

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR ET DU MASTER EN
SCIENCES DE LA MER**

OPTION : INGÉNIERIE DE LA GESTION ET DE LA PROTECTION DU LITTORAL

Étude De Protection Et d'Aménagement De La Plage Ouest De Sidi Fredj

Présenté par : **Guendez Ahmed Zoheir**

Soutenu publiquement, le 29 /06 /2025 devant le jury composé de :

H. OTMANI	Maitre de conférences à l'École Nationale Supérieure Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.	Président
S. MAHDID	Maitre-assistant classe "A" à l'École Nationale Supérieure Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.	Examinatrice
N. MERABET	Maitre-assistant classe "A" à l'École Nationale Supérieure Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.	Encadreur
Z. AGABI	Ingénieur du Laboratoire d'Etudes Maritimes.	Encadreur

Année universitaire : 2024/2025.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrateurs, M. Z. Agabi et Mme N. Merabet, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils avisés et leur bienveillance tout au long de ce projet. Leur expertise et leur soutien ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également M. Zerrouk, chef de département, pour son écoute et son soutien, ainsi que l'ensemble des enseignants de l'ENSSMAL qui ont contribué à ma formation et à mon développement académique.

Un grand merci à l'équipe du LEM pour leur accueil, leur assistance et les échanges enrichissants qui ont marqué cette expérience.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à M. H. Otmani, président du jury, et à Mme S. Mahdid, examinatrice, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, mes frères, mes tantes et mes oncles, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel.

Sans eux, ce parcours n'aurait pas été possible.

Que ce travail soit le reflet de leur confiance et de leur encouragement constant.

Dédicaces

À la douce mémoire de ma mère bien-aimée et de ma tante ربي یرحمهم Parties trop tôt, laissant un vide immense sur mon chemin, mais dont l'amour inconditionnel, les valeurs nobles et les sages enseignements restent à jamais gravés dans mon cœur, me guidant et me fortifiant à chaque pas.

À ma sœur et son mari Omar, ainsi qu'à leurs enfants Mohamed et Areslane, pour leur soutien inconditionnel.

À mes frères Kacem, Redouane, Liya, Malik, Ibrahim, Meriem, Ilyas, Asma, à mes tantes, à Medjdoub (mon deuxième PaPa) le mari de ma tante, à mes oncles, et à Sara avec son mari Slimane et leurs enfants Ritadj et Hadjer.

À mon meilleur ami Mokadem Miloud, un frère de cœur.

À Soufi Ismaïl, ami de la cité universitaire, et à tous mes camarades de la promotion GPL, qui ont partagé avec moi cette belle aventure académique.

Merci à vous tous pour votre présence, votre soutien et vos encouragements tout au long de ce parcours.

Sommaire :

Introduction générale

1.	CONTEXTE GENERAL :	1
2.	PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS DE L'ETUDE :	4

Chapitre I

1.	INTRODUCTION :	7
2.	PRESENTATION GEOGRAPHIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE LA ZONE DE SIDI FREDJ :	7
3.	LA PLAGE OUEST DE SIDI FREDJ (NOTRE ZONE D'ETUDE) :	8
3.1.	Caractéristiques de l'état des lieux :	8
4.	ÉVOLUTION HISTORIQUE DU RIVAGE :	10
5.	CADRE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE :	11
6.	BATHYMETRIE GLOBALE (LA BAIE DE BOU-ISMAIL) :	13
7.	FACIES SEDIMENTAIRE :	14
7.1	Sédimentologie générale (la baie de Bou-Ismaïl) :	14
8.	CADRE METEOROLOGIQUE :	17
8.1	Température et précipitations :	17
8.2	Les Vents :	17
9.	RESEAU HYDROGRAPHIQUE :	19
9.1	Oued Mazafran :	19
10.	PARAMETRES OCEANOGRAPHIQUES :	20
10.1	Les Houles :	20
11.	Les Courants :	20
12.	La marée et les variations du niveau marin :	21
13.	Changement climatique :	22
14.	Conclusion :	25

Chapitre II

I. Morphologie de la Zone d'étude : ...

1.	INTRODUCTION :	29
2.	ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU LITTORAL (2002-2018) :	29
3.	ANALYSE DES DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES :	32
3.1	Données utilisées :	32
4.	BATHYMETRIE LOCALE (PLAGE OUEST DE SIDI FREDJ) :	32
II.	SEDIMENTOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE :	36
1.	INTRODUCTION :	36
2.	CARACTERISATION SEDIMENTAIRE ET SONDAGES DES FONDS MARINS :	36
2.1	Prélèvements d'échantillon sédimentaire :	36
2.2	Sondage à la lance :	36
3.	ÉTUDE SEDIMENTOLOGIQUE :	36
4.	POSITIONNEMENT DES POINTS DE PRELEVEMENTS :	37
5.	METHODE D'ANALYSES :	38

6.	RESULTATS DE L'ANALYSE SEDIMENTOLOGIQUE :	39
6.1	Analyse des courbes cumulatives :	39
6.2	Teneur et répartition de la fraction fine (Pélites) :	40
6.3	Caractères granulométriques de la fraction grossière (>50) :	41
6.4	Analyse modale :	43
6.5	Indice de classement de Trask (So) :	45
6.6	Indice d'asymétrie (Sk) :	46
7.	CONCLUSION :	48
7.1	Morphologie sous-marine (bathymétrie, isobathes, pente) :	48
7.2	Sédimentologie de la zone (D50 et type de sable) :	48

Chapitre III

1.	INTRODUCTION :	53
2.	OBJECTIF ET PRINCIPE DE LA MODELISATION :	53
3.	DESCRIPTION DES MODULES DU LOGICIEL MIKE 21 :	53
4.	CONSTRUCTION DU MODELE :	55
4.1	Domaine du Calcul :	55
4.2	Données sédimentologiques :	55
4.3	Données de houles :	56
4.4	Périodes de simulation :	57
4.5	Paramétrage du modèle hydro-sédimentaire :	58
5.	RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA SIMULATION NUMERIQUE :	58
5.1	Étude de l'état du site :	58
6.	CONCLUSION :	67

Chapitre IV

1.	INTRODUCTION :	69
2.	ÉPIS (OUVRAGES TRANSVERSAUX) :	69
2.1	Principe de fonctionnement :	69
2.2	Pour qu'ils soient efficaces :	69
2.3	Est-ce une bonne solution pour notre cas ?	70
3.	BRISE-LAMES IMMERGÉS (OUVRAGES LONGITUDINAUX) :	71
3.1	Principe de fonctionnement :	71
3.2	Est-ce une bonne solution pour notre cas ?	71
4.	L'ENROCHEMENT :	72
4.1	Principe de fonctionnement :	72
4.2	L'enrochement est-il la meilleure solution pour notre cas ?	72
5.	RECHARGEMENT ARTIFICIEL :	73
5.1	Principe de fonctionnement :	73
5.2	Est-ce une bonne solution pour notre cas ?	74
6.	GEOTUBE (GEOTEXTILE IMMERGÉ) :	74
6.1	Principe de fonctionnement :	74

6.2	Est-ce une bonne solution pour notre cas ?	75
7.	CONCLUSION :	75
	<i>Conclusion</i>	79
	<i>Conclusion générale</i>	
	<i>Références bibliographiques</i> :	80
	Références Web :	82
	Annexe 1 : (Fiche technique du matériel et des moyens utilisés) :	84
	A. Moyens humains :	84
	B. Moyens matériels :	84
	C. Détail du système GPS Leica GS25 :	84
	Annexe 2 : (Méthodologie) :	85
	Levé topographique :	85
	Levé bathymétrique :	86
	Annexe 3 : (Photographies de terrain) :	92
	Annexe 4 : (Courbes cumulatives) :	93
	Annexe 5 : (Tableau de résultats granulométriques des échantillons prélevés) :	97

Liste des figures :

Figure 1 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude (LEM-2024). Erreur ! Signet non défini.	
Figure 2 : Photos de la zone d'étude (LEM-2024).....	9
Figure 3 : L'état du talus qui surplombe la zone d'étude (LEM-2024).....	10
Figure 4 : Superposition de la ligne de rivage 2024 sur une image satellitaire de 2002.....	11
Figure 5 : La carte géologique de la baie Bou-Ismaïl.	12
Figure 6 : Bathymétrie globale de la zone d'étude (LEM-2024).	14
Figure 7 : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM-1998).....	15
Figure 8 : Variation des moyennes mensuelles des températures et des précipitations entre 2015-2025.....	17
Figure 9 : Rose annuelle des vents et positionnement du point du réseau SIMAR (1958-2021)....	18
Figure 10 : Projections de l'élévation du niveau de la mer et planification des mesures d'adaptation.....	23
Figure 11 : Carte de la bathymétrie de la plage ouest de Sidi Fredj.....	33
Figure 12 : les deux profils transversaux dans la zone d'étude.....	34
Figure 13 : Carte de positionnement des points de prélèvements.	37
Figure 14 : Schéma du protocole d'analyse granulométrique des sédiments marins.....	38
Figure 15 : Courbes cumulatives des échantillons de sédiments prélevés.	39
Figure 16 : Carte de la répartition spatiale de la fraction fine sur la plage ouest de Sidi Fredj.	40
Figure 17 : Carte de la répartition de la médiane granulométrique (D50).	42
Figure 18 : Carte de la répartition du décile supérieur granulométrique (D90).	43
Figure 19 : Courbe uni-modale un seul stock sédimentaire.	44
Figure 20 : Courbe bimodale mélange de deux stocks sédimentaires.....	44
Figure 21 : Courbe plurimodale mélange de plusieurs stocks sédimentaires.....	45
Figure 22 : Indice de classement de Trask (So).....	46
Figure 23 : Indice d'asymétrie (Sk).	47
Figure 24 : histogramme de D50 de la zone d'étude.....	48
Figure 25 : Bathymétrie et maillage du domaine de la zone d'étude (la bathymétrie est relative à NGA).....	55
Figure 26 : Position du point SIMAR 2120084.	56
Figure 27 : Histogramme des hauteurs significatives des vagues (Hs) et des Périodes pics (Tp). .	56
Figure 28 : Roses des houles à la frontière offshore des modèles à l'échelle locale.....	57
Figure 29 : Evolution de la hauteur significative et la direction de la houle.....	62
Figure 30 : Champs des courants de la houle.....	64
Figure 31 : Capacité de transport des sédiments induite par la houle.....	66
Figure 32 : les épis des plages générés par intelligence artificielle.....	70
Figure 33 : les épis dans une plage de Manche en France.....	70
Figure 34 : L'enrochement du port de Carras a été réalisé en 2023. (Photo Jean-François Ottonello).....	73
Figure 35 : Schéma présentant les différents types d'ouvrages de protection littorale.....	76
Figure 36 : Matériel du levé topographique.....	86
Figure 37 : Le système d'acquisition et de traitement.....	87
Figure 38 : Transducteur Bi-fréquences embarqué sur un Zodiac.	88
Figure 39 : Principe du levé bathymétrique avec mono faisceau bi-fréquence.....	88
Figure 40 : Configuration du système de sondeur mono faisceau.	89
Figure 41 : Traitement des données de sondeur mono faisceau bi-fréquence.....	90

Figure 42 : Traitement des données avec le Logiciel Hypack. 91

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Coordonnées géographiques de la zone de Sidi Fredj (Abid et Sahel 2017).	7
Tableau 2 : la Répartition des différents types de sédiment (Leclaire, 1972).	16
Tableau 3 : Niveaux de référence	21
Tableau 4 : Interprétation du classement granulométrique selon le coefficient de classement (So).	46
Tableau 5 : Interprétation des valeurs du coefficient d'asymétrie (Sk)	47

Liste des abréviations :

Abréviation	Signification
AFNOR	Association Française de Normalisation
ANP	Armée Nationale Populaire
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CSV	Comma-Separated Values
DAT	Data File
FM	Flexible Mesh
GES	Gaz à effet de serre
GPS	Global Positioning System
Ha	Hectares
HD	Hydrodynamic
Hs	Hauteur significative de la houle
Km	Kilomètre
LEM	Laboratoire Études Maritimes
Md	Médiane granulométrique
M	Mètre
m/an	Mètre par an
m/s	Mètre par seconde
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NGA	Nivellement Général d'Algérie
RPA	Règlement Parasismique Algérien
RTK	Real-Time Kinematic
SIMAR	Sistema de Información Marina
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
ST	Sand Transport
SW	Spectral Wave
TXT	Text File
Tp	Période de pic
UHF	Ultra High Frequency
µm	Micromètre

Introduction Générale

Introduction générale

1. Contexte général :

Le littoral constitue un espace stratégique d'une grande importance. Véritable interface entre la terre et la mer, il abrite des écosystèmes riches et diversifiés, joue un rôle fondamental dans la régulation climatique et offre des services essentiels tels que la protection contre l'érosion et les tempêtes. Par ailleurs, les plages et les zones côtières sont des lieux privilégiés pour le tourisme, la pêche et le commerce maritime, contribuant ainsi au développement économique des régions littorales.

La dégradation du littoral menace non seulement l'équilibre des écosystèmes marins et côtiers, mais également les infrastructures et les populations vivant à proximité. De nos jours, l'érosion côtière représente un phénomène mondial majeur, affectant environ un quart des plages sableuses avec des taux d'érosion supérieurs à 0.5 mètre par an (*Luijendijk et al., 2018*). Plus de 600 millions de personnes vivent à moins de 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer (*McGranahan et al., 2007*), rendant la bande littorale soumise à des pressions environnementales et économiques croissantes (*Nicholls et Cazenave, 2010*).

Cette situation souligne l'urgence et la nécessité de mieux comprendre la dynamique littorale pour élaborer des solutions adaptées qui soutiennent un développement durable et une gestion plus maîtrisée de ces espaces fragiles.

L'Algérie, en tant que pays méditerranéen, est particulièrement concernée par ces enjeux de gestion côtière. Située au cœur de la Méditerranée occidentale, avec une façade maritime d'environ 2 148 km (selon une étude publiée le 26 juin 2023 par le ministère de l'Environnement et l'Institut national de cartographie et de télédétection), elle occupe une position stratégique face à l'Europe, son principal partenaire économique. Ce lien est d'autant plus essentiel que l'Algérie exporte une grande partie de son pétrole et de son gaz vers l'Europe, tout en important l'essentiel de ses biens d'équipement et de consommation (*M. Ahmed Mahjou*).

Les plages algériennes revêtent une importance capitale tant sur le plan écologique, économique que social. Elles abritent des écosystèmes variés et jouent un rôle majeur dans le développement touristique et économique, tout en étant essentielles à l'aménagement du territoire (*Paskoff, 2006*). Cependant, ces espaces naturels sont soumis à de nombreuses pressions qui compromettent leur équilibre et leur pérennité. Parmi ces menaces, l'érosion côtière figure en première ligne, accentuée par l'élévation du niveau de la mer et les

Introduction générale

aménagements anthropiques (*Bird, 2008*). Ce phénomène naturel, est cependant accélérée par l'activité humaine, représentant un défi majeur dans la gestion des plages. Elle désigne la destruction progressive des plages et des dunes, causée par l'action des vagues, des courants et des tempêtes. Plusieurs facteurs, notamment le changement climatique, l'urbanisation excessive, la suppression de la végétation et l'extraction de sable réduisent la résilience de ces espaces face à l'érosion.

Les infrastructures littorales sont également touchées, notamment par les attaques marines qui peuvent endommager les habitations, les voies de communication et les équipements touristiques. D'autres menaces incluent l'intrusion saline dans les nappes phréatiques et l'affaissement des ouvrages côtiers. Cette réalité entraîne un recul progressif du trait de côte, modifiant les paysages littoraux et affectant les écosystèmes

Environ 70 % des plages à l'échelle mondiale sont concernées par ce phénomène, tandis que seulement 10 % d'entre elles enregistrent une avancée naturelle du trait de côte (*Paskoff, 2006*). Une étude de *Chaibai et Hanani (2022)* montre que l'érosion en Algérie touche environ 75 % des plages sableuses, en particulier celles de l'est et du centre, comme la baie d'Alger et la région de Tipaza, avec un taux de recul variant de 1 à 2 mètres par an. (*Chaibai et Hanani, "Gestion des risques côtiers en Algérie", 2022*).

Face à cette problématique croissante, il devient impératif de mettre en place des stratégies de protection et l'adoption de solutions durables. L'étude de la protection et de l'aménagement des plages repose sur une compréhension approfondie des processus dynamiques et des contraintes régissant la côte et l'avant-côte. Ces processus incluent l'interaction des vagues, de la houle, des marées, des courants et des surcotes, ainsi que les mouvements sédimentaires. Ces éléments jouent un rôle fondamental dans l'évolution et la stabilité des plages, influençant directement les stratégies de gestion et de protection à adopter.

En particulier, les zones d'avant-côte, extrêmement sensibles, sont soumises à des facteurs physiques comme les vents, la marée, la densité de stratification et la force de Coriolis (*Hemdane, 2006 ; Swift et al., 1986*). Ces éléments modifient la dynamique sédimentaire et exacerbent l'érosion littorale.

Pour répondre à cette problématique, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre. Les structures de protection telles que les digues, épis et murs sont couramment utilisées pour limiter l'impact des vagues et des courants. De même, des approches plus naturelles, comme la restauration des dunes et la replantation de végétation adaptée, peuvent aider à stabiliser les sols et ralentir l'érosion. Le réensablement des plages, pour compenser les pertes de sable, constitue également une méthode courante pour restaurer la forme et la résilience des plages.

Introduction générale

Toutefois, ces interventions doivent être soigneusement intégrées dans la dynamique naturelle du littoral et anticiper leurs effets à long terme.

Devant les enjeux croissants liés à l'érosion côtière en Algérie, il devient essentiel d'adopter une approche scientifique rigoureuse afin d'évaluer les dynamiques littorales et de proposer des solutions durables. L'étude des processus hydrodynamiques et sédimentaires permet non seulement de mieux comprendre l'évolution des plages, mais aussi d'orienter les stratégies d'aménagement et de protection adaptées à chaque site spécifique.

Plusieurs recherches ont déjà été menées sur l'aménagement et la protection du littoral, mettant en évidence l'impact des dynamiques côtières sur l'évolution des plages et l'efficacité des différentes stratégies de gestion. Parmi ces travaux, on peut citer la thèse de Hemdane (2006), qui analyse les dynamiques hydro-sédimentaires des côtes algériennes et leurs implications pour la gestion du littoral. De même, Chaibai et Hanani (2022) ont étudié l'érosion côtière en Algérie et proposé des solutions d'adaptation basées sur des approches de gestion intégrée. Paskoff (2006) a également exploré les mécanismes de recul du trait de côte et l'influence des facteurs naturels et anthropiques.

D'autres recherches, telles que celles de Tarik et Bouziane (2010), se sont focalisées sur les effets des infrastructures portuaires sur la dynamique sédimentaire des plages, mettant en évidence l'impact des aménagements humains sur l'équilibre des écosystèmes côtiers. Ces travaux fournissent un cadre de référence essentiel pour approfondir l'analyse des problématiques spécifiques aux plages algériennes.

Des études antérieures ont notamment analysé les effets de l'érosion, de l'élévation du niveau de la mer et des interventions humaines sur le littoral algérien, proposant diverses approches d'adaptation et de préservation. Ces travaux constituent une base essentielle pour approfondir l'analyse et adapter les solutions aux spécificités locales. C'est dans cette perspective que s'inscrit mon travail de mémoire, qui vise à analyser les mécanismes d'érosion affectant la plage de Sidi Fredj en étudiant les facteurs hydrodynamiques, les transports sédimentaires et l'impact des infrastructures humaines sur la dynamique côtière.

Dans ce cadre, la plage ouest de Sidi Fredj est envisagée comme un terrain d'expérimentation scientifique, permettant d'évaluer l'efficacité des stratégies de lutte contre l'érosion et d'orienter les futures politiques de gestion côtière en Algérie. Située à proximité d'Alger, cette plage est soumise à une forte pression anthropique due à l'urbanisation croissante, au développement touristique et aux aménagements portuaires. Ces facteurs,

Introduction générale

combinés aux effets naturels de l'érosion et aux changements climatiques, entraînent une réduction progressive de sa superficie et une altération de son équilibre écologique.

L'étude de cette plage, dans le cadre de ce travail, vise à mieux comprendre les impacts de l'érosion sur l'écosystème local et à proposer des solutions pratiques pour sa préservation. L'objectif est de proposer des stratégies de protection et d'aménagement adaptées à cette zone en tenant compte des contraintes environnementales et économiques. À travers une méthodologie basée sur des observations de terrain, des modélisations numériques et une analyse des données historiques, cette étude ambitionne d'apporter une contribution significative à la gestion durable du littoral algérien

2. Problématiques et objectifs de l'étude :

Face à l'érosion progressive de la plage ouest de Sidi Fredj, une érosion exacerbée par des facteurs multiples tels que l'urbanisation croissante, les infrastructures portuaires ainsi que les changements hydrodynamiques, il devient alors primordial d'identifier puis de mettre en place des stratégies de protection de même que d'aménagement adaptées. L'objectif principal est toujours de garantir la durabilité de cet espace littoral. Il faut aussi minimiser absolument tous les impacts négatifs de toutes ces interventions humaines sur tout l'environnement côtier.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'état actuel de la plage ouest de Sidi Fredj, d'en comprendre les dynamiques et d'élaborer des solutions optimales pour sa protection et son aménagement durable. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs étapes méthodologiques seront suivies et articulées autour des axes suivants :

- **Analyse des conditions morphologiques et sédimentologiques :** La première étape consiste en la réalisation de levés topographiques, bathymétriques et d'études sédimentologiques pour caractériser précisément l'évolution du site. Ces travaux permettront de dresser un état des lieux détaillé des caractéristiques physiques de la plage, de sa topographie, ainsi que des dynamiques qui influencent son évolution au fil du temps.
- **Étude Hydro-sédimentaire en modèle numérique :** Une analyse approfondie des conditions marines, telles que les houles et leur interaction avec la côte, sera effectuée. Ces données sont essentielles pour mieux comprendre les facteurs qui contribuent à l'érosion et aux changements dans la dynamique côtière. Elles permettront

Introduction générale

également d'évaluer l'impact des événements climatiques extrêmes et des variations saisonnières.

- **Proposition de solutions d'aménagement :** En tenant compte des contraintes environnementales et socio-économiques, différentes stratégies d'aménagement et de protection seront explorées. Parmi celles-ci, on étudiera des techniques de protection douce, telles que le rechargement de plage, ainsi que des ouvrages de stabilisation plus durables comme les épis et les brise-lames, en suivant les recommandations de Dean & Dalrymple (2002). Ces solutions visent à préserver la plage tout en respectant son équilibre écologique et en assurant sa résilience face aux risques d'érosion.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre I : Généralité sur la zone d'étude

Chapitre II : Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

Chapitre III : Étude Hydro-sédimentaire en modèle numérique

Chapitre IV : Propositions de la protection et d'aménagement du site

Et Conclusion.

Chapitre I

Généralité sur la zone d'étude

1. Introduction :

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel de bien cerner le contexte géographique, environnemental et océanographique de la zone concernée afin de poser les bases d'une analyse rigoureuse et pertinente.

Une attention particulière est ensuite accordée à la région côtière de Sidi Fredj, dont la situation géographique et les spécificités environnementales jouent un rôle déterminant dans la dynamique littorale locale. Pour compléter cette contextualisation, une analyse des caractéristiques physiques et naturelles de la zone est menée. Elle comprend une rétrospective de l'évolution du rivage, l'examen de la bathymétrie de la baie de Bou-Ismaïl, ainsi qu'une description des faciès sédimentaires observés.

Enfin, le chapitre intègre les principaux éléments du cadre météorologique ainsi que les paramètres océanographiques, indispensables pour comprendre les processus qui influencent l'équilibre et la transformation du milieu marin et côtier. Cette synthèse multidisciplinaire constitue une base solide pour les développements ultérieurs de ce travail.

2. Présentation géographique et environnementale de la zone de Sidi Fredj :

La zone de Sidi Fredj est une presqu'île située à environ 20 kilomètres à l'Ouest d'Alger, sur le littoral méditerranéen. Elle forme le cap Est de la baie de Bou Ismail et délimite le côté Ouest de la baie d'El Djamila.

Le tableau ci-dessous présente les coordonnées géographiques caractéristiques de la zone de Sidi Fredj.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques de la zone de Sidi Fredj (Abid et Sahel 2017).

Coordonnées	Latitude	Longitude
Point Nord-Est	36°45'17" Nord	2°50'48" Est
Point Sud-Ouest	36°45'06" Nord	2°50'41" Est

La zone côtière étudiée fait face à un problème persistant d'érosion, dont l'ampleur risque de s'accroître à l'avenir.

Cette situation compromet la stabilité des installations et des infrastructures côtières telles que les habitations présentes sur la façade et en contact direct avec la mer.

Ainsi que la préservation des écosystèmes côtiers, comme la plage adjacente. Elle est caractérisée par la présence d'ouvrages en enrochements.

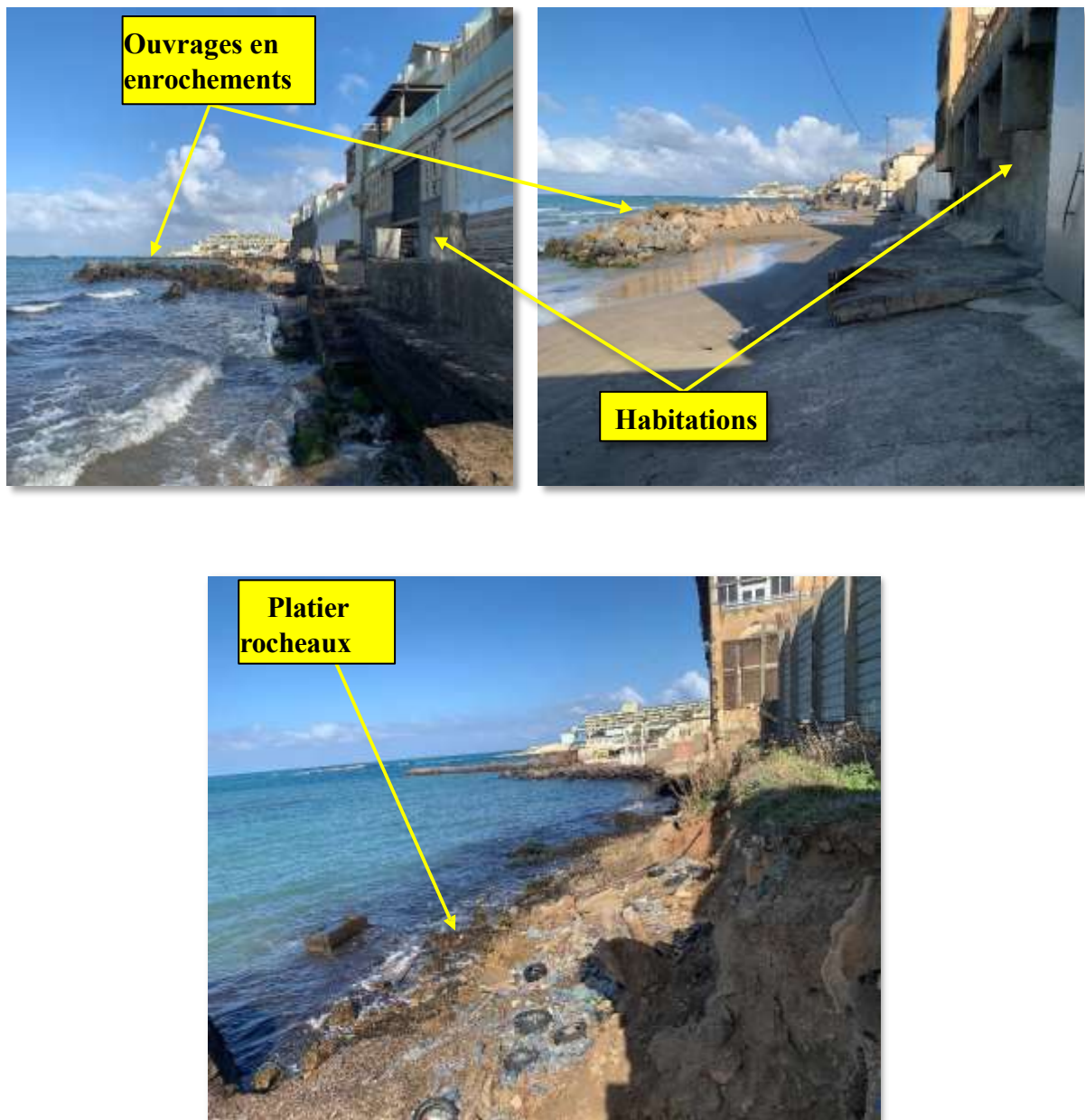


Figure 2 : Photos de la zone d'étude (LEM-2024).

Dans la partie Nord de la zone, l'état du talus de la plateforme est préoccupant, car il est dépourvu de protection et exposé directement aux vagues. Ajouté à cela la présence de débris et de déchets de constructions.



Figure 3 : L'état du talus qui surplombe la zone d'étude (LEM-2024).

4. Évolution historique du rivage :

L'étude de l'évolution côtière vise à comprendre les mécanismes qui expliquent les changements de position et de nature du trait de côte au fil du temps. À l'échelle mondiale, il a été constaté que de nombreux littoraux sont confrontés à des phénomènes d'érosion, souvent liés aux pressions exercées par l'occupation humaine des zones côtières. Ces transformations s'inscrivent dans un contexte dynamique, où de multiples facteurs naturels et anthropiques interagissent.

La surface des mers et des océans se modifie toujours en raison des mouvements des marées, des vagues, des courants, des variations de la température et de pression et de la salinité des eaux superficielles (CHAABAN, 2011).

Donc l'évolution du trait de côte de la région de Sidi Fredj est analysée à différentes périodes, en tenant compte de l'impact des interventions humaines sur cette portion du littoral.



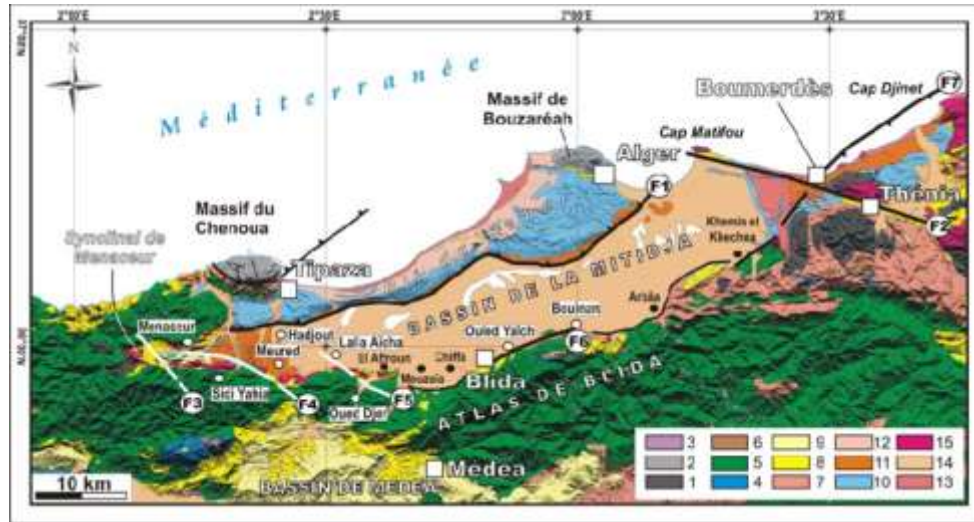
Figure 4 : Superposition de la ligne de rivage 2024 sur une image satellitaire de 2002.

5. Cadre géologique et géomorphologique :

La baie de Bou Ismaïl, également appelée le Golfe de Castiglione, s'étend entre deux points marquants : le Mont Chenoua à l'ouest et la pointe de Sidi-Fredj à l'est. Ce secteur se distingue par une géologie riche et variée. Le massif du Chenoua est constitué de formations métamorphiques et calcaires, issues d'un décrochement dextre datant de l'Éocène. Des micas et calcaires, comparables à ceux de Bouzaréah, apparaissent sporadiquement le long du littoral. Sur son versant oriental, une lumachelle d'un mètre d'épaisseur, attribuée au Sicilien, illustre l'élévation continue du massif.

Le Sahel, d'âge pliocène, est formé de marnes bleues ou grises recouvertes de grès et de sables, organisés en un anticlinal est-ouest. Le flanc nord a été érodé par les fluctuations marines du Pléistocène, tandis que le flanc sud, dominant la plaine de la Mitidja, reste mieux conservé. La bordure littorale, entre Bérard et Ain Benian, est composée de dunes récentes, d'alluvions sableux et graveleux, et de terrains quaternaires. Les dépôts marins quaternaires, débutant par un calcaire coquillé, atteignent jusqu'à 10 mètres, tandis que les dépôts éoliens peuvent dépasser 30 mètres. Cette diversité traduit les variations du niveau marin au Paléocène, avec la présence de terrasses post-calabriennes reposant sur les marnes plaisanciennes.

La plage ouest de Sidi-Fredj, quant à elle, repose sur deux ensembles géologiques principaux. Le premier est un socle rocheux métamorphique composé de gneiss, micaschistes et calcaires métamorphiques, appartenant au massif d'Alger (*Degiovanni, 1973*). Ce socle est le prolongement du massif cristallin de la Grande Kabylie, dont le massif granitique de Thénia constitue une composante majeure (*Leclaire, 1972*).



- 1 : Terrains métamorphiques ; 2 : Socle primaire ; 3 : Trias ; 4 : Jurassique ; 5 : Crétacé ;
 6 : Éocène ; 7 : Oligocène ; 8 : Miocène anté-nappes ; 9 : Miocène post-nappes ; 10 : Pliocène ;
 11 : Villafranchien ; 12 : Calabrien ; 13 : Quaternaire marin ; 14 : Quaternaire continental ;
 15 : Magmatisme indifférencié.

Figure 5 : La carte géologique de la baie Bou-Ismaïl.

Sur le plan géomorphologique, le littoral algérois, de Cap Djinet à Douaouda Marine, révèle une grande variété de formes, résultat d'une géologie complexe combinée à l'action continue des dynamiques côtières (Thèse de Changement climatique et risques côtiers dans la métropole algéroise). On y trouve un enchaînement de falaises, plages sableuses et systèmes dunaires.

La zone d'étude, qui appartient au littoral du Sahel occidental d'Alger, correspond à une plaine côtière étroite (500 m à 1 km de large) et peu élevée (entre 0 et 25 m d'altitude). La plateforme côtière, notamment à Bou-Ismaïl (secteur Bérard–Rocher plat), ne dépasse pas 200 mètres de largeur. À l'est de l'oued Mazafran, les côtes sont généralement basses et sableuses.

6. Bathymétrie globale (la baie de Bou-Ismaïl) :

La configuration des fonds marins joue un rôle crucial dans la propagation des houles, influençant ainsi les caractéristiques de celles-ci lorsqu'elles approchent le littoral, ainsi que les mouvements sédimentaires qu'elles induisent.

La courbe bathymétrique des 200 mètres est généralement considérée comme la limite entre la marge continentale algérienne et les plaines abyssales. En moyenne, cette zone présente une largeur de 24 km, atteignant jusqu'à 55 km dans la baie de Bou-Ismaïl (*Bachari, 2009*).

Le plateau continental est particulièrement étroit, il s'élargissant au maximum à 13 km au niveau du mont Chenoua, contre un minimum de seulement 3 km entre Sidi Fredj et Alger. Ce plateau est caractérisé par une pente douce, de l'ordre de 2 à 3 %, avec un changement de pente marqué autour de l'isobathe des 100 mètres. Toutefois, cette pente peut être localement perturbée par la présence de pointements rocheux, notamment au large de Mazafran et de Bou-Ismaïl (*Bachari, 2009*).

Quant aux plages de la région, elles se distinguent en trois types :

- Plages basses et sableuses. Telles que Zeralda.
- Côtes basses et rocheuses aux bords non abrupts. Caractérisées par des entablements sous-marins envahis par des herbiers de zoostères et de posidonies. Notamment dans les régions de Bou-Ismaïl.
- Plages présentant des côtes rocheuses déchiquetées et des pentes abruptes. Comme dans la baie de Chenoua.

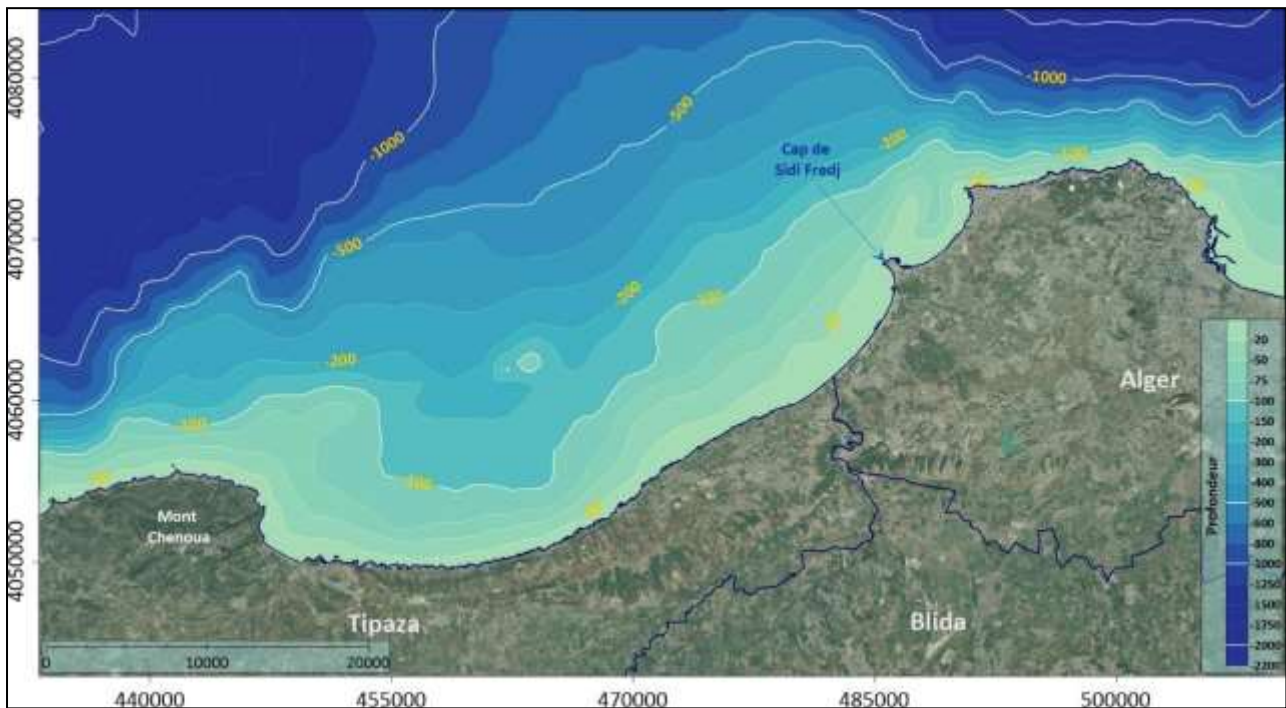


Figure 6 : Bathymétrie globale de la zone d'étude (LEM-2024).

7. Facies sédimentaire :

7.1 Sédimentologie générale (la baie de Bou-Ismaïl) :

La baie de Bou-Ismaïl présente une grande diversité de faciès sédimentaires, avec au moins neuf types identifiés, allant des sables fins aux vases pures, en passant par des sédiments de transition et des graviers envasés (*Al Sid Chikh et al., 2009 ; Belkessa, 1999*). Cette répartition est hétérogène entre l'Est et l'Ouest de la baie. Près de l'embouchure de l'oued Mazafran, les sables grossiers dominent jusqu'à environ 2,5 mètres de profondeur. Plus loin, entre 2,5 et 15 mètres, les sables moyens prennent le relais, notamment vers Khemisti jusqu'à Tipaza. Au-delà, entre 15 et 25 mètres, les fonds sont recouverts de sables fins, notamment au large de Sidi Fredj et Palm Beach. Enfin, de 25 à 40 mètres de profondeur, les sables fins vaseux prédominent.

Cette répartition résulte de l'influence conjointe des dynamiques du plateau continental de Bou-Ismaïl et des apports fluviaux des oueds Mazafran, Nador et El Hachem (*LEM, 1998*). Certains secteurs abritent des zones écologiquement sensibles, comme les graviers de Castiglione ou les herbiers à phanérogames marines, essentiels à l'écosystème côtier (*Grimes, 2004*). On observe une organisation progressive des sédiments depuis la côte jusqu'au large, incluant des zones de transition riches en biodiversité.

Deux grands ensembles sédimentaires dominent : d'une part, les faciès coquilliers (coquilles actuelles sur le plateau interne et reliques sur les plateaux externe et médian) ; d'autre part, les sédiments terrigènes issus des apports fluviaux, allant des dépôts grossiers aux pélites dans les vasières et sur les pentes continentales (Moulfi, 2012).

Trois grandes étapes de mise en place sédimentaire sont identifiées : les sédiments reliques du plateau externe déposés lors d'une stabilité relative du niveau marin ; ceux du plateau médian, formés durant un ralentissement de la transgression holocène ; et enfin les sédiments récents, incluant coquilles, pélites et sables, produits par des conditions dynamiques actuelles (Bachari, 2009). Cette stratification reflète l'interaction entre les processus géomorphologiques et hydrodynamiques qui façonnent les fonds marins de la baie de Bou-Ismaïl.

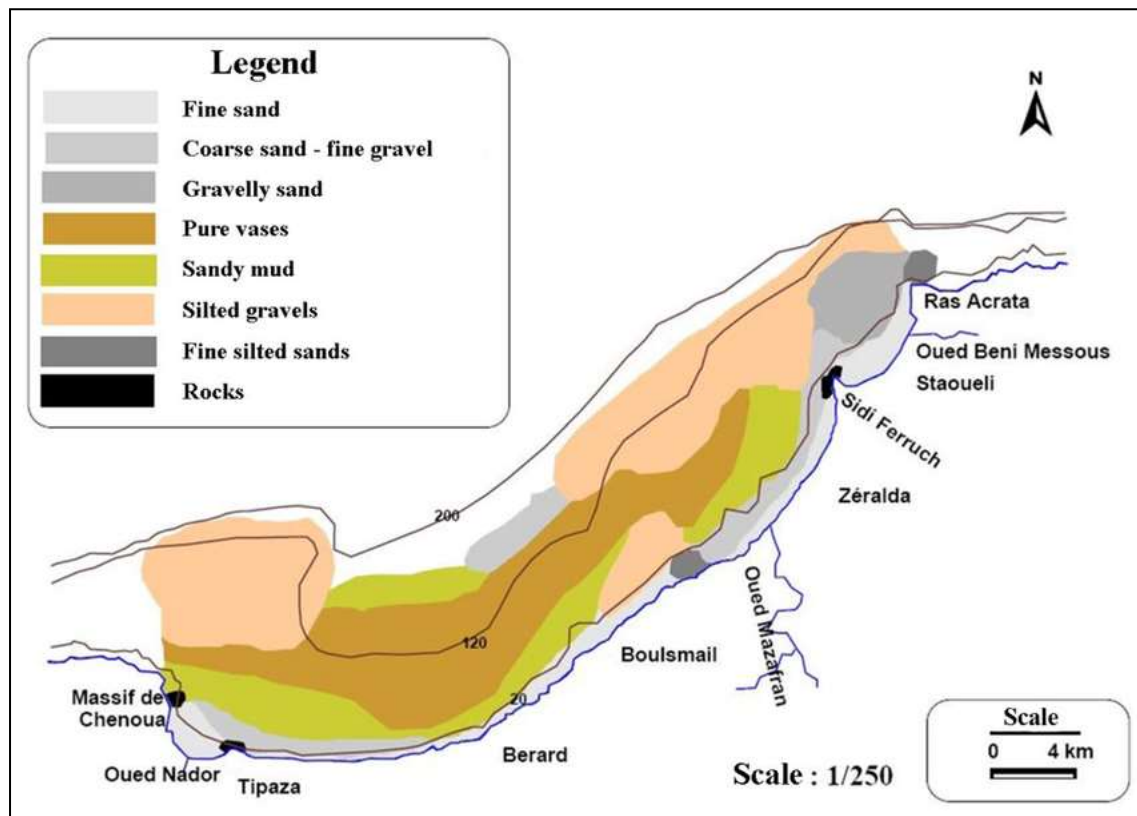


Figure 7 : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM-1998).

La répartition et la nature des sédiments du plateau continental dépendent de son relief, dès les apports terrigènes, des courants et des houles (Leclaire, 1972).

Tableau 2 : la Répartition des différents types de sédiment (Leclaire, 1972).

Types de Sédiments	Localisation
Sable fin	Recouvrant les zones peu profondes au niveau du Cap de Sidi Fredj.
Sable grossiers	Occupe une large bande qui s'étale de la partie Ouest du Cap de Sidi Fredj jusqu'à l'embouchure de l'Oued Mazafran.
Sable graveleux	Se trouve principalement dans la partie Est de la baie d'El Djamila.
Sable envasé	
Vases-sableux	Présent dans la baie de Bou Ismail au-delà de l'isobathe (-20 m).
Graviers envasés	Localisés : 1) Au large de Ras Acrata ; 2) Au niveau de l'embouchure de l'Oued Bénis Messous et s'étendent vers l'Ouest de Bou Ismail.
Vases pures	Quasiment absentes de la baie d'El Djamila, elles apparaissent au large de la presqu'île de Sidi Fredj et forment une bande entre Zéralda et Bou Ismail.

8. Cadre météorologique :

8.1 Température et précipitations :

La région d'étude bénéficie d'un climat de type méditerranéen se caractérisant par des étés secs et chauds, ainsi que des hivers humides et froids.

La distribution spatiale des précipitations sur le littoral de la région est étroitement liée à l'orographie. En effet, les quantités de pluie varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagnes et de leur exposition aux vents. Ainsi la direction des axes montagneux par rapport à la mer et aux vents détermine les variations de précipitations dans la région.

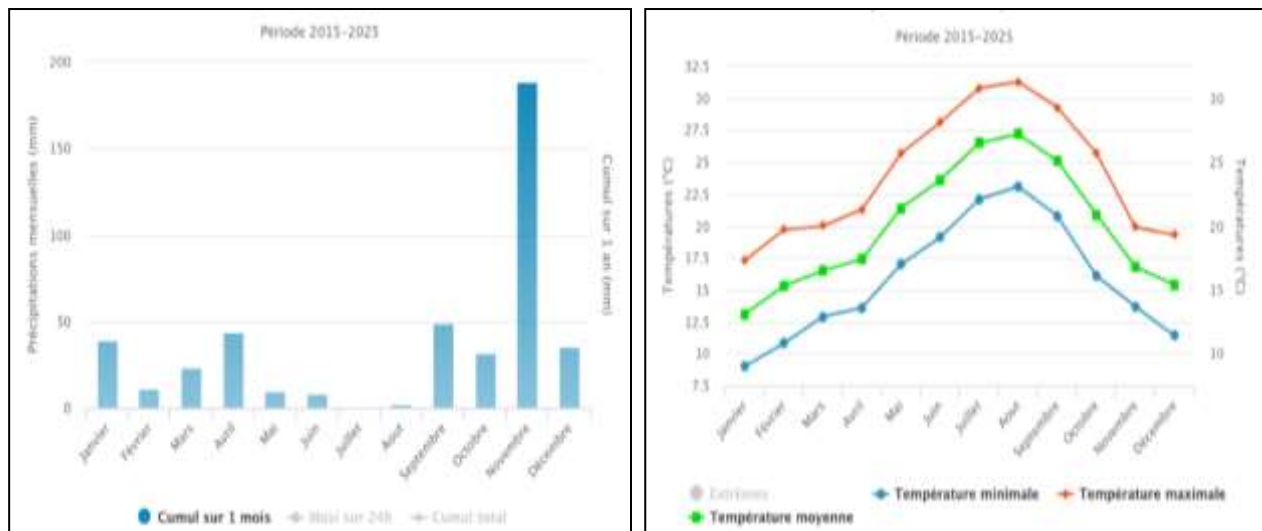


Figure 8 : Variation des moyennes mensuelles des températures et des précipitations entre 2015-2025

L'analyse de ces paramètres climatiques températures, précipitations, vents est donc indispensable pour appréhender les processus physiques intervenant dans l'évolution de la plage ouest de Sidi-Fredj.

8.2 Les Vents :

À Sidi-Fredj, les vents jouent un rôle central dans le climat local, la navigation et les dynamiques marines. Leur direction et intensité varient selon les saisons. En hiver (octobre à mars), les vents dominants viennent de l'Ouest avec une fréquence de 60 % à 80 %, tandis que ceux du Nord-Ouest peuvent atteindre 90 % à 99 %. Ces vents sont frais, humides, souvent accompagnés d'un ciel couvert et de pluies régulières. En été (avril à septembre), les vents du

Nord-Est et de l'Est prennent le relais avec une fréquence de 45 % à 75 %. Moins violents, ils apportent une fraîcheur bienvenue durant les fortes chaleurs. Ces variations saisonnières influencent la température ressentie, la dispersion des polluants, ainsi que les activités côtières et maritimes.

8.2.1 Les données du point du réseau du modèle numérique SIMAR 44 de 1958 à 2021 :

Les données de vents d'un point du réseau du modèle numérique SIMAR 44 de l'organe public des ports - Espagne située à proximité de notre site plus exactement à l'Est de la zone pour une période d'enregistrement de 1958 à 2021 sont représentées par la rose annuelle des vents.

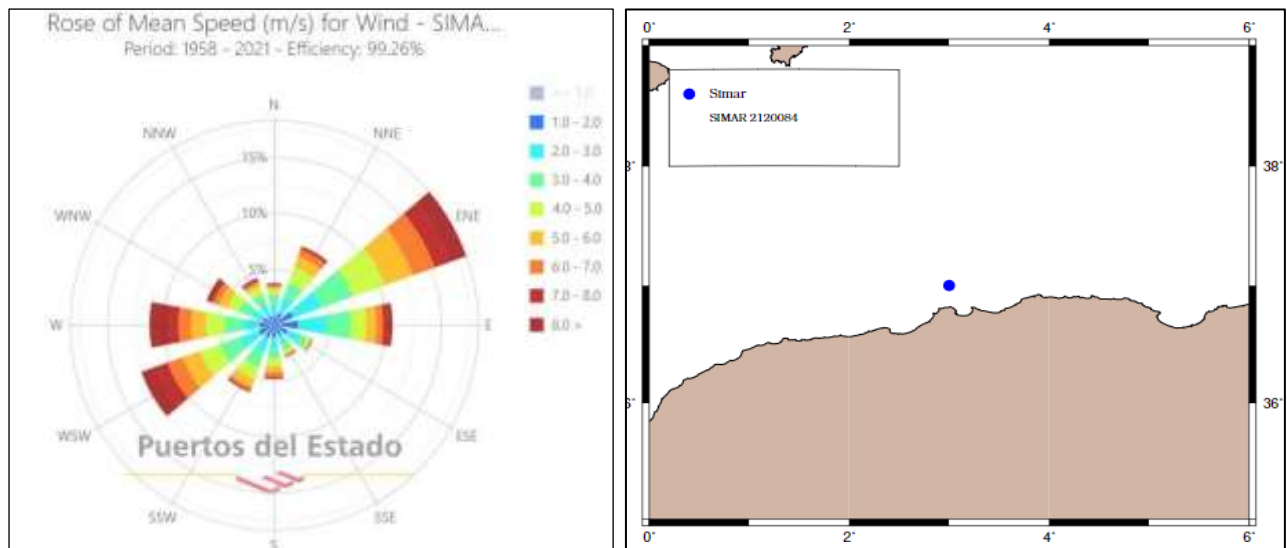


Figure 9 : Rose annuelle des vents et positionnement du point du réseau SIMAR (1958-2021).

En effet, la rose montre la prédominance des secteurs ENE à E et WSW à W. Le secteur ENE est largement dominant avec une fréquence de 20 %, suivi de la direction WSW et W avec une fréquence comprise entre 10 et 15 %. La direction Nord présente une fréquence inférieure à 5 %.

9. Réseau Hydrographique :

La zone de Sidi-Fredj est principalement influencée par l'oued Mazafran. Il y a aussi l'oued de Béni Messous, qui traverse le centre de la baie d'El Djamila, juste à côté. Même s'il n'a pas un impact direct important sur notre zone d'étude, il contribue quand même au transport de matériaux et de nutriments.

9.1 Oued Mazafran :

Le bassin versant d'oued Mazafran est l'un des plus importants bassins du côtier Algérois. 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.

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 3 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 (LEM-2024).

10. Paramètres océanographiques :

10.1 Les Houles :

Les houles, ces grandes vagues générées par les vents, jouent un rôle crucial dans la dynamique côtière de Sidi-Fredj, influençant l'érosion du littoral, la navigation et les écosystèmes marins.

10.1.1 Période hivernale : En hiver, les houles proviennent principalement de l'Ouest et présentent des amplitudes variant de 1 à 3 mètres, atteignant parfois 5 mètres. Ces houles puissantes génèrent des courants marins qui transportent les sédiments vers le large, contribuant ainsi à l'érosion des côtes. Ces phénomènes peuvent affecter les infrastructures littorales, telles que les digues et les plages (*Nadir, 2016*).

10.1.2 Période estivale : En été, les houles proviennent principalement du secteur Nord-Est, mais elles sont généralement moins intenses qu'en hiver. Leur faible amplitude génère des courants plus modérés, avec un impact moindre sur l'érosion côtière.

Les houles jouent un rôle essentiel dans la dynamique littorale, en particulier en ce qui concerne l'érosion et les changements dans la configuration des plages.

Les paramètres océanographiques locaux, comme la température de l'eau, la salinité et la hauteur des vagues, sont des éléments clés pour comprendre les forces qui influencent la dynamique des plages. Ces paramètres permettent de modéliser les conditions marines et d'anticiper les impacts sur l'érosion et la stabilité du littoral.

11. Les Courants :

Les courants océaniques se caractérisent par des mouvements d'eau à la fois horizontaux et verticaux, mais à une vitesse beaucoup plus lente et régulière que les courants atmosphériques. Leur comportement est néanmoins régi par des phénomènes similaires notamment :

- La disparité dans la distribution de l'énergie solaire entre l'équateur et les pôles.
- L'effet de la rotation de la Terre. Où la force de Coriolis entraîne une déviation des courants marins vers la droite dans l'hémisphère Nord, notamment le courant algérien d'origine atlantique, exercent une influence déterminante sur le littoral algérien, y compris à Sidi-Fredj.

Ce courant se déplace d'Ouest en Est le long des côtes sous l'effet de la force de Coriolis. Il forme des tourbillons anticycloniques accompagnés de phénomènes d'upwelling (Millot, Taupier-Letage, & Benzohra, 1990).

12. La marée et les variations du niveau marin :

En Algérie, deux différents niveaux de référence sont utilisés comme montré au tableau ci-après :

Tableau 3 : Niveaux de référence

Niveau	Rapport à zéro hydrographique (Z.H.)
Zéro hydrographique	0.00 m
Nivellement Général Algérien	+ 0.34 m

La marée sur la côte algérienne est très faible, elle est de type semi-diurne. Son amplitude est de l'ordre de quelques décimètres (20 à 30 cm) (LEM – 2024).

Elle est le plus souvent masquée par la surélévation ou l'abaissement du niveau de l'eau engendré par des variations de conditions climatologiques.

D'autres phénomènes peuvent donc se superposer à cette marée astronomique telle que la pression barométrique, les seiches. ...etc.

La surcote exceptionnelle en Algérie intégrant les effets de marée, de dépression et de tempête est habituellement égal à +1m NGA. Cette valeur compatible avec les surcotes généralement rencontrée en Méditerranée.

En conclusion, comme niveau d'eau du projet il est recommandé d'utiliser le niveau 0.00 et le niveau +1.0 m (Z.H) qui correspondent au niveau - 0.34 m NGA et + 0.7 m NGA (LEM-2024).

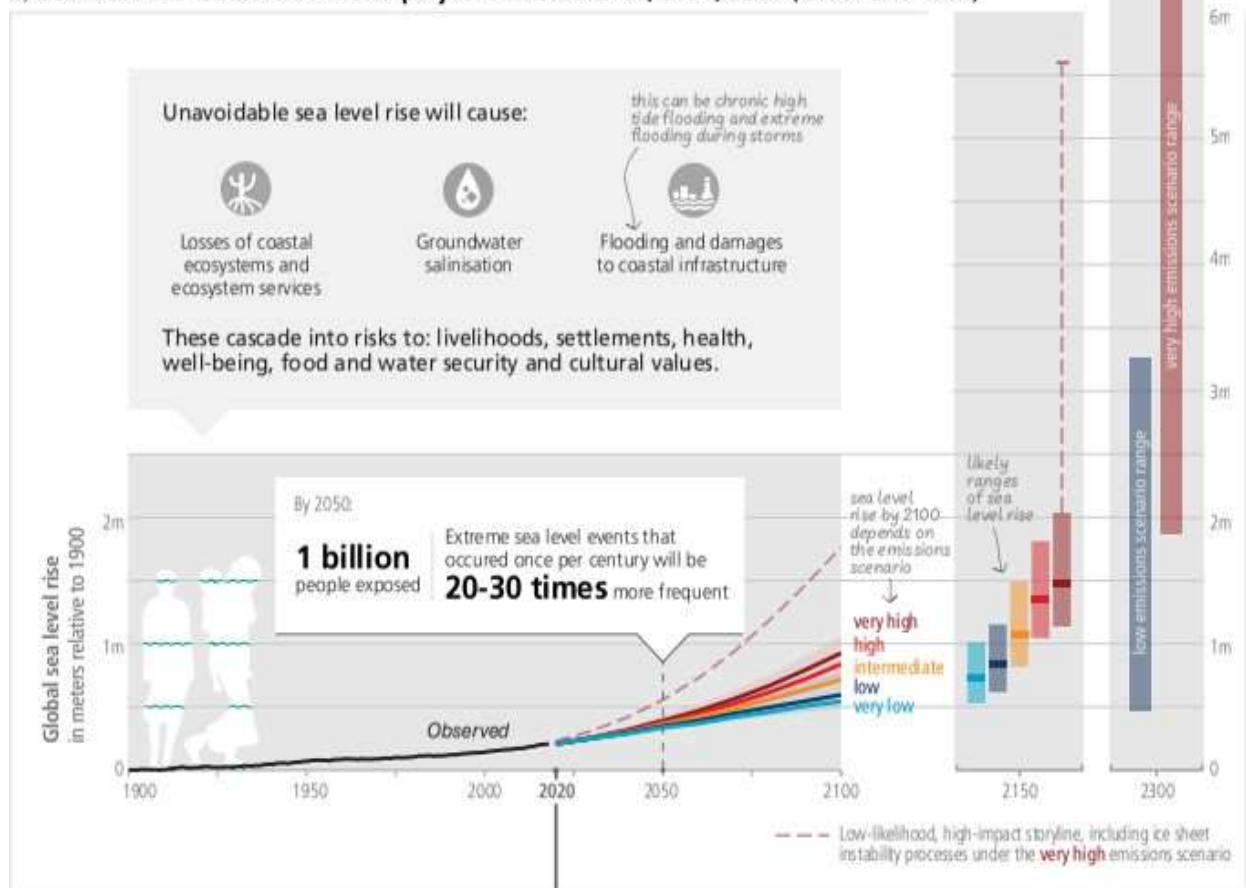
13. Changement climatique :

L'Algérie se trouve dans une région très vulnérable aux effets des changements climatiques. Ces risques émergents sont devenus aujourd'hui une réalité vécue ». Plus de 13 millions d'hectares (ha) sont touchés par l'érosion, l'Algérie perd annuellement près de 400.000 ha à cause de ce phénomène. En outre, l'Algérie subit depuis les années 70 une sécheresse récurrente avec une baisse de précipitations d'environ 10% durant les 20 dernières années, entraînant ainsi un dérèglement du calendrier agricole et une baisse des rendements des céréales allant jusqu'à 50%. Les experts prévoient l'accentuation de cette baisse à l'horizon 2040 avec une diminution attendue de 10 à 20% par rapport au niveau enregistré en 2011 (*MEER 2022*).

D'autres aspects des conséquences du réchauffement mondial sur les régions côtières de l'Algérie comprennent le haut niveau de la mer et les vagues dangereuses (des tempêtes plus fortes et plus fréquentes en 1980, 1989, 1995 et 2001), provoquant l'érosion et même la disparition des plages : par ex. les plages à l'ouest d'Alger, la plage de Bejaia, de Boumerdes et d'Oran. De tels phénomènes provoquent la perte de plages (par ex. West Beach à Sidi Fredj, à l'ouest d'Alger), et par conséquence une perte de l'écotourisme et de l'intérêt économique, de l'intrusion saline (salinisation des sols et de la nappe phréatique) et de l'inondation des régions côtières à basse altitude. ([*Algérie, Alimentation, Changement climatique, Moyen-Orient et en Afrique du Nord, Plaidoyer 20/07/2011*](#)).

Sea level rise will continue for millennia, but how fast and how much depends on future emissions

a) Sea level rise: observations and projections 2020-2100, 2150, 2300 (relative to 1900)



Responding to sea level rise requires long-term planning

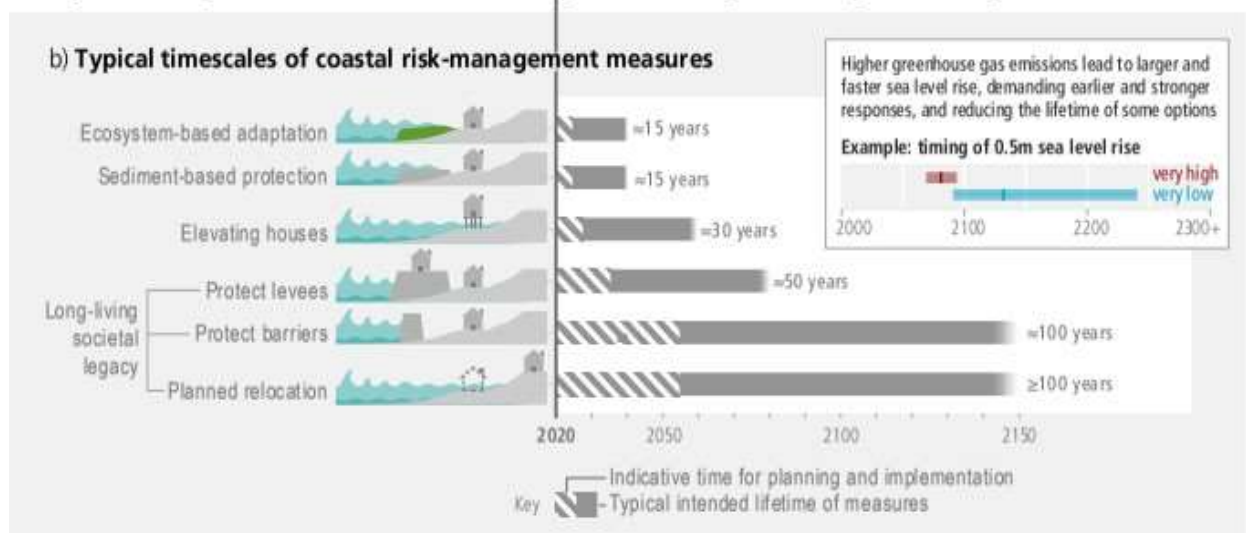


Figure 10 : Projections de l'élévation du niveau de la mer et planification des mesures d'adaptation.

Évolution du niveau moyen global de la mer et enjeux pour la gestion côtière :

La figure présentée illustre les tendances passées et les projections futures de l'élévation du niveau moyen global de la mer, ainsi que leurs implications en matière de gestion des risques côtiers.

Changements observés et projetés du niveau de la mer :

Le **panneau (a)** retrace l'évolution du niveau de la mer depuis 1900. Les données historiques ont été obtenues à partir des marégraphes jusqu'en 1992, puis des altimètres satellitaires à partir de cette date. Les projections futures reposent sur des modèles climatiques et glaciaires, en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

Par rapport à la période de référence 1995-2014, le niveau moyen global pourrait augmenter :

- D'ici 2050 :
 - +0,15 à +0,23 m selon le scénario SSP1-1.9 (faibles émissions),
 - +0,20 à +0,29 m selon le scénario SSP5-8.5 (fortes émissions).
- D'ici 2100 :
 - +0,28 à +0,55 m (SSP1-1.9),
 - +0,63 à +1,01 m (SSP5-8.5).
- D'ici 2150 :
 - +0,37 à +0,86 m (SSP1-1.9),
 - +0,98 à +1,88 m (SSP5-8.5).

Il est important de noter l'existence de scénarios à faible probabilité mais à fort impact, qui prévoient des hausses encore plus importantes du niveau marin, en raison de processus incertains comme l'instabilité des calottes glaciaires.

Échelles de temps pour la gestion des risques côtiers :

Le **panneau (b)** met en évidence les échelles de temps généralement associées à la planification, à la mise en œuvre et à la durée de vie des mesures de gestion côtière. Avec l'accélération prévue de la montée du niveau de la mer après 2050, les infrastructures de

protection devront être plus robustes et mises en place plus tôt, ce qui pourrait réduire leur durée d'efficacité.

À long terme, certaines régions, notamment les petites îles et les zones côtières basses, pourraient faire face à des risques existentiels si les niveaux marins dépassent les capacités d'adaptation actuelles.

Enjeux humains :

Enfin, les zones côtières basses abritent aujourd'hui environ 896 millions de personnes, un chiffre susceptible de dépasser un milliard d'ici 2050, quel que soit le scénario SSP considéré. Cela souligne l'importance critique d'anticiper les impacts du changement climatique sur ces zones densément peuplées et vulnérables.

14. Conclusion :

L'analyse approfondie du cadre géographique, géologique, hydrologique, climatique et océanographique de la zone d'étude constitue un préalable indispensable à la compréhension des mécanismes qui gouvernent la dynamique littorale de la plage Ouest de Sidi Fredj. La diversité des facteurs naturels (géomorphologie complexe, sédimentologie variée, régime hydrodynamique spécifique) conjuguée aux pressions anthropiques croissantes (urbanisation, aménagements côtiers, fréquentation touristique) rend cette zone particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion côtière.

L'évolution historique du rivage, la configuration bathymétrique du plateau continental, la répartition des faciès sédimentaires et l'action combinée des houles dominantes, des courants marins et des apports fluviaux façonnent continuellement le trait de côte et modulent les équilibres sédimentaires locaux. De plus, les impacts du changement climatique, par la montée du niveau marin et l'intensification des événements extrêmes, accentuent les risques de dégradation du littoral à moyen et long terme.

L'ensemble de ces éléments met en évidence la nécessité d'une approche intégrée et pluridisciplinaire dans toute démarche de protection et d'aménagement durable de cette portion littorale stratégique. Les données recueillies et synthétisées dans ce premier chapitre serviront de fondement aux analyses morpho-dynamiques et aux propositions d'interventions présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

I. Morphologie de la Zone d'étude :

1. Introduction :

Dans le cadre de l'étude de protection et d'aménagement de la plage ouest de Sidi Fredj, l'analyse morphologique de la zone constitue une étape clé. Elle permet de comprendre la configuration du site, tant sur le plan terrestre que sous-marin, et d'en déduire les dynamiques côtières à l'origine des phénomènes d'érosion, d'accrétion ou de transport sédimentaire.

La morphologie terrestre et sous-marine (morpho-bathymétrie) est donc étudiée à partir de données précises issues des levés topographiques et bathymétriques effectués sur site, dans le but d'identifier les caractéristiques géométriques de la plage et du fond marin, ainsi que leur rôle dans la dynamique littorale locale.

2. Évolution morphologique du littoral (2002-2018) :

À l'aide d'une série de photographies satellitaires récupérées de Google Earth couvrant la période de 2002 à 2018, une analyse diachronique du littoral à une échelle locale a été entreprise.

L'objectif de cette analyse est de déceler les évolutions majeures, en particulier celles d'origine anthropique, survenues le long du rivage au fil du temps.



1. Présence d'épis et d'une jetée caractérisant le port de Palm Beach

On observe la structure du port de Palm Beach avec une jetée principale orientée vers le nord. Cette configuration influence la dynamique sédimentaire locale en générant une accrétion au sud-ouest (côté plage) et une érosion potentielle au nord-est par déficit sédimentaire dû à l'interception du transit littoral.



2. Réalisation d'une batterie d'épis en T pour la protection du rivage au niveau de Mazafran

Entre la première image et cette image, on note la mise en place progressive d'une série d'épis en T au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran. Ces ouvrages visent à stabiliser le rivage, réduire l'érosion et favoriser l'accrétion entre les structures.



3. Extension du jeté nord du port de Palm Beach

L'image la plus récente montre un allongement visible de la jetée nord du port de Palm Beach. Cette extension est probablement destinée à améliorer la protection portuaire contre les houles dominantes, mais elle modifie aussi les courants littoraux,



Chapitre II Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

4. Réalisation d'une batterie d'épis en T à Azur Plage

Une autre batterie d'épis en T a été construite plus à l'ouest, au niveau d'Azur Plage. Cette zone semble avoir été particulièrement sujette à l'érosion, justifiant une intervention lourde par ouvrages rigides. On note un effet visible de piégeage des sédiments entre les épis.



5. Multiplication des épis à Azur Plage (renforcement de la protection)

Au fil des deux années, le nombre d'épis à Azur Plage a été augmenté, traduisant soit une aggravation du phénomène d'érosion, soit une volonté d'étendre les zones protégées. Cela montre une stratégie de gestion du trait de côte de plus en plus interventionniste.



6. Mise en place d'un brise-lames à Palm Beach

La dernière intervention majeure visible est la construction d'un brise-lames parallèle à la côte à Palm Beach. Il joue un rôle de dissipation de l'énergie des vagues, favorisant le dépôt sédimentaire derrière l'ouvrage. Cela pourrait permettre une régénération naturelle ou artificielle de la plage, mais avec le risque de perturbation hydrodynamique au large.

Et de 2018 jusqu'à 2025, il n'y avait pas de nouveau changement majeur visible sur les images satellites, suggérant une relative stabilisation du linéaire côtier suite aux aménagements réalisés, ou une pause dans les interventions anthropiques.

3. Analyse des données topo-bathymétriques :

3.1 Données utilisées :

Les données exploitées dans le cadre de cette étude proviennent d'une campagne de reconnaissance menée en mars 2024 par le Laboratoire d'Études Maritimes (LEM). Cette campagne s'est articulée autour de deux volets principaux :

- **Levé topographique :**

Le levé a couvert une surface terrestre d'environ 16 hectares, correspondant à la zone d'étude située en arrière-plage et en plage émergée.

- **Levé bathymétrique :**

Un levé bathymétrique a été réalisé sur une superficie de 24 hectares, englobant la zone marine attenante à la plage.

Pour une description détaillée de la méthodologie employée lors des levés topographique et bathymétrique, le lecteur est invité à consulter l'Annexe 2.

4. Bathymétrie locale (plage ouest de Sidi Fredj) :

Dans le logiciel **MIKE Zero**, la bathymétrie a été réalisée à partir de données de points mesurant la profondeur à différents emplacements géographiques. On a créé un fichier Excel (ou dans d'autres formats compatibles tels que **.XYZ**, **.DFS0**, **.TXT**, ou **.CSV**) contenant trois colonnes :

X : Coordonnée Est/Ouest (longitude).

Y : Coordonnée Nord/Sud (latitude).

Z : Profondeur (valeurs négatives vers le bas).

Ces données ont été utilisées pour générer un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** dans **MIKE Zero**, à travers le module **MIKE Zero Mesh Generator** ou **MIKE Bathymetry**. Une interpolation a été réalisée à partir des points de mesure afin de créer une grille régulière ou un maillage non-structuré (maillage flexible **.mesh**) servant de base au modèle hydrodynamique.

À la fin du processus, une **carte bathymétrique** a été obtenue, représentant les variations de profondeur dans la zone d'étude.

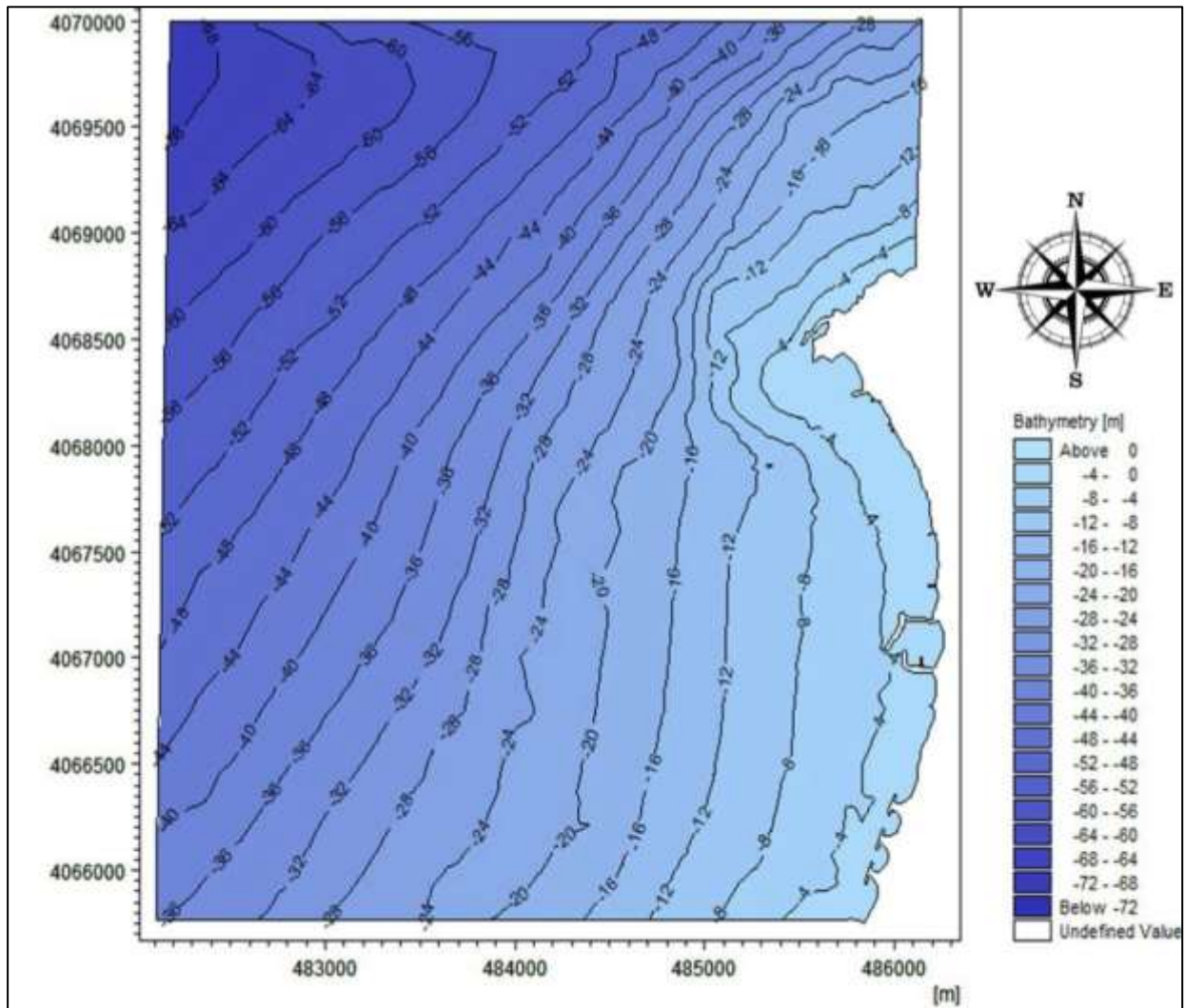


Figure 11 : Carte de la bathymétrie de la plage ouest de Sidi Fredj.

Cette carte bathymétrique de la plage Ouest de Sidi Fredj montre une pente bathymétrique progressive allant de la côte vers le large. Les isobathes (lignes de profondeur) sont relativement espacées près du rivage, indiquant une pente douce, puis se resserrent progressivement vers l'ouest, signalant une pente plus abrupte. Les profondeurs varient d'environ 0 m (zone blanche près de la côte) jusqu'à -11 m (zones bleu foncé à l'ouest). Cette configuration suggère une plage à faible énergie avec un dépôt sédimentaire stable, mais qui s'incline plus rapidement au-delà d'une certaine distance du rivage.

Chapitre II Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

4.1 Les deux profils dans la bathymétrie de la plage ouest de Sidi Fredj :

Les résultats du traitement des données bathymétriques permettent de distinguer deux zones principales dans cette plage.

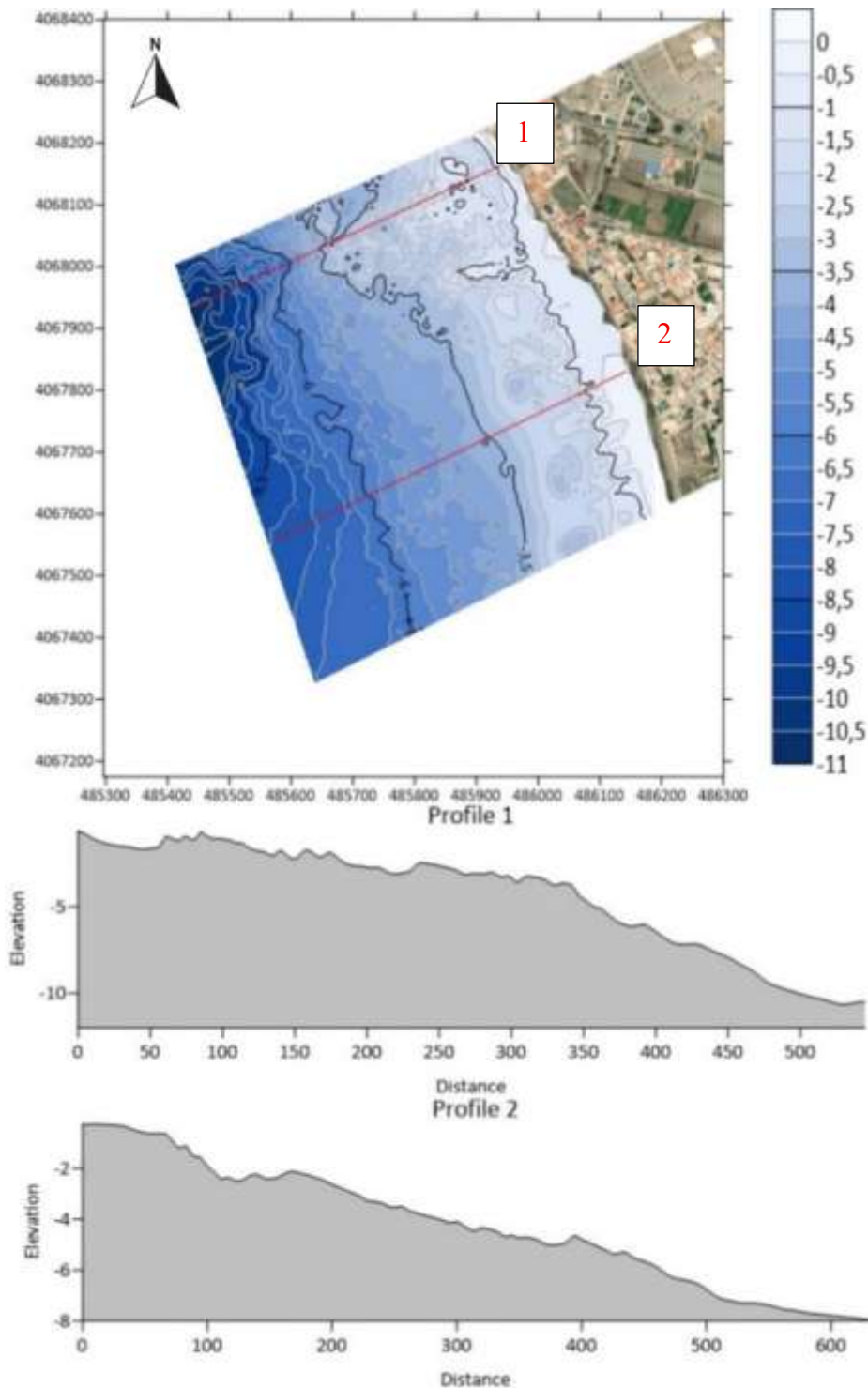


Figure 12 : les deux profils transversaux dans la zone d'étude.

Chapitre II Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

Chacun des profils présentés ci-dessus offre une représentation détaillée de la topographie du fond marin, permettant d'évaluer la pente en fonction des variations des fonds, influencées par leur nature. L'analyse de ces profils a conduit aux interprétations suivantes :

L'analyse les deux profils transversaux, permet de distinguer deux zones morphologiquement distinctes :

4.1.1 Profil 1 : correspondant la zone nord présent un fond marin globalement régulier avec une pente moyenne estimée à environ 2 %. Le profil montre une pente continue vers le large, atteignant des profondeurs proches de -11 m. Cette configuration suggère une stabilité morphologique de cette partie du littoral, probablement peu affectée par des processus dynamiques intenses tels que l'érosion ou les courants de fond.

4.1.2 Profil 2 : correspondant la zone sud se distingue par un fond également régulier, mais avec une pente légèrement plus faible d'environ 1 %. Le profil montre une descente progressive jusqu'à environ -8 m, avec une forme plus linéaire et stable que dans la zone nord. Cette pente encore plus douce indique une zone d'accumulation sédimentaire plus importante, souvent typique des plages abritées ou moins exposées à l'action directe des vagues.

Ces différences peuvent influencer la distribution des sédiments, la vulnérabilité à l'érosion, et les usages côtiers (navigation, aménagement, baignade, etc.).

II. Sédimentologie de la zone d'étude :

1. Introduction :

L'analyse sédimentologique constitue une étape essentielle pour la compréhension du fonctionnement morpho-dynamique d'un littoral. Elle permet d'identifier la nature, la granulométrie, ainsi que l'origine des sédiments qui composent la plage, fournissant ainsi des indications précieuses sur les processus d'érosion, de transport et de dépôt. Dans le cadre de cette étude, une campagne de prélèvements sédimentaires a été réalisée sur la plage ouest de Sidi Fredj afin de caractériser les matériaux présents, d'évaluer leur variabilité spatiale et d'orienter les choix techniques pour les aménagements de protection et de valorisation du site.

2. Caractérisation sédimentaire et sondages des fonds marins :

2.1 Prélèvements d'échantillon sédimentaire : Vingt-cinq (25) échantillons de sédiments ont été prélevés à différentes distances du rivage à l'aide d'une drague.

2.2 Sondage à la lance : Vingt-quatre (24) sondages à la lance ont été réalisés sur site afin d'estimer l'épaisseur de la couche meuble superficielle du fond marin. Ces mesures ont permis de mieux comprendre la structure des fonds et d'orienter les hypothèses de conception d'aménagement.

3. Étude sédimentologique :

L'objectif de cette étude est d'analyser la répartition des sédiments en milieu marin ainsi que les mécanismes régissant leur mise en place. La méthodologie sédimentologique a impliqué le prélèvement d'échantillons superficiels en mer, lesquels ont été ensuite analysés en laboratoire.

Les résultats issus de ces analyses ont été interprétés et intégrés comme données d'entrée dans un modèle numérique. Cette approche permettra une compréhension plus approfondie des caractéristiques des sédiments marins et contribuera à éclairer les processus de leur distribution et de leur dépôt dans la zone d'étude.

4. Positionnement des points de prélèvements :

Vingt-cinq (25) stations d'échantillonnage pour les sédiments superficiels ont été positionnées avec précision à diverses profondeurs le long de la côte, atteignant jusqu'à -15 mètres de profondeur (voir la méthodologie d'échantillonnage et le protocole détaillé en annexe).

Ces stations ont été implantées de manière stratégique afin de capter l'ensemble de la variabilité sédimentologique au sein de la zone d'étude, facilitant ainsi une analyse granulométrique et texturale exhaustive des sédiments. Les cartes ci-après présentent la localisation exacte de chaque station d'échantillonnage pour les deux secteurs étudiés.

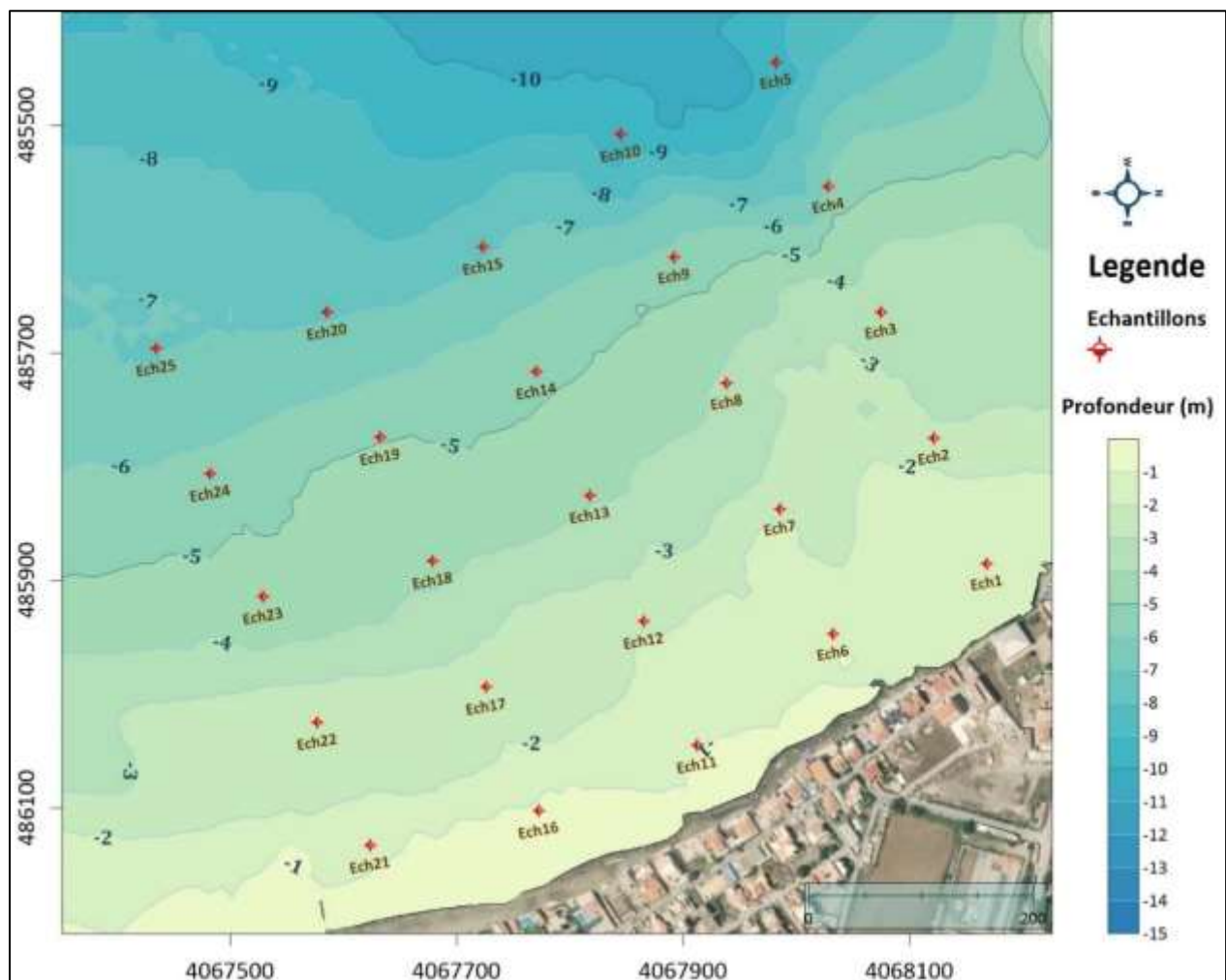


Figure 13 : Carte de positionnement des points de prélèvements.

5. Méthode d'analyses :

Dans le cadre de l'analyse granulométrique des sédiments, une fraction de chaque échantillon brut est extraite pour calculer le pourcentage de la fraction fine. Cette fraction fine est séchée et pesée pour obtenir le poids initial P1. Ensuite, elle est lavée pour éliminer la fraction fine, séchée à nouveau, et pesée pour obtenir le poids final P2. Le pourcentage de la fraction fine est calculé à l'aide de la formule :

$$\%Frac. fine = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

L'autre partie du sédiment est préalablement soumise à une séparation sur un tamis de maille équivalente à 50 µm sous un courant d'eau, puis elle est séchée. Les sédiments secs sont ensuite tamisés sur une série de tamis conformes à la norme AFNOR. Les poids recueillis sur chaque tamis, convertis en pourcentages pondéraux des sédiments, permettent d'établir des courbes granulométriques cumulatives pour chaque échantillon.

Ces courbes sont tracées sur un graphe semi-logarithmique, avec le pourcentage cumulé des refus en ordonnées et le diamètre des grains en abscisses. L'examen de ces courbes permet de distinguer la présence des différents stocks de sédiment.

L'analyse granulométrique, résumée graphiquement, est présentée dans la figure ci-après.

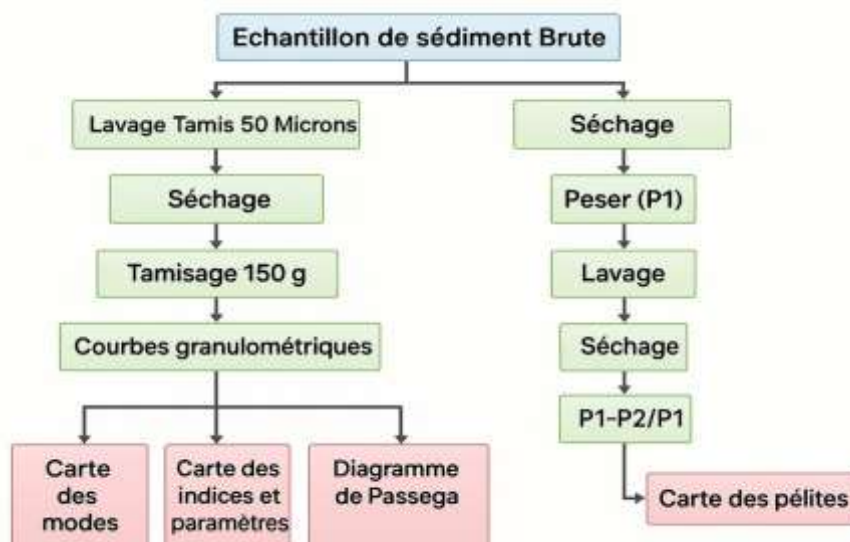


Figure 14 : Schéma du protocole d'analyse granulométrique des sédiments marins.

6. Résultats de l'analyse sédimentologique :

Les résultats de l'analyse granulométrique sont communiqués à travers des tableaux, des graphiques, ou des cartes de répartition qui détaillent la nature des sédiments ainsi que leurs caractéristiques granulométriques :

- Carte des teneurs en fraction fine.
- Carte des médianes granulométrique Md ou D50.
- Carte du décile supérieur D90.
- Distribution de l'indice de classement So.
- Distribution de l'indice d'asymétrie Sk.

6.1 Analyse des courbes cumulatives :

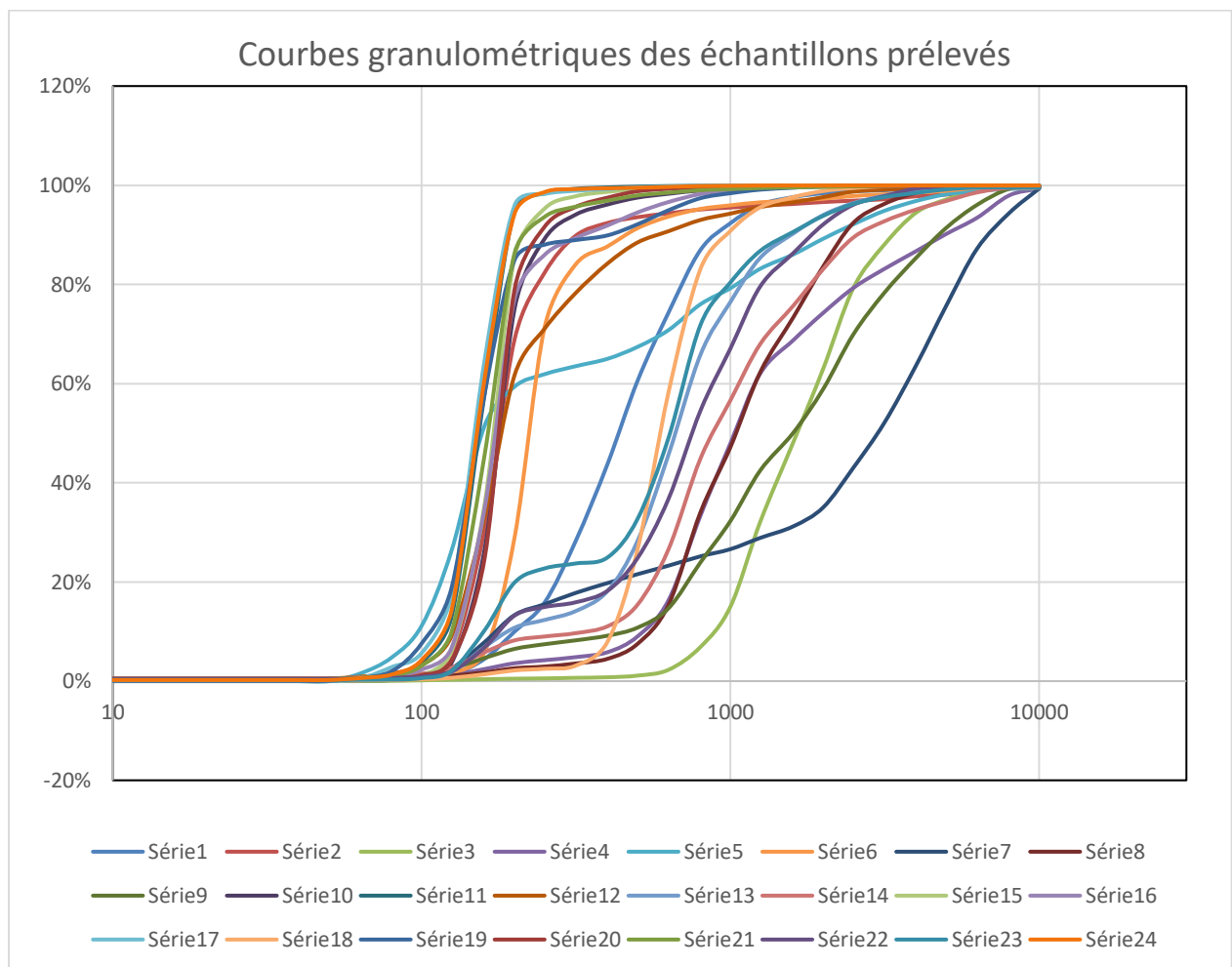


Figure 15 : Courbes cumulatives des échantillons de sédiments prélevés.

L'analyse des courbes granulométriques cumulatives issues des 24 échantillons prélevés sur la plage ouest de Sidi Fredj met en évidence une répartition sédimentaire différente. On a des courbes présente une forme en S caractéristique des distributions gaussiennes, typiques d'un bon tri granulométrique.

6.2 Teneur et répartition de la fraction fine (Pélites) :

La considération de la teneur en fraction fine ou pélites (<50 µm) est importante car elle peut mettre en évidence des sources potentielles d'apport et des aires préférentielles de dépôt.

Une carte est établie à partir des pourcentages des pélites des 25 échantillons, elle montre la répartition spatiale de la fraction fine.

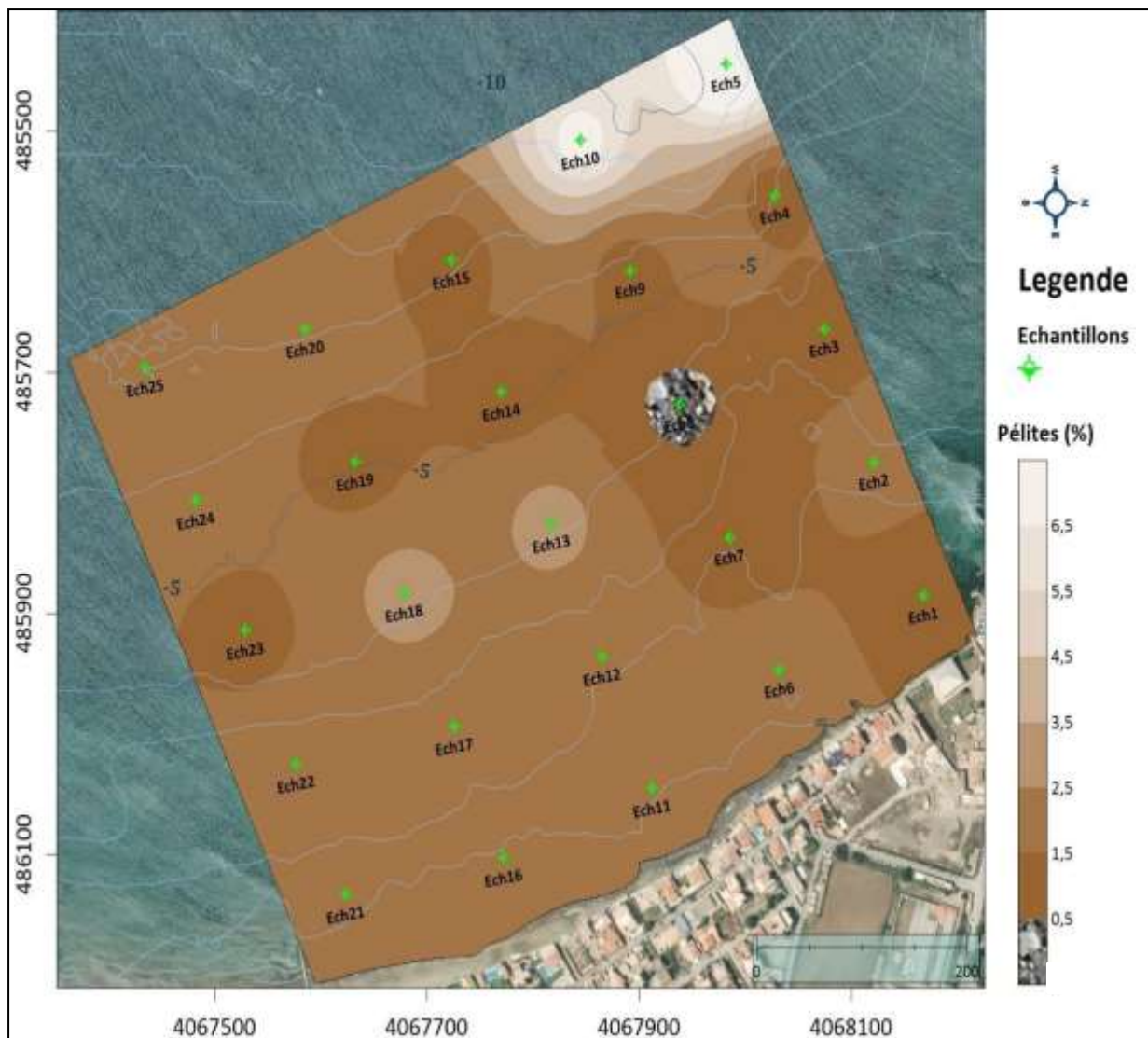


Figure 16 : Carte de la répartition spatiale de la fraction fine sur la plage ouest de Sidi Fredj.

Chapitre II Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

Selon la carte de répartition des pélites (figure n°22), la majorité des échantillons prélevés jusqu'à l'isobathe des -10 m dans la zone d'étude présentent des teneurs en pélites comprises entre 0 et 7 %. Une concentration atteignant 7 % constitue une valeur relativement élevée dans un environnement côtier soumis à une forte dynamique, traduisant des conditions locales favorables à la décantation des particules fines. Ces teneurs plus marquées sont principalement observées au large, dans la partie nord de la zone étudiée, tandis qu'à proximité du rivage, les valeurs diminuent nettement, oscillant entre 0,5 % et 2,5 %, à l'exception d'un échantillon rocheux.

Cette répartition traduit une configuration typique des milieux hydro-dynamiquement actifs, où l'énergie de la houle empêche le dépôt des particules fines à proximité de la côte, favorisant leur accumulation dans les zones plus profondes et calmes.

6.3 Caractères granulométriques de la fraction grossière (>50) :

6.3.1 Médiane granulométrique (D 50) :

La médiane granulométrique, communément notée D50, correspond au diamètre de grain pour lequel 50 % de la masse des particules du sédiment présentent un diamètre inférieur, et 50 % un diamètre supérieur. Elle constitue ainsi un indicateur représentatif de la taille moyenne des grains au sein de l'échantillon sédimentaire.

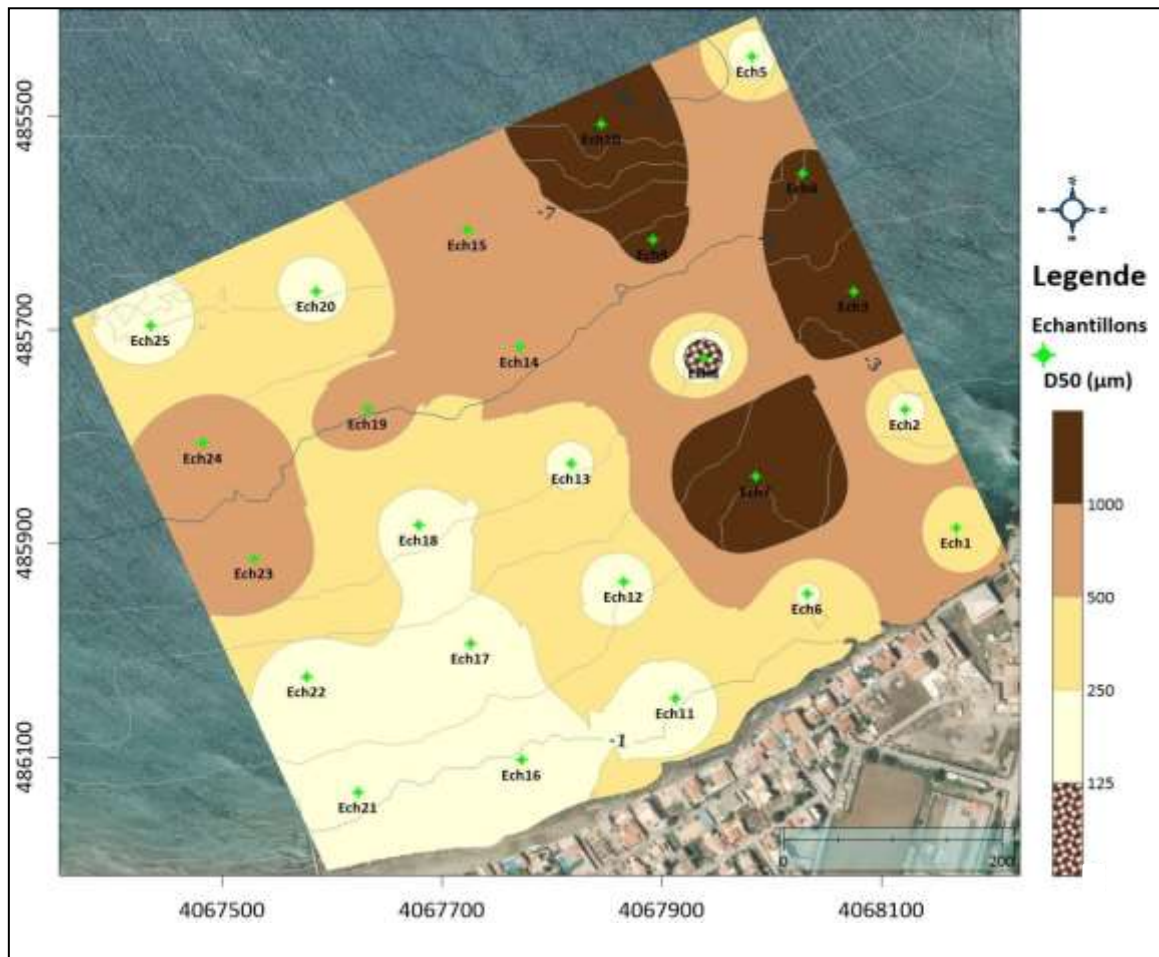


Figure 17 : Carte de la répartition de la médiane granulométrique (D50).

Les analyses granulométriques montrent une large gamme de tailles de grains pour les sédiments prélevés, variant de 50 à 10 000 μm dans l'ensemble de la zone d'étude. La carte de répartition spatiale de la médiane granulométrique (Figure N°23) révèle que la plage sous-marine étudiée est dominée par des sables fins à moyens dans sa partie sud.

En revanche, la partie nord de la zone est principalement recouverte de sédiments grossiers à très grossiers.

6.3.2 Décile supérieur (D 90) :

Le décile supérieur, noté D90, représente le diamètre de grain en dessous duquel se trouvent 90 % de la masse totale des particules sédimentaires. Autrement dit, seuls 10 % du poids total sont constitués de particules plus grossières. Cet indicateur permet ainsi d'apprécier la présence éventuelle de fractions grossières dans le sédiment.



Figure 18 : Carte de la répartition du décile supérieure granulométrique (D90).

La partie sud de la zone d'étude est principalement dominée par du sable fin à grossier. Il est également notable que deux échantillons présentent des valeurs de D90 supérieures à 1 000 µm, indiquant la présence de sable très grossier.

En revanche, la partie nord montre une distribution granulométrique s'étendant du sable grossier au très grossier.

6.4 Analyse modale :

Les histogrammes de fréquences fourniront des indications sur le mode où le diamètre le plus fréquent des grains et éventuellement sur le mélange de deux ou plusieurs stocks sédimentaires différents, si plusieurs modes apparaissent dans l'histogramme de fréquence.

Une répartition naturelle peut admettre une ou plusieurs classes modales plus ou moins bien marquées. On parle de distribution uni-modale (1 seul mode), bimodale (2 modes) ou plurimodale (3 modes et plus).

- Courbes uni-modales : il s'agit de sédiment avec un seul stock sédimentaire.
- Courbes bi-modales : il s'agit de sédiment avec deux stocks sédimentaires.
- Courbes pluri-modales : il s'agit de sédiment avec plusieurs stocks sédimentaires.

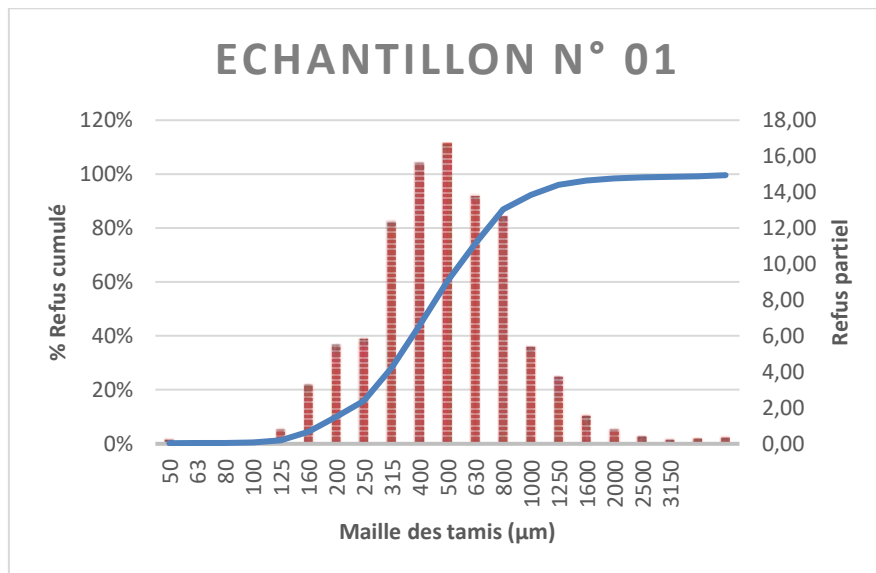


Figure 19 : Courbe uni-modale un seul stock sédimentaire.

Courbes unimodales : Elles traduisent la présence d'un seul stock sédimentaire, provenant d'une source unique ou d'un mode de transport homogène. Cette distribution granulométrique se manifeste par un seul pic bien défini dans la courbe des refus partiels, indiquant une population de grains relativement bien triée.

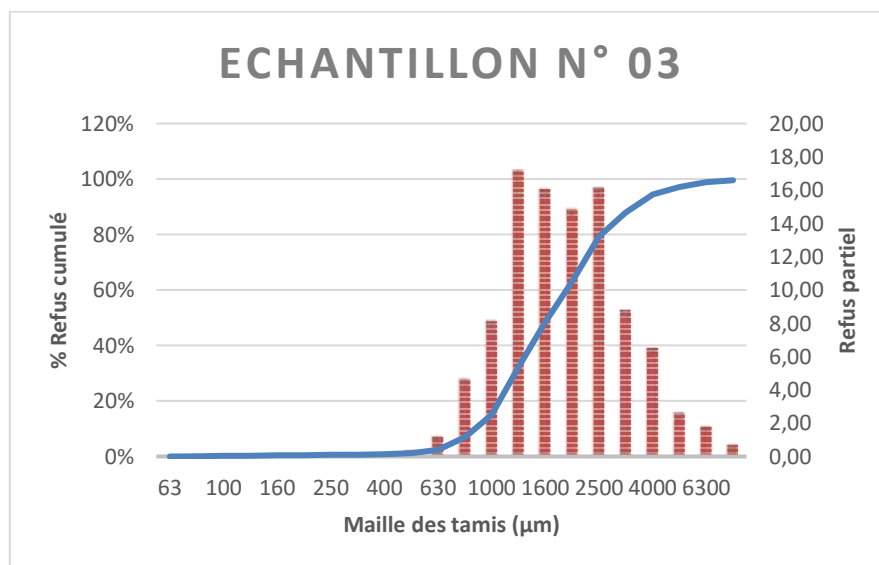


Figure 20 : Courbe bimodale mélange de deux stocks sédimentaires.

Courbes bimodales : Elles indiquent la présence de deux stocks sédimentaires distincts, généralement issus de deux sources différentes ou de deux modes de transport. Cette double distribution granulométrique se manifeste par deux pics dans la courbe des refus partiels, traduisant un mélange de matériaux à granulométries différentes.

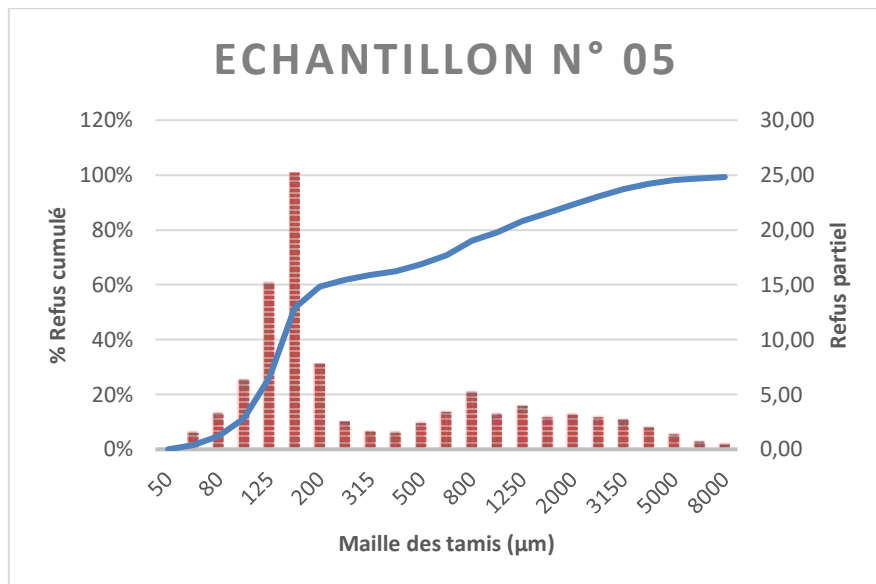


Figure 21 : Courbe plurimodale mélange de plusieurs stocks sédimentaires.

Courbes plurimodales : Elles traduisent la présence de plusieurs stocks sédimentaires distincts, issus de sources variées ou de phénomènes hydrodynamiques multiples. Ce type de courbe est caractérisé par plusieurs pics dans les refus partiels, indiquant une grande diversité granulométrique au sein de l'échantillon.

6.5 Indice de classement de Trask (So) :

L'indice de classement (ou hétérométrie), complète l'image du sédiment donnée par la médiane granulométrique en fournissant une mesure de la dispersion des tailles des grains autour de la valeur centrale.

Le paramètre fréquemment employé dans les travaux sédimentologiques, est le "Sorting index" de TRASK, So :

$$So = \sqrt{\frac{Q75}{Q25}}$$

Avec, Q25 représente le premier quartile de la distribution (la valeur du diamètre correspondant à l'ordonnée 25% des fréquences cumulées) et Q75 représente le troisième quartile de la distribution (correspondant à l'ordonnée 75%).

Ces classes sont intéressantes car elles constituent un indice d'hydrodynamisme fort lorsque le classement est bon et définissent des aires de décharge ou de dépôt lorsqu'il est mauvais.

Les limites utilisées sont :

Tableau 4 : Interprétation du classement granulométrique selon le coefficient de classement (So).

Valeur de So	Classement	Interprétation (courant)	
$1.00 < So \leq 1.20$	Sédiment très bien classé (homogène)	Très régulier	
$1.20 < So \leq 1.60$	Sédiment bien classé	Régulier	
$1.60 < So \leq 2.00$	Sédiment moyennement classé	Peu régulier	
$So > 2.00$	Sédiment mal classé (hétérogène)	Irrégulier	

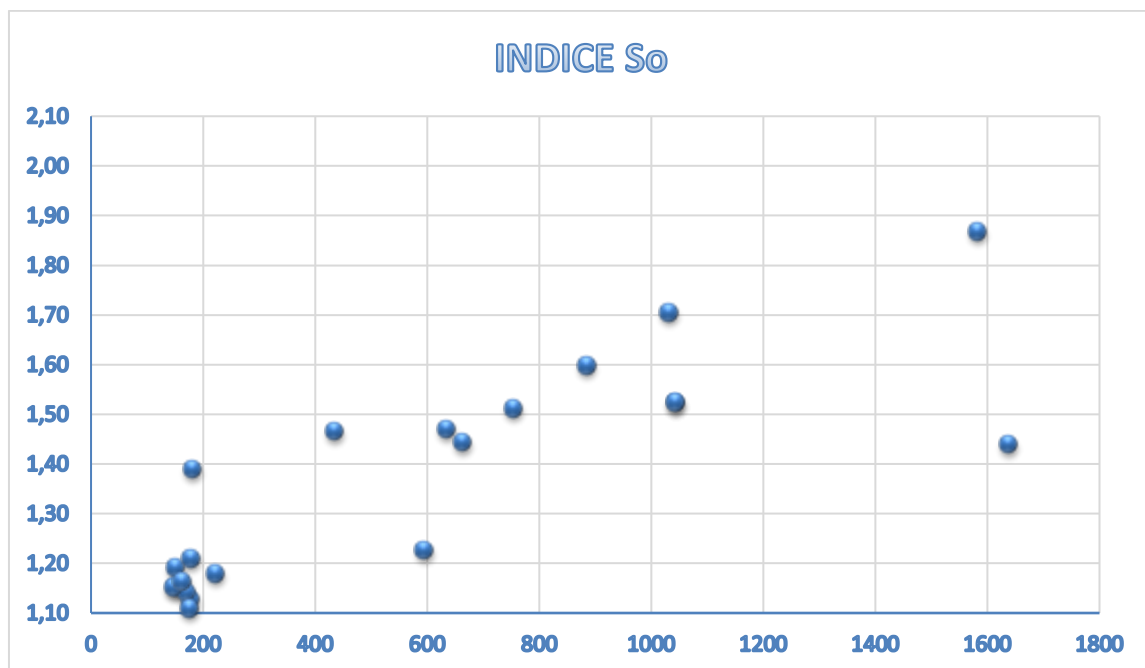


Figure 22 : Indice de classement de Trask (So).

Le résultat du calcul de cet indice montre que les majorités valeurs de (So) se situent entre $So = 1.10$ et $So = 1.60$ cela indique que la majorité des sédiments sont bien à très bien classés, donc plutôt homogènes et réguliers.

On a aussi quelques points entre 1.60 et 2.00, ces points montrent que certains échantillons ont une granulométrie plus dispersée, indiquant un classement moyen (sédiments peu réguliers).

6.6 Indice d'asymétrie (Sk) :

Chapitre II Morphologie et sédimentologie de la zone d'étude

L'indice d'asymétrie Sk caractérise le degré de symétrie de la courbe par rapport à la médiane. Il indique la prépondérance, ou non, des particules fines ou grossières par rapport à la moyenne de l'échantillon.

L'indice d'asymétrie (Sk) est défini par la relation suivante :

$$Sk = \frac{Q_{25} \times Q_{75}}{(Q_{50})^2}$$

Pour ce coefficient d'asymétrie ou de Skewness, les valeurs adoptées sont les suivantes :

Tableau 5 : Interprétation des valeurs du coefficient d'asymétrie (Sk)

Valeur de Sk	Asymétrie	Interprétation
$SK = 1$	Nulle	Courbe à tendance symétrique
$SK > 1$	Négative	Décalage vers les particules grossières (asymétrie négative)
$SK < 1$	Positive	Décalage vers les particules fines (asymétrie positive)

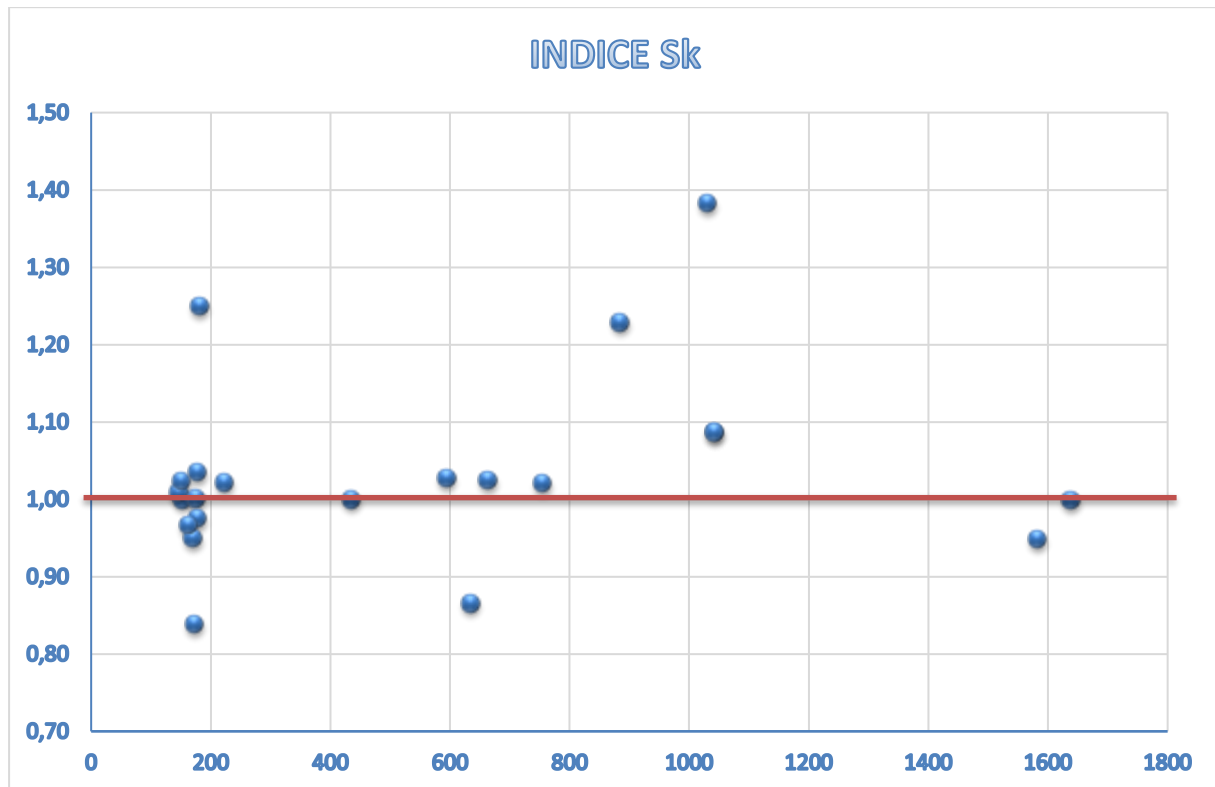


Figure 23 : Indice d'asymétrie (Sk).

L'ensemble des échantillons prélevés présentent des valeurs de l'indice d'asymétrie Sk égales ou très proches de 1.

La lecture de ces valeurs suggère généralement une symétrie dans le classement entre les particules fines et les particules grossières.

7. Conclusion :

7.1 Morphologie sous-marine (bathymétrie, isobathes, pente)

L'analyse bathymétrique de la plage Ouest de Sidi Fredj met en évidence une morphologie sous-marine globalement régulière, caractérisée par une pente douce de l'ordre de 1,2 %, typique des plages sableuses en milieu abrité. Les isobathes présentent une répartition homogène et parallèle à la côte, traduisant une stabilité générale du fond marin. Toutefois, quelques irrégularités ponctuelles, sous forme de barres hydrauliques observées entre 0 et 5 mètres de profondeur, témoignent de l'influence locale des processus de déferlement et de la dynamique sédimentaire.

7.2 Sédimentologie de la zone (D50 et type de sable)

L'analyse granulométrique des sédiments révèle une variabilité des tailles de grains, avec un diamètre médian (D50) global de 0,603 mm, correspondant à un sable grossier. Cette distribution granulométrique reflète des conditions hydrodynamiques contrastées : des sables fins à moyens dominent la partie sud, traduisant un environnement à faible énergie, tandis que des sables grossiers à très grossiers caractérisent la partie nord, soumis à des dynamiques plus énergétiques.

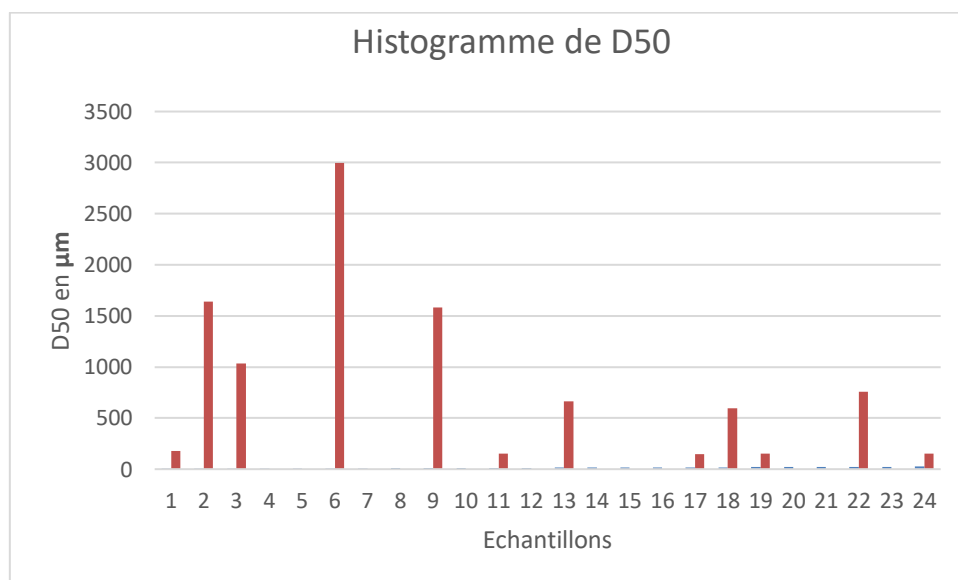


Figure 24 : histogramme de D50 de la zone d'étude

Chapitre III

Etude Hydro-sédimentaire en modèle numérique

1. Introduction :

Ce chapitre se focalisera sur les études de modélisation numérique réalisées dans le cadre de cette étude en utilisant l'outil MIKE 21. Il sera subdivisé en deux parties principales. La première partie fournira une description approfondie du module, des données d'entrée, et du paramétrage de ce modèle. La seconde partie traitera l'application du module sélectionné et présentera les résultats obtenus.

2. Objectif et principe de la modélisation :

Pour appréhender le fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral dans la zone d'étude, nous avons mis en place une modélisation véritablement bidimensionnelle intégrant la propagation de la houle, la courantologie et le transport sédimentaire. Cette modélisation a été réalisée à l'aide de la suite FM de Mike 21, un système intégré performant combinant les modules de houle (SW), de courant (HD) et de transport sédimentaire (ST) au sein d'un modèle morphologique entièrement dynamique.

L'objectif principal est de comprendre le comportement du littoral à travers une reproduction numérique des phénomènes hydro-sédimentaires affectant le site. Cette simulation permet d'analyser les interactions entre les différents processus physiques en jeu (houle, courants, transport des sédiments) afin d'avoir une vision détaillée de la dynamique côtière actuelle.

3. Description des modules du logiciel MIKE 21 :

Une étude bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire est entreprise à l'aide des modules SW, HD et ST, respectivement, de la suite logicielle MIKE 21. Une brève description de ces modules est présentée ci-dessous :

3.1 Mike 21 SW :

Le modèle numérique de la houle MIKE 21 SW, a été appliqué pour la transformation de la houle. Mike 21 SW est un modèle vent-houle spectral basé sur un maillage non structuré. Le modèle simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues générées par le

vent et la houle au large des côtes du littoral. MIKE 21 SW inclut les phénomènes physiques suivants :

- La croissance de la houle par l'action du vent.
- Interaction houle - houle non linéaire.
- Dissipation due au déferlement.
- Dissipation due à la friction au fond de mer.
- Dissipation due à la profondeur limitée du déferlement.
- Réfraction et diminution du fond due aux variations de la profondeur.

Effet de profondeur d'eau variant dans le temps et les inondations et le séchage.

3.2 Mike 21 HD :

MIKE 21 HD constitue le cœur de la suite logicielle MIKE 21 en fournissant les paramètres hydrodynamiques nécessaires aux autres modules. C'est un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques à surface libre qui permet de simuler les variations du niveau d'eau et des écoulements, moyennés sur la colonne d'eau, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et du large. Le modèle hydrodynamique de MIKE 21 est utilisé pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes. MIKE 21 HD prend également en compte les phénomènes d'immersion et émergence des estrans.

3.3 MIKE 21 ST :

Le module ST de la suite MIKE 21 est mis en œuvre pour la modélisation du transport sédimentaire au niveau du port et des zones adjacentes. MIKE 21 ST calcule le transport sédimentaire sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus. Le modèle est déterministe et demande un minimum de calibration. Les taux initiaux de sédimentation/érosion sont calculés sur base de l'équation de conservation de la masse sédimentaire. Le modèle est utilisé pour déterminer la répartition du transport sédimentaire (ou des changements dans cette répartition) et les taux de sédimentation/érosion suite à des impacts d'aménagements (épaves, brise-lame, digue, chenal, remblaiements, dragage etc.).

4. Construction du modèle :

4.1 Domaine du Calcul :

Le domaine de calcul est centré sur la zone d'étude correspondant à la plage ouest de Sidi Fredj. Il a été défini de manière à garantir que les conditions aux limites soient cohérentes avec les phénomènes physiques en présence (caractéristiques de la houle au large et les courants littoraux induits).

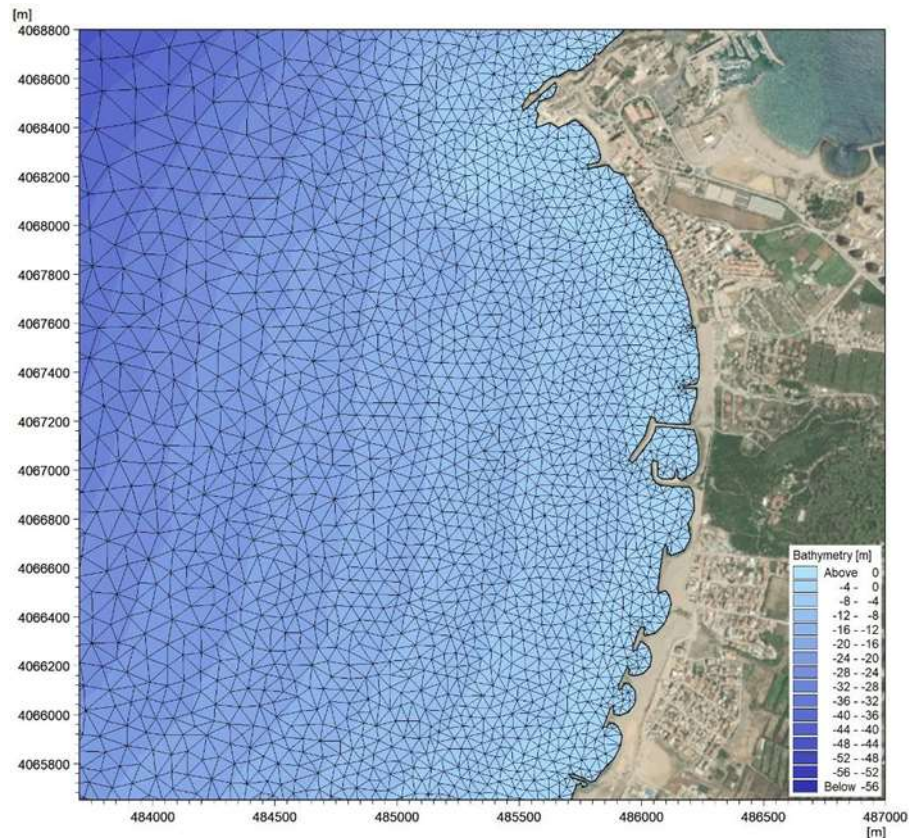


Figure 25 : Bathymétrie et maillage du domaine de la zone d'étude (la bathymétrie est relative à NGA).

4.2 Données sédimentologiques :

Pour la zone d'étude correspondant à la plage ouest de Sidi Fredj, le sable est caractérisé par un diamètre médian de 0,603 mm, une gradation $\sqrt{D84}/\sqrt{D15}$ de 2,051, et une porosité de 0.4 est prise en compte sur l'ensemble du modèle.

4.3 Données de houles :

4.3.1 Conditions de houle au large :

Les données relatives à la houle d'un point du réseau du modèle numérique SIMAR 2120084, provenant de la base de données Puerto d'El Estado de l'organisme Publics des ports en Espagne, sont présentées pour la région à l'ouest de la baie d'Alger. Ces données couvrent la période de 1958 à 2023 et sont représentées sous forme d'histogramme, illustrant les hauteurs significatives (Hs) en mètres et les périodes de pic (Tp) en secondes, avec leur fréquence en pourcentage.

Par ailleurs, le modèle côtier de la zone d'étude est contraint aux limites par des paramètres caractéristiques du spectre de houle provenant de la base de données SIMAR 2120084, englobant la période du 01/01/2023 00:00:00 au 30/03/2024 11:00:00. La frontière offshore, d'une longueur d'environ 60 km et située à une profondeur de -2400 m, est définie par un point de données SIMAR.



Figure 26 : Position du point SIMAR 2120084.

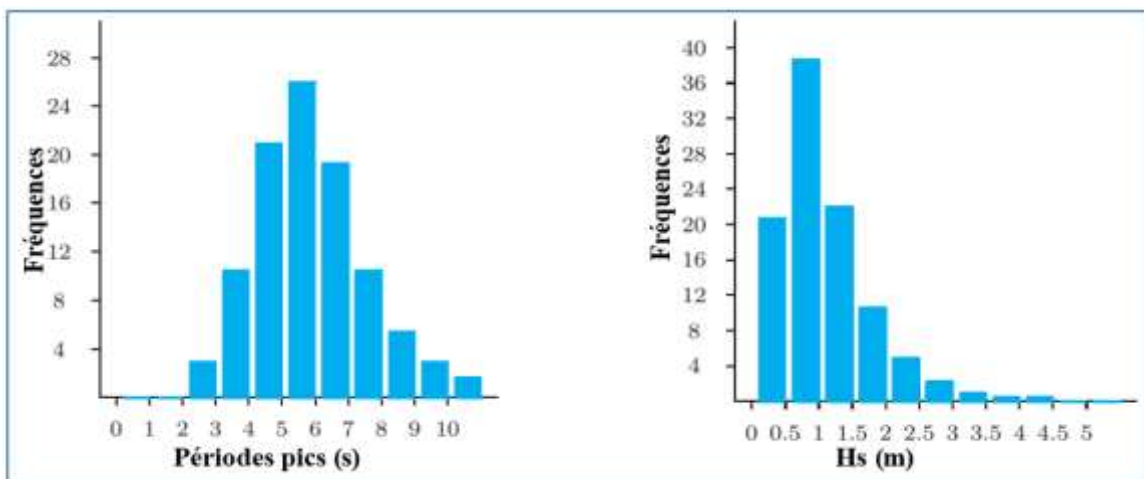


Figure 27 : Histogramme des hauteurs significatives des vagues (Hs) et des Périodes pics (Tp).

4.3.2 Conditions de houle à la côte :

La rose des houles à la frontière offshore des modèles indique que les houles en provenance du Nord et du Nord-Ouest sont les plus fréquentes.

Cette représentation graphique offre des informations cruciales sur les houles les plus prédominantes, permettant ainsi de déterminer la direction du transit sédimentaire le plus dominant dans la zone d'étude.

En analysant cette rose des houles, il devient possible d'identifier les influences maritimes majeures qui contribuent au transport sédimentaire, renforçant ainsi notre compréhension des processus hydro-sédimentaires dans la région.

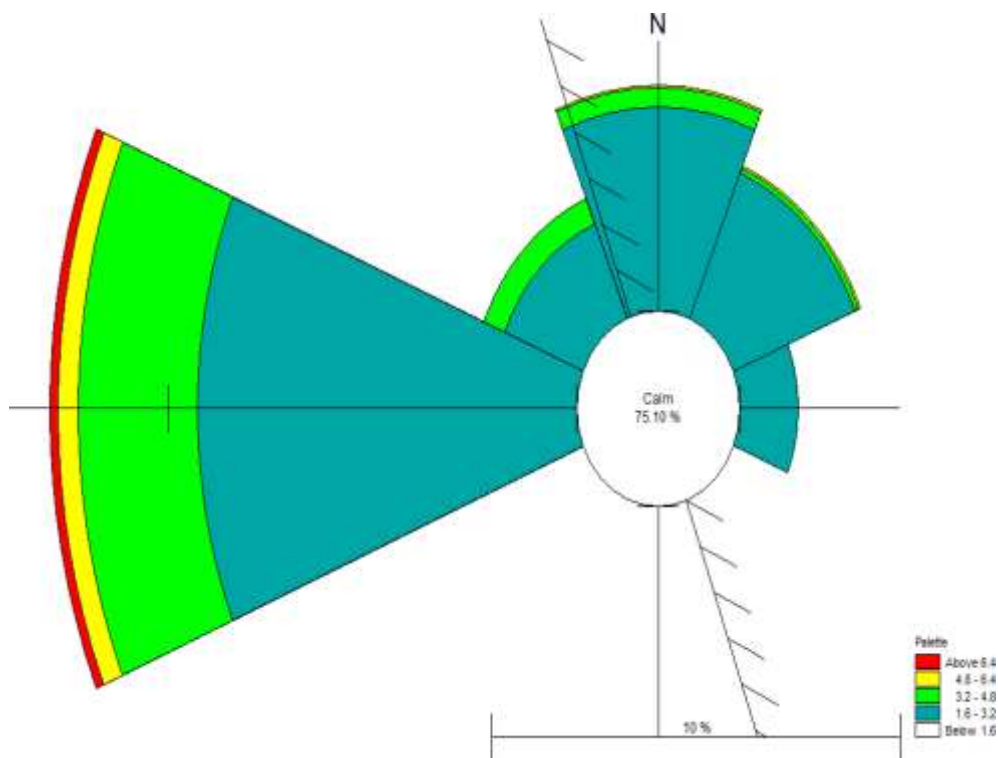


Figure 28 : Roses des houles à la frontière offshore des modèles à l'échelle locale.

4.4 Périodes de simulation :

Le modèle de transformation de la houle fût exécuté pour une durée de 1 an et 3 mois (01/01/2023 00 :00 :00 au 30/03/2024 11 :00 :00) avec un intervalle de temps de 1 heure.

4.5 Paramétrage du modèle hydro-sédimentaire :

La configuration des modèles côtiers est détaillée dans les tableaux ci-après :

Code de calcul			Grille Locale		
			Spectral Waves SW		
			Hydro Dynamics HD		
			Sand Transport ST		
Grilles de Calcul					
Projection			UTM 31 N		
Limite Nord			X = 484894 Y = 4070014		
Limite Ouest			X = 483623 Y = 4067908		
Limite Est			X = 486008 Y = 4069433		
Résolution spatiale			500 mètres		
Période de Modélisation			1 an		
Bathymétrie			Levé local, Navionics		
Niveau marin			Marnage aux limites		
Vent			Non pris en charge		
Houle		Source	Puerto (SIMAR 2120084)		
Conditions aux limites		Pas de temps		1 heure	
Diamètre médian	Rugosité des fonds	Porosité	D50 = 0,603 mm	Sg=2,051	p = 0.40

5. Résultats et interprétation de la simulation numérique :

Afin d'illustrer les principales tendances du transport sédimentaire dans la région des zones d'étude, les résultats de la modélisation sont présentés pour des conditions représentatives du climat de la houle.

Il est important de noter que la modélisation du transport sédimentaire est effectuée pour l'ensemble des conditions climatiques de l'année en cours, permettant ainsi d'obtenir un transport annuel moyen pour l'état initial. Cette approche assure une représentation intégrée du transport sédimentaire sur l'ensemble des conditions de houle caractéristiques de la zone d'étude.

5.1 Étude de l'état du site :

Les faibles profondeurs induisent une réfraction significative des houles, entraînant à la fois un amortissement et un resserrement des directions d'incidence face à l'unité sédimentaire.

Afin de simplifier l'interprétation des résultats à venir, ces conditions seront désignées respectivement comme la houle du Nord et du Nord-Est. La houle du Nord est caractérisée par une hauteur de 1,5 m et un angle d'incidence de 340°, tandis que la houle du Nord-Est présente une hauteur de 1,8 m avec un angle d'incidence de 360°. Une troisième condition est également considérée, caractérisée par une hauteur de 0,8 m et un angle d'incidence de 29°.

5.1.1 Evolution des houles :

- **Houle N360 (Nord) :**

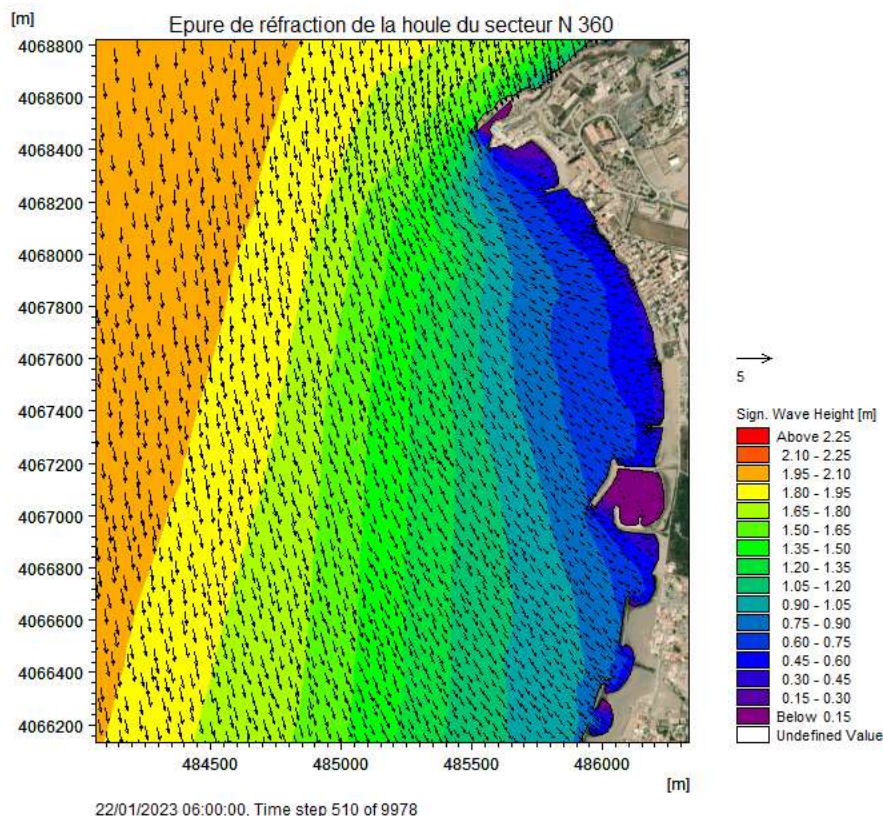
La houle provenant du Nord, avec une direction d'incidence de 360° et une hauteur de 2,31 m, subit une forte réfraction à l'approche de la côte. Cette atténuation est due à la présence du cap de Sidi Fredj, à l'obliquité de la houle et aux faibles profondeurs dans la zone littorale. L'énergie de la houle diminue progressivement, réduisant ainsi son impact sur le rivage, partiellement protégé par les reliefs naturels.

- **Houle NO315 (Nord-Ouest) :**

La houle en provenance du Nord-Ouest, avec une direction d'incidence de 315° et une hauteur de 2,98 m, subit une réfraction partielle grâce à la protection naturelle offerte par le Cap de Sidi Fredj. Cette configuration entraîne une diminution progressive de la hauteur des vagues à l'approche de la côte, atténuant ainsi leur impact direct sur le littoral.

- **Houle O270 (Ouest) :**

La houle provenant de l'Ouest, avec une direction d'incidence de 270° et une hauteur de 1,42 m, arrive presque perpendiculairement à la côte. Elle conserve une grande partie de son énergie en atteignant la zone d'étude, avec très peu de réfraction, ce qui provoque un impact direct et marqué sur le littoral.



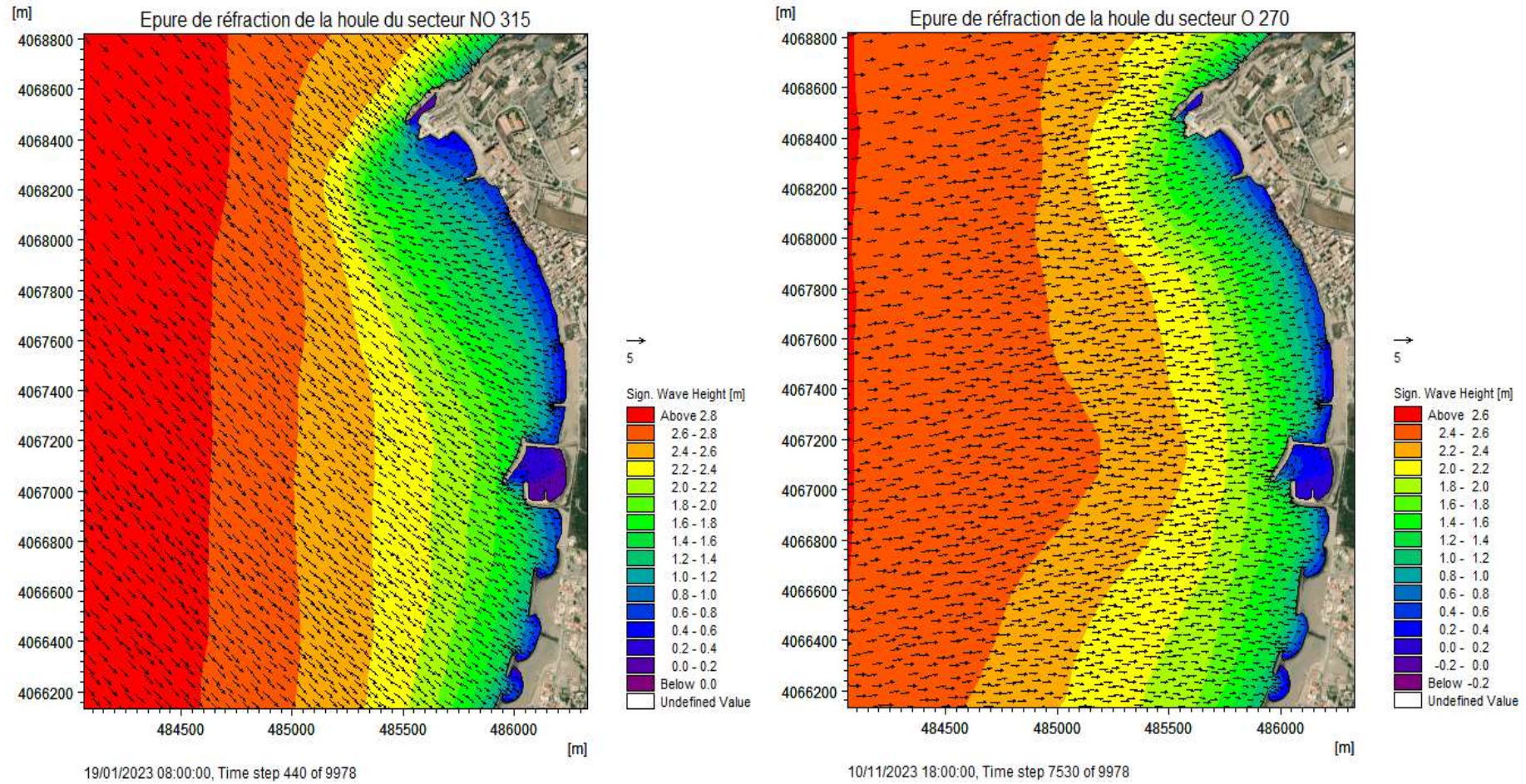


Figure 29 : Evolution de la hauteur significative et la direction de la houle.

5.1.2 Evolution des courants :

- **Houle N360 (Nord) :**

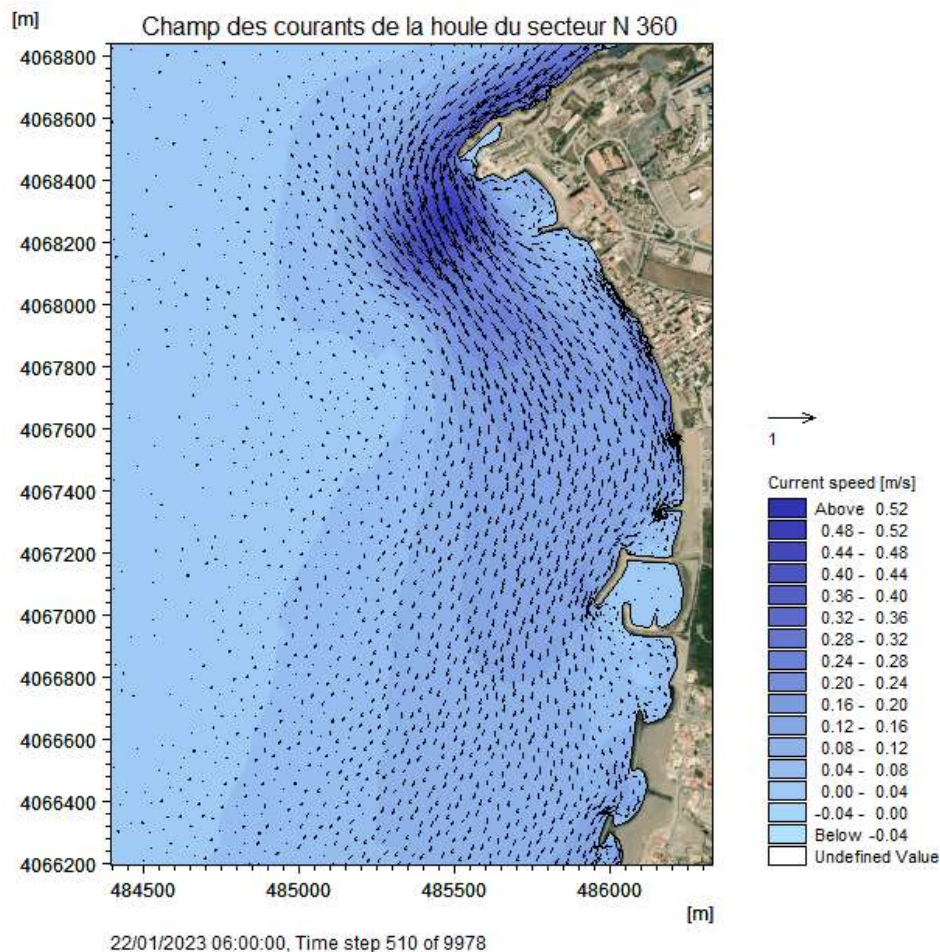
Les courants induits par cette houle sont modérés et présentent une direction parallèle à la côte, orientée vers le sud. Bien que leur vitesse soit inférieure à celle observée pour d'autres directions de houle, ces courants participent activement au transport des sédiments le long du littoral.

- **Houle NO315 (Nord-Ouest) :**

Les courants générés par cette houle sont relativement puissants et orientés du Nord vers le Sud. Leur dynamique est influencée par la morphologie côtière, contribuant à la redistribution des masses d'eau dans la zone d'étude.

- **Houle O270 (Ouest) :**

Sous l'effet de cette houle, les courants côtiers s'orientent principalement selon un axe Nord-Sud, avec des vitesses pouvant dépasser 0,50 m/s. À proximité du port de Palm Beach, une réorientation vers le large est observée, traduisant une interaction entre les courants dominants et les structures portuaires existantes.



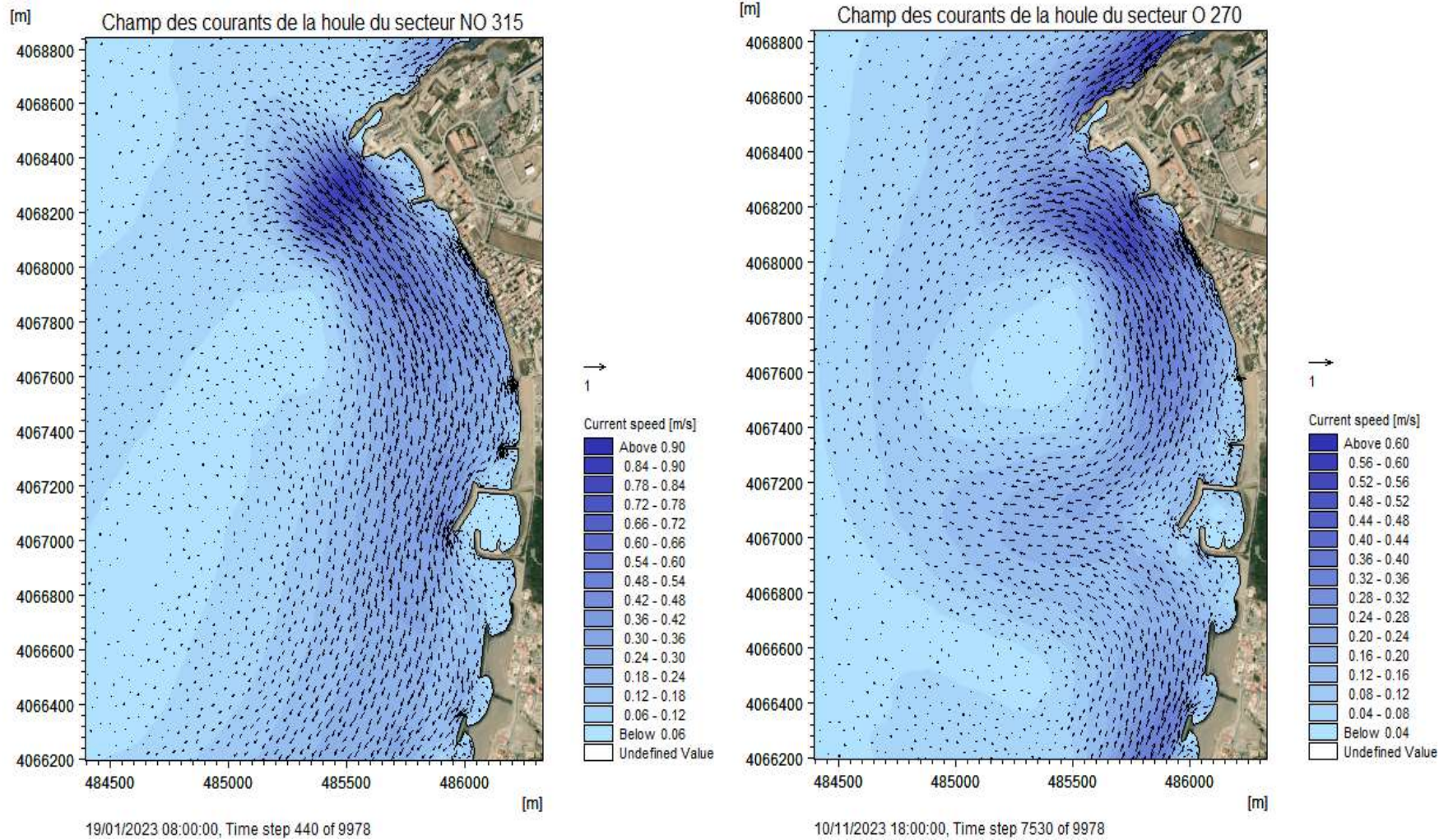


Figure 30 : Champs des courants de la houle

5.1.3 Synthèse de la dynamique sédimentaire :

Houle N360 (Nord) :

La capacité de transport sédimentaire reste limitée sous l'effet de la houle N360. Les sédiments sont dispersés sur l'ensemble de la zone d'étude, avec une concentration plus notable dans la partie nord, traduisant une dynamique plus diffuse et moins énergétique que pour d'autres configurations de houle.

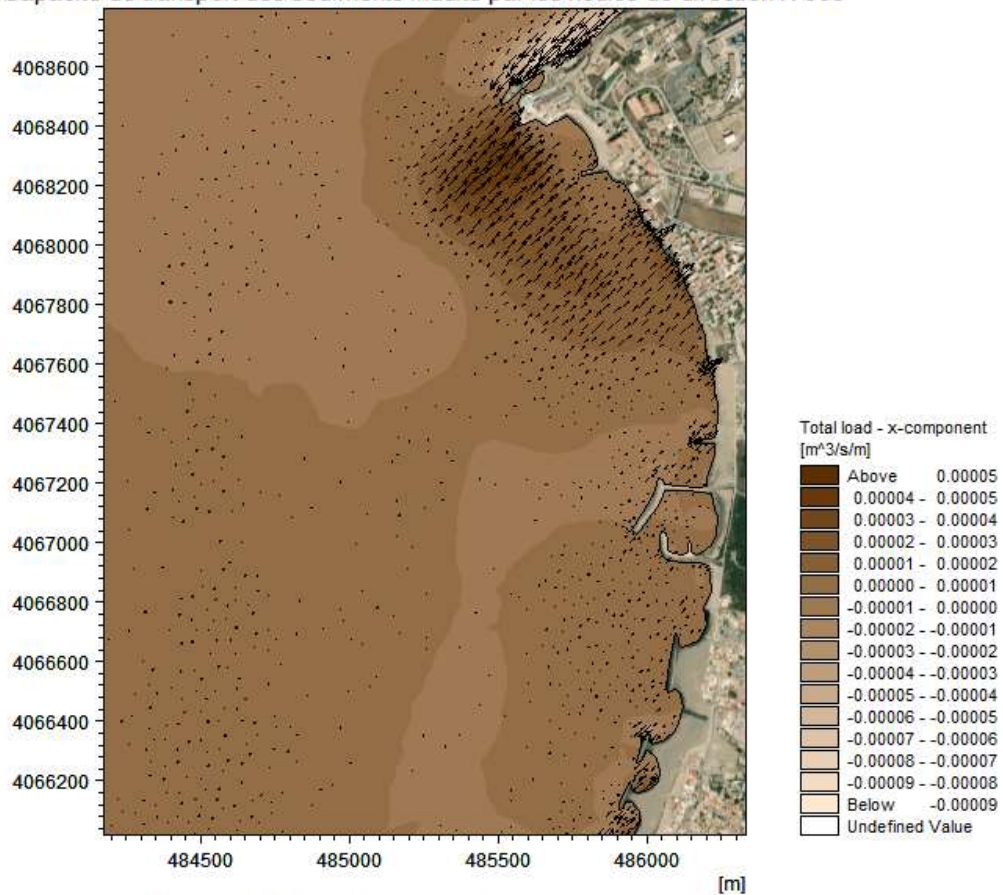
Houle NO315 (Nord-Ouest) :

Le transport sédimentaire, induit par la houle et les courants associés, il est moins intense comparé à d'autres directions de houle, bien qu'il reste notable dans la partie nord de la zone. Les sédiments suivent principalement un mouvement du Nord vers le Sud, en accord avec l'orientation des courants.

Houle O270 (Ouest) :

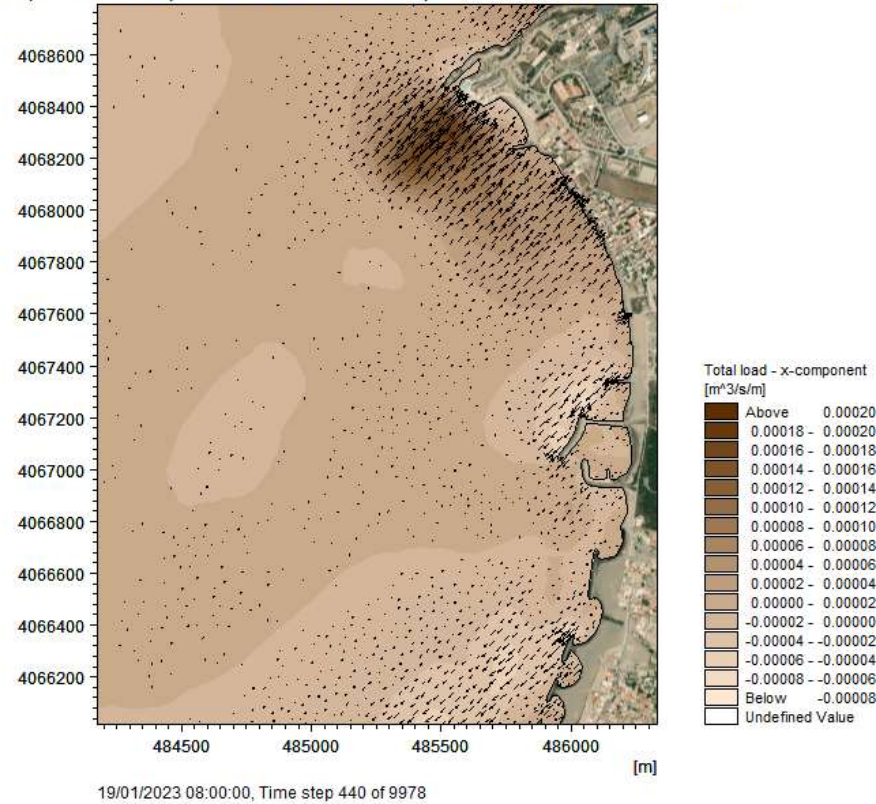
Le transport sédimentaire suit la dynamique des courants, se dirigeant du Nord vers le Sud. La capacité de transport est particulièrement élevée dans les parties nord et centrale de la zone d'étude, contribuant à un déplacement notable des sédiments le long de la plage.

Capacité de transport des sédiments induite par les houles de direction N 360



22/01/2023 06:00:00, Time step 510 of 9978

Capacité de transport des sédiments induite par les houles de direction NO 315



Capacité de transport des sédiments induite par les houles de direction O 270

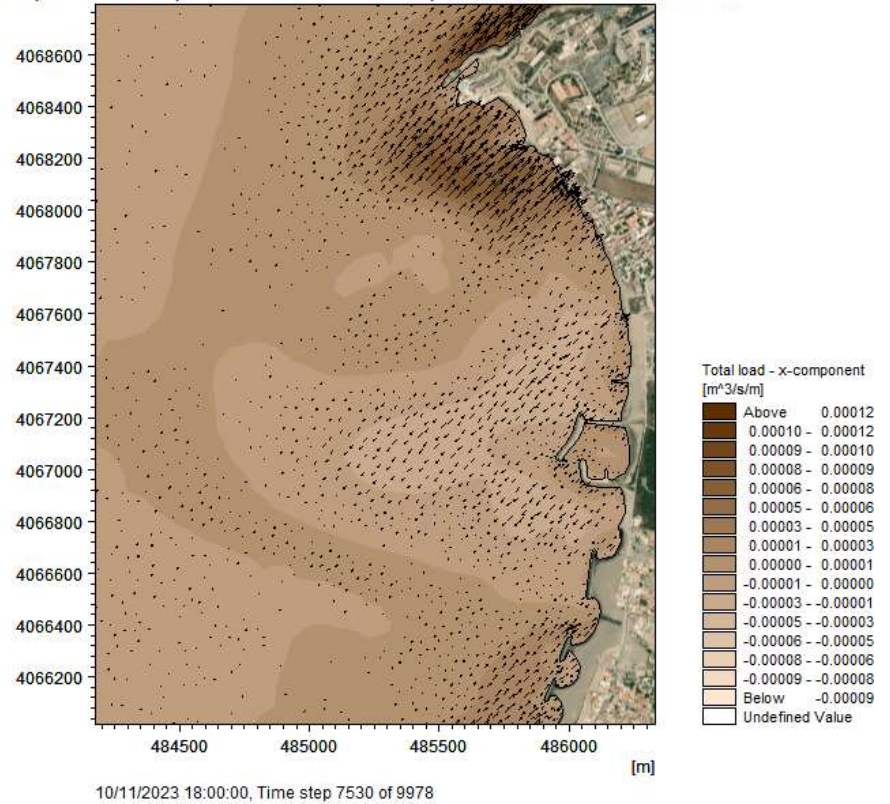


Figure 31 : Capacité de transport des sédiments induite par la houle

6. Conclusion :

La modélisation numérique réalisée à l'aide de la suite MIKE 21 a permis de reproduire de manière détaillée les interactions complexes entre la houle, les courants et le transport sédimentaire au niveau de la plage ouest de Sidi Fredj. Grâce à l'intégration des modules SW, HD et ST, les simulations ont mis en évidence l'impact différencié des houles selon leur direction d'incidence.

Les houles en provenance de l'Ouest (O270) se sont révélées les plus énergétiques, induisant un transport sédimentaire marqué du Nord vers le Sud, en particulier dans les parties nord et centrale de la zone. À l'inverse, les houles du Nord (N360) et du Nord-Ouest (NO315) ont présenté un effet plus diffus, avec une capacité de transport plus modérée.

Les courants induits par la houle suivent majoritairement un axe Nord-Sud, avec une intensité maximale sous l'effet de la houle O270. La modélisation a aussi mis en évidence l'effet de la morphologie du site, notamment du Cap de Sidi Fredj, qui joue un rôle protecteur partiel face aux houles incidentes.

Ces résultats apportent une meilleure compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire locale et constituent une base solide pour l'évaluation des impacts potentiels des aménagements côtiers et la définition de stratégies durables de protection et de valorisation du littoral.

Chapitre IV

Propositions de la protection et d'aménagement du site

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

1. Introduction :

La protection du littoral contre l'érosion marine représente un enjeu crucial dans les zones côtières vulnérables, particulièrement face à l'intensification des phénomènes hydrodynamiques liés aux changements climatiques ainsi qu'aux pressions anthropiques croissantes (Dupont, 2020). Afin de répondre efficacement à cette problématique, plusieurs types d'ouvrages de défense côtière peuvent être mis en œuvre. Ces ouvrages se distinguent principalement par leur position par rapport au trait de côte et par leur mode d'action sur la dynamique sédimentaire et hydrodynamique du littoral (Martin, 2018). Parmi ces solutions, on distingue notamment : les ouvrages transversaux, qui agissent perpendiculairement au rivage pour limiter le transport sédimentaire ; les ouvrages longitudinaux, parallèles au trait de côte, visant à réduire l'énergie des vagues ; aussi on a l'enrochement, qui consiste en la mise en place de blocs rocheux pour protéger les berges ; ainsi que le rechargement artificiel, technique consistant à apporter du sable pour compenser les pertes sédimentaires (Lemoine, 2019).

2. Épis (Ouvrages transversaux) :

Un épi est un ouvrage rigide ou semi-rigide construit perpendiculairement au rivage, généralement en enrochement ou en béton. Il agit comme une barrière qui interrompt le courant littoral responsable du transport des sédiments (sable).

2.1 Principe de fonctionnement :

Le principe des épis repose sur la modification du transit sédimentaire littoral. En interrompant le courant côtier, l'épi ralentit la dérive littorale et permet l'accumulation de sable sur le côté amont (côté d'arrivée du courant). Cela entraîne souvent une érosion accrue côté aval si le système n'est pas bien conçu ou s'il manque d'entretien.

2.2 Pour qu'ils soient efficaces :

- 5 La longueur et l'espacement doivent être adaptés à la bathymétrie et aux dynamiques locales.
- 6 Ils doivent être semi-perméables pour ne pas bloquer totalement l'écoulement.

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

2.3 Est-ce une bonne solution pour notre cas ?

Avantages	Inconvénients
Favorisent la reconstitution naturelle de la plage	Risque de déséquilibre sédimentaire si les épis ne sont pas bien dimensionnés
Solution relativement simple à construire et à entretenir	Peu esthétiques, impact visuel négatif en zone touristique
Peuvent être combinés avec des rechargements en sable	

Les épis peuvent être utiles dans des zones précises pour piéger le sable et stabiliser la plage, à condition qu'ils soient bien dimensionnés et intégrés dans une approche globale. Ils ne doivent pas être utilisés seuls sans analyse des effets induits sur les plages voisines.



Figure 32 : les épis des plages générés par intelligence artificielle



Figure 33 : les épis dans une plage de Manche en France

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

3. Brise-lames immergés (Ouvrages longitudinaux) :

Il s'agit d'une structure construite parallèlement au rivage, mais située sous la surface de l'eau (immergée), réalisée en enrochements ou en caissons. Elle agit comme une barrière sous-marine qui casse la houle avant qu'elle n'atteigne la plage.

3.1 Principe de fonctionnement :

Le brise-lames immergé réduit l'énergie des vagues, ce qui :

- Diminue l'érosion directe du rivage ;
- Crée une zone d'eaux calmes à l'arrière, favorable à la sédimentation naturelle ;
- Peut permettre la formation de tombolos, c'est-à-dire de bancs de sable qui relie la plage à l'ouvrage.

Il présente aussi l'avantage d'être peu visible depuis la terre, ce qui le rend discret en milieu touristique.

3.2 Est-ce une bonne solution pour notre cas ?

Avantages	Inconvénients
Protection efficace contre l'érosion liée à la houle	Coût de mise en œuvre élevé (travaux maritimes, sécurité, accessibilité)
Préservation du paysage visuel, car ils sont immergés	Fonctionnement dépendant de la profondeur : inefficacité si mal dimensionnés
Favorisent la stabilisation naturelle du sable (zone calme propice au dépôt)	Entretien régulier nécessaire pour éviter l'envasement ou la submersion

Les brise-lames immergés représentent une option très intéressante pour la plage Ouest de Sidi Fredj, notamment dans les zones où la houle est dominante et où l'on souhaite limiter l'impact visuel. Leur combinaison avec des rechargements ou des récifs artificiels pourrait renforcer leur efficacité.

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

4. L'enrochement :

L'enrochement est une technique de protection côtière consistant à disposer des blocs de roche, de taille et poids variables, pour former une structure massive capable de résister aux forces marines (houle, courant, marée). On l'utilise couramment pour construire des digues, des brise-lames, ou renforcer un rivage exposé à l'érosion.

4.1 Principe de fonctionnement :

Le principe de l'enrochement repose sur la dissipation de l'énergie des vagues. Lorsqu'une vague heurte les blocs rocheux, son énergie est progressivement réduite par les vides entre les pierres et par la rugosité de la surface. Cette absorption de l'énergie permet de limiter l'érosion du sol situé derrière ou sous la structure. Un bon enrochement est souvent constitué de plusieurs couches :

- Bloc de carapace (extérieur) : gros blocs résistants aux chocs directs.
- Couche de transition / filtre : matériaux granulaires intermédiaires qui empêchent le déplacement des sédiments.
- Noyau interne : matériaux plus fins, servant de support.

4.2 L'enrochement est-il la meilleure solution pour notre cas ?

Avantages	Inconvénients
Efficacité éprouvée face à une houle forte et continue	Impact visuel et écologique : dénature le paysage et perturbe les écosystèmes
Durabilité dans le temps, avec peu d'entretien	Coût élevé selon la taille et la qualité des blocs utilisés
Adaptabilité à différentes configurations côtières	Ne favorise pas la récupération naturelle du sable, sauf en combinaison avec d'autres solutions

Dans le cas spécifique de la plage Ouest de Sidi Fredj, où l'érosion est importante mais où l'environnement touristique et naturel est sensible, l'enrochement seul n'est peut-être pas suffisant ni idéal. Une solution hybride (brise-lames immergés, végétalisation, etc.) combinée à des ouvrages en enrochements localisés (ex. : à proximité des infrastructures critiques ou des zones les plus vulnérables) semble être une option plus durable et intégrée.



Figure 34 : L'énrochement du port de Carras a été réalisé en 2023. (Photo Jean-François Ottonello)

5. Rechargement artificiel :

Le rechargement artificiel consiste à ajouter du sable (ou parfois des galets) sur une plage en érosion, provenant généralement d'un site d'emprunt sous-marin ou terrestre. C'est une solution douce, qui imite les processus naturels et améliore la plage sans structure rigide.

5.1 Principe de fonctionnement :

Le sable est déposé sur la plage selon un profil étudié pour résister à l'action des vagues et du courant. Cette opération :

- Rétablit la largeur et le volume initial de la plage ;
- Fournit une protection naturelle contre la houle et les tempêtes ;
- Protège les infrastructures côtières en reculant la ligne de rivage.

Le rechargement peut être périodique (tous les 5 à 10 ans) en fonction de la dynamique érosive locale.

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

5.2 Est-ce une bonne solution pour notre cas ?

Avantages	Inconvénients
Restaure rapidement la plage et améliore l'aspect paysager.	Durée de vie limitée : le sable peut être rapidement emporté s'il n'est pas protégé par d'autres ouvrages.
Solution non rigide, réversible et compatible avec le tourisme.	Coût élevé si le sable doit être dragué loin ou tamisé.
Peut-être ciblée sur les zones les plus critiques (au droit des habitations).	Nécessite une maintenance régulière et un suivi post-opération.

Le rechargement artificiel ciblé représente une solution complémentaire précieuse pour la plage Ouest de Sidi Fredj, en particulier devant les habitations directement exposées à la mer. Il peut amortir les vagues, restaurer une zone tampon sableuse, et offrir un gain esthétique notable. Son efficacité est optimisée lorsqu'il est combiné à des ouvrages rigides ou immergés, comme les brise-lames ou les épis.

6. Géotube (Géotextile immergé) :

Le géotube est un ouvrage souple constitué d'une enveloppe en géotextile remplie de sable ou de boue pompée, placé généralement sous la surface de l'eau ou en pied de plage. Il constitue une solution semi-rigide qui combine des avantages des solutions souples (comme le rechargement) et des ouvrages rigides (comme les brise-lames), tout en s'intégrant au paysage littoral.

6.1 Principe de fonctionnement :

Le géotube est installé sur le fond marin ou en pied de plage selon un positionnement précis. Une fois rempli, il prend une forme stable et offre une barrière physique contre l'énergie des vagues. Cette installation permet :

- D'atténuer la houle et réduire l'énergie des vagues arrivant sur la plage ;
- De stabiliser le pied de berme et limiter l'érosion régressive ;
- De favoriser le dépôt sédimentaire en créant des zones de calme hydrodynamique ;
- De protéger indirectement les infrastructures situées en arrière de la plage.

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

6.2 Est-ce une bonne solution pour notre cas ?

Avantages	Inconvénients
Réduction efficace de l'érosion en dissipant l'énergie des vagues.	Peut être exposé aux dommages en cas de tempête extrême ou d'affouillement du fond marin.
Installation relativement rapide et sans impact lourd sur le paysage.	Peut nécessiter une surveillance régulière pour vérifier sa stabilité et son intégrité.
Solution réversible et écologique : possibilité de démontage ou d'ajustement.	Moins efficace contre les houles de forte amplitude s'il n'est pas bien dimensionné ou ancré.
Favorise l'accumulation de sédiments en arrière de l'ouvrage.	Coût de fabrication et de pose non négligeable (matériau technique, pompage de remplissage).

L'utilisation de géotubes peut représenter une solution intéressante pour la plage Ouest de Sidi Fredj, notamment en complément d'un rechargement artificiel de sable. Installés en pied de berme ou immergés à faible profondeur, les géotubes permettent de dissiper une partie de l'énergie des houles dominantes de secteur Ouest (N270°), de stabiliser les sédiments rechargés et de limiter l'érosion régressive. Cependant, leur efficacité dépend fortement de la bonne conception de leur dimensionnement, de leur ancrage et d'une surveillance post-installation.

7. Conclusion :

L'analyse des différentes techniques de protection côtière met en évidence la nécessité d'adopter des solutions adaptées aux caractéristiques morphologiques, hydrodynamiques et socio-économiques du site concerné. Les épis, les brise-lames immergés, l'enrochement, le rechargement artificiel et les géotubes présentent chacun des mécanismes d'action spécifiques, ainsi que des avantages et des contraintes techniques, environnementales et économiques. Dans le cas particulier de la plage Ouest de Sidi Fredj, où les enjeux d'érosion côtière se conjuguent à une forte occupation urbaine en bord de mer, une stratégie intégrée combinant des ouvrages rigides (enrochements localisés, brise-lames immergés) et des solutions souples (rechargement artificiel, géotubes) apparaît comme la plus pertinente. Cette approche globale permettrait de réduire efficacement l'énergie des houles dominantes, de stabiliser les sédiments et de préserver, autant que possible, le caractère touristique et paysager du site, tout en assurant la protection des infrastructures en zone littorale.

Chapitre IV Propositions de la protection et d'aménagement du site

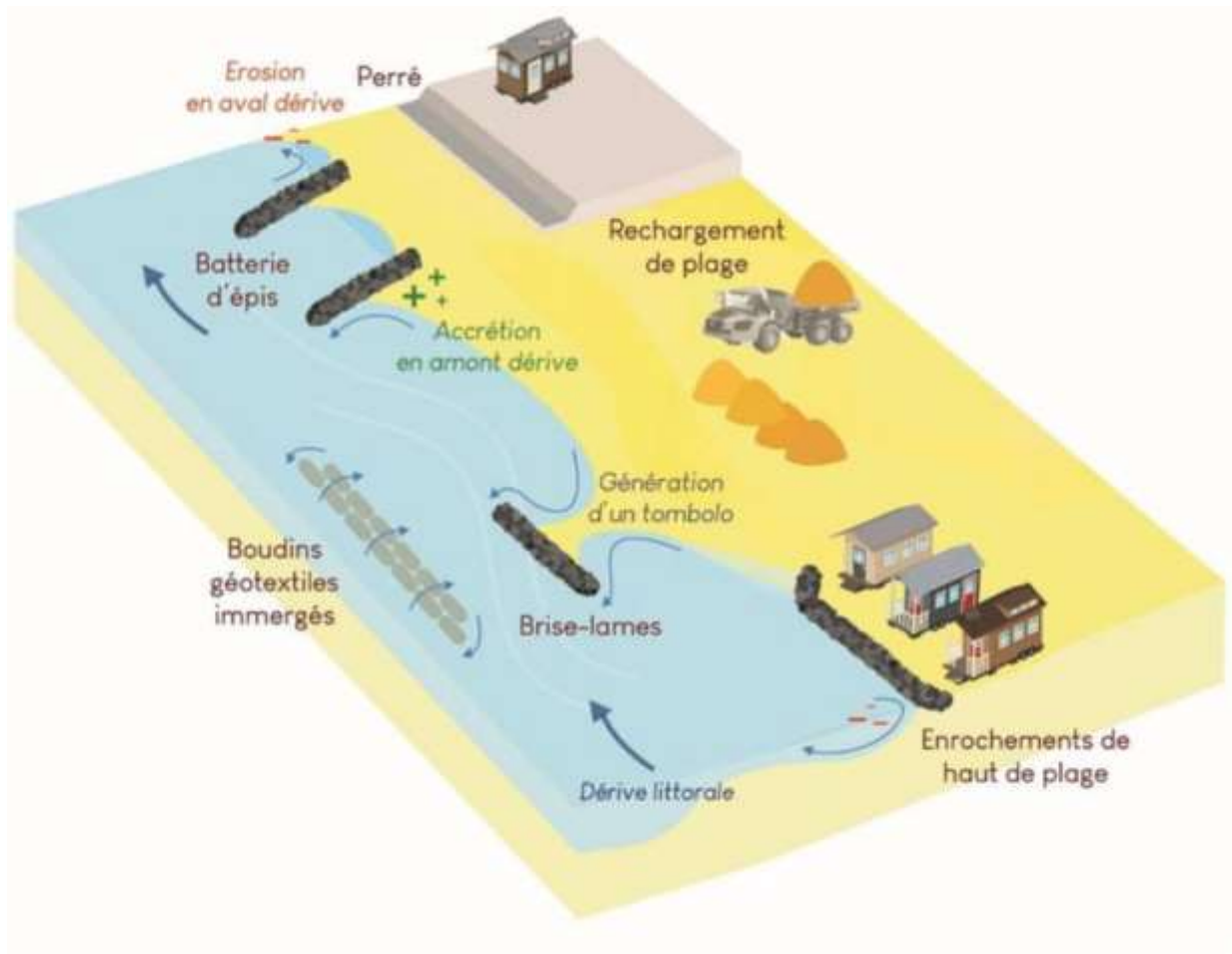


Figure 35 : Schéma présentant les différents types d'ouvrages de protection littorale.

Ce schéma illustre l'ensemble des ouvrages de protection côtière, regroupant les différentes solutions techniques utilisées pour lutter contre l'érosion marine et protéger le littoral, telles que les épis, les brise-lames, les enrochements et les ouvrages de rechargement et le géotube.

Conclusion

Conclusion générale :

L'étude de protection et d'aménagement de la plage ouest de Sidi Fredj, portant sur un linéaire de 760 mètres, a permis de mieux cerner les processus d'érosion affectant cette portion du littoral. L'analyse croisée des fonds marins, des caractéristiques sédimentologiques et des conditions de houle a mis en évidence le rôle prédominant des vagues en provenance du secteur ouest (N270°) dans le recul progressif du rivage, en raison de leur action sur le transport longitudinal des sédiments.

L'utilisation de modèles numériques a permis de simuler l'impact des tempêtes et des états de mer extrêmes sur la dynamique côtière, fournissant une base technique solide pour l'élaboration de solutions adaptées.

Afin de répondre efficacement à la problématique d'érosion et de garantir une protection durable du site, plusieurs options d'aménagement ont été envisagées :

- La **construction d'épis perpendiculaires** à la ligne de rivage, destinés à piéger les sédiments et à limiter leur dérive le long de la côte.
- L'**implantation de brise-lames parallèles** au rivage, pour atténuer l'énergie des vagues avant leur déferlement sur la plage.
- L'**enrochement de protection** pour stabiliser les secteurs les plus exposés à l'érosion.
- Le **rechargement artificiel en sable**, visant à restaurer le volume sédimentaire de la plage et à renforcer sa capacité naturelle d'absorption des houles.
- L'**utilisation de géotubes**, structures souples remplies de sable, qui présentent l'avantage de freiner efficacement l'érosion tout en assurant une bonne intégration paysagère.

Parmi l'ensemble des solutions proposées, l'option des géotubes apparaît comme la plus adaptée au contexte spécifique de la plage ouest de Sidi Fredj. Elle conjugue efficacité technique, coût maîtrisé, impact visuel réduit et facilité de mise en œuvre. Cette solution permet également de préserver la vocation touristique du site tout en respectant son équilibre environnemental.

En définitive, cette approche intégrée et multifonctionnelle souligne l'intérêt de combiner des techniques complémentaires selon les caractéristiques locales du milieu. Les résultats obtenus offrent un **cadre de référence pertinent** pour orienter les futures actions de **gestion et de protection du littoral** de Sidi Fredj, dans une perspective de durabilité face aux pressions naturelles et anthropiques croissantes.

Références bibliographiques :

A

- **Abid, A., & Sahel, M. (2017).** Étude géographique et environnementale de la zone de Sidi Fredj. Rapport d'activité.
- **ABID, D et SEHIL, R. (2017).** *Les paramètres physicochimiques de l'eau de mer et de sédiment de la plage ouest de Sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Environnement marin. Alger : ENSSMAL, P.P.5-64.
- **Ahmed Mahjou, M. (2021).** *Les échanges énergétiques entre l'Algérie et l'Europe.* [En ligne] [consulté le 14/06/2025]. Disponible sur le web : <https://asjp.cerist.dz>

B

- **Bachari, A. (2009).** *Étude bathymétrique et sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl.* Thèse de doctorat. Géologie marine. Alger : Université d'Alger, P.P. 185-210.
- **Bird, Eric (2008).** *Coastal Geomorphology: An Introduction.* Chichester : Wiley, P.320.

C

- **Chaibai, Ahmed ; Hanani, Mohamed (2022).** *Gestion des risques côtiers en Algérie.* Revue Algérienne de l'Environnement, vol. 7, n° 2, P.P. 166-180.
- **Chaibai, N.; Hanani, N. (2022).** *Gestion des risques côtiers en Algérie.* Mémoire de master, Géographie littorale. Alger : Université d'Alger, P.P. 85-110.
- **Chaibai, N.; Hanani, Y. (2022).** *Gestion des risques côtiers en Algérie.* Revue des Sciences de la Terre, vol. 25, n° 4, P.P. 85-110.
- **Les paramètres physicochimiques dans l'eau de mer et le sédiment de la plage Ouest de Sidi Fredj, Thèse, 2020,** Cote 577.727 653 DAD/M, Bibliothèque virtuelle de l'ENSSMAL.

D

- **Dean, Robert G.; Dalrymple, Robert A. (2002).** *Coastal Processes with Engineering Applications.* Cambridge : Cambridge University Press, P.475.
- **Degiovanni, A. (1973).** *Étude géologique et géomorphologique de la région de Sidi Fredj.* Thèse de doctorat. Géologie. Alger : Université d'Alger, P. 145.
- **Dupont, J. (2020).** *Gestion intégrée des zones côtières face au changement climatique.* Mémoire de master. Environnement côtier. Marseille : Université de Provence, P. 112.

G

1. **Google (2025).** *Google Earth.* [En ligne] [consulté le 14/06/2025]. Disponible sur le web : www.google.com/earth

H

- **Hemdane, A. (2006).** *Dynamiques hydro-sédimentaires des côtes algériennes et implications pour la gestion du littoral.* Thèse de doctorat, Océanographie. Alger : Université d'Alger, P.P.166-280.
- **Hemdane, Mohamed (2006).** *Analyse des dynamiques hydro-sédimentaires des côtes algériennes et implications pour la gestion du littoral.* Thèse de doctorat. Géographie physique. Alger: Université d'Alger, P.250.

I

- **Info-climat (s.d.).** *Données climatologiques.* [En ligne] [consulté le 14/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.infoclimat.fr>

L

- **Leclaire, J. (1972).** *Structure et évolution du massif cristallin de la Grande Kabylie.* Mémoire de master. Géologie. Alger : Université d'Alger, P. 130.
- **LECLAIRE, L. (1972).** *Sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Précontinent algérien).* Paris : Mémoire du muséum national d'histoire Naturelle, 391 p.
- **L.E.M. (2007).** *Étude d'ensablement du port de plaisance de Palm Beach.* Rapport d'activité. Document non publié. Alger : LEM.
- **L.E.M. (2009).** *Étude de protection de la plage de Palm Beach Azur.* Rapport d'activité. Document non publié. Alger : LEM.
- **L.E.M. (2022).** *Étude de protection et de réhabilitation des ouvrages maritimes du port de plaisance de Palm Beach (Résidence d'État).* Rapport d'activité. Document non publié.
- **LEM. (2024).** *Étude pour la réalisation d'une route côtière avec protection et aménagement côtier reliant Oued El Harrach à Tamenfoust.* Rapport d'activité. Document non publié. Alger : LEM.
- **Lemoine, S. (2019).** *Techniques de protection du littoral : enrochement et recharge artificiel.* Mémoire de master. Sciences de la mer. Brest : Université de Bretagne Occidentale, P. 135.
- **Luijendijk, Arjen; Hagenaars, Gijs; et al. (2018).** *The State of the World's Beaches.* Nature Scientific Reports, vol. 8, n° 6641, P.P. 1-11.

M

- **Martin, P. (2018).** *Dynamique sédimentaire et ouvrages de défense côtière.* Mémoire d'ingénieur. Génie côtier. Nantes : ENSTA Bretagne, P. 98.
- **McGranahan, Gordon; Balk, Deborah; Anderson, Bridget (2007).** *The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones.* Environment and Urbanization, vol. 19, n° 1, P.P. 17-37.
- **MEER (2022).** *Impact des changements climatiques en Algérie : érosion, sécheresse et risques côtiers.* Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables.
- **MICLAT. (2017).** *Données démographiques et géographiques de la wilaya d'Alger.* Rapport d'activité.
- **Millot, C., Taupier-Letage, I., & Benzohra, M. (1990).** *Dynamique des courants marins en Méditerranée occidentale.* Revue Océanographique, vol. 15, n° 3, P.P. 45-60.

- **Millot, C., Taupier-Letage, I., & Benzohra, M. (1990).** *Les courants marins et leur influence sur le littoral algérien*. Paris : Masson, P. 220.
- **Moulfi, A., Pauc, H., & Moulfi, L. (2012).** *Les sédiments récents de la baie de Bou-Ismaïl (Ouest algérois)*. Bulletin du Service Géologique National, vol. 23, n° 1, P.P. 29-49.

N

- **Nadir, M. (2016).** *Modélisation numérique de la morphodynamique d'une côte sableuse*.
- **Nicholls, Robert J.; Cazenave, Anny (2010).** *Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones*. Science, vol. 328, n° 5985, P.P. 1517-1520.

P

- **Paskoff, Roland (2006).** *Les traits de côtes*. Paris: Masson, P.220.
2. **Puerto Del Estado (2024).** *Données de houles de 1974 à 2024*. [En ligne] [consulté le 14/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.puertos.es/en-us>

S

3. **SAS PLANETE (2025).** *Données géographiques de la plage Ouest de Sidi Fredj*. [En ligne] [consulté le 14/06/2025]. Disponible sur le web : www.sasplanete.com
- **Swift, D.J.P.; et al. (1986).** *Physical Processes and Sedimentology of Continental Shelves*. Marine Geology, vol. 70, n° 1-2, P.P. 1-25.
 - **Swift, D.J.P.; et al. (1986).** *Physical processes and sedimentary response on a modern epicontinental shelf: the Middle Atlantic shelf of North America*. Continental Shelf Research, vol. 6, n° 1-2, P.P. 1-32.

T

- **Tarik, M.; Bouziane, A. (2010).** *Effets des infrastructures portuaires sur la dynamique sédimentaire des plages algériennes*. Revue des Sciences de la Terre, vol. 25, n° 4, P.P. 45-60.
- **Tarik, Samir; Bouziane, Nadia (2010).** *Effets des infrastructures portuaires sur la dynamique sédimentaire des plages*. Mémoire de master. Génie côtier. Oran : Université d'Oran, P.120.

Références Web :

4. www.energie-algerie-europe.dz
5. <https://www.nicematin.com/vie-locale/le-comite-de-quartier-appelle-a-ressusciter-ce-petit-port-de-nice-908834>
6. <https://littoral.manche.fr/gestion-et-adaptation/les-modes-de-gestion/lutte-active-dure/>

Annexes

Annexe 1 : (Fiche technique du matériel et des moyens utilisés) :

A. Moyens humains :

L'équipe mobilisée pour la campagne de reconnaissance et d'étude était composée de :

- 01 Ingénieur chef de mission.
- 01 Ingénieur d'étude.
- 01 Technicien topographe.
- 01 Dessinateur projeteur.
- 01 Matelot / Chauffeur.
- 02 Plongeurs.

B. Moyens matériels :

L'ensemble des équipements mobilisés pour la réalisation de la campagne comprend :

- 01 lot GPS Leica GS25 avec accessoires
- 01 échosondeur bi-fréquences CEE-ECHO
- Logiciel HYPACK pour l'acquisition et le traitement des données bathymétriques
- Logiciels AUTOCAD et COVADIS (licences propres) pour le traitement et le dessin des plans
- 01 ordinateur portable et accessoires informatiques
- Matériel de plongée sous-marine pour les inspections visuelles et les prélèvements
- 01 benne de prélèvement pour les échantillons sédimentaires
- 01 embarcation pneumatique type Zodiac
- 01 moteur hors-bord

C. Détail du système GPS Leica GS25 :

Le levé topographique a été réalisé à l'aide d'un système GPS différentiel à double fréquence, de type Leica GS25. Ce système comprend :

- 2 récepteurs bi-fréquence Leica GS25
- 2 antennes bi-fréquence compactes
- 2 radios modems
- 1 carnet de terrain
- Câbles, batteries et accessoires divers
- 1 trépied pour station de base

Annexe 2 : (Méthodologie) :

Levé topographique :

Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK) permet de mesurer un point à quelques centimètres près.

Ce récepteur mobile, porté par le topographe au moment du levé, fonctionne en mode RTK (Real Time Kinematic), résolution des ambiguïtés en mode OTF. Il reçoit les données des satellites et de la station de référence simultanément et fournit instantanément la position tridimensionnelle du point à une précision inférieure à cinq centimètres (<5 cm).

Le transfert et le traitement des données sont réalisés sur le logiciel (LeicaGeo Office).

La visualisation de ces données permet de déceler les éventuelles anomalies et de détecter les zones non couvertes. Les fichiers de sorties ainsi traités sont transférés et reportés sur dessin à l'aide du logiciel DAO Autocad.

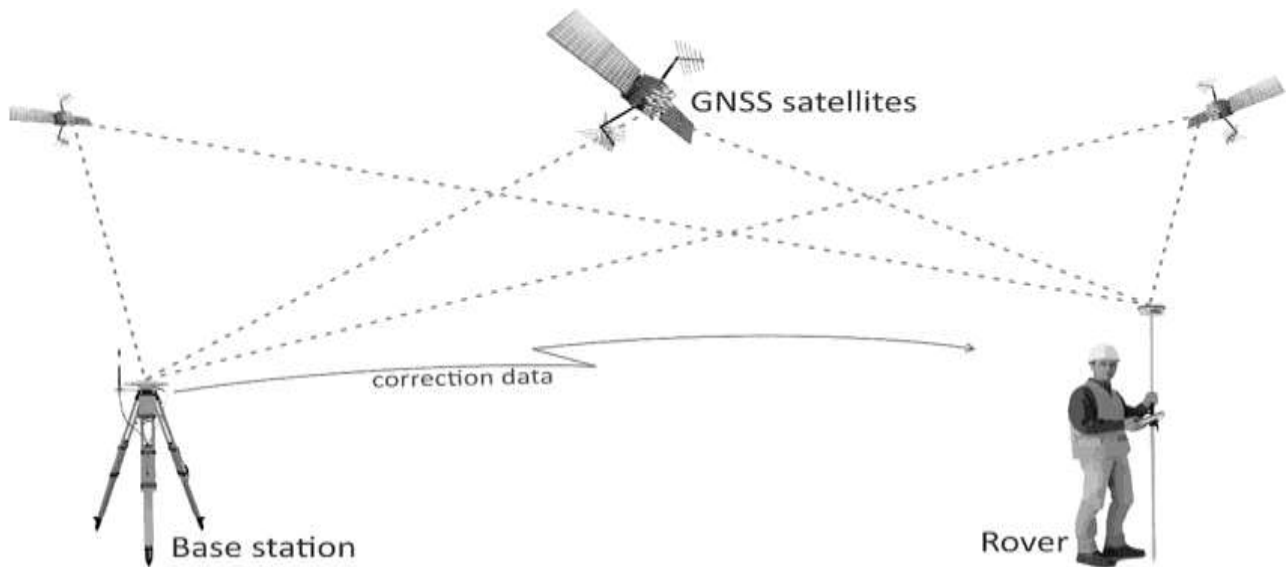


Figure 41 : Schématisations du levé topographique en mode RTK.



Figure 36 : Matériel du levé topographique.

Levé bathymétrique :

Le levé bathymétrique a pour objectif de déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin, dans le système géodésique WGS84. Il a été réalisé à l'aide d'un échosondeur bi-fréquence monté sur une embarcation pneumatique, ce type d'embarcation permet d'étudier les fonds marins de faibles profondeurs, couplé à un récepteur GPS RTK pour une précision centimétrique. Quelles que soient les variations de hauteur de la surface d'eau dues aux conditions météorologiques (vent, houle, etc.), la longueur du mât qui sépare le transducteur de l'écho sondeur de l'antenne GPS, ne changera pas.

L'embarcation a été équipée du système suivant :

- 1- Système de navigation GPS RTK permet de positionner l'embarcation avec une précision centimétrique.

Le GPS RTK (Real Time kinematic ou cinématique temps réel) utilise le même principe de correction différentielle que le DGPS. Une base dont la position est connue transmet les corrections au récepteur mobile en temps réel et en continue.

- 2- Echosondeur bi-fréquences CEE-ECHO (**Figure 43**), ce sondeur fonctionne à 200/33 kHz et permet donc la mesure instantanée de deux profondeurs (le dépôt sédimentaire et le fond du plan d'eau).
- 3- Le transducteur de l'écho sondeur est fixé à l'extrémité immergée du mât

support d'antenne GPS, donc à la verticale de celle-ci. Une tige de protection est installée à l'avant du transducteur pour le protéger d'éventuels obstacles (rochers sur le fond).



Echosondeur bi-fréquences CEE-ECHO



Transducteur de l'échosondeur bi- fréquences CEE-ECHO

Figure 37 : Le système d'acquisition et de traitement.

Le sondeur mono faisceau est le type de sondeur acoustique le plus répandu. Le sondeur émet un signal acoustique en direction du fond ; une fois que ce signal est réfléchi, son écho est reçu par le transducteur du sondeur. La vitesse du son étant connue, le sondeur calcule la distance entre le transducteur et le fond en prenant en compte le temps mis par le signal pour se refléter.

Les sondeurs bathymétriques émettent des impulsions monochromatiques de différentes fréquences (la fréquence utilisée varie selon la profondeur de l'eau).

Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK) permet de mesurer un point à quelques centimètres près. Cette précision verticale permet de déterminer les corrections du niveau de l'eau (corrections des marées au temps réel).

Donc pour la réalisation de cette tâche par GPS, il a été procédé à la mise en place du système suivant :

Une antenne GPS, qui reçoit les données des satellites, est fixée sur le point de référence. Le récepteur LEICA GS25 émet ces données par liaison radio au récepteur mobile à l'aide d'un modem interne et une antenne UHF.

Le récepteur mobile placé à bord de l'embarcation fonctionne en mode RTK (Real Time Kinematic, résolution des ambiguïtés en mode OTF). Il reçoit les données des satellites de la station de référence et fournit instantanément la position tridimensionnelle de l'antenne GPS.



Figure 38 : Transducteur Bi-fréquences embarqué sur un Zodiac.



Figure 39 : Principe du levé bathymétrique avec mono faisceau bi-fréquence.

L'embarcation est équipée d'un support vertical fixé sur le côté, qui maintient à la base le transducteur de l'échosondeur et en tête l'antenne GPS. Quel que soit la variation du plan d'eau, la longueur du support est constante, par conséquent tous les échos mesurés sont référencés par rapport à l'antenne GPS. La partie immergée du support ainsi que celle située hors de l'eau sont mesurées avant le début des levés.

Ce dispositif est interfacé par un micro-ordinateur et le logiciel de navigation et d'acquisition de données « HYPACK ».

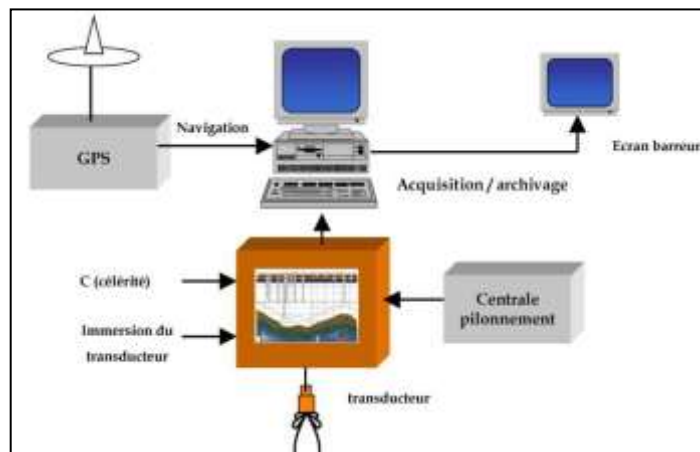


Figure 40 : Configuration du système de sondeur mono faisceau.

Le logiciel reçoit du récepteur GPS les coordonnées du point au niveau du plan d'eau, l'échosondeur calcule la profondeur à partir des mesures effectuées par le transducteur, le résultat de ces deux opérations aboutit à la connaissance des coordonnées du point bathymétrique mesuré.

Point de contrôle

Un point de contrôle est implanté à terre, ses coordonnées sont obtenues par observation statique relativement à la station de référence.

Ce point de contrôle est mesuré avant le début de chaque levé. Les coordonnées affichées sur HYPACK sont comparées avec les coordonnées réelles. Afin de pouvoir entamer les levés, l'écart tolérable obtenu suite à cette comparaison doit être inférieur à cinq centimètres (< 5 cm).

Calibrage de l'échosondeur

Le calibrage de l'échosondeur s'effectue en utilisant une plaque métallique suspendue à l'aide d'une chaîne graduée.

La plaque est immergée à une profondeur choisie par rapport au niveau du plan d'eau.

Le calibrage se fait en agissant sur la valeur de célérité (vitesse de propagation du signal dans l'eau), afin d'obtenir la profondeur affichée sur l'échosondeur égale à celle lue sur les graduations de la chaîne.

L'opération est répétée sur plusieurs profondeurs, avant d'entamer les levés.

Bilan sur les résultats

Aucun problème n'a été rencontré. Les données bathymétriques ont été assurées à plus de 99 %. La qualité de ce travail a pu être assurée par la fiabilité du matériel et par le contrôle des mesures et la calibration des équipements

Traitement des données et validation des données

Le traitement des données effectué par le sondeur bathymétrique passe par cinq points importants : le conditionnement du signal, la numérisation des données, la détection bathymétrique, le calcul de la profondeur et enfin l'affichage des données.

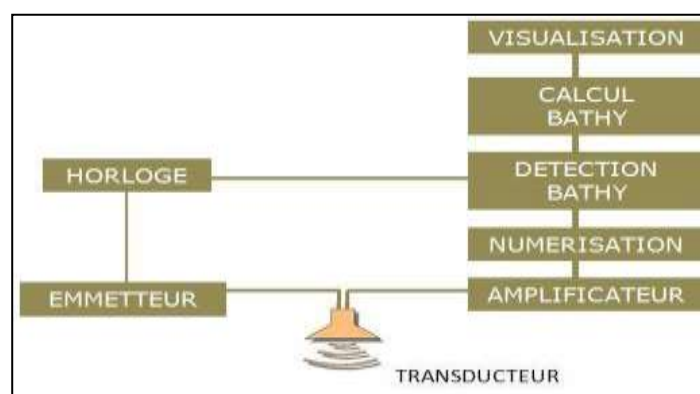


Figure 41 : Traitement des données de sondeur mono faisceau bi-fréquence.

Les données brutes acquises lors du levé bathymétrique sont traitées à l'aide du logiciel HYPACK avec le module Single Beam, où il a été procédé au filtrage des données, élimination des sondes résultantes de fausses mesures dues au bruit et édition du fichier Bathy *.XYZ.

Après édition des données, un contrôle de qualité a été effectué avec le module Cross Statistics du logiciel Hypack, ce test consiste à vérifier la justesse des données en comparant avec d'autre sonde de contrôle.

La souplesse du logiciel permet de générer un modèle numérique du terrain MNT des données traitées grâce auquel sont visualisées les isobathes qui permettent de vérifier les données sur la base de la forme des courbes générées.

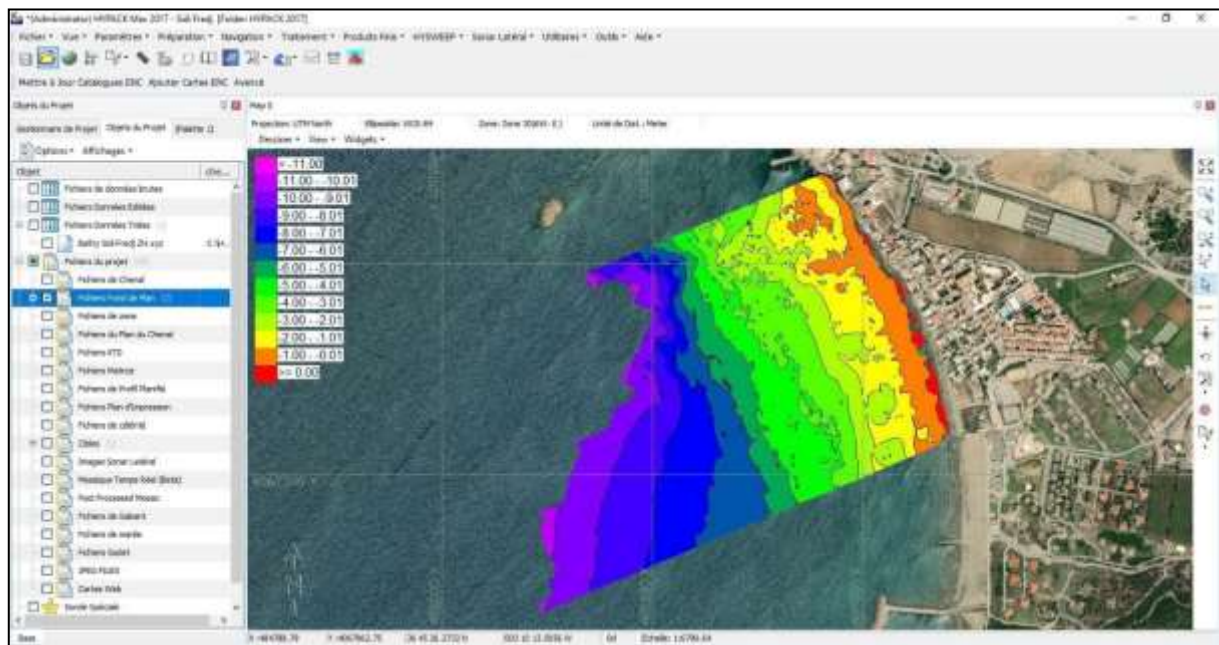
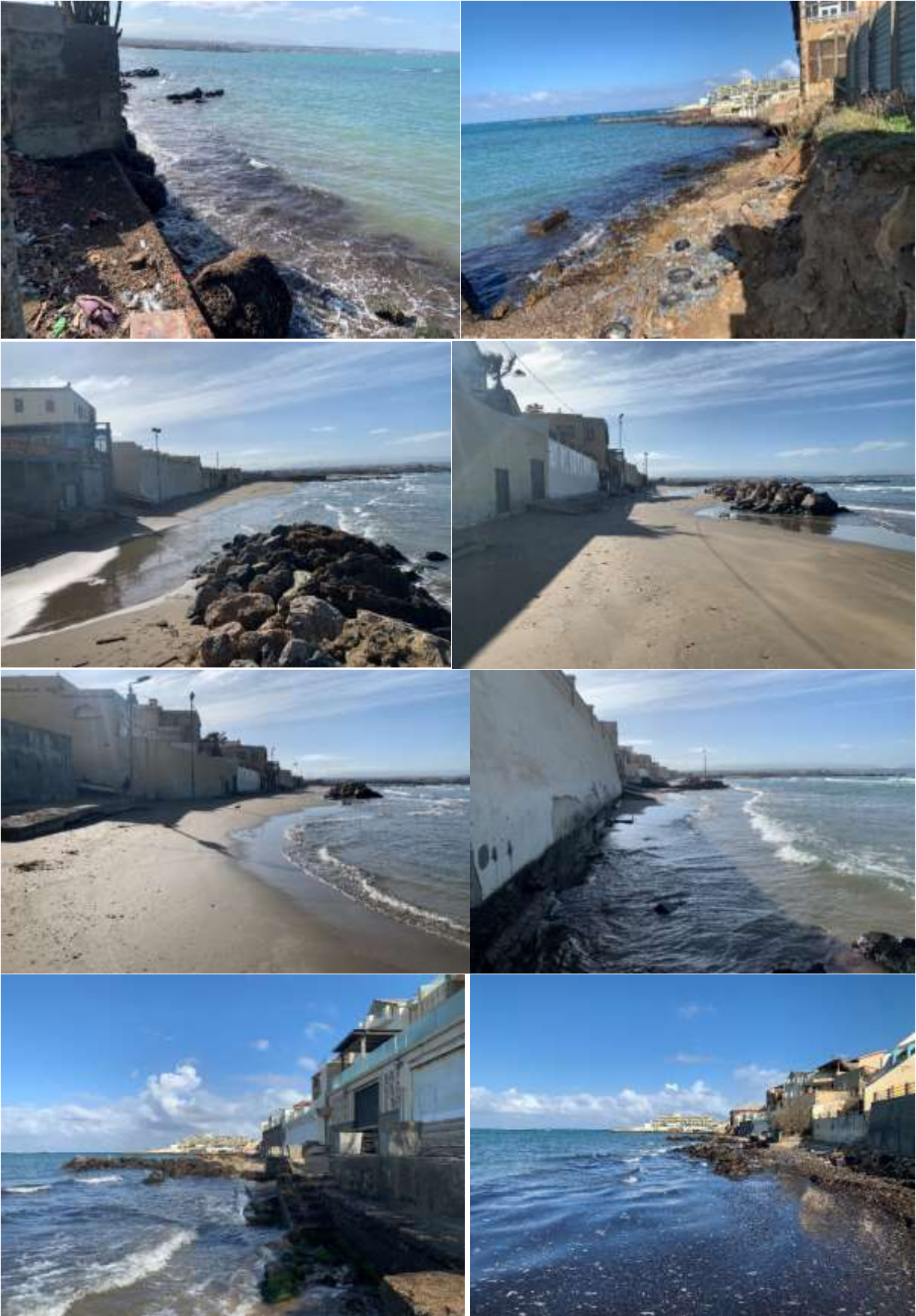
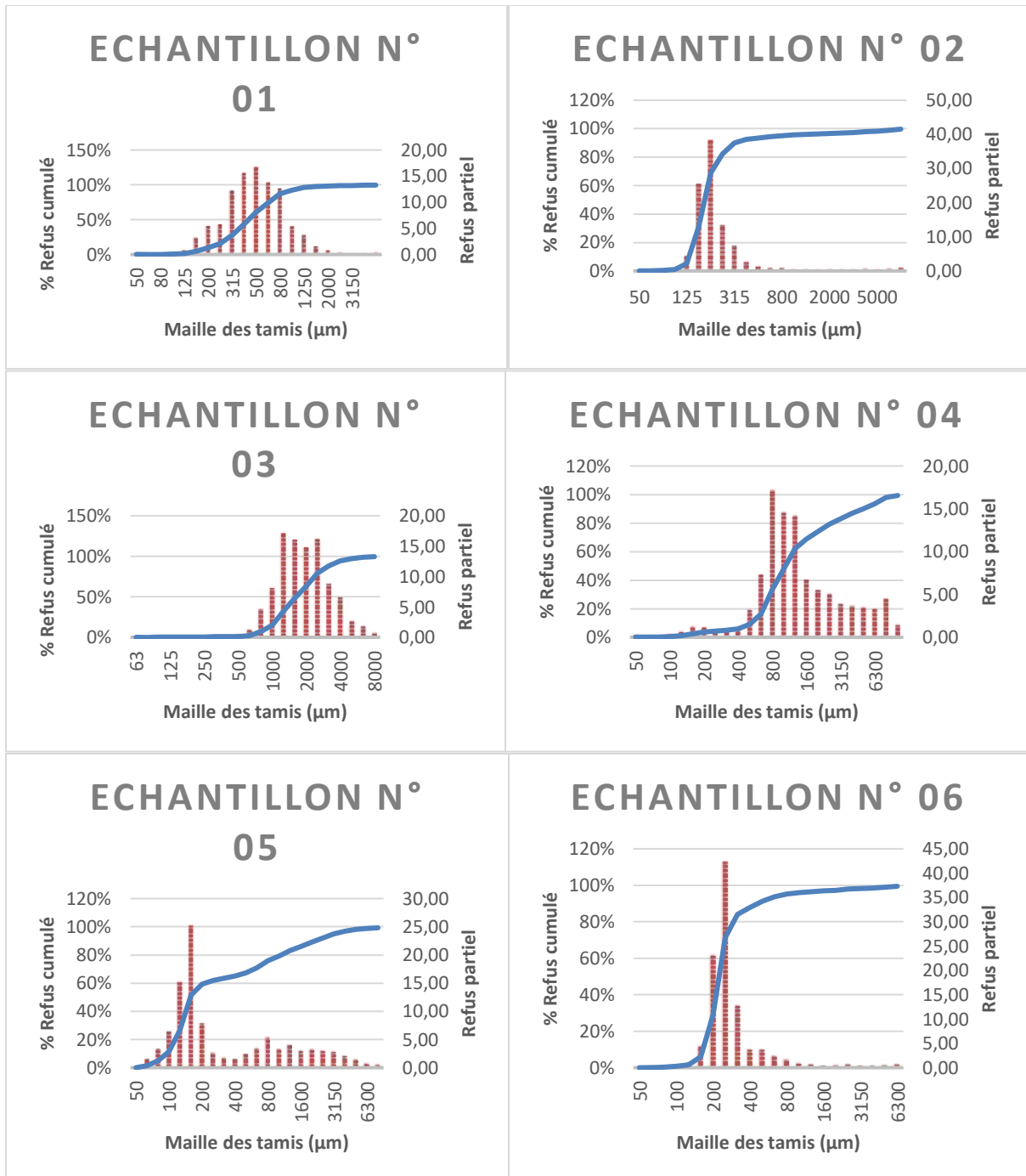


Figure 42 : Traitement des données avec le Logiciel Hypack.

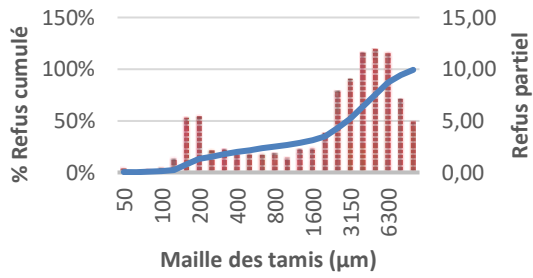
Annexe 3 : (Photographies de terrain) :



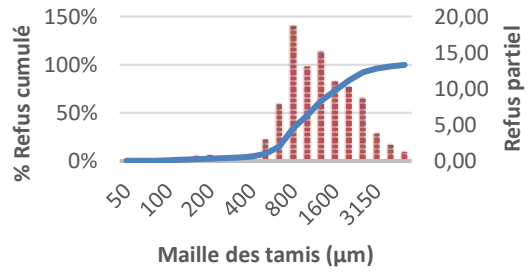
Annexe 4 : (Courbes cumulatives) :



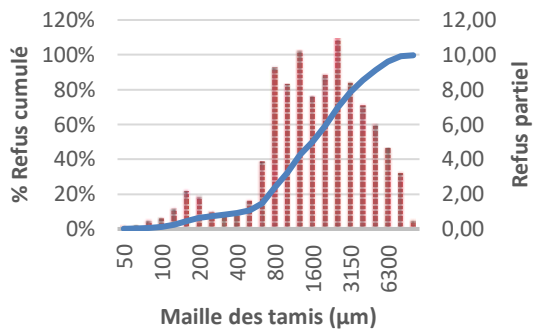
ECHANTILLON N° 07



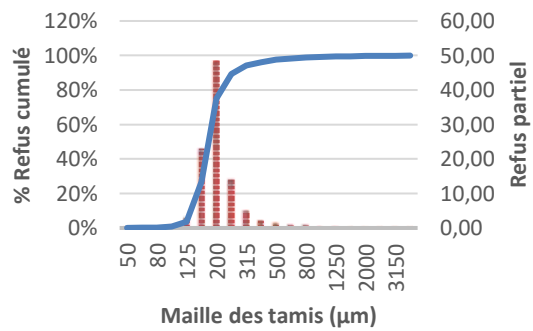
ECHANTILLON N° 09



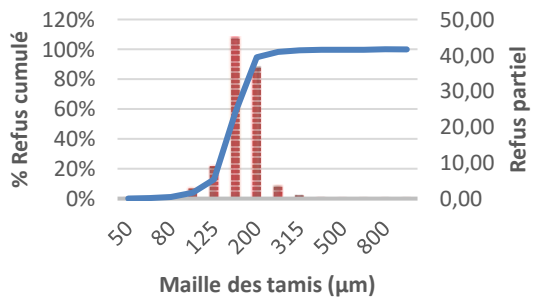
ECHANTILLON N° 10



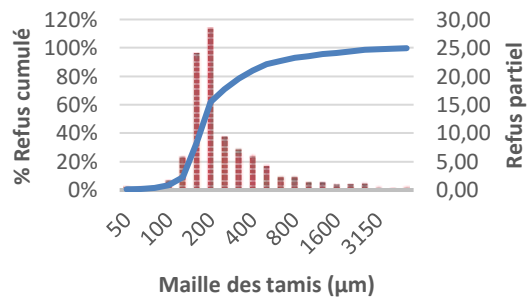
ECHANTILLON N° 11



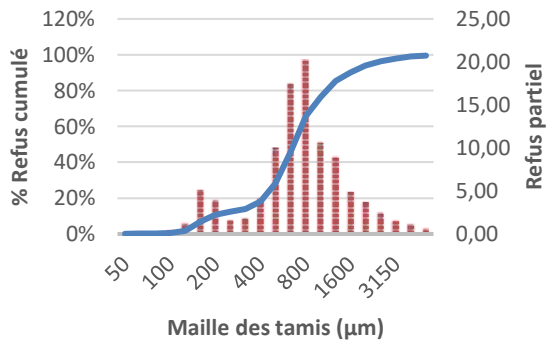
ECHANTILLON N° 12



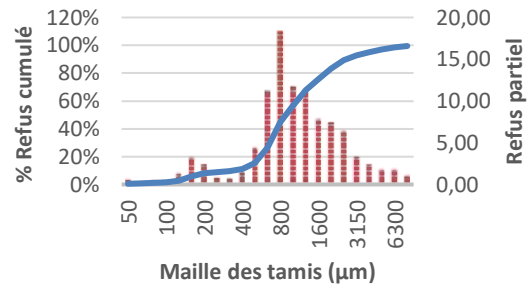
ECHANTILLON N° 13



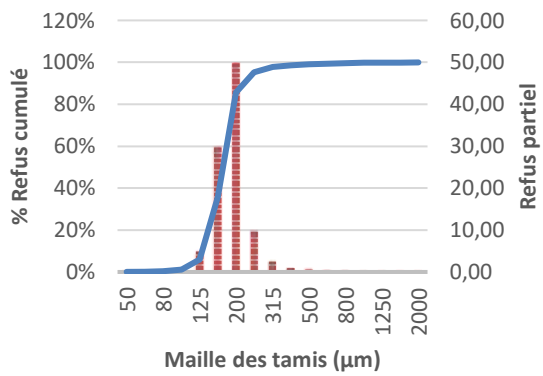
ECHANTILLON N° 14



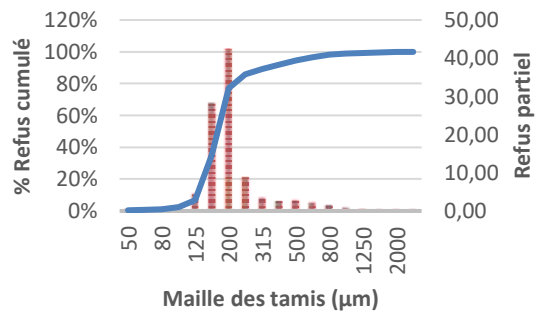
ECHANTILLON N° 15



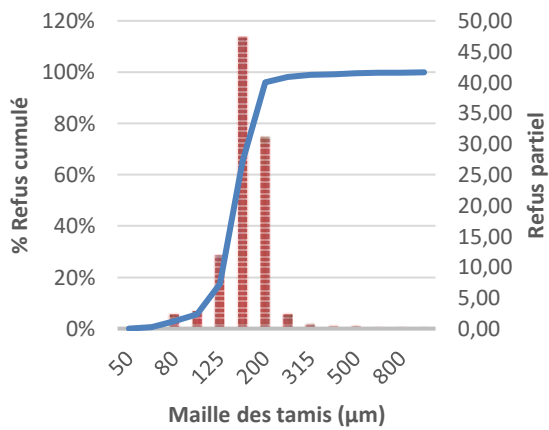
ECHANTILLON N° 16



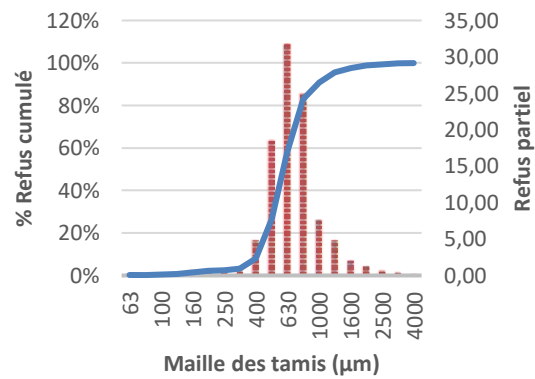
ECHANTILLON N° 17



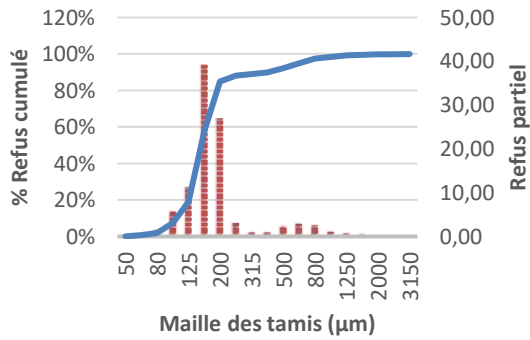
ECHANTILLON N° 18



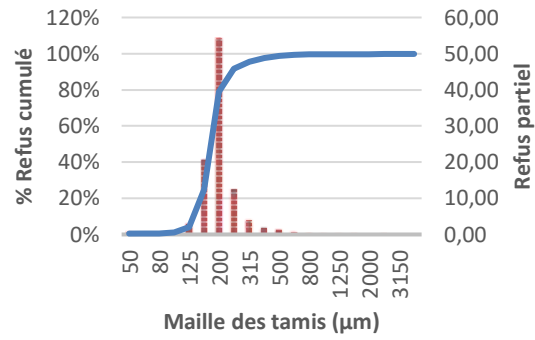
ECHANTILLON N° 19



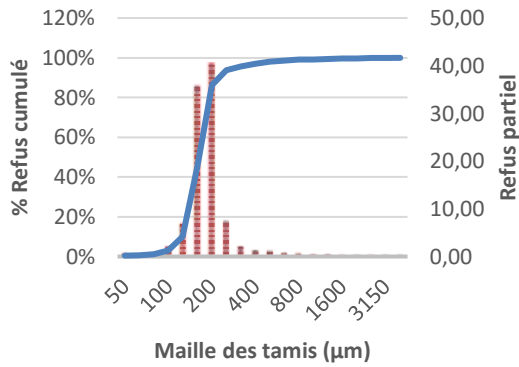
ECHANTILLON N° 20



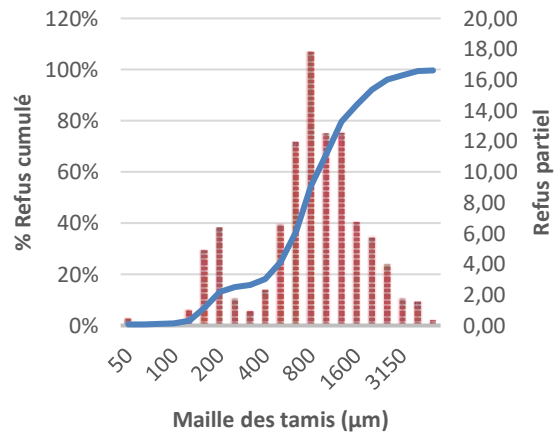
ECHANTILLON N° 21



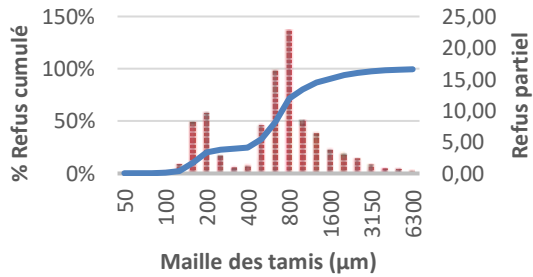
ECHANTILLON N° 22



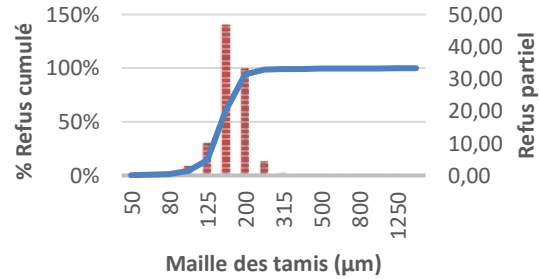
ECHANTILLON N° 23



ECHANTILLON N° 24



ECHANTILLON N° 25



Annexe 5 : (Tableau de résultats granulométriques des échantillons prélevés) :

N° Ech	X	Y	D50	D90	D16	D84	D25	D75	Périte
1	485885.1654	4068168.002	436.5	908.7	250,5	757	250,5	639,3	1%
2	485774.6919	4068121.391	180	321.6	139,5	262,5	151,4	221,3	2%
3	485664.0499	4068074.709	1640	3390.3	1010,5	2832	1138,8	2358,5	1%
4	485553.5526	4068028.089	1033	4951.6	622,5	3295,5	712,8	2069,4	1%
5	485444.3844	4067982.029	157.5	2123.8	107,5	1315	122,6	764,2	9%
6	485946.8117	4068032.374	224.5	461	177	313,5	192,4	267,5	2%
7	485837.0401	4067985.506	2995	6640.6	265,5	5911	815,6	4947,1	1%
8	485726.4984	4067938.31	Roche	Roche	Roche	Roche	Roche	Roche	Roche
9	485615.6187	4067891.951	1044.5	2353.5	635,5	2005	714,6	1659,5	1%
10	485507.463	4067844.792	1584	4750.3	651	3800,5	714,6	1659,5	7%
11	486044.6725	4067912.311	179.5	260.1	143,5	231	825,8	2880,2	2%
12	485935.5927	4067865.21	154	194.2	127,5	188	157,2	199,9	2%
13	485825.1431	4067817.517	183.5	588.5	135,5	394	133,6	177,4	3%
14	485716.1443	4067770.45	665	1578.6	350,5	1203,5	147,6	285,1	1%
15	485606.72	4067723.2	886.5	2609.1	509	2053	466,4	970,6	1%
16	486102.1736	4067772.407	171.5	221.4	136,5	198,5	614,8	1569,7	2%
17	485993.3708	4067725.993	174.5	336.7	137	238	146,4	190,7	2%
18	485882.5864	4067678.733	149	191.7	121,5	184,5	147,1	173,5	3%
19	485773.9075	4067632.372	596	978.2	443	816,5	130	172,1	1%
20	485663.9302	4067585.457	153	404.7	118,5	198,5	492,4	740,6	2%
21	486132.6122	4067623.594	177.6	243.2	145,5	219	130	184,2	2%
22	486024.5413	4067576.857	164.5	224.1	131	197,5	160,4	196,8	2%
23	485913.8929	4067529.005	756	1846.6	322	1467	139	188	1%
24	485805.9987	4067482.344	636.5	1540.5	183,5	1131	505,4	1153,9	2%
25	485695.9341	4067434.744	152	194.4	126,5	187,5	402,6	870,1	2%

Positionnement des sondages à la lance					
N° de point	Coordonnées du point		Profondeur d'eau (m) (ZH)	Pénétration	Nature du fond
	X (UTM)	Y (UTM)			
SL1	485897.866	4068099.74	-1	0.05	Roche Naturel
SL2	485833.869	4068067.6	-1.14	0.05	Roche Naturel
SL3	485744.673	4068034.55	-2.25	0.10	Roche Naturel
SL4	485672.132	4068000.87	-2.80	00	Roche Naturel
SL5	485932.519	4067413.42	-4.20	00	Roche Naturel
SL6	485997.059	4067978.27	-0.50	0.30	Sable
SL7	485917.889	4067944.29	-1.58	0.60	Roche Naturel
SL8	485822.443	4067904.37	-3.15	00	RN + Posidonie
SL9	485746.207	4067868.47	-3.68	0.30	Sable
SL10	486001.46	4067429.91	-3.33	0.60	Sable
SL11	486077.396	4067851	-0.25	0.80	Sable
SL12	485998.918	4067816.78	-1.98	0.90	Sable
SL13	485903.564	4067776.37	-2.90	0.50	Sable
SL14	485805.848	4067733.91	-4.50	00	Roche Naturel
SL15	486086.953	4067458.5	-2.87	0.80	Sable
SL16	486144.254	4067715.13	-0.04	0.90	Sable
SL17	486066.053	4067681.6	-2.19	0.80	Sable
SL18	485970.365	4067641.61	-2.95	0.60	Sable
SL19	485872.968	4067599.87	-4.32	0.30	Sable + RN
SL20	486161.296	4067475.55	-0.40	0.90	Sable
SL21	486151.662	4067556.92	-0.26	0.90	Sable
SL22	486094.831	4067542.12	-2.17	0.60	Sable
SL23	486015.153	4067515.83	-2.25	0.40	Sable
SL24	485924.638	4067488.5	-4.01	00	Roche Naturel

Résumé :

L'étude réalisée sur la plage ouest de Sidi Fredj (760 m) s'inscrit dans un contexte de forte érosion côtière, provoquant un recul du trait de côte et menaçant directement les habitations et infrastructures implantées en bordure de mer. Des campagnes de mesures (topographiques, bathymétriques, morphologiques et sédimentologiques), associées à la modélisation des processus hydrosédimentaires, ont permis de caractériser les dynamiques littorales en présence. Sur la base de ces analyses, plusieurs solutions de protection ont été proposées : des ouvrages de stabilisation (épis, brise-lames), des protections lourdes (enrochement, géotubes en géotextile) et des opérations de rechargement de sable, afin de stabiliser durablement le rivage tout en limitant les impacts environnementaux.

تم إجراء الدراسة على الشاطئ الغربي لسيدي فرج (بطول 760 مترًا) في سياق يشهد تآكلًا ساحليًا حادًا، مما أدى إلى تراجع خط الساحل وتهديد مباشر للمساكن والبنى التحتية الواقعة على حافة البحر. وقد سمحت حملات القياس (الطبوغرافية، القياسات الأعماقية، المورفولوجية والحبيبية)، بالإضافة إلى نمذجة العمليات الهيدروديناميكية والرسوبية، بتحديد ديناميكيات السواحل القائمة. واستنادًا إلى هذه التحاليل، تم اقتراح عدة حلول للحماية: منشآت تثبيت (أصابع، كواسر أمواج)، حماية ثقيلة (صخور ضخمة، أنابيب جيولوجية من النسيج الجيولوجي)، وعمليات تغذية بالرمل بهدف تثبيت الشاطئ بشكل مستدام مع تقليل الآثار البيئية إلى أدنى حد.

The study carried out on the western beach of Sidi Fredj (760 m) takes place in a context of severe coastal erosion, causing shoreline retreat and directly threatening the houses and infrastructures located along the seafront. Measurement campaigns (topographic, bathymetric, morphological, and sedimentological), combined with modeling of hydro-sedimentary processes, allowed for the characterization of the existing coastal dynamics. Based on these analyses, several protection solutions have been proposed: stabilization structures (groynes, breakwaters), heavy protections (rock armoring, geotextile geotubes), and sand nourishment operations, in order to sustainably stabilize the shoreline while minimizing environmental impacts.