

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



THÈSE DE DOCTORAT 3^{ème} cycle LMD

Présentée par:

Karima REMMACHE

Pour l'obtention du grade de

Docteur

Domaine: Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géographie et Aménagement du Territoire

Spécialité : Environnement Marin et Littoral

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION TRÈS HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTUDE DIACHRONIQUE DES PLAGES DE LA RÉGION CENTRE ALGÉRIENNE

Soutenu publiquement le 18-02-2023 devant le jury composé de:

LOUANCHI Ferial	Professeur	ENSSMAL	Présidente du jury
BACHARI Nour El Islam	Professeur	USTHB	Directeur de thèse
HOUMA Fouzia	Professeur	ENSSMAL	Co-Directeur de thèse
MAZOUAR Khoudir	Professeur	ENSSMAL	Examineur
GRIMES Samir	Professeur	ENSSMAL	Examineur
SAMRA Safia	Professeur	ENSM	Examinatrice
AYACH Mohamed	Chercheur	LSCE (France)	Invité

T
H
È
S
E

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement	i
Résumé	iii
Table des Matières	iv
Liste des Figures	vii
Liste des Tableaux	xi
Liste des Abréviations	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
ZONE D'ÉTUDE	6
Contexte Géographique et Géomorphologique	6
Bathymétrie et Modèle Numérique de Terrain	9
Hydrodynamisme	12
<i>Le vent</i>	20
<i>Dérive littorale</i>	20
<i>Transport sédimentaire</i>	20
<i>Courantologie</i>	21
1 TELEDETECTION & CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE CÔTE	23
1.1 INTRODUCTION	23
1.1.1 Résolutin d'image satellite	25
1.1.2 Les images Très Haute Résolution	26
1.1.3 Cartographie du trait de côte	27
1.1.4 La ligne de référence adoptée	28
1.2 METHODOLOGIE	28
1.2.1 Création de la base de données	30
1.2.2 La base de données	31
1.2.3 Traitement de la base de données	32
1.3 RESULTATS	35
1.4 DISCUSSION	56
1.5 CONCLUSION	59
2 ETUDE DIACHRONIQUE DES PLAGES	62

2.1	INTRODUCTION	62
2.2	METHODOLOGIE	63
2.3	RESULTATS	64
2.3.1	La côte centre algérienne	64
2.3.2	La région de Zeralda	71
2.4	DISCUSSION	86
2.5	CONCLUSION	88
3	ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	91
3.1	ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	91
3.1.1	INTRODUCTION	91
3.1.2	Objectifs	93
3.1.3	Choix de sites d'échantillonnage	93
3.1.4	Sortie sur terrain	95
3.1.5	Méthodologie d'échantillonnage	96
3.2	ANALYSE GRANULOMETRIQUE	98
3.2.1	Analyse au laboratoire	98
3.2.2	Traitement des données	99
3.2.3	Distributions granulométriques	99
3.2.4	Calculs des moments statistiques	100
3.2.5	Analyse granulométrique de la fraction fine	101
3.2.6	Analyse granulométrique de la fraction grossière	103
3.2.7	Diagramme triangulaire et faciès granulométriques	117
3.2.8	INTERPRETATION	119
3.2.9	DISCUSSION	121
3.2.10	CONCLUSION	123
3.3	ANALYSE MINERALOGIQUE	125
3.3.1	CREATION DE LA BASE DE DONNEES	127
3.3.2	Préparation des échantillons pour la minéralogie totale	127
3.3.3	Conditions d'analyses	127
3.3.4	TRAITEMENT	128
3.3.5	La Diffraction des Rayons X (DRX)	128
3.3.6	Principe de la DRX	128
3.3.7	La reconnaissance qualitative et quantitative des minéraux	129
3.3.8	Quantification des phases avec des structures cristallines partiellement connues ou inconnues	130
3.3.9	RESULTATS	131
3.3.10	Répartition des minéraux lourds au niveau	142
3.3.11	DISCUSSION	144
3.3.12	CONCLUSION	146
	CONCLUSION GÉNÉRALE	149
	Annexes	155
	Bibliographie	157

TABLE DES FIGURES

1	Organigramme de la méthode utilisée	5
2	Situation géographique de la zone d'étude.	6
3	Délimitation des deux communes Zeralda et Staoueli.	7
4	Situation géographique des deux communes Zeralda et Staoueli.	8
5	Carte représentant la bathymétrie et la topographie de la région centre algérienne.	11
6	Composantes d'un système morphodynamique côtier [24]	13
7	Carte représentant la hauteur significative des vagues pour le mois de Février 2019.	14
8	Carte représentant la hauteur significative des vagues pour le mois de Septembre 2019.	14
9	Carte représentant la célérité des vagues pour le mois de Février 2019.	16
10	Carte représentant la célérité des vagues pour le mois de Septembre 2019.	16
11	Carte représentant l'énergie de la houle pour le mois de février 2019.	17
12	Carte représentant l'énergie de la houle pour le mois de Septembre 2019.	17
13	Carte représentant l'énergie transmise par la houle pour le mois de Février 2019.	18
14	Carte représentant l'énergie transmise par la houle pour le mois de Septembre 2019.	18
15	Carte représentant l'écartypre pour l'année 2019.	19
16	Carte représentant la moyenne pour l'année 2019.	19
1.1	Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après Shepard (1973) [51]	27
1.2	Exemples de proxys de la position du trait de côte.	28
1.3	Méthodologie générale pour mesurer la récession/accrétion du trait de côte.	29
1.4	Rectification de l'image ancienne par l'image de référence [55].	33
1.5	Etapas d'extraction du trait de côte.	34
1.6	Image mode RGB transformée en trait de côte par le nouvel algorithme proposé.	34
1.7	Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Tipaza (Secteur de Chenoua) entre 2002 et 2019.	36
1.8	Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Tipaza (Secteur de Kouali) entre 2002 et 2019.	37
1.9	Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Douaouda entre 2002 et 2019.	38
1.10	Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Ain Tagourait entre 2002 et 2019	39

1.11 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Zeralda entre 2002 et 2019.	40
1.12 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Staouali entre 2002 et 2019.	41
1.13 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Cheraga entre 2002 et 2019	42
1.14 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Ain Benian (côte sableuse)entre 2002 et 2019	43
1.15 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Kouba entre 2002 et 2019.	44
1.16 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Bordj El Kiffan (Secteur Ouest) entre 2002 et 2019.	45
1.17 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Bordj El Kiffan (Secteur centre) entre 2002 et 2019	46
1.18 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de bordj el kifan (Secteur Est) entre 2002 et 2019.	47
1.19 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Haraoua entre 2002 et 2019.	48
1.20 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Réghaia entre 2002 et 2019.	49
1.21 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Boudouaou El Bahri entre 2002 et 2019.. . . .	50
1.22 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Corso entre 2002 et 2019.	51
1.23 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Boumerdes entre 2002 et 2019.	52
1.24 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Thenia entre 2002 et 2019.	53
1.25 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Zemmouri entre 2002 et 2019.	54
1.26 Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Ain Benian (Côte rocheuse) et de la commune de Bouzareah entre 2002 et 2019.	55
2.1 Représentation de la surface des plages de la région de Bou Ismail en 2020	66
2.2 Représentation de la surface des plages de la région d'Alger en 2020 . . .	67
2.3 Représentation de la surface des plages de la région de Zemmouri en 2020	68
2.4 Représentation de la surface des plages de la région de Bou Ismail en 2020	69
2.5 Représentation de la surface des plages de la région d'Alger en 2020. . . .	69
2.6 Représentation de la surface des plages de la région de Zemmouri en 2020.	69
2.7 Représentation des traits de côte des dates différentes et des transects générés sur une partie de la zone étudiée.	72
2.8 Localisation des 8 stations des roses des vagues près de notre zone d'étude.	73
2.9 Représentation des roses de vagues (la direction et la hauteur significative)	74
2.10 Localisation des 4 stations des roses des vagues près de notre zone d'étude.	75
2.11 Représentation des évolutions du trait de côte le long de notre zone d'intérêt.	77

2.12	Représentation des valeurs d'EPR et du LRR pour tous les transects de la zone d'étude.	79
2.13	Corrélation des valeurs EPR et LRR calculés le long de tous les transects.	79
2.14	surfaces des plages de la commune de Zeralda 2019.	81
2.15	Surfaces des plages de la commune de Staoueli 2019.	81
2.16	Bilan surfacique d'érosion/accrétion pour les plages des deux communes Zeralda et Staoueli sur une série temporelle entre 2002 et 2019.	82
2.17	Les valeurs de NSM indiquant l'érosion / l'accrétion de la plage khaloufi.	83
2.18	les valeurs de NSM indiquant l'érosion / l'accrétion de la plage Corso.	84
3.1	Diagramme schématique illustrant les différentes étapes de l'étude sédimentologique	94
3.2	Localisation des stations d'échantillonnage pour la plage Khaloufi.	95
3.3	Localisation des stations d'échantillonnage pour la plage Corso.	96
3.4	Répartition spatiale de la fraction fine pour la plage Khaloufi.	102
3.5	Histogramme représentant la teneur en fraction fine de chaque station pour la plage Khaloufi.	102
3.6	Répartition spatiale de la fraction fine pour la plage Corso.	103
3.7	Histogramme représentant la teneur en fraction fine de chaque station pour la plage Corso.	103
3.8	Carte de répartition du mode pour chaque station dans la plage Khaloufi.	104
3.9	Carte de répartition du mode pour chaque station dans la plage Corso.	105
3.10	Carte représentant la répartition spatiale du grain moyen pour la plage Khaloufi.	106
3.11	Carte représentant les normes du grain moyen pour la plage Khaloufi.	106
3.12	Carte représentant la répartition spatiale du grain moyen pour la plage Corso.	107
3.13	Carte représentant les normes du grain moyen pour la plage Corso.	107
3.14	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice de classement pour la plage Khaloufi.	108
3.15	Carte représentant les normes de l'indice de classement pour la plage Khaloufi.	109
3.16	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice de classement pour la plage Corso.	109
3.17	Carte représentant les normes de l'indice de classement pour la plage Corso.	110
3.18	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'asymétrie pour la plage Khaloufi.	111
3.19	Carte représentant les normes de l'indice d'asymétrie pour la plage Khaloufi.	111
3.20	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'asymétrie pour la plage Corso.	112
3.21	Carte représentant les normes de l'indice d'asymétrie pour la plage Corso.	112
3.22	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'aplatissement pour la plage Khaloufi.	113
3.23	Carte représentant les normes de l'indice d'aplatissement pour la plage khaloufi.	114
3.24	Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'aplatissement pour la plage Corso.	114

3.25	Carte représentant les normes de l'indice d'aplatissement pour la plage Corso.	115
3.26	La répartition spatiale du coefficient d'uniformité pour la plage Khaloufi.	116
3.27	Carte représentant la norme du coefficient d'uniformité pour la plage Khaloufi.	116
3.28	La répartition spatiale du coefficient d'uniformité pour la plage Corso. . .	117
3.29	Carte représentant la norme du coefficient d'uniformité pour la plage Corso.	117
3.30	Diagramme triangulaire -Sable-Silt-Argile- représentant les faciès granulométriques de l'ensemble des sédiments superficiels prélevés sur la plage Khaloufi.	118
3.31	Diagramme triangulaire -Sable-Silt-Argile- représentant les faciès granulométriques de l'ensemble des sédiments superficiels prélevés sur la plage Corso.	119
3.32	Diagramme schématique résumant les différentes étapes de l'analyse minéralogique.	126
3.33	Principe de diffraction des rayons X (DRX) par les atomes maillant la structure cristalline d'un minéral donné, avec d la distance interréticulaire entre les plans cristallographiques $P - P'$ et $P' - P''$, θ l'angle de Bragg. . .	129
3.34	Représentation du score des minéraux pour chaque échantillon	132
3.35	Représentation des pourcentages des minéraux pour chaque échantillon .	132
3.36	Carte représentant la répartition spatiale des pourcentages de Quartz sur la surface de la plage Khaloufi.	133
3.37	Carte représentant la répartition spatiale des pourcentages de Calcite sur la surface de la plage Khaloufi	134
3.38	Représentation des scores des ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Khaloufi.	136
3.39	Représentation des pourcentages en ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Khaloufi.	136
3.40	Carte représentant les Scores des minéraux pour la plage Corso	137
3.41	Carte représentant les pourcentages des minéraux pour la plage Corso . .	137
3.42	Carte représentant la répartition spatiale du Quartz pour la plage Corso .	138
3.43	Carte représentant la répartition spatiale de la Calcite pour la plage Corso	139
3.44	Carte représentant la répartition des Feldspaths pour la plage Corso . . .	139
3.45	Carte représentant la répartition des Microclines pour la plage Corso . .	140
3.46	Carte représentant la répartition de l'Orthoclase pour la plage Corso . . .	140
3.47	Carte représentant la répartition des plagioclases pour la plage Corso . .	140
3.48	Représentation des scores des ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Corso.	141
3.49	Représentation des pourcentages en ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Corso.	141

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison des avantages et des inconvénients des trois méthodes de téléchargement des images Google Earth pro.	31
1.2	Bilan par zone des images satellitaires de la région centre algérienne téléchargées de Google Earth via Smart GIS Software.	32
2.1	Variations de la hauteur significative des vagues et des directions enregistrées pour huit stations.	75
2.2	Variations de la hauteur significative des vagues pour quatre stations près de la plage Corso.	76
2.3	Représentation des variations du NSM et EPR du trait de côte le long de notre zone d'intérêt	78
2.4	Estimation des erreurs de la position et la période de calcul du taux de changement pour chaque ligne de rivage	86

LISTE DES ABRÉVIATIONS

<i>BP</i>	Beach Profile
<i>DRX</i>	Diffraction des rayons X
<i>DSAS</i>	Digital Shoreline Analysis System
<i>Ed</i>	Erreur de numérisation
<i>EPR</i>	End Point Rate
<i>ESRI</i>	Environmental systems Research Institute
<i>Et</i>	Erreur totale
<i>ETM</i>	Eléments en trace métalliques
<i>ETM+</i>	Enhanced Thematic Mapper Plus
<i>Ev</i>	Photo incertitude de position niveau de la marée haute
<i>HM</i>	Minéraux Lourds
<i>HWL</i>	Ligne des hautes eaux
<i>IFOV</i>	Instantaneous Field Of View
<i>KG</i>	Indice d'aplatissement
<i>LRR</i>	Taux de régression linéaire
<i>MNT</i>	Modèle numérique de terrain
<i>MSS</i>	Multi Spectral Scanner
<i>Mz</i>	La taille moyenne des grains
<i>NSM</i>	Net Shoreline Movement
<i>OLI</i>	Operational Land Imager
<i>Q50</i>	La médiane (deuxième quartile)
<i>RMSE</i>	Root Mean Square Error
<i>RS</i>	Remote Sensing : Télédétection
<i>SIG</i>	Systèmes d'information géographique
<i>Ski</i>	Indice d'symétrie

SO Indice de classement

SWAN Modèle de simulation rétrospective de vagues

THRS Les images de très haute résolution

TM Thematic mapper

U Coefficient d'uniformité

UTM La projection cartographique Mercator transversale universelle

WGS Le datum du système géodésique mondial

WLR Régression linéaire pondérée

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La zone côtière est l'un des milieux les plus dynamiques dans le monde, car c'est là que différentes géosphères interagissent. Se déroulant à différentes échelles de temps, ces interactions provoquent une reconstruction dynamique du littoral, appelée morphodynamique côtière. Les facteurs responsables de l'évolution de la zone côtière peuvent être regroupés en facteurs géologiques et géomorphologiques, hydrodynamiques, biologiques, climatiques et anthropiques [1]. La zone côtière est un terme général qui décrit la zone sous l'influence des processus côtiers, tels que l'érosion côtière [2], dont il y a eu une augmentation de l'impact des aléas côtiers en raison du degré élevé d'occupation côtière et d'une réduction des apports sédimentaires fluviaux. Comprendre et prévoir l'évolution du littoral le long des côtes sablonneuses est d'une importance primordiale pour les gestionnaires côtiers et les décideurs [3]. Une évaluation des risques dans une zone côtière nécessite la connaissance de l'aléa et de ses impacts [4]. L'élévation du niveau de la mer, les niveaux d'eau élevés des ondes de tempête, les vagues de tempête à haute énergie, l'épuisement des bilans sédimentaires des rivières et la construction de digues sont tous capables de provoquer un changement de plage à grande échelle. Comme l'évolution du littoral est l'effet combiné des activités naturelles et humaines, qui varient dans l'espace et dans le temps, les modèles numériques de terrain sont essentiels pour comprendre le comportement de changement du littoral qui conduira à terme à une gestion intégrée des zones côtières.

De plus, l'extraction d'une carte bathymétrique pour la zone côtière sera importante car elle réduira le coût des études de terrain nécessaires pour poursuivre différentes études de modélisation morphodynamique [5]. La réponse des zones côtières à l'élévation du niveau de la mer dépend de la nature du cadre géologique, de la topographie et des caractéristiques physiques de la zone côtière. En outre, les zones côtières plates sont plus vulnérables aux inondations par l'eau de mer que les côtes à forte pente. De plus, les hautes vagues véhiculent plus d'énergie et ont un impact dévastateur sur les côtes que les basses vagues [2]. Pour extraire et analyser une caractéristique côtière, le système d'information géographique (SIG) et la télédétection (RS) sont souvent intégrés. Par conséquent, une

cartographie précise de la position instantanée du littoral a souvent été associée à une incertitude importante [6]. Pour détecter les changements dans la région côtière, y compris le littoral, les données de télédétection soutiennent et remplacent les enquêtes par ses performances répétitives et plus rentables [7]. La technologie de télédétection présente les avantages d'une large couverture, d'une imagerie instantanée, d'une résolution spatiale élevée, d'une courte période de revisite et d'une acquisition rapide des données, et elle est maintenant largement utilisée dans la détection des changements ([8]; [9]) Sur une grande échelle. La disponibilité d'images multi-bandes, multi-temporelles et multi-capteurs et les progrès du traitement et de l'analyse numériques ont permis aux scientifiques de recueillir des informations sur les changements spatiaux et temporels et sur la sensibilité des altérations dues aux événements naturels et anthropiques [10]. Les conditions climatiques influencent grandement l'afflux de matériaux dans la zone côtière, en déterminant la quantité et l'origine des matériaux terrigènes fournis à la zone côtière ainsi que la quantité de matériaux biogéniques produits et fournis aux sédiments [1]. Les côtes sablonneuses sont des milieux complexes soumis à une grande variété de phénomènes qui jouent un rôle fondamental dans le risque d'exposition à l'érosion côtière et qui contribuent à des effets et des bilans sédimentaires négatifs ([11]; [12]; [13]). Cependant, le forçage anthropique, comme les rechargements de plage ou la mise en place de structures dures qui perturbent les voies sédimentaires, peut également avoir un impact profond sur la variabilité du littoral [14].

L'imagerie satellitaire accessible au public peut désormais être utilisée gratuitement pour fournir des données à court terme à plusieurs décennies sur le littoral, de l'échelle locale à mondiale, en utilisant diverses techniques (par exemple [15]; [16]). Ensuite, parmi les différents proxys du littoral [17], la frontière humide/sec est clairement identifiée sur les images satellitaires par les différentes couleurs de sable lors du processus de séchage. Parce qu'elle est plus sensible aux fluctuations du run-up qu'aux variations astronomiques des marées. L'espace côtier de la côte algérienne concentre un maximum d'enjeux et de risques tant sur le plan écologique que physique. La mobilité des sédiments constitue un obstacle important pour la compréhension de la dynamique côtière. La capacité de résilience des plages fait qu'il y'a une alternance entre érosion et engraissement permettant de rééquilibrer autant que possible les plages [18]. Le littoral est dynamique et subit de fréquentes évolutions, à court et à long termes, causés par des changements hydrodynamiques, des changements géomorphologiques et d'autres facteurs [19]. Outre la variabilité des phénomènes naturels, les ouvrages qui s'y développent affectent directement la côte en changeant son rivage et sa direction [20]. A toutes ces actions s'ajoutent la dégradation des dunes bordières à cause de l'extension de l'urbanisation touristique et balnéaire à

leur niveau et la perturbation du transit sédimentaire suite aux aménagements portuaires et l'installation des ouvrages de protection [21].

Les demandes d'observation d'un plus grand territoire avec une meilleure précision se font sentir de plus en plus. Avec l'avènement des images de THRS, l'extraction des structures linéaires est facilitée et permet une meilleure identification des différents objets géographiques. Cependant, cette précision génère du bruit dû au capteur, au contexte à des artefacts qui rendent difficile l'extraction. Par exemple l'effet de l'ombre pour l'objectif d'extraction du trait de côte.

Ce travail de recherche se situe dans le cadre de l'interprétation d'images, dont l'objectif est d'extraire de l'information à partir de données de télédétection spécialement, à partir d'images très haute résolution spatiale qui couvrent les régions d'Alger, Bou Ismail & Zemmouri. La présente contribution repose sur la combinaison de l'étude cinématique du trait de côte et l'évolution des plages en utilisant des données de télédétection très haute résolution et le SIG, ainsi que la modélisation de l'hydrodynamisme à très haute résolution en utilisant le modèle SWAN. Ensuite le littoral de ces régions connaît une pression anthropique croissante notamment par les apports sédimentaires des oueds et l'engraissement suite à l'installation des ouvrages de protection. A cet effet, ce travail vise aussi la détermination de ces impacts négatifs sur la dynamique sédimentaire et l'équilibre naturel de deux plages en se basant sur la caractérisation granulométrique et minéralogique des sédiments superficiels, ainsi que les facteurs qui contrôlent la dynamique des sédiments en rapport avec leur taille et leur répartition spatiale. Pour cartographier les faciès sédimentaires, il est nécessaire de pouvoir disposer d'un minimum d'analyses, de prélèvements d'échantillons, de mesures granulométriques et d'en évaluer entre autres leurs composition géochimique.

Dans le but d'une planification territoriale et de développement durable de la zone côtière Algéroise et devant le besoin de prévenir les risques côtiers que présente l'érosion par ses impacts socio-economiques et environnementaux sans cesse changeantes émerge notre problématique : - **Quel est l'apport de la télédétection très haute résolution pour l'étude diachronique des plages et la cinématique du trait de côte de la région centre Algérienne? Quels sont les facteurs influant cette évolution diachronique? Et quel est son impact sur la répartition des sédiments superficiels des plages?** Le présent travail aura pour but de répondre à notre problématique et les objectifs de la thèse sont les suivants :

Cartographie des traits de côte et des surfaces des plages :

Ce travail de thèse a pour principal objectif de cartographier le trait de côte et les surfaces de plages en utilisant des images satellitaires de très haute résolution issues de Google earth pro.

Mesure de la longueur du rivage à très haute résolution :

Dans cette étude, la longueur de la côte Algéroise pour l'année 2020 a été calculée à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale.

L'influence des facteurs hydrodynamiques sur l'évolution diachronique des plages :

Pour cela les résultats de l'hydrodynamisme en utilisant le modèle SWAN à haute résolution ont été utilisés pour expliquer la dynamique des plages.

Cartographie des propriétés géophysiques des sédiments :

Via cette approche, nous y distinguerons les paramètres physiques des sédiments (granulométrie, compositions minéralogique). A la suite de traitements adaptés, l'exploitation des résultats devrait permettre d'extrapoler les propriétés des sédiments. Bien que les analyses en laboratoire assurent un contrôle systématique à la caractérisation, les analyses de ces prélèvements ne sont pas normées ce qui entraîne des écarts d'interprétation d'une région à l'autre.

Cette thèse s'articulera autour de trois chapitres :

- 1) Le premier chapitre aura pour but de donner une vision la plus complète possible de l'état des connaissances sur l'érodabilité de la côte Algéroise. L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer le potentiel de Google earth pro et sa validation dans le cadre de problématiques de gestion du littoral. Par conséquent, l'objectif de cette partie est d'examiner systématiquement l'utilisation de la télédétection THRS et des SIG dans l'étude des plages.
- 2) Puis, nous nous focaliserons sur les principales caractéristiques des mécanismes hydro-sédimentaires en se basant sur une brève description des facteurs influençant la dynamique sédimentaire à savoir l'hydrodynamisme à très haute résolution.
- 3) Le troisième chapitre portera essentiellement sur les méthodes classiquement utilisées en sédimentologie pour caractériser les sédiments prélevés sur le terrain. Le premier volet sera consacré à étudier le contexte sédimentaire à savoir la granulométrie. Tandis que le second volet portera l'accent sur la composition géochimique des sédiments prélevés afin d'expliquer la dynamique sédimentaire sur les plages.

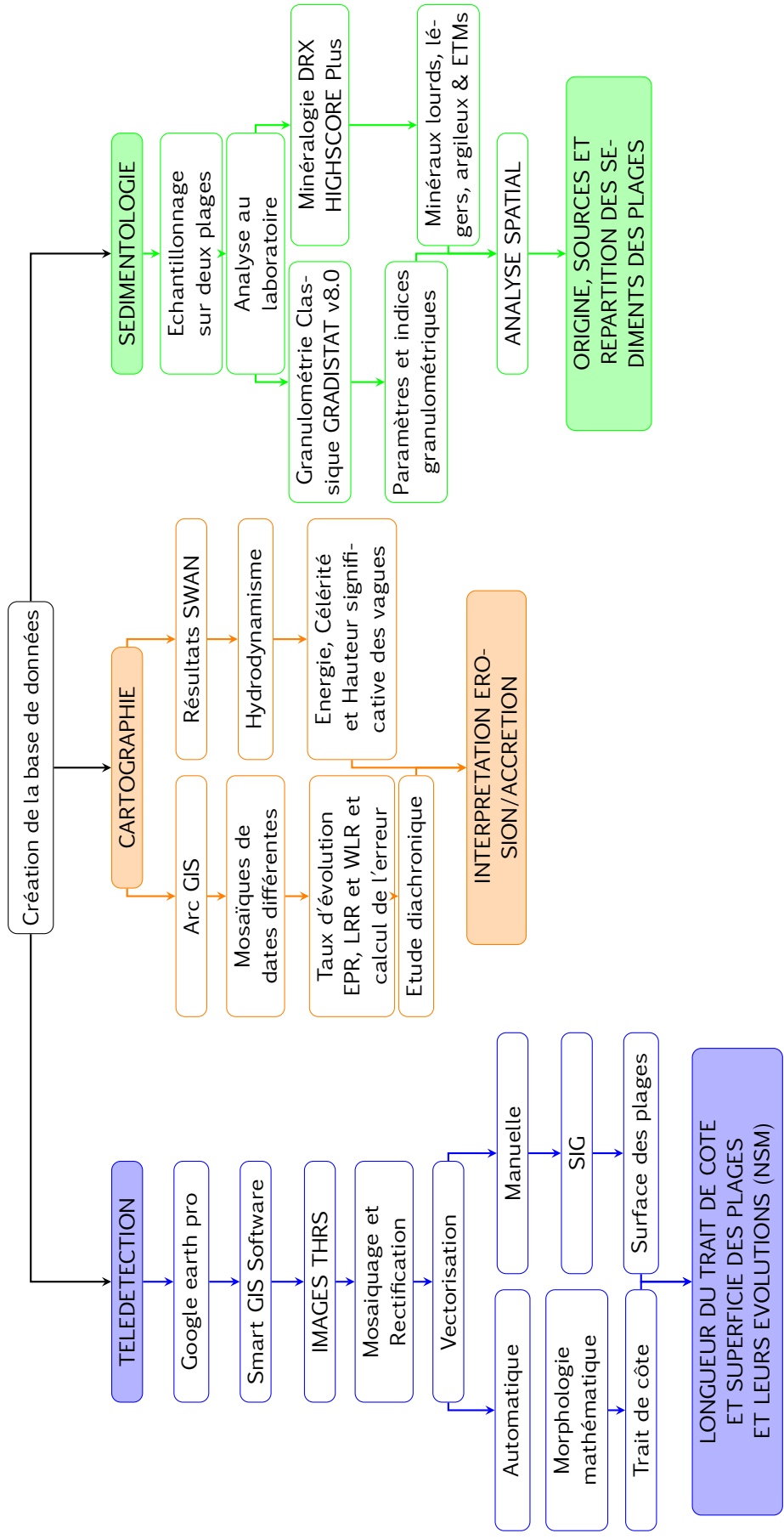


FIGURE 1 – Organigramme de la méthode utilisée

ZONE D'ÉTUDE

L'une des composantes clés de la géomorphologie côtière est le trait de côte, qui offre le plus de données sur la dynamique des reliefs côtiers. Ainsi, les plages sont parmi les structures les plus complexes de la nature qui affichent des changements visibles au fil du temps, et sont considérées comme l'une des caractéristiques les plus dynamiques des écosystèmes côtiers.

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE

La zone d'étude constitue le secteur centre du littoral algérien, spatialement elle se localise entre les longitudes 2°20'00"E à l'ouest jusqu' à 3°50'00"E à l'est. Notre zone comprend : la baie de Bou Ismail, la baie d'El Djamilia, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri (Figure 2).

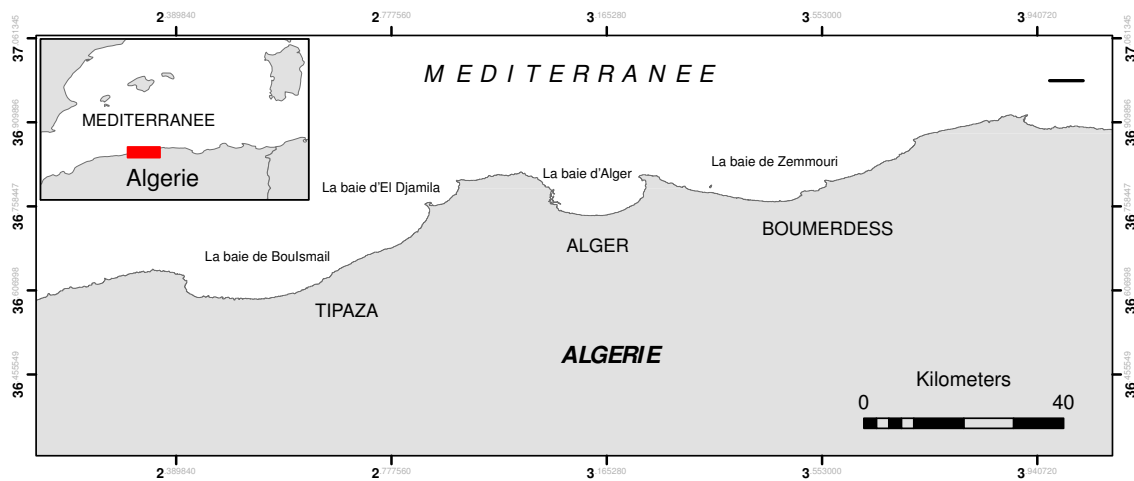


FIGURE 2 – Situation géographique de la zone d'étude.

La côte des trois baies comprend plusieurs plages, avec des oueds caractérisés par des petits bassins versants qui sont des pourvoyeurs variables de sédiments vers les plages lors

des périodes de crue. La zone côtière sélectionnée pour la présente étude se caractérise par des reliefs tels que des plages de sable, des falaises rocheuses et des baies.

Au cours des deux dernières décennies, les plages de notre zone d'intérêt ont été soumises à des pressions de développement liées à la fois à la croissance démographique régionale et au tourisme. Ces pressions se sont considérablement accrues depuis 2002. Le littoral de la côte algéroise est l'un des secteurs côtiers qui se développe le plus rapidement en Algérie. Les pressions de développement sont encore exacerbées par une multiplication de la population touristique estivale et les aménagements qui ont fortement impacté les plages et les dunes côtières. Ainsi les apports fluviaux aux plages ne sont pas significatifs, surtout après la construction des barrages sur les Oueds. Une autre contrainte sur l'approvisionnement en sable est celle imposée par les ports de plaisance qui agit comme une limite artificielle de cellules sédimentaires convergentes qui piège davantage le sable, empêchant sa dispersion le long des côtes.

Vue l'étendue de la zone d'étude et la grande masse des résultats en sortie nous avons cartographié les résultats par wilaya et par commune littorales. Entre autre l'étude se concentre sur les plages exposées de la baie de Bou Ismail dont l'étude a été mise en œuvre dans la côte de Zeralda et Staoueli située dans la partie centrale de la baie, s'étendant sur 20 km et est orientée nord-ouest. Nous avons choisi le littoral de ces deux communes car elles présentent les différents phénomènes étudiés. Ainsi notre travail se propose d'approfondir les connaissances sur cette zone côtière en termes de recul et d'avancé du trait de côte, leur réponse aux changements des conditions hydrodynamiques et d'estimer les impacts des aménagements sur les aspects morfo-sédimentaires des plages. (Figure 3)

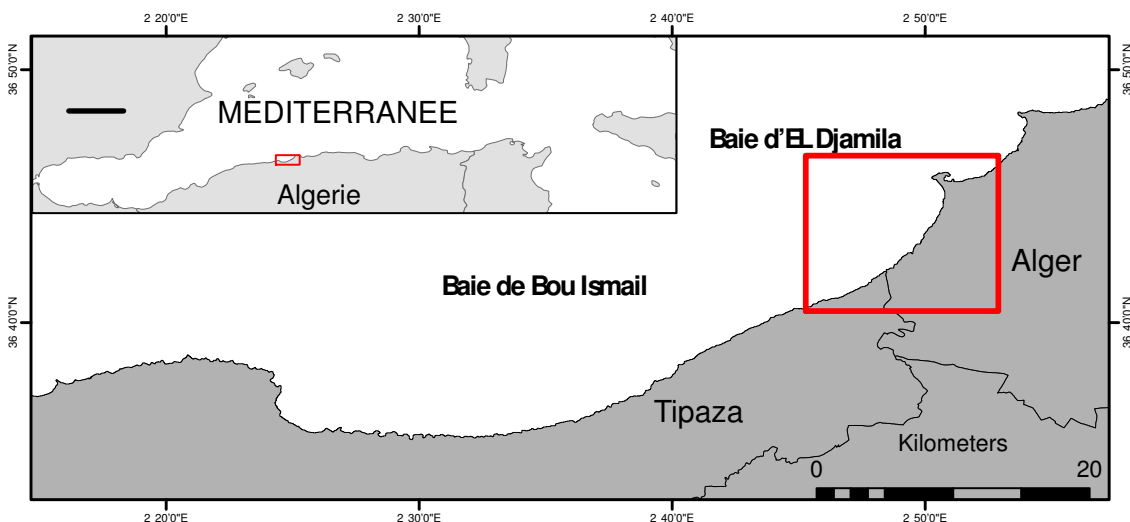


FIGURE 3 – Délimitation des deux communes Zeralda et Staoueli.

De point de vue géomorphologique, ce tronçon est constitué de plages sableuses alternées avec des côtes rocheuses et a très peu d'intrants fluviaux dont l'embouchure de l'oued Mazafran (le principal cours d'eau de la baie de Bou Ismail qui constitue la majorité des apports hydriques par voie fluviale dans la baie) se trouve dans le secteur de notre zone d'intérêt. Il est considéré comme la principale source des flux de sédiments, avec un débit très élevé (surtout en période de fortes précipitations), à ce système s'ajoutent des petits cours d'eaux qui se jettent dans ce secteur. Ce littoral a connu de grands bouleversements depuis l'installation de différents ouvrages maritimes (Ports, brises lames, épis), ainsi ce littoral est le siège d'une dynamique hydrosédimentaire très active. Ce domaine côtier s'est fortement perturbé par un régime hydrodynamique très complexe, l'agressivité de la houle, l'influence du courant algérien ainsi que la proximité de l'Oued Mazafran. (Figure 4)

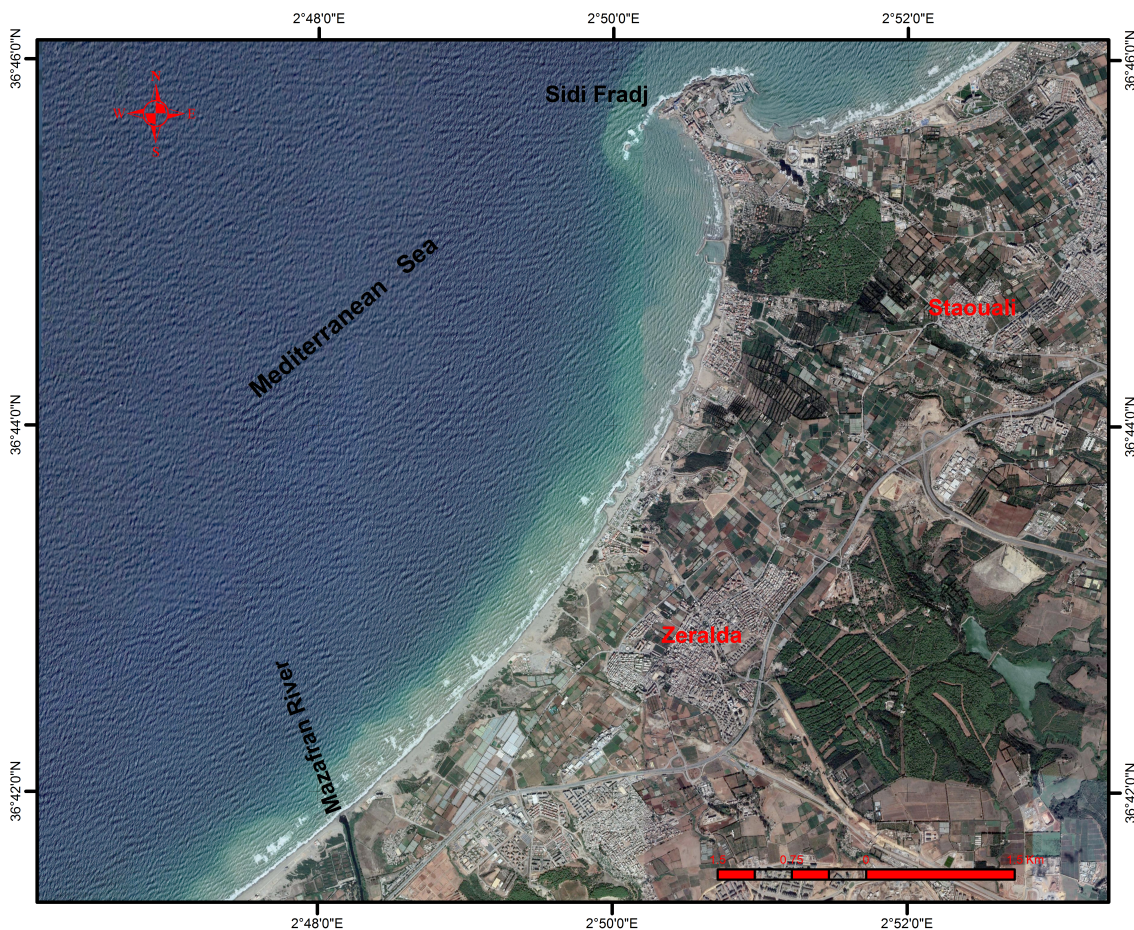


FIGURE 4 – Situation géographique des deux communes Zeralda et Staoueli.

BATHYMÉTRIE ET MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Dans cette étude, des données bathymétriques ont été utilisées pour cartographier et évaluer le changement morphologique et le transport sédimentaire. A cet effet, le SIG a été utilisé afin d'analyser, modéliser, gérer et éditer les données spatiales. Les données ont d'abord été analysées à l'aide d'une méthode basée sur l'interpolation des points bathymétriques, qui a permis d'élaborer une carte bathymétrique.

A partir du MNT, on peut extraire la carte des pentes et la carte du relief ombré ainsi que la carte du réseau hydrographique virtuel [22] (Figure 5)

Synthèse d'analyse topographique

Le territoire de la côte algéroise se caractérise de manière générale par sa topographie de faible pente. La côte algéroise est une zone formée de reliefs continus sans interruption de pente remarquable depuis leur commencement à l'ouest aux environs du mont chenoua jusqu'à la vallée de l'oued Isser à l'Est. Le long de la côte algéroise plusieurs unités topographiques se succèdent du Nord vers le Sud. Nous distinguons :

- ◀ La frange littorale formée d'une succession de plages et des dunes bordières plus ou moins fixés par la végétation et alternées par des côtes rocheuses.
- ◀ Les plaines côtières qui sont de dimension réduites et se trouvent dans la partie centre de la zone d'étude et devant l'embouchure de l'oued Mazafran.
- ◀ Les vallées qui sont souvent étroites et dominées par des crêtes raides.
- ◀ Les zones de pentes peu élevées, aux sommets souvent allongés et arrondis et qui occupent une grande partie de la superficie totale de la région.

La frange côtière de la côte algéroise souffre aujourd'hui de nombreuses agressions anthropiques (tourisme, aménagements, exploitation du sable, etc). Ces agressions jouent un rôle dans la destruction des cordons dunaires, accélération de phénomène d'érosion et la disparition de la réserve des stocks sédimentaires nécessaires à l'équilibre des unités morphologiques le long de la côte étudiée.

La bathymétrie de la zone d'étude

La morphologie des unités des plages et des cordons dunaires de la côte ainsi que quelques unités topographiques de la partie continentale étudiée ont une relation avec les fonds

sous-marins. De ce fait, il est intéressant de faire une analyse de la bathymétrie de la côte étudiée, en vue de comprendre comment se dessinent les grands traits morphologiques des fonds marins et leurs relations avec le transport des sédiments le long de la côte. La carte bathymétrique des trois baies Alger, BouIsmaïl et Zemmouri a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS à partir du traitement et l'examen d'une base de données extraite de la carte marine. Afin d'analyser l'organisation des fonds marins et leurs influences sur l'agitation côtière (propagation et changement des directions des houles), L'étude topographique et bathymétrique fait ressortir que la morphologie sous marine dans la partie Ouest et centre de la zone étudiée montre un bassin parallèle à celui qui existe sur la côte, le plateau continental devient étroit dans la baie de zemmouri par rapport à la zone précédente (les baies d'Alger et de BouIsmaïl) (Figure 5)

Les sédiments résultant de l'altération des formations géologiques de l'arrière-pays sont transportés par les principaux oueds qui débouchent dans les trois baies pour former et enrichir les stocks sédimentaires de la côte. Cette dynamique est contrôlée au niveau du continent par la topographie et les précipitations. Au niveau de la côte, les sédiments sont transportés des embouchures vers les stocks sédimentaires par les courants longshore générés essentiellement par les houles dominantes issues des différentes directions, avec la prédominance des houles de secteur Nord- Ouest pour la baie de BouIsmaïl. Les vents jouent un rôle significatif surtout dans l'évolution et la formation des dunes littorales.

HYDRODYNAMISME

Selon [23] : « Les littoraux constituent des environnements fragiles dans lesquels se manifestent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes ». Les équilibres écologiques et paysagers des espaces littoraux sont en fonction des facteurs humains mais ils sont aussi dus aux facteurs naturels du site. Les facteurs naturels tel que les houles, les vents, et la surélévation actuelle du niveau moyen des eaux, vont s'associer pour modeler le rivage et lui donner un tracé qui lui est propre mais qui n'est pas stable et peut se modifier dans le temps si l'un des paramètres naturels vient à être perturbé. Les précipitations tombent sur la surface réceptrice que l'on nomme « bassin versant » avec une fréquence, une intensité et une durée qui dépendent du type de climat de la région. Elles ruissellent de plus haute altitude (amont) vers l'aval de manière plus ou moins intense et rapide selon la nature des roches et des sols, la pente des versants et selon le couvert végétal. Ce travail de recherche se rapportant aux plages des trois baies Alger, BouIsmaïl et Zemmouri, on ne peut pas les étudier seules, sans prendre en considération l'ensemble des composantes du système littoral de la côte algéroise, y compris le contexte hydro-morphologique et les facteurs hydrodynamiques (vent, houle, courant,...). Cette analyse confirme que l'érosion côtière et l'évolution morpho-sédimentaire sont influencées directement ou indirectement par ces facteurs hydrodynamiques.

Les sédiments issus de l'altération des différentes formations géologiques qui affleurent dans les différents bassins versant de l'arrière-pays de la côte algéroise sont acheminés par une dynamique fluviale intense de l'amont du bassin versant vers la partie aval (les embouchures). Ces sédiments seront repris et transportés le long de la côte par des agents hydrodynamiques marins (houles, courants et vents) pour engraisser ou démaigrir les différents stocks sédimentaires (plage ou dunes) de la frange littorale étudiée et pour assurer aussi l'échange de sable entre les unités morphologiques de la côte. Dans cette partie du travail nous allons essayer d'identifier et de connaître les conditions marines, au large de la baie de BouIsmaïl, qui contrôlent les processus d'érosions et d'accrétions, l'évolution morpho-dynamique et la configuration générale de la baie de BouIsmaïl.

La connaissance de la propagation de l'énergie des vagues dans des eaux peu profondes nous permettra de donner des réponses à propos de nombreux phénomènes côtiers, car les données hydrodynamiques sont essentielles pour l'étude de la vulnérabilité côtière.

La figure 6 synthétise les composantes générales d'un système morphodynamique côtier. Tous ces nombreux facteurs et mécanismes physiques peuvent intervenir dans la dynamique et la répartition des faciès sédimentaires. Une modification du forçage génère une

modification de la dynamique, du transport sédimentaire et de l'interaction et renverse parfois les morphologies. Une rétroaction positive renforce la tendance d'évolution du système en augmentant le déséquilibre, alors qu'une rétroaction négative a tendance à entraîner le système vers un équilibre. [24]

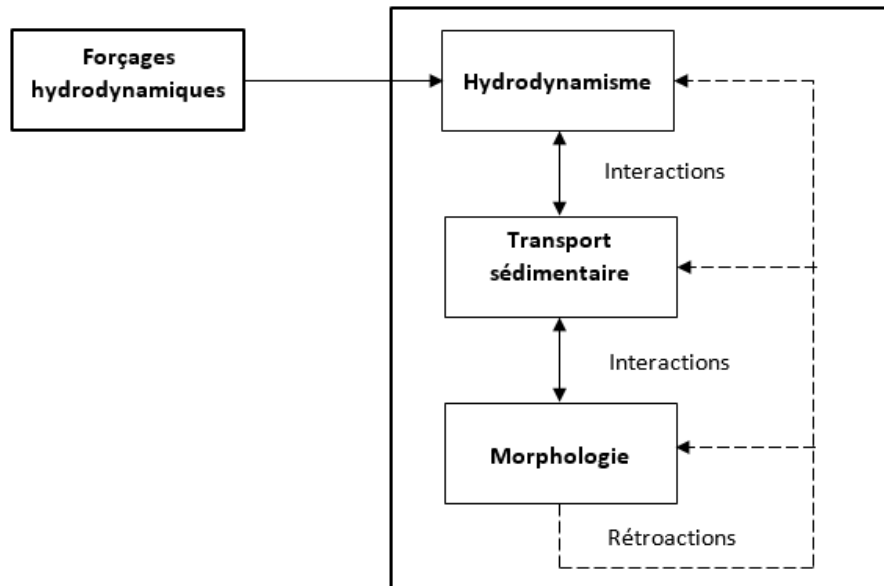


FIGURE 6 – Composantes d'un système morphodynamique côtier [24]

Le rivage peut conduire soit à l'érosion, soit à des processus d'accrétion induite par l'action des vagues, l'élévation du niveau de la mer et le transport des sédiments bien que la morphologie de la côte joue un rôle vital dans la détermination des processus de la côte, tandis que la dérive littorale a un impact significatif sur la modification des reliefs côtiers et l'orientation de la côte [25]. L'activité hydrodynamique marine est un phénomène très complexe qui nécessite la connaissance de plusieurs paramètres physiques. La hauteur des vagues dépend généralement de la vitesse du vent et de sa persistance. Une analyse spatiale entre les différents paramètres de vagues effectués par les cartes a permis d'effectuer une sélection des zones les plus dynamiques pour la baie de Bou-ismail qui est délimité à l'est par le promontoire de Ras-Acrata tandis qu'à l'ouest il est limité par le Cap du Mont-Chenoua. Le régime hydrodynamique est dominé par l'action des fortes houles provenant de l'ouest-nord-ouest. Au niveau de zeralda les hauteurs les plus fréquentes se situent entre 0.41 m et 2.4 m. et la célérité est de 2.5 m/s. En raison de l'orientation du littoral, près du rivage les vagues provoquent généralement un courant de dérive littorale engendrée par des houles ouest-nord-ouest. Les résultats des hauteurs significatives de vagues montrent que plusieurs zones côtières sont affectées par une hauteur supérieure à 3 m, notamment dans la partie ouest et centrale de la baie dont les hauteurs significatives des vagues les plus élevées sont observées en Février et dépassent généralement 3 m. (Figure 7)

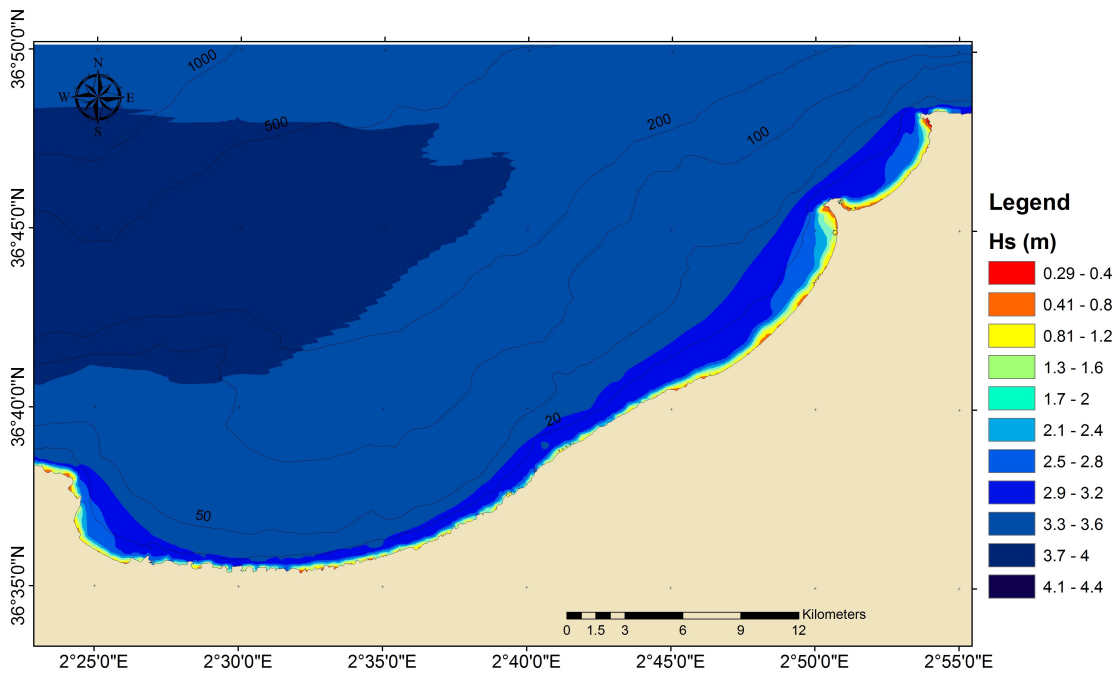


FIGURE 7 – Carte représentant la hauteur significative des vagues pour le mois de Février 2019.

La hauteur des vagues dépend généralement de la vitesse du vent et de sa persistance. Au cours de la saison de faible énergie la hauteur significative des vagues pour le mois de Septembre est globalement modérée. (Figure 8)

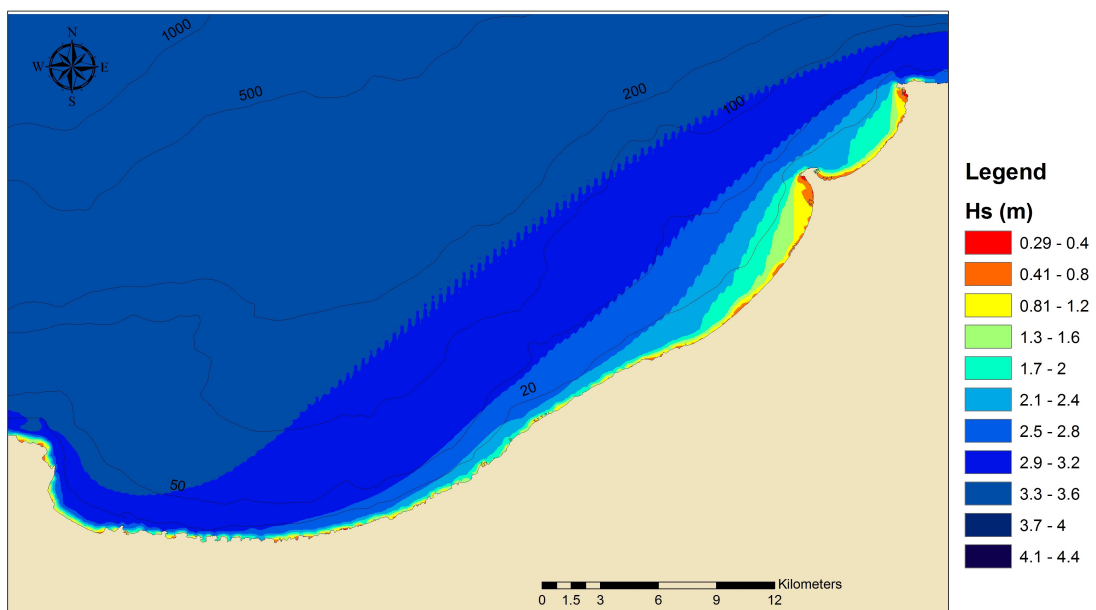


FIGURE 8 – Carte représentant la hauteur significative des vagues pour le mois de Septembre 2019.

Cette étude vise à présenter une évaluation et la mise en œuvre d'un modèle de simulation rétrospective de vagues de vent SWAN à haute résolution. Ce modèle SWAN calibré constituera un modèle pratique de rétroprojection des vagues avec une résolution spatiale élevée (3 km). Étant donné que la disponibilité des mesures de vagues in situ est très limitée dans le temps et dans l'espace et dans la plupart des régions du monde [26], l'utilisation de la simulation numérique est donc nécessaire pour assurer une résolution spatiale et temporelle à long terme du vent et pour la prévision des vagues [27]; [28]. Le modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore) [29] Version 41.20; est exécutable en mode de troisième génération, ce modèle rétrospectif de vague est caractérisé par une bonne efficacité au niveau de la zone côtière [29]. Selon [30], le modèle SWAN est capable de reproduire parfaitement les phénomènes côtiers de diffraction et de réfraction, liés à la morphologie côtière. Dans cette étude, nous avons utilisé les résultats sur les vagues de la base de données développée par [28] dont les étapes sont les suivantes :

- ◀ La première étape est la collecte et le traitement des données d'entrée telles que les forces génératrices et modificatrices de la vague.
- ◀ La deuxième étape est la préparation des commandes d'exécution du modèle, tandis que
- ◀ La troisième étape est l'utilisation d'un code numérique développé, qui a permis de calculer d'autres paramètres des vagues essentiels pour comprendre le comportement hydrodynamique du littoral et pour quantifier les énergies transmises le long de la côte.

Les vagues générées par les vents sont en réalité sous un complexe. Ces ondes se dispersent dans la mer avec des longueurs d'onde et des vitesses différentes [31]. Les données de sortie obtenues par le modèle SWAN ont été cartographiées avec ArcGIS afin de réaliser une analyse spatiale.

La célérité la plus importante est observée en Février et dépassent 4 m/s. (Figure 9)

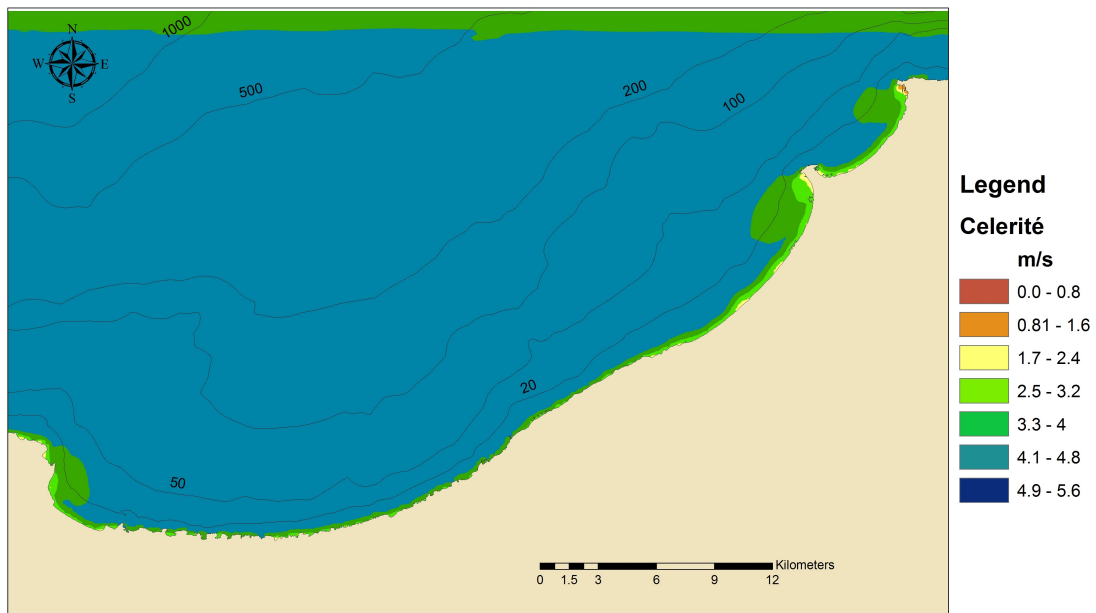


FIGURE 9 – Carte représentant la célérité des vagues pour le mois de Février 2019.

On remarque également sur la carte thématique de la célérité pour le mois de septembre que les valeurs ne dépassent pas 2.5 m/s (Figure 10)

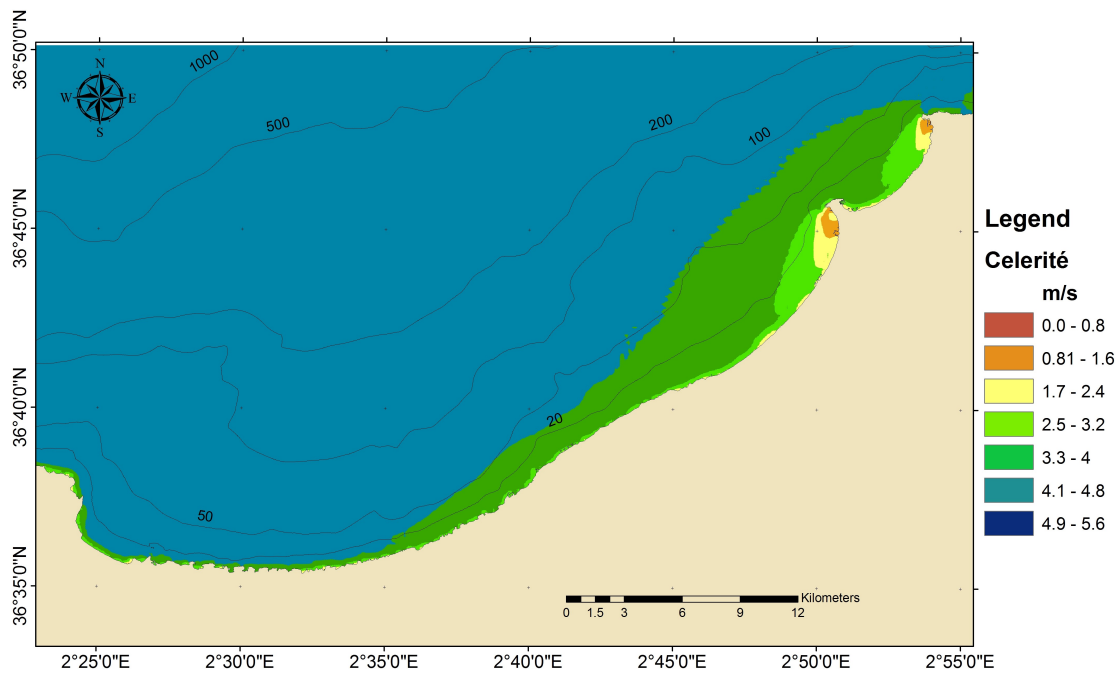


FIGURE 10 – Carte représentant la célérité des vagues pour le mois de Septembre 2019.

L'énergie des vagues du large est plus importante que celle des vagues du littoral [32] mais les zones côtières n'ont pas le même potentiel énergétique; la répartition

de cette énergie hydrodynamique dépend de plusieurs facteurs, dont la morphologie côtière.(Figure 11)

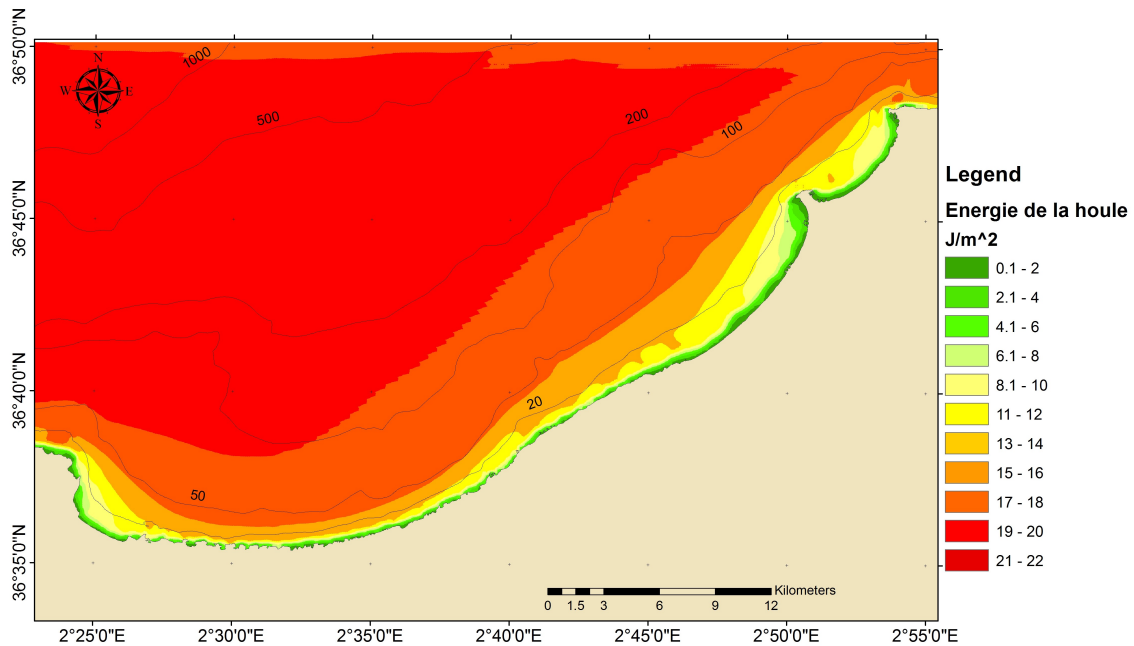


FIGURE 11 – Carte représentant l'énergie de la houle pour le mois de février 2019.

L'énergie de la houle pour le mois de septembre est représentée dans la(Figure 12)

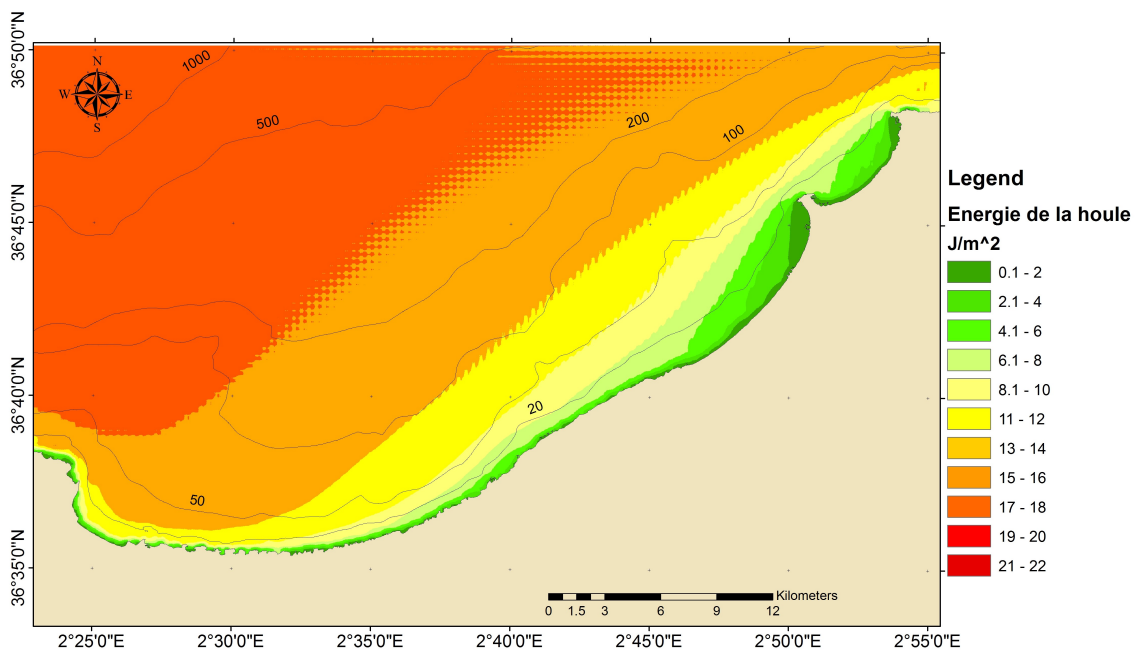


FIGURE 12 – Carte représentant l'énergie de la houle pour le mois de Septembre 2019.

Ensuite, pendant les jours de tempête, nous pouvons enregistrer l'activité hydrodynamique le long de la côte, même dans les zones les plus abritées, ce qui nous a permis de

mieux observer la propagation de l'énergie des vagues le long de la côte, et nous a permis également de classer la zone côtière selon leur potentiel énergétique. L'énergie transmise par la houle pour le mois de Février 2019 est représentée dans la (Figure 13) et dans la (Figure 14) pour le mois de Septembre

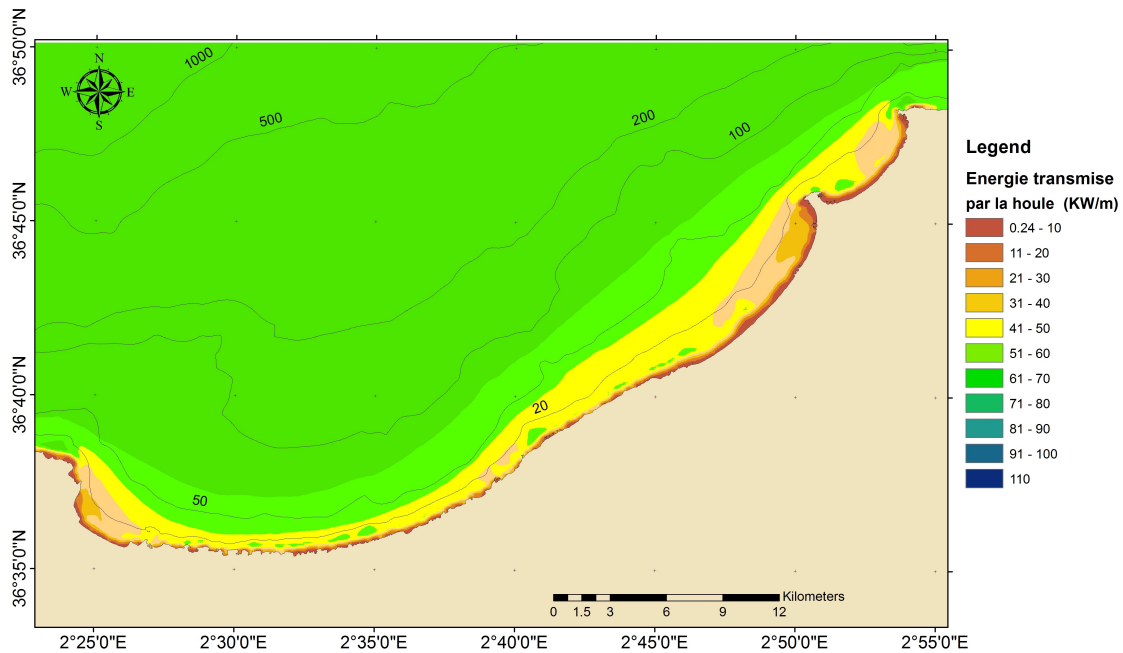


FIGURE 13 – Carte représentant l'énergie transmise par la houle pour le mois de Février 2019.

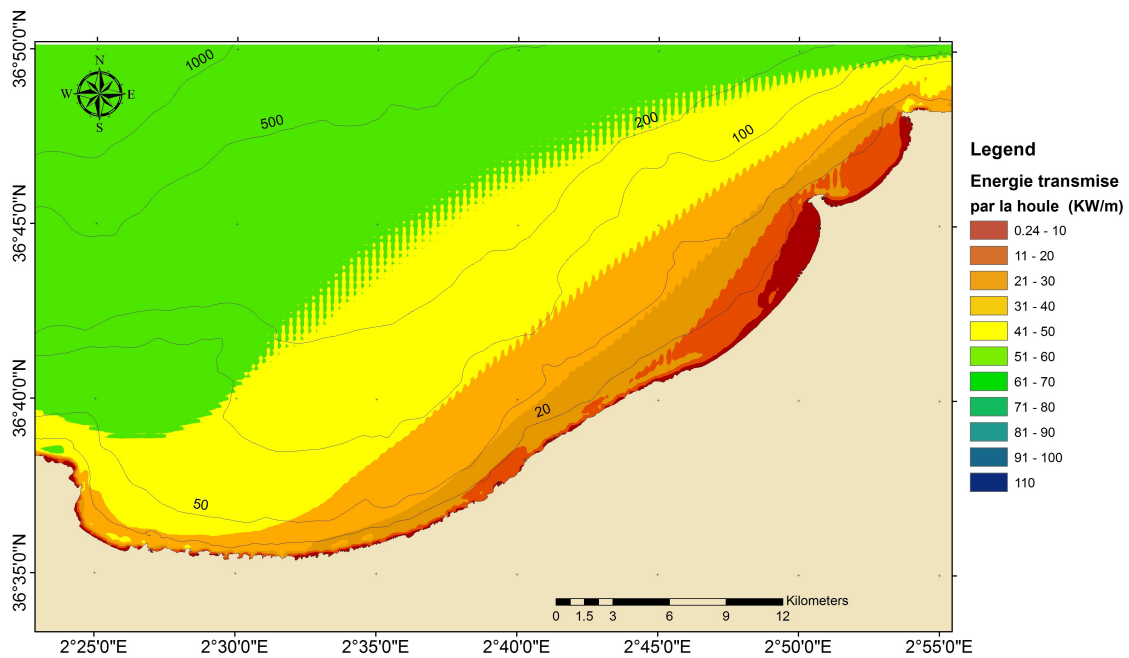


FIGURE 14 – Carte représentant l'énergie transmise par la houle pour le mois de Septembre 2019.

L'écartype et la moyenne d'énergie des vagues dans la baie de Bouismail sont représentés dans les (Figures 15 et 16) respectivement.

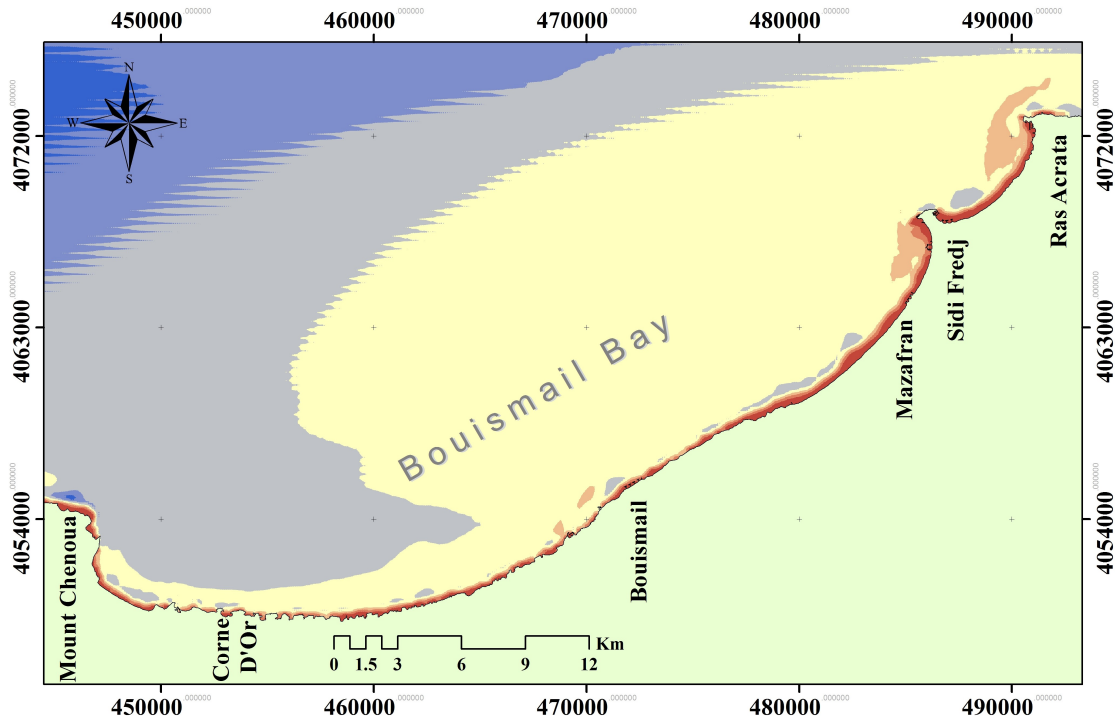


FIGURE 15 – Carte représentant l'écartype pour l'année 2019.

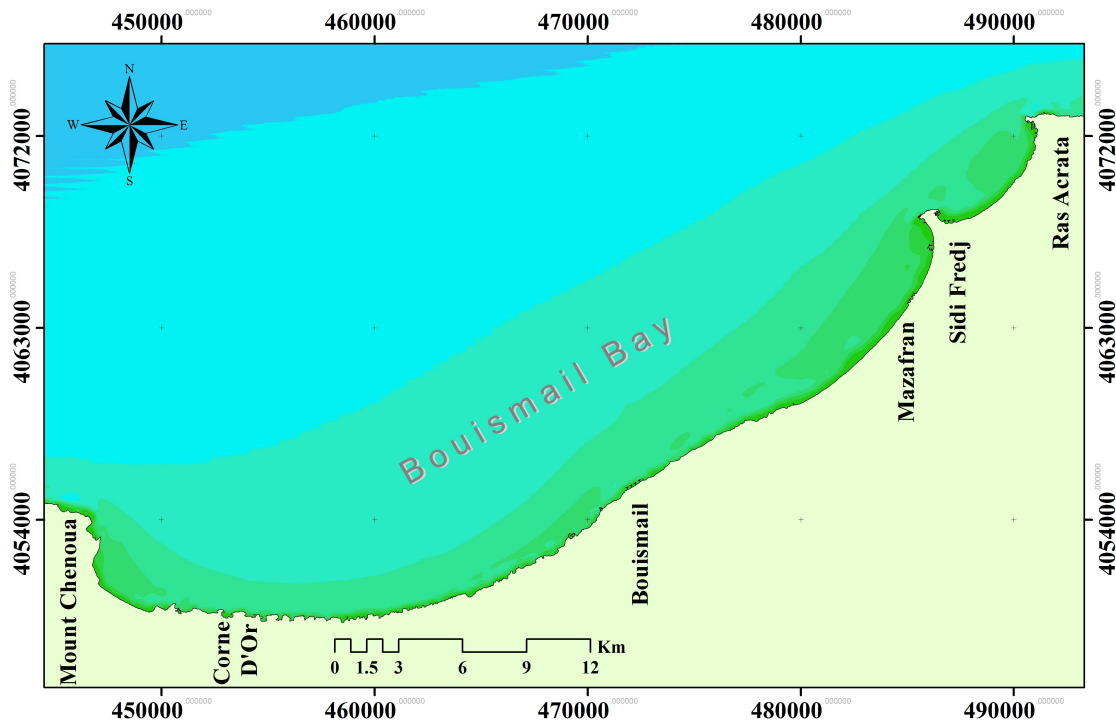


FIGURE 16 – Carte représentant la moyenne pour l'année 2019.

ces cartes ont permis de comprendre la propagation des ondes le long de la baie de Bou Ismail. Ce qui a permis de donner une improvisation des zones côtières touchées par une activité ondulatoire importante dans cette zone côtière.

Le vent

Les vents jouent un rôle important dans la détermination de l'évolution des unités géomorphologiques de la côte et la circulation des eaux marines superficielles. Leur impact évolue avec leur force (vitesse) et leur fréquence [33]. Ils sont générateurs des vagues et des courants superficielles responsables du transport sédimentaire long-shore et cross-shore des sédiments en mer. Sur l'arrière partie de la côte, les vents sont le moteur essentiel de l'accumulation des stocks sableux, sous forme de dunes actuelles ou anciennes le long de la côte, ces vents déplace les grains de sable jusqu'à environ 1 km vers l'intérieur des terres.

Les vents qui viennent du large des baies sur les terres des baies à leur tour, jouent un rôle significatif par la déflation dans l'évolution géomorphologique côtière, surtout dans la formation des dunes et l'échange sédimentaire entre les plages et les dunes.

Dérive littorale

Lorsque les vagues atteignent la plage avec une certaine obliquité, elles génèrent un courant parallèle au rivage appelé la dérive littorale. La vitesse de dérive littorale dépend de plusieurs facteurs : période des vagues, angle d'incidence des vagues par rapport au littoral, hauteur déferlante H , pente et la rugosité du fond.

Transport sédimentaire

Généralement, la dérive littorale provoque un transport sédimentaire parallèle au rivage. Ces mouvements peuvent entraîner une érosion ou une accumulation importante dans un milieu local ou régional. [34], cette variation peut influencer la propagation des ondes et vice-versa. Les sédiments qui arrivent à l'embouchure des Oueds des trois baies seront repris et contrôlés le long de la côte par des houles pour enrichir les différents stocks sédimentaires de la frange littorale étudiée surtout les plages. Cela met en évidence le rôle significatif des oueds dans le processus morfo-dynamique côtier en général.

Courantologie

Les courants jouent un rôle sédimentologique essentiel. Ils interviennent dans la mise en mouvement des particules (érosion), dans leur transport et dans leur sédimentation. Les courants marins sont fortement dépendants de la marée mais peuvent également être influencés par les vents du secteur nord-ouest dans notre zone d'étude. Les courants marins sont en partie contrôlés par la bathymétrie. Néanmoins, l'hydrodynamisme de cette région reste complexe compte tenu des multiples interactions avec l'oued Mazafran et les facteurs météorologiques. Ces derniers peuvent avoir des actions parfois concordantes. Par conséquent, le schéma de circulation des eaux n'est pas toujours systématique.



TELEDETECTION & CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE CÔTE

1.1 INTRODUCTION

Le littoral est dynamique et subit de fréquentes évolutions, à court et à long termes [19]. A ces évolutions s'ajoutent la perturbation du transit sédimentaire [35]. Acquérir des connaissances sur le changement de plage à une échelle de temps intermédiaire augmenterait notre capacité à gérer les risques ([36]; [37]). L'étude du taux de changement de la position du littoral est importante pour un large éventail d'études côtières. Telles que l'élaboration de la planification des marges de recul, du zonage des risques, des études de l'érosion-accréation, bilans sédimentaires régionaux et conceptuels ou prédictifs et la modélisation de la morphodynamique côtière ([38]; [39]). Les images satellitaires de télédétection ont été largement utilisées pour surveiller la position des zones côtières et du littoral, qui fournissent des statistiques répétées et cohérentes des variations côtières [40]. La disponibilité d'images multi-bandes, multi-temporelles et multi-capteurs et les progrès du traitement et de l'analyse numériques ont permis aux scientifiques de recueillir des informations sur les changements spatiaux et temporels et sur la sensibilité des altérations dues aux événements naturels et anthropiques [10]. Dans la littérature plusieurs travaux ont utilisé des images telles que photo-aérienne et images des différents satellites avec des caractéristiques différentes (TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI (Operational Land Imager), Sentinel, Landsat MSS (Multispectral Scanner), ect). La présente étude, basée sur des techniques de télédétection, s'inscrit dans cette perspective et porte sur la partie centre du littoral algérien dont les données satellitaires issues de Google Earth pro de 2002 et 2019 ont été utilisées pour examiner les changements du littoral qui se sont produits dans la zone côtière. Les résolutions spectrales, spatiales et temporelles, la couverture répétitive, la vue synoptique et la rentabilité des données de télédétection les ont rendues plus favorables que les données

collectées par les techniques conventionnelles [41]. La plate-forme gratuite Google Earth pro offre des ressources de très haute résolution pour l'acquisition des données géo spatiales. Elle donne accès à une quantité croissante d'ensembles de données obtenus à distance via son interface. Ces données peuvent être intégrées dans des SIG en mettant en œuvre des outils et des méthodologies d'analyse, qui peuvent améliorer de nouvelles connaissances sur leur application. Les SIG sont unanimement reconnus en tant qu'outils d'aide à l'analyse, à la compréhension, à la gestion du territoire ainsi qu'à la planification et à la décision. Ils permettent de créer, analyser, modéliser et cartographier des données ([42]; [43]; [44]). Les SIG permettent ainsi de caractériser, de visualiser des objets naturels et anthropiques sous forme de cartes numériques. Les images enregistrées par les satellites de télédétection en "observation de la Terre" se présentent, à l'origine, sous forme de valeurs numériques qui traduisent la radiométrie (quantité d'énergie) émise par des portions élémentaires (pixels) de la surface terrestre dans différentes bandes spectrales (ou canaux) d'enregistrement. Pour obtenir une restitution visible de ces valeurs numériques, on a couramment recours à la réalisation d'une composition colorée. Elle résulte de la synthèse colorée additive entre trois couleurs fondamentales (trois plans colorés) : rouge, vert et bleu. Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multi spectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux. Ainsi, la connaissance de la dynamique littorale est un préalable indispensable à la gestion des rivages et, notamment, celle des plages sur lesquelles repose en grande partie l'économie locale. Pour mener à bien une telle investigation, il est souvent nécessaire d'effectuer une étude diachronique de la position du trait de côte ([45]; [46]). Nous avons utilisé la morphologie mathématique pour transformer les images satellite en trait de côte. L'analyse vectorielle permet facilement l'incorporation d'un certain nombre de rivages vectoriels dérivés de sources d'images recueillies au fil du temps et consiste à calculer les taux de changement qui se sont produits le long de la côte en utilisant un système d'analyse numérique du littoral (DSAS) [47]. Pour l'étude diachronique de la dynamique spatio-temporelle de la ligne de rivage ainsi que l'évolution des plages de la région centre de la côte algérienne sur une période de 17 ans nous nous sommes intéressés à répondre aux questions qui suivent :

- ◀ Peut-on transformer les images Google Earth pro en trait de côte afin de réaliser une étude diachronique?
- ◀ Comment rectifier les images issues de Google Earth pro des dates différentes? Cette difficulté pointe souvent les limites des méthodes utilisées.

1.1.1 Résolutin d'image satellite

Une image satellitaire est caractérisée par sa résolution spatiale, sa résolution spectrale, sa résolution radiométrique et sa résolution numérique. Dans un système de mesurage, on appelle résolution l'aptitude d'un instrument à discriminer deux objets ou deux valeurs proches l'une de l'autre. Dans le cas d'une image, il est aussi employé pour désigner l'aptitude à rendre distincts deux points voisins.

1.1.1.1 Résolution spatiale

La résolution spatiale des capteurs caractérise la finesse de perception d'un détail au sol (unité de base = pixel). La résolution spatiale dépend du champ de vision instantanée (IFOV) de l'instrument, c'est-à-dire le cône visible du capteur permettant de déterminer l'aire de la surface à analyser à une altitude donnée. L'aire du pixel peut être facilement obtenue en faisant le produit de l'IFOV par la distance entre le capteur et la surface analysée.

1.1.1.2 Résolution spectrale

La résolution spectrale est la sensibilité des capteurs à certaines longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Elle caractérise la précision de la mesure radiométrique et la capacité du capteur à distinguer deux longueurs d'ondes successives et est définie par le nombre de bandes, la largeur des bandes du capteur et le pas d'échantillonnage spectral de l'instrument. Selon la réponse spectrale les images satellites peuvent être classées en deux classes : [48]

L'imagerie panchromatique

Acquise par un capteur numérique qui mesure le reflet dans une large bande électromagnétique. Les données panchromatiques sont représentées sous forme d'images en noir et blanc. Elle sert principalement à obtenir des informations de type " géométrique " comme la forme, la dimension et la surface.

L'imagerie multi-bande (multi spectrale)

Acquise par un capteur numérique qui mesure le reflet dans de nombreuses bandes spectrales. Ces multiples valeurs de reflet se combinent pour créer des images en couleurs. Elle sert principalement à obtenir des informations à caractère «qualitatif».

1.1.1.3 Résolution temporelle

La résolution temporelle correspond à l'intervalle de temps écoulé entre l'acquisition de deux images successives sur la même zone. Dans le cas des satellites, la résolution temporelle est déterminée par son orbite. Le phénomène de nébulosité affecte souvent la résolution temporelle.

1.1.1.4 Composition colorée

Selon les applications, on peut être amené à effectuer différentes compositions colorées :

- Soit des compositions que l'on appelle 'vraies couleurs' si l'on veut rendre les images réalistes.
- Soit des compositions 'fausses couleurs', qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image.

1.1.2 Les images Très Haute Résolution

Le développement des images satellitaire THRS en particulier est un véritable profit pour l'identification des objets géographique. Les traits de côtes sont aisément identifiables au premier coup d'œil sur ces images en particulier les images en couleurs vrai. Dans ce contexte l'objectif du présent chapitre est l'automatisation d'extraction du trait de côte en se basant sur ce que la composition coloré peut nous apporter, et la conception d'une base de décisions, déduites des observations humaines et formalisées en base de règles traduites en un algorithme de classification locale. La plupart des modèles de reconnaissance de formes sont basés sur une étape de segmentation préliminaire. Le processus proposé ignore cette étape en se basant sur l'image originale, mais en introduisant une étape qui se base sur la recherche d'un point objectif sur une fenêtre de forme défini par un déplacement et un angle d'observation. Les traits de côtes sont de natures différentes : sables, falaise, aménagement portuaire, végétation etc. Mais la seule chose commune est

que la ligne de côte se limite par la présence de bord de mer. Dans ce contexte et afin d'aboutir à l'objectif présent, on s'est basé sur la détection des limites de la surface MER. Dans cette étude une méthode d'extraction à partir des images couleur qui est basé sur le suivi de la ligne de côte est appliquée. Le produit final offert est un vecteur de points de la ligne de côte qui pourra être incorporé dans une base de données SIG.

1.1.3 Cartographie du trait de côte

La variabilité de la définition du trait de côte provient de la particularité morphodynamique du littoral : c'est une zone en mouvement, sans cesse changeante, qui n'admet pas de limite fixe, chaque façade maritime est différente en termes de conditions de types de côte (rocheuse, meuble, artificialisée) ce qui induit des divergences de définition du trait de côte. Selon [49]; et [50], le trait de côte correspond à la ligne des plus hautes mers par temps calme (Figure 1.1).

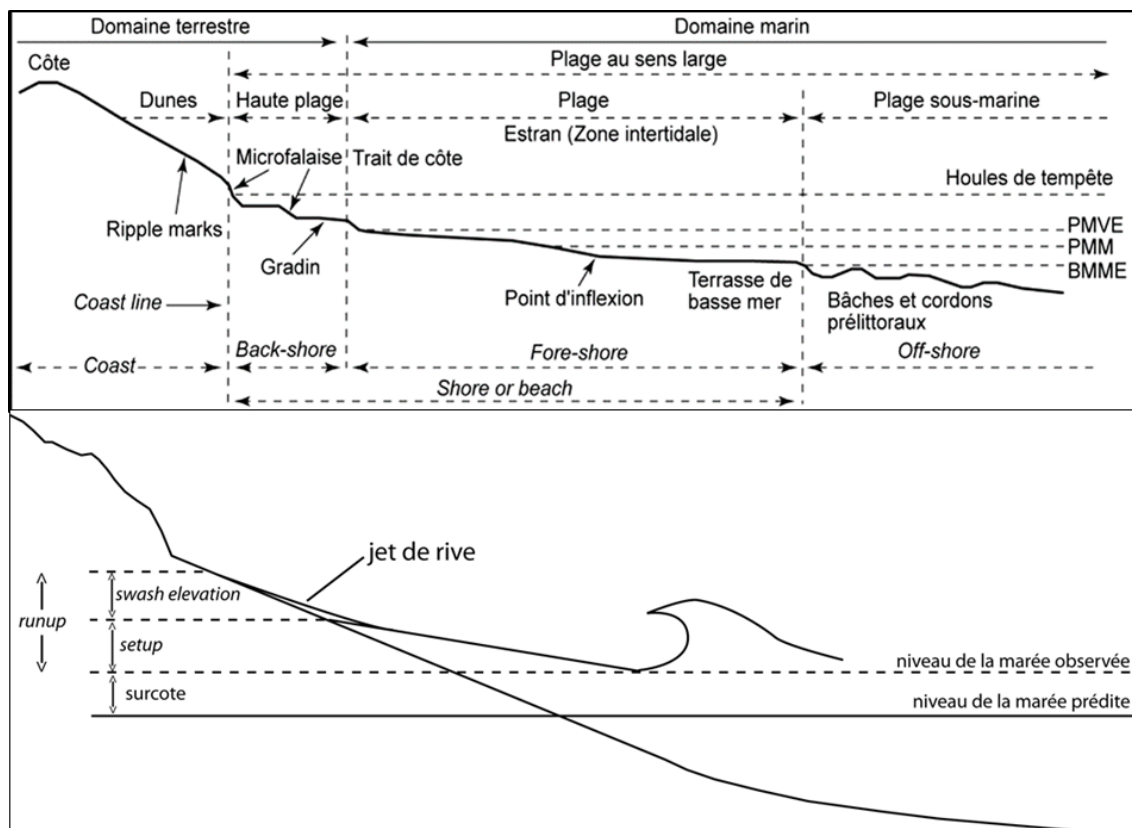


FIGURE 1.1 – Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après Shepard (1973) [51] et le BP par rapport aux conditions morphologiques et hydrodynamiques.

1.1.4 La ligne de référence adoptée

Limite de référence indéniable en tant que séparation linéaire entre deux domaines, terrestre et maritime, le trait de côte est pourtant une notion ambiguë tant le passage de l'un vers l'autre est progressif dans l'espace et mobile dans le temps [43]. Le littoral présente de nombreuses ondulations à certains endroits où la démarcation du littoral et l'identification des modifications du littoral devraient être très difficiles. Le littoral est facile à définir mais la démarcation est très difficile puisque le niveau de l'eau change constamment [8]. Le choix de la ligne de référence d'un littoral est une considération primordiale dans la cartographie du littoral [52]. Cette référence du rivage (indicateur du littoral) doit être identifiée pour déterminer l'érosion côtière. Par ailleurs, selon [6], la ligne de référence de l'érosion est généralement le bord supérieur d'une falaise, le rebord de la dune côtière, la ligne de végétation, ou une crête de plage. Si aucune de ces lignes de référence n'est présente, la ligne des plus hautes eaux (HWL) est souvent utilisée. (Figure 1.2)



FIGURE 1.2 – Exemples de proxys de la position du trait de côte.

1.2 METHODOLOGIE

La méthodologie utilisée est résumée dans la (Figure 1.3). L'approche comprend les étapes suivantes :

- 1) choix d'une ligne de référence ;
- 2) rectification géométrique des mosaïcs des deux dates différentes ;
- 3) digitalisation du trait de côte et estimation des erreurs ;
- 4) étude de la cinématique du trait de côte et de l'évolution des surfaces des plages.

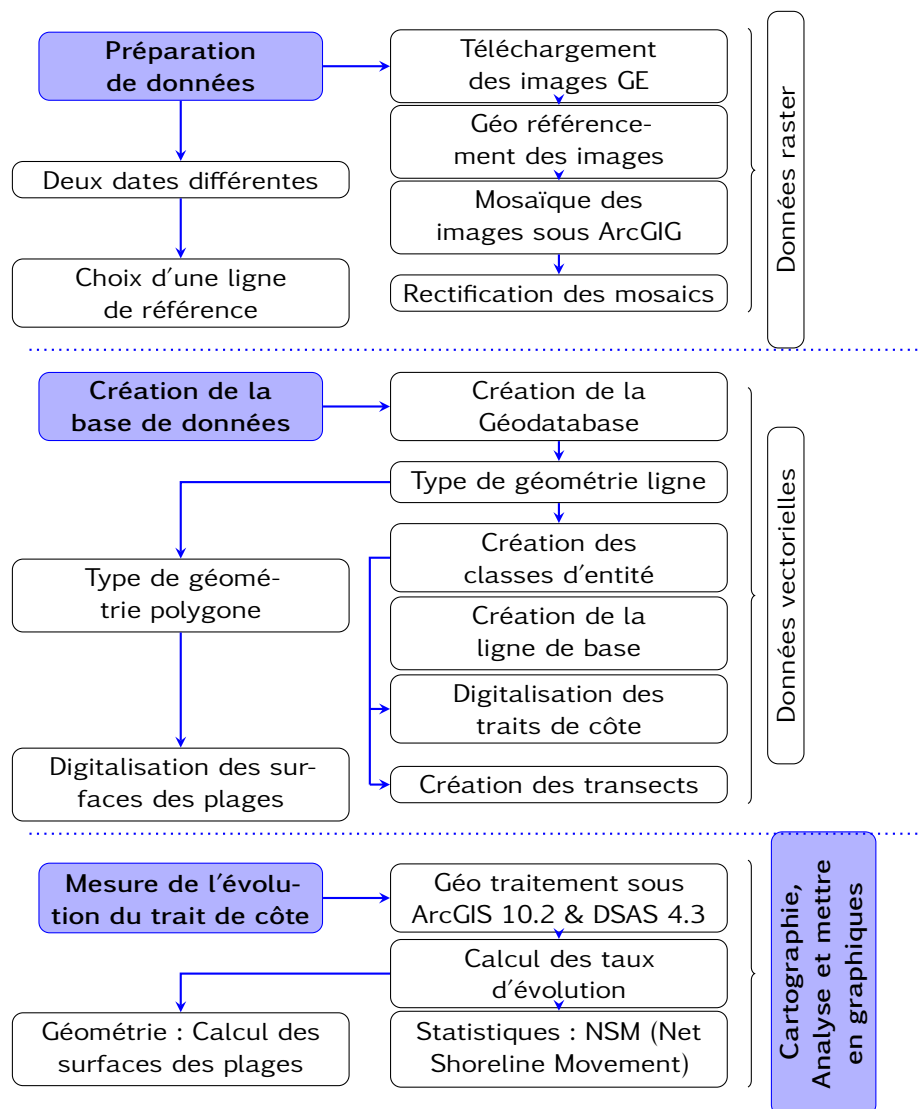


FIGURE 1.3 – Méthodologie générale pour mesurer la récession/accrétion du trait de côte.

La réalisation de ces étapes se compose de trois principaux aspects :

- 1) préparation des données ;
- 2) création de la base des données ;
- 3) mesure de l'évolution du trait de côte. Les changements de superficie des plages pourraient être comparés pour déterminer l'évolution entre 2002 et 2019. L'organigramme ci-dessus résume toutes les étapes de cette partie. (Figure 1.3).

Le présent travail se propose de réaliser une cartographie de l'érosion côtière pour la surveillance de la dynamique littorale à une échelle précise. Alors il est nécessaire de disposer d'outils appropriés pour l'acquisition de données, leurs traitements et leurs analyses. Dans cette thèse nous avons essayé de développer un atlas de la côte centre algérienne à partir des images Google Earth pro. Pour ce faire nous avons développé deux volets :

Dans le premier volet, nous avons cherché à trouver la meilleure méthode de téléchargement des images Google Earth. Pour ce fait, nous avons exploré trois méthodes. Soit directement via Google earth, ou par d'autres logiciels dont Offline Map Maker et Smart GIS.

Tandis que dans le deuxième volet, nous avons décrit et expliqué les différentes techniques du SIG appliquées ; d'une part, pour le traitement des images brutes téléchargées en utilisant les outils de gestionnaire des données du logiciel ArcGIS et d'autre part, pour l'extraction du trait de côte et des surfaces des plages par digitalisation des images traitées. Puis, le calcul numérique des paramètres statistiques d'évolution des plages par l'extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS) intégrée sous ArcGIS.

1.2.1 Création de la base de données

La première étape de notre étude consiste à la création d'une base de données des images de très haute résolution et qui répond à trois (03) critères :

- ◀ Elles doivent être géoréférencées.
- ◀ De haute résolution spatiale (échelle centimétrique).
- ◀ Et d'une résolution temporelle (images de différentes dates)

1.2.1.1 Choix et téléchargement des images satellitaires

Plusieurs sources d'images satellitaires peuvent être exploitées pour extraire la ligne du rivage à savoir : les images de Google Earth pro. C'est un logiciel open accès en offrant un historique sur 20 ans environ des images satellitaires de très haute résolution. Dont nous avons fixé les principes de téléchargement suivants :

- ◀ Pour chaque zone, on ne s'intéresse dans l'historique que par deux (02) images. Une parmi les plus récentes et l'autre parmi les plus anciennes.
- ◀ On sélectionne l'image là où l'état de la mer est calme.
- ◀ Pour chaque image, on prend de préférence celle prise en mois de Septembre, Août ou Octobre car c'est la période là où les plages sont en état d'équilibre [53].
- ◀ Toutes les images doivent être soumises à la même résolution.

La méthodologie développée dans cette étude afin d'une exploitation meilleure des images satellitaires Google earth par rapport aux méthodes de téléchargements repose sur trois méthodes :

- ◀ Une en téléchargeant les images directement via Google Earth Pro.
- ◀ En utilisant le logiciel Offline Map Maker 7.535 et ;
- ◀ La troisième en utilisant le logiciel Smart GIS Map Editor 18.001.

1.2.1.2 Comparaison et choix de la méthode de téléchargement

Le (Tableau 2.1) résume les différents avantages et inconvénients de chaque méthode de téléchargement des images de Google Earth pro.

TABLE 1.1 – Comparaison des avantages et des inconvénients des trois méthodes de téléchargement des images Google Earth pro.

Méthode	Avantages	Inconvénients
Directement via Google Earth	<ul style="list-style-type: none"> ◀ Images de très haute résolution (0.2 m) ◀ Possibilité de télécharger l'historique des images. 	<ul style="list-style-type: none"> ◀ Prendre beaucoup de temps.
Via OMM	<ul style="list-style-type: none"> ◀ Téléchargement rapide. ◀ Grandes zones téléchargées à la fois. 	<ul style="list-style-type: none"> ◀ Possibilité de télécharger seulement l'image la plus récente disponible dans Google Earth.
Via Smart GIS	<ul style="list-style-type: none"> ◀ Images de très haute résolution (à la limite de celle de Google Earth). ◀ Possibilité de télécharger l'historique des images. ◀ Téléchargement rapide. 	

D'après la comparaison avantages/inconvénients, il est clair que le téléchargement des images via Smart GIS est la meilleure méthode et la plus performante, car elle nous permet de télécharger un grand nombre d'images de très haute résolution et en un temps record. Donc, dans notre travail c'est cette méthode qu'on va adopter.

1.2.2 La base de données

Notre objectif consiste à créer une base de données d'images satellitaires de très haute résolution couvrant la zone côtière qui comprend la baie de Bou-Ismaïl, la baie d'El-Djamila, le littoral rocheux, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri. Le (Tableau 2.2) résume le nombre des images téléchargées par zone et leur date.

TABLE 1.2 – Bilan par zone des images satellitaires de la région centre algérienne téléchargées de Google Earth via Smart GIS Software.

Zone	Bou-Ismaïl	El-Djamila	Littoral rocheux	Alger	Zemmouri	Région centre
Nombre d'images (2019)	441	63	134	167	198	1003

1.2.3 Traitement de la base de données

Dans cette partie, nous avons procédé à décrire les différents outils et techniques du SIG utilisés pour un meilleur traitement de nos données.

1.2.3.1 *Traitement des images brutes*

Les images téléchargées sont géo référencées et bien unis entre elles. Cela nous permet une digitalisation correcte en passant d'une image à l'autre de même date. Mais, le problème se pose lors de la superposition des images des dates anciennes et récentes. Un décalage est remarquable entre les fonds spatiaux allant jusqu'à les quinze mètre (15 m). Le présent traitement sert à éliminer ce décalage.

1.2.3.2 *Mosaïquage des images*

Ce traitement consiste à rassembler les images brutes en une seule image par mosaïquage, puis la rectification de l'une d'eux. Le Mosaïquage consiste à assembler l'ensemble des images raster en une seule image. Pour se faire nous avons utilisé l'outil "Mosaic To New Raster".

1.2.3.3 *Rectification des images mosaïquées*

Les techniques du SIG utilisés pour le traitement des images téléchargées afin de faire une rectification des images Google earth par l'élimination du décalage entre ses fonds spacieux causé par la superposition des dates anciennes et récentes ont été établie pour une étude diachronique des plages et un diagnostic sur les variations historiques du trait de côte.

Les mosaics ont été géoréférencées sous ArcGIS à l'aide de points de contrôle. Le nombre de points de contrôle utilisés pour chaque mosaic variait entre 40 et 50. L'une des images doit être choisie comme référence à l'autre (il est préférable qu'elle soit la plus récente). Dans notre cas, nous avons choisi l'image de l'année 2019 pour recaler les

images anciennes. Du fait que notre application s'intéresse à l'étude du trait de côte le choix des points de calage est extrêmement important, dont, on doit sélectionner des vecteurs projetés sur le niveau 0 m [54] (Figure 1.4).



FIGURE 1.4 – Rectification de l'image ancienne par l'image de référence [55].

La superposition des images a montré des décalages géométriques qu'il fallait impérativement corriger pour assurer un bon suivi spatio-temporel du trait de côte afin de les projeter dans le système de projection cartographique UTM/WGS 84/Zone 31 Nord.

1.2.3.4 Digitalisation du trait de côte

Le tracé du trait de côte que nous avons suivi varie d'un secteur à l'autre. C'est la limite de la laisse mer instantanée pour les zones calmes et son milieu pour les secteurs agités. Le trait de côte subit des transformations dues à plusieurs phénomènes. Le passage d'une image au trait de côte a fait l'objet de plusieurs techniques proposées.

L'interprétation visuelle d'une image par un photo-interprète est liée en premier lieu à la couleur ainsi qu'aux caractéristiques géométriques de l'objet géographique à extraire. Ainsi d'autres caractéristiques importantes comme la nature de l'environnement de l'objet peuvent améliorer le taux de reconnaissance. Mais cela en utilisant l'œil humain comme moyenne en premier lieu afin d'aboutir l'objectif d'interprétation. Dans ce qui suit nous

allons proposer un processus d'extraction automatique d'un objet géographique qui est le trait de côte en interprétant des observations visuelles en un algorithme d'extraction employant la géométrie du trait de côte, ainsi la couleur de la surface Mer.

La morphologie mathématique est une technique réalisée sur une image binaire qui consiste à filtrer ou partitionner les objets dans un but de représentation ou de modélisation. Basée sur le principe de la théorie des ensembles, elle traite et manipule l'image binaire par le biais d'un objet prédéfini appelé élément structurant et un certain nombre d'opérations complexes comme l'érosion et la dilatation et également des opérations mathématiques ensemblistes (union, intersection et complémentarité). Cette méthode analyse les liens existants entre un objet et son voisinage immédiat. L'élément structurant balaie toute l'image de manière que son origine soit centre sur un des pixels de l'image. Le choix de l'élément structurant est fonction des différentes formes recherchées dans l'image étudiée. La méthodologie de détection du trait de côte combine entre des notions de géométrie simple et la formalisation des observations de l'œil nu sous forme de règles de décision. Le principe général est de choisir un point de départ de la côte manuellement. Nous proposons un algorithme d'avancement récursif qui crée les points trait de côte voisin du point de départ. Cet algorithme est récursif et par conséquent ne s'arrête qu'à la fin de la côte ou les conditions de similarités des pixels ne sont plus valable [56].(Figure 1.5).

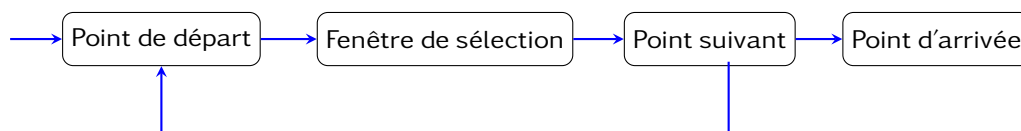


FIGURE 1.5 – Etapes d'extraction du trait de côte.

Cette méthode est automatique et s'applique pour toute image satellitaire multi spectrale. (Figure 1.6). Les données numérisées sont stockées dans une géodatabase.

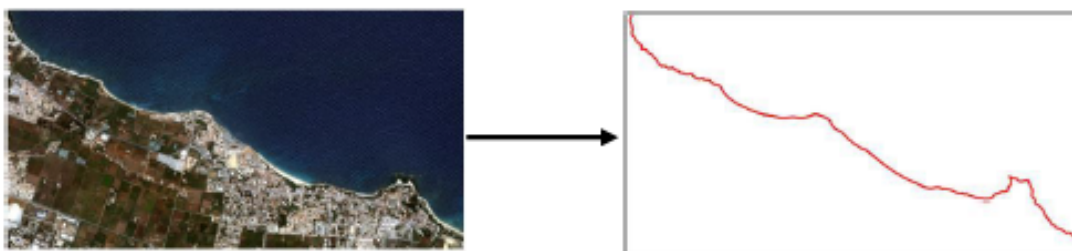


FIGURE 1.6 – Image mode RGB transformée en trait de côte par le nouvel algorithme proposé.

1.3 RESULTATS

Cette analyse consiste à déterminer les distances d'évolution (Avancement/Recul) du trait de côte, et du linéaire affecté par plage puis par commune littorale. Pour ce fait, nous avons eu recours à l'application (DSAS) intégrée dans l'environnement ArcGIS 10.2. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des distances et des taux d'évolution à partir des différents traits de côte. [7]. Le seul paramètre que nous avons calculé est le NSM (Net Shoreline Movement). Il reporte la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent au niveau de chaque transect [57].

La cartographie nous permet une visualisation simple et efficace de nos résultats. Et vue la grande masse des résultats en sortie et l'étendue de la zone d'étude, nous avons procédé à l'élaboration d'un mini atlas cartographique d'érosion côtière. Dans l'élaboration des cartes d'érosion, nous nous sommes basés sur le NSM (Distance de variation) entre 2002 et 2019. Par la suite, nous avons défini des classes qui représentent l'état d'érosion.

En raison de la nécessité de produire des taux de changement de rivage statistiquement défendables, une attention considérable a été accordée à la compréhension des incertitudes associées à l'interprétation et à la numérisation des images de télédétection ([58]; [59]). Le système d'analyse numérique du littoral (DSAS) [7] est l'outil analytique prédominant utilisé pour analyser les changements de forme en plan de la position du littoral, et est exécuté comme une extension dans ArcGIS. Plusieurs statistiques sont générées automatiquement par DSAS, y compris le mouvement net du littoral (NSM) ainsi que la régression sous forme de taux calculés à l'aide des intersections des rivages et des transects. Certaines côte rocheuses avec des formes de rivage complexes ont été considérées comme inappropriées et ont été exclues de l'analyse. Un intervalle de confiance de (95,5 %) a été appliqué lors du calcul des taux de modification du littoral basés sur la régression.

La superposition des traits de côte des dates différentes nous a permis de contribuer à la réalisation d'une carte d'érosion côtière qui comporte vingt et une (21) cartes d'érosion pour vingt et une (21) communes du littoral de notre zone d'intérêt. Figures 1.7- 1.26

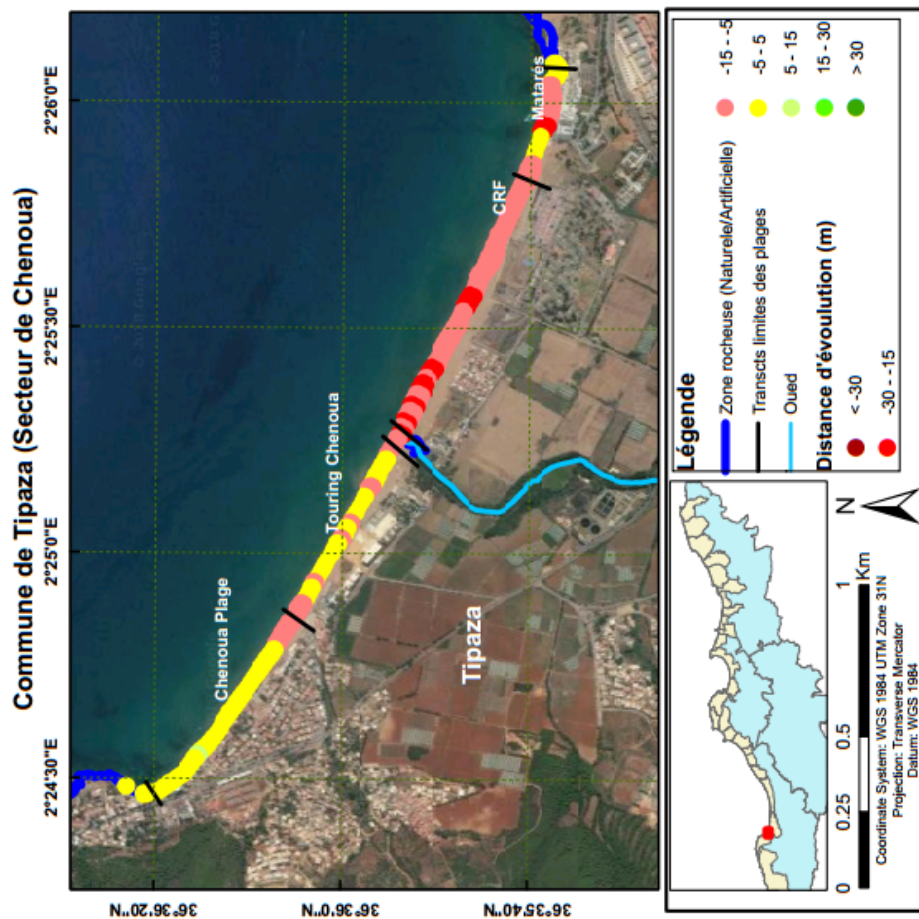
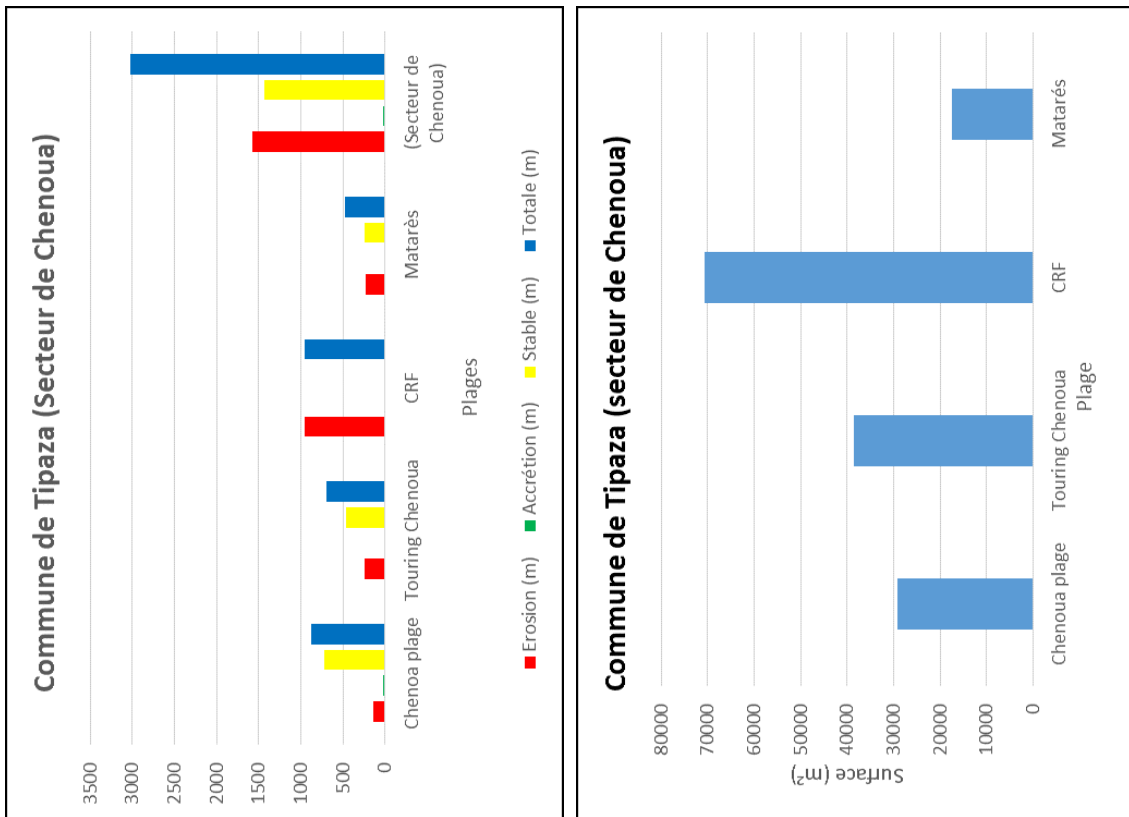


FIGURE 1.7 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Tipaza (Secteur de Chenoua) entre 2002 et 2019.

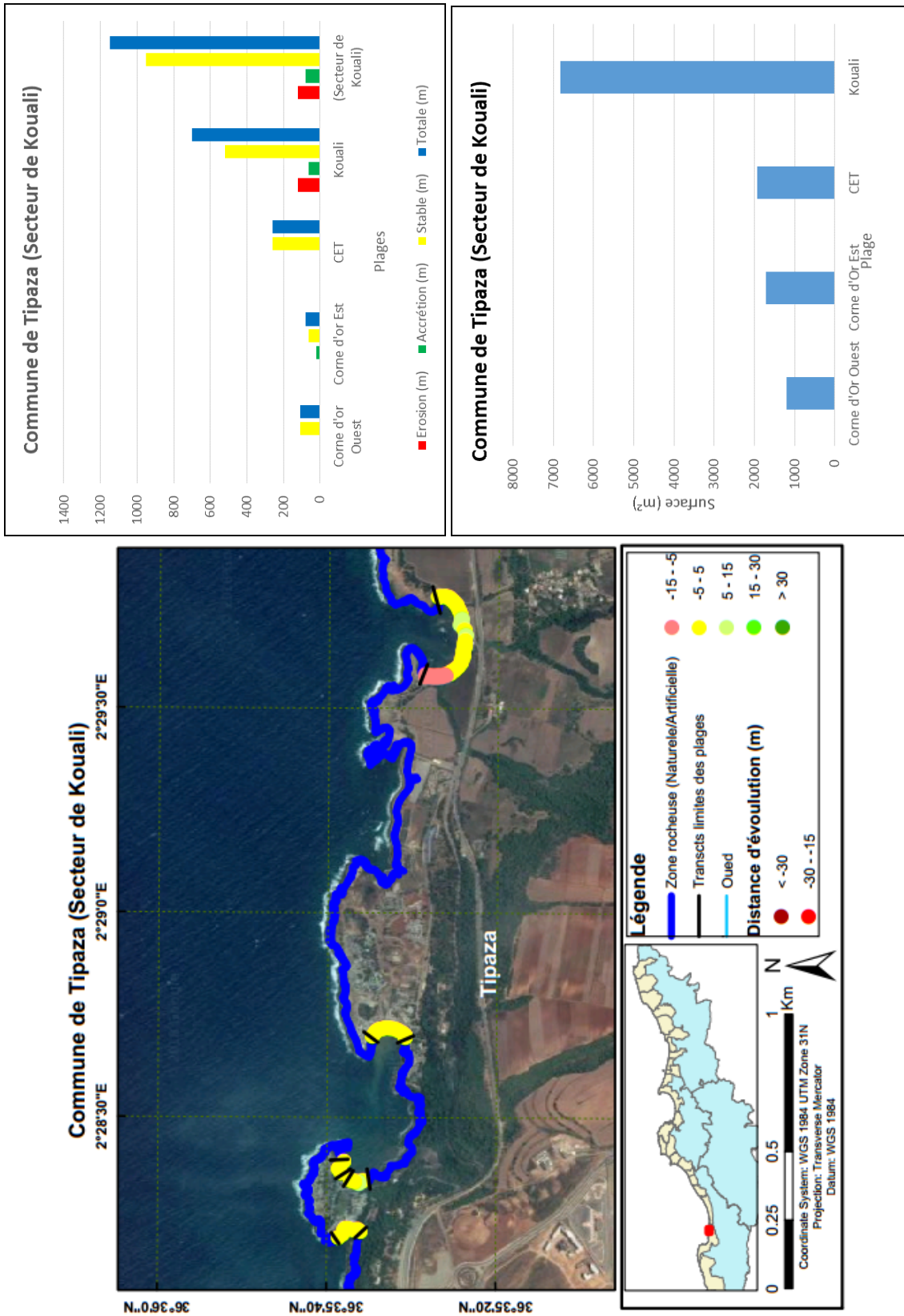


FIGURE 1.8 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Tipaza (Secteur de Kouali) entre 2002 et 2019.

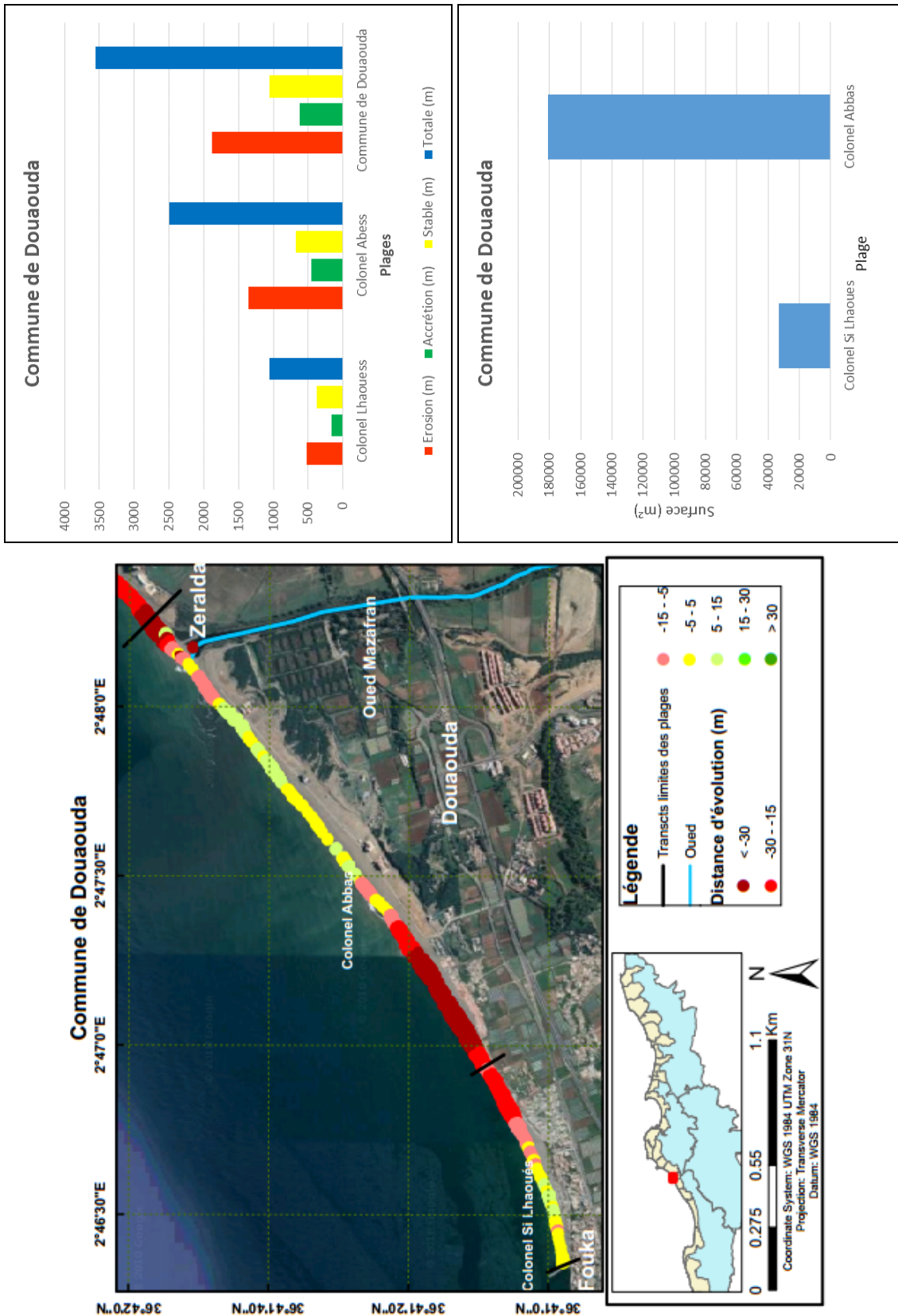


FIGURE 1.9 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Douaouda entre 2002 et 2019.

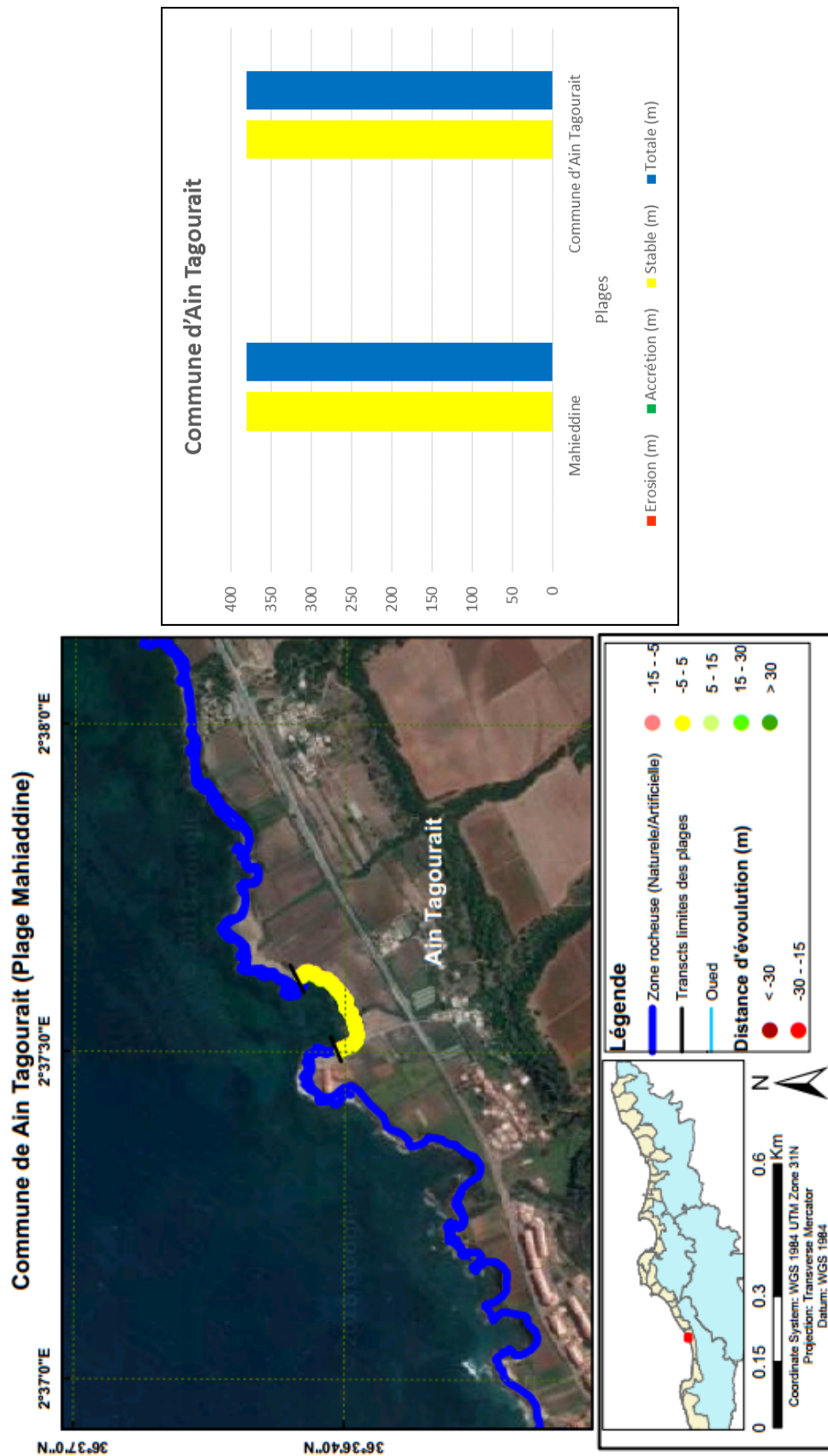


FIGURE 1.10 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Ain Tagourait entre 2002 et 2019

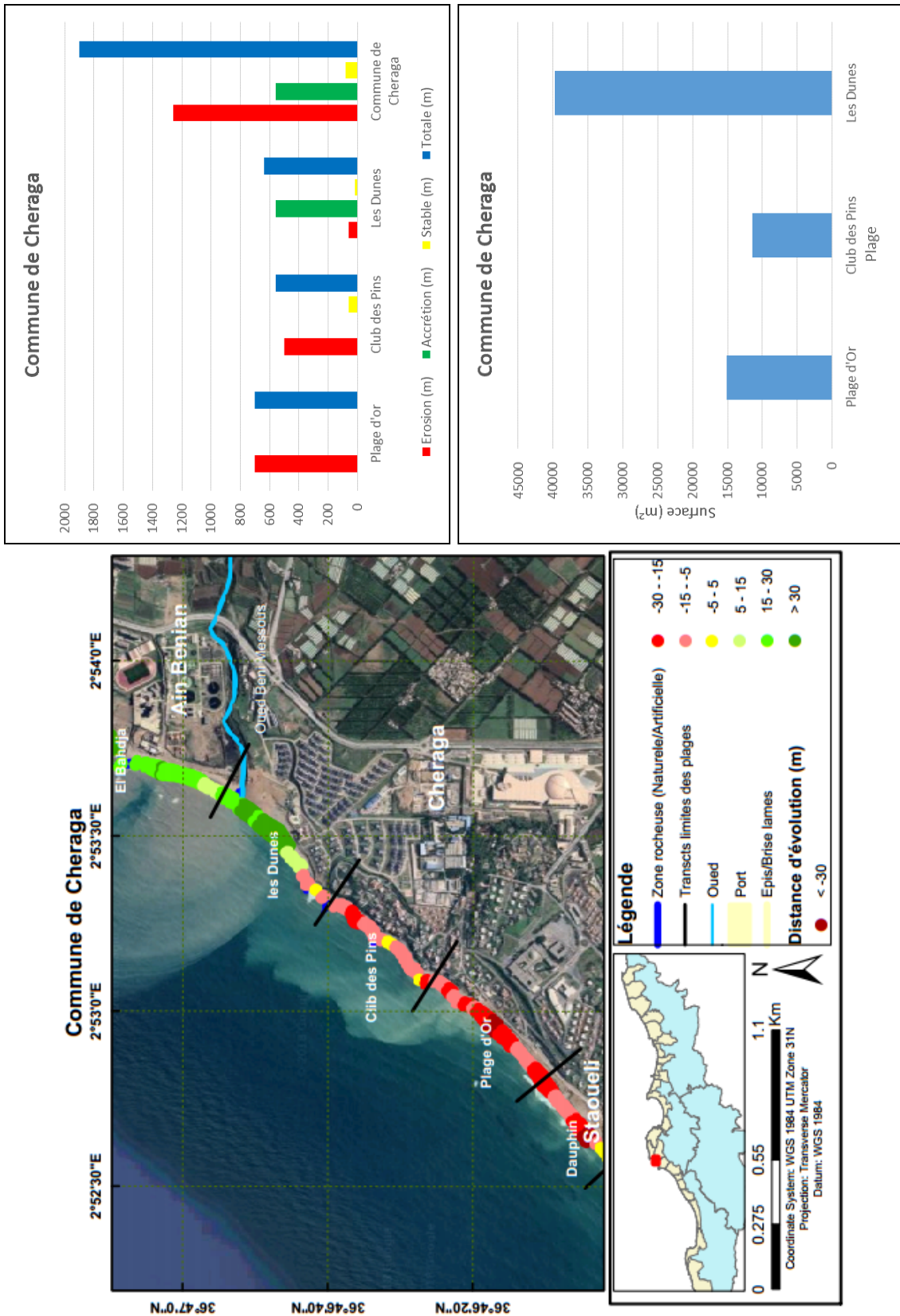


FIGURE 1.13 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Cheraga entre 2002 et 2019

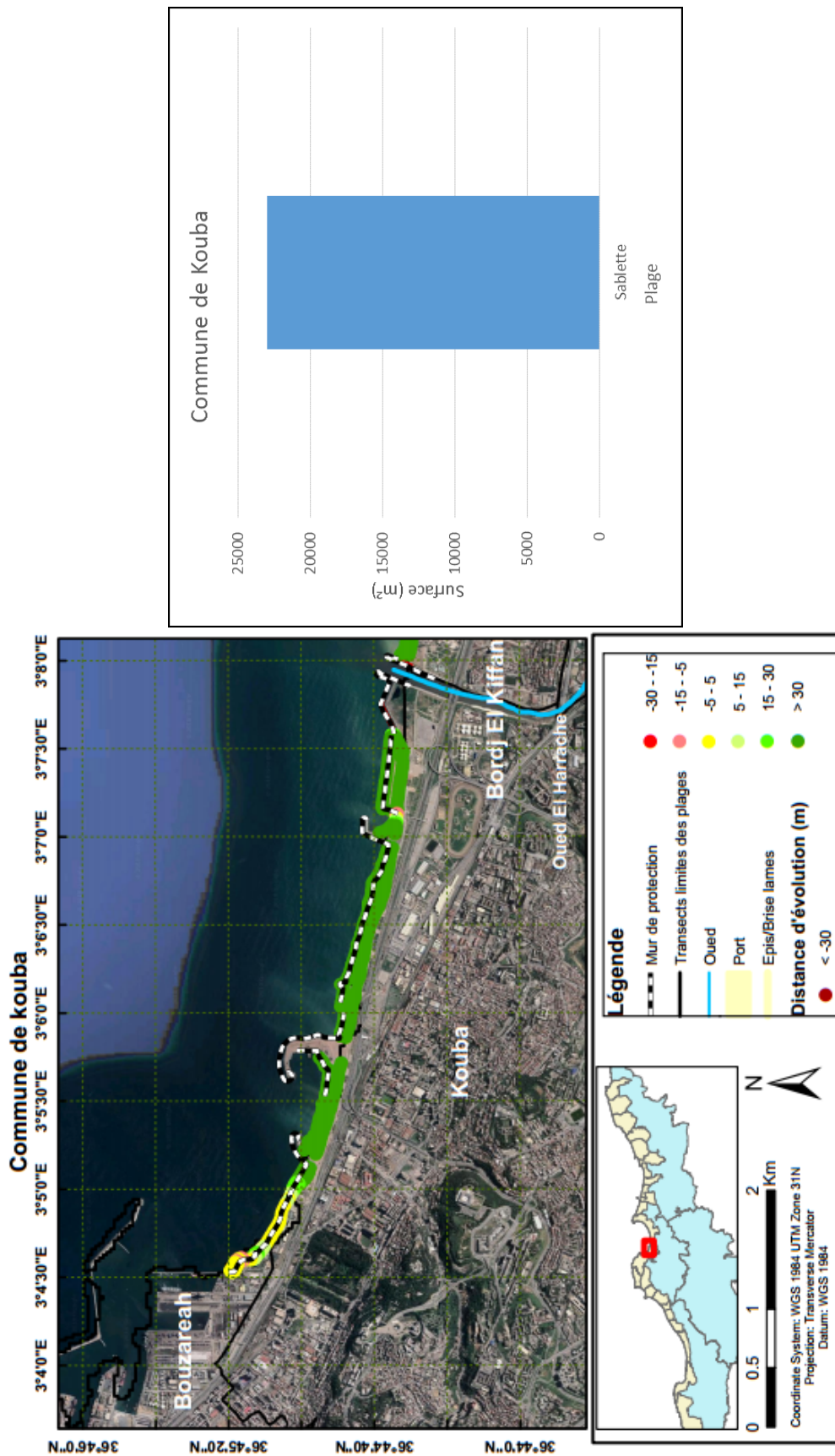


FIGURE 1.15 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Kouba entre 2002 et 2019.

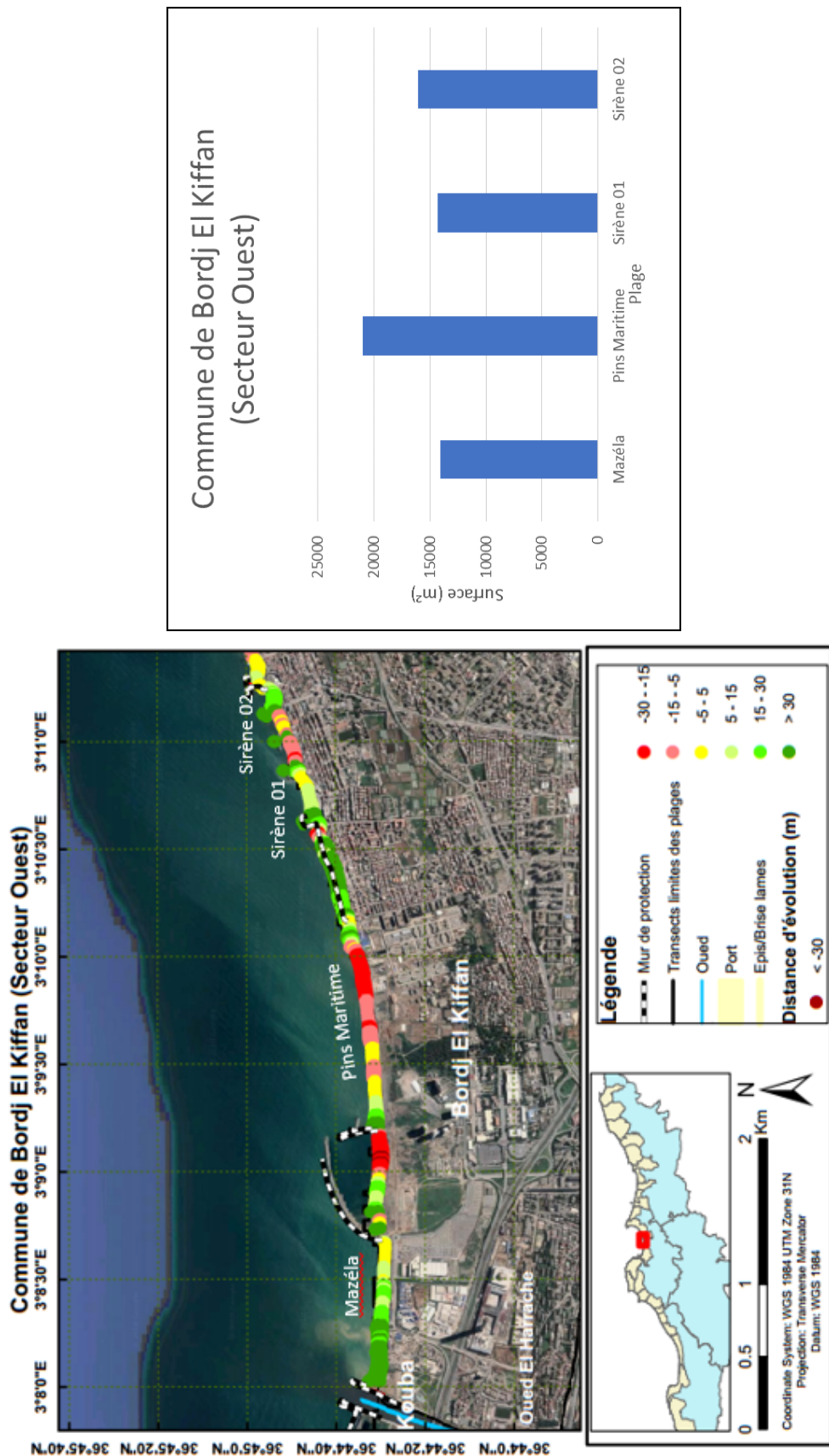


FIGURE 1.16 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Bordj El Kiffan (Secteur Ouest) entre 2002 et 2019.

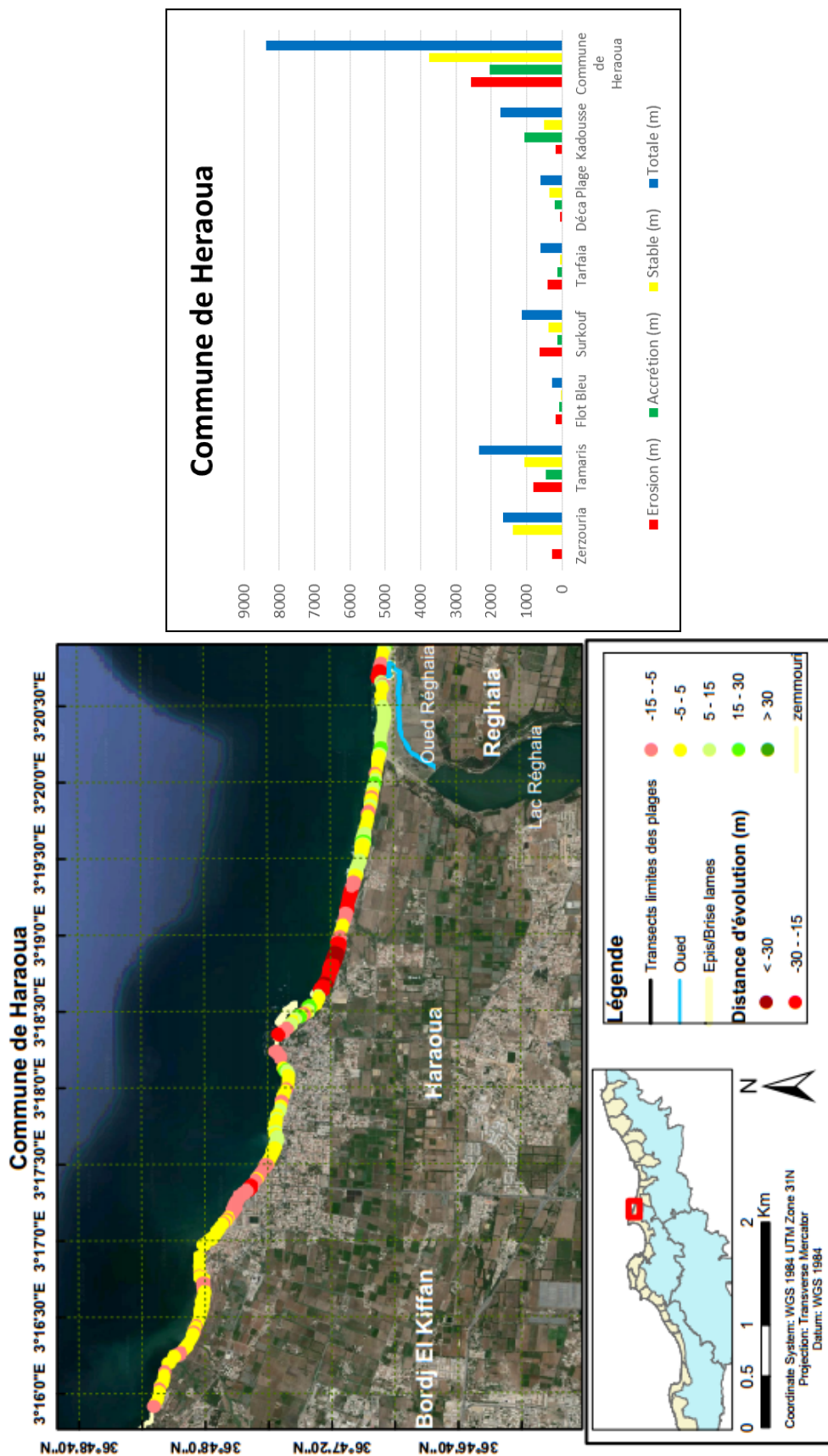


FIGURE 1.19 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Haraoua entre 2002 et 2019.

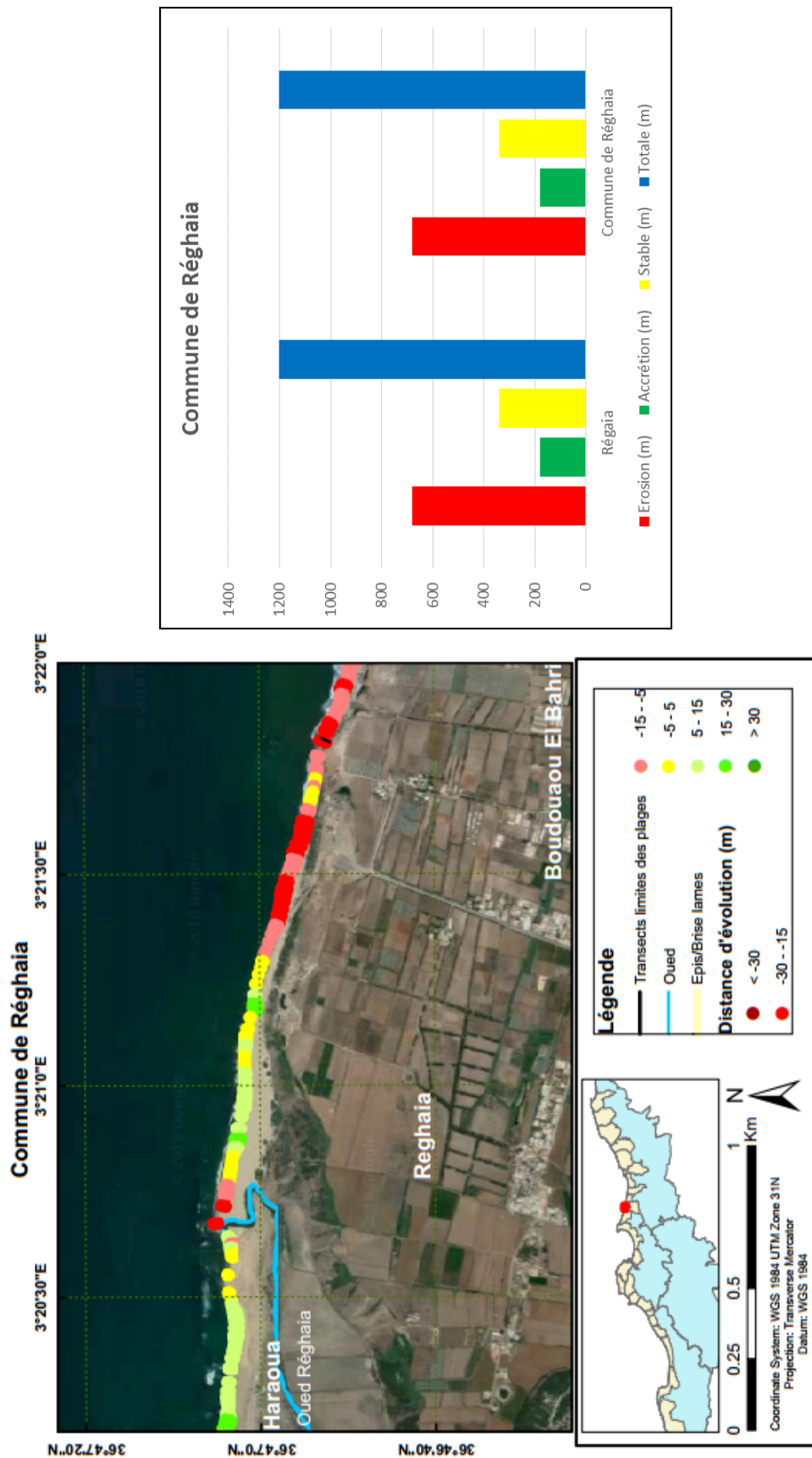


FIGURE 1.20 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Réghaia entre 2002 et 2019.

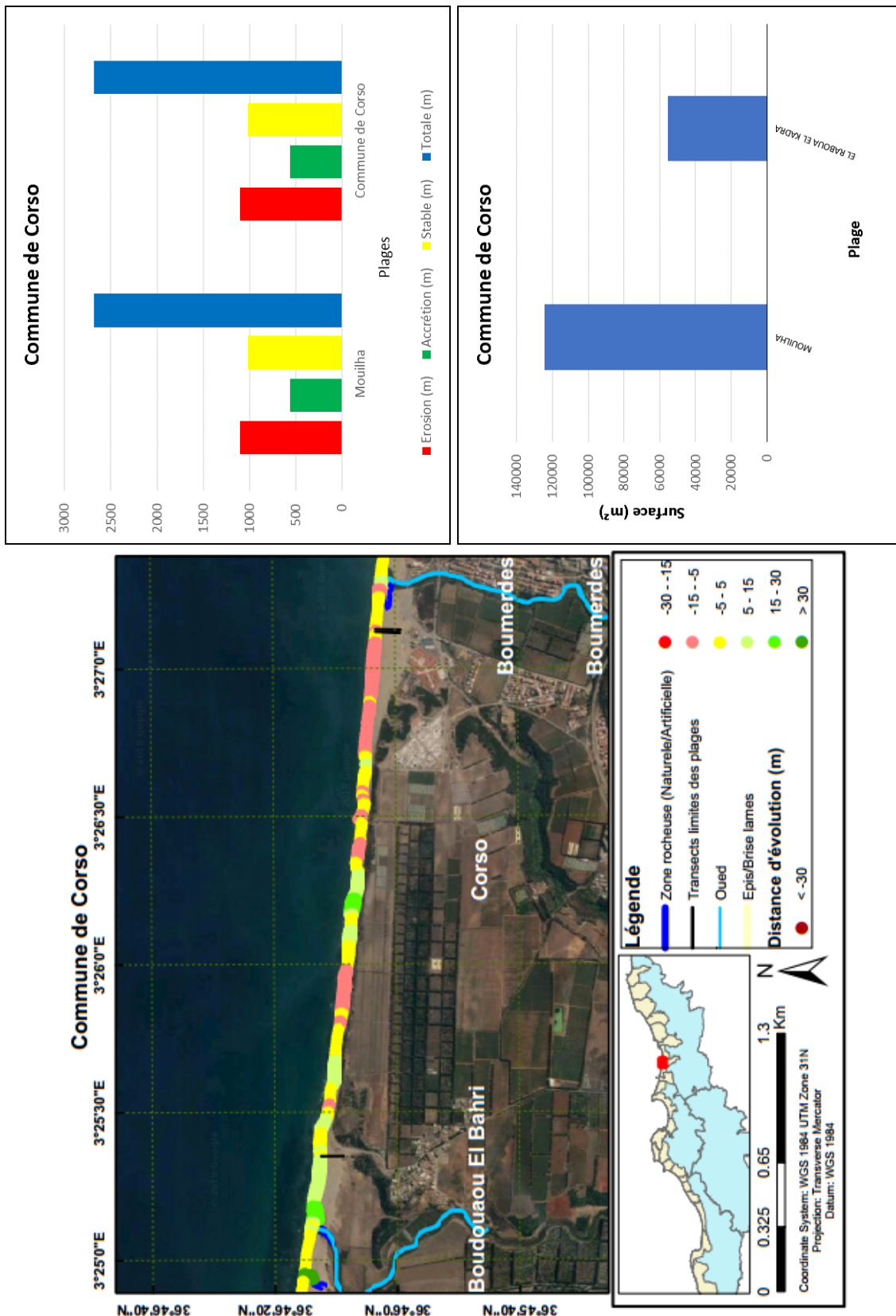


FIGURE 1.22 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Corso entre 2002 et 2019.

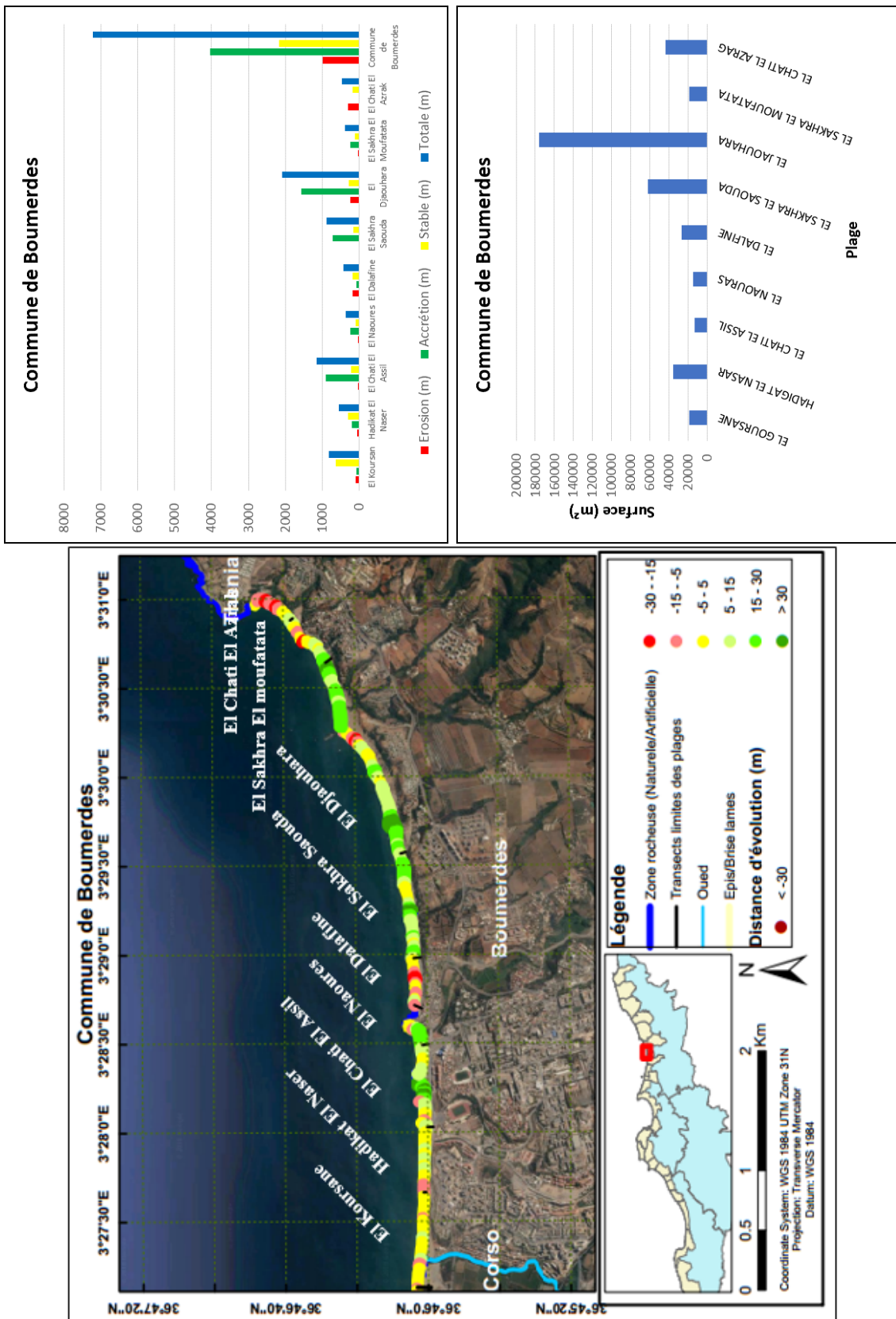


FIGURE 1.23 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Boumerdes entre 2002 et 2019.

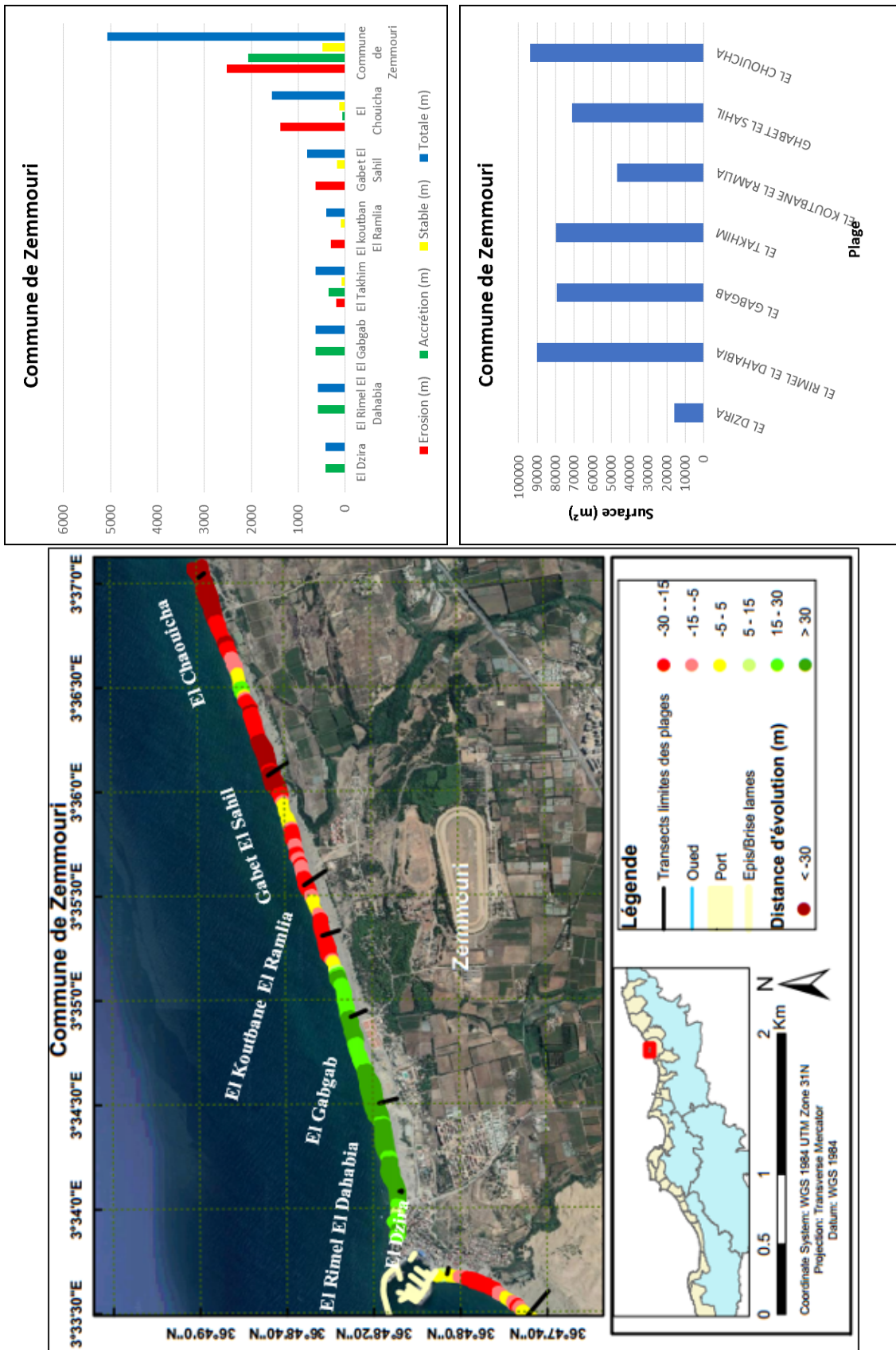


FIGURE 1.25 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Zemmouri entre 2002 et 2019.

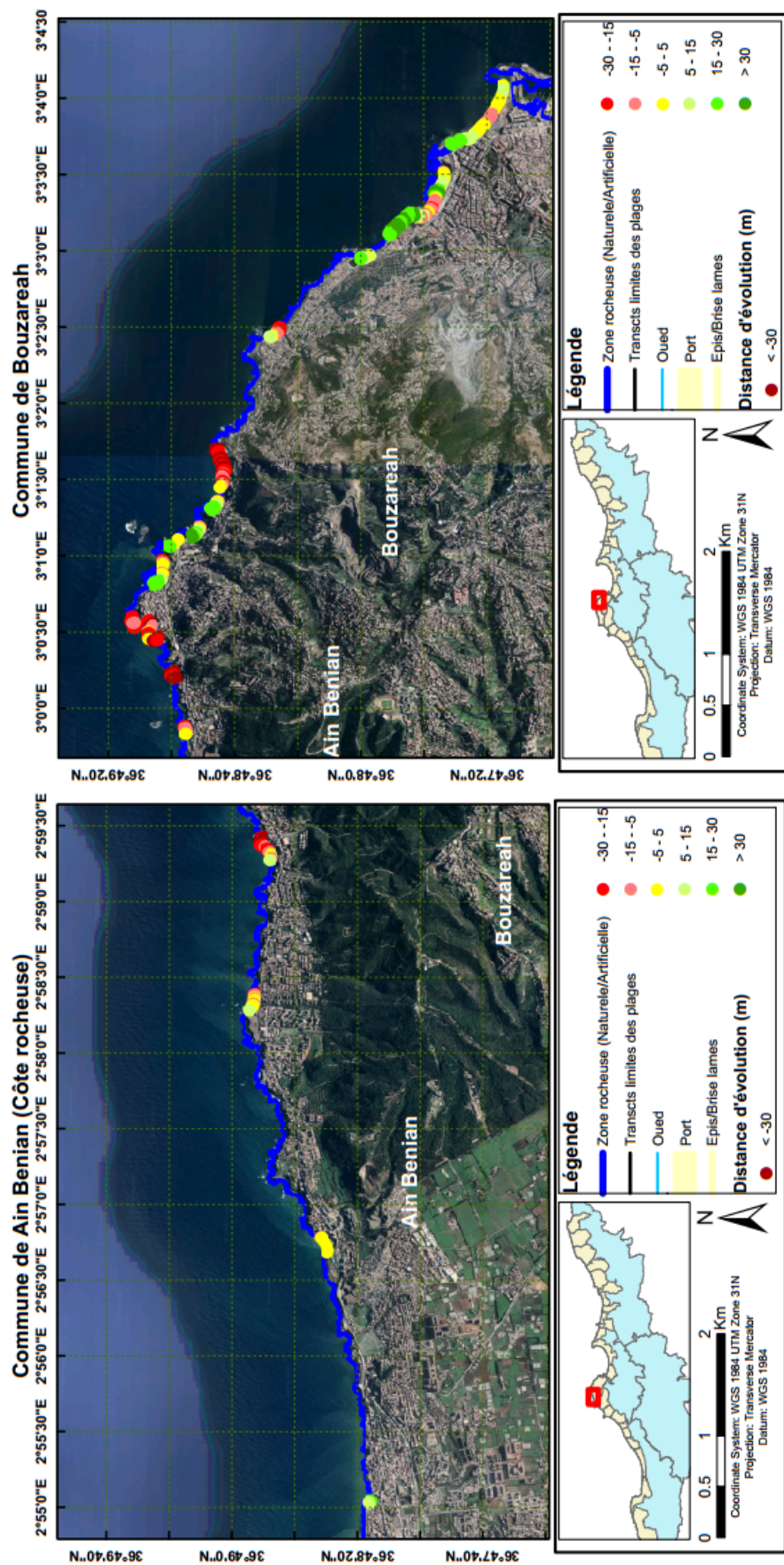


FIGURE 1.26 – Représentation de l'évolution du trait de côte et des plages de la commune de Ain Benian (Côte rocheuse) et de la commune de Bouzareah entre 2002 et 2019.

1.4 DISCUSSION

L'intégration du RS et du SIG est essentielle pour la gestion des phénomènes géographiques ([60]; [61]). Le SIG est un outil automatisé permettant d'acquérir, de stocker, de récupérer, de manipuler, d'évaluer et d'afficher des données géoréférencées. Les deux types de données fondamentaux gérés par ce système sont les données géo spatiales, qui décrivent l'emplacement au sol d'une entité et les données d'attribut, qui définissent les propriétés de l'entité. Les données sont généralement représentées et stockées dans des formats vectoriels ou raster dans le SIG [22]. La compilation de l'interprétation RS directement dans un SIG implique que les résultats peuvent faire partie d'une base de données pour un accès facile. Avec le SIG, les résultats d'interprétation d'images peuvent être combinés et liés à d'autres sources de données telles que la géochimie. D'où la possibilité d'une évaluation intégrée des résultats.

La définition du trait de côte est tout aussi délicate que son espace reste dynamique. Le trait de côte a donc plusieurs définitions qui varient selon les indicateurs [62]. À côté de cette complexité qui revient constamment, due à la mobilité des espaces d'estran, se posent les problèmes liés aux définitions des différentes disciplines qui s'intéressent à la mobilité du trait de côte (géomorphologie, géographie, océanographie). Ainsi, en fonction de l'emplacement côtier, de la source de données et de la pertinence scientifique, différents indicateurs de position de la ligne de référence sont utilisés pour documenter les changements côtiers [63]. Les lignes de référence peuvent donc varier d'une discipline à une autre. C'est pourquoi leur utilisation en cinématique du littoral a fait l'objet de plusieurs études [51]. Au-delà de cette difficulté, s'ajoute la diversité des critères d'identification du trait de côte selon les spécialités. Dans la littérature anglo-saxonne et américaine, en particulier, les termes *shoreline* et *coastline* sont considérés comme synonymes, alors qu'il faut les distinguer, car *shoreline* désignant la limite du plan d'eau en fonction des fluctuations du jet de rive et de la marée; ce qui signifie littéralement en langue française la ligne instantanée de rivage. Quant à l'expression *coastline*, elle renvoie à la limite atteinte par les pleines mers des vives eaux d'équinoxe et pouvant être matérialisée selon le type de côte par le pied de falaise ou la limite de la végétation [64]. Donc, en français, elle est liée à la notion de trait de côte.

La cartographie de l'érosion côtière à partir de l'analyse minutieuse des images Google Earth pro sous ArcGIS 10.2 et l'extension DSAS 4.3 nous a permis de sélectionner les plages les plus dynamiques pour la zone étudiée. Les changements linéaires de la position du rivage complété par le calcul des bilans de surface offre une vision de la cinématique

côtière en deux dimensions. Les transects espacés de 20 mètres et répartis sur 126 plages ont abouti à la réalisation d'une carte d'érosion côtière pour la zone étudiée.

L'évolution des positions littorales indique que toute la zone côtière étudiée est très dynamique. Mise à part quelques parties stables nous avons enregistré soit une récession, soit une accrétion. Les plages de cette région présentent différentes amplitudes de ces phénomènes d'une façon que nous avons une alternance des trois phénomènes parfois sur la même plage. Cela est dû à l'exposition à la houle par différentes directions ainsi que la morphologie côtière et la rugosité du fond de chaque partie du trait de côte ou encore la profondeur de la mer près des côtes. Outre les facteurs naturels, les activités anthropiques peuvent également influencer le changement du trait de côte. Autour de certaines côtes, des projets d'alimentation des plages et des structures de protection du littoral sont construits pour prévenir l'érosion du littoral [63]. C'est le cas des plages situées près des ouvrages maritimes car les répercussions des installations portuaire, épis et brise lames sur le transport sédimentaire et la modification de l'hydrodynamisme côtier se manifestent par l'apparition des zones d'accrétion artificielle sur le moyen et le long terme.

L'utilisation des images de Goole earth pro pour la mesure de la cinématique du trait de côte est pertinente dans le cas des littoraux extrêmement dynamiques dont l'évolution est supérieure à la marge d'erreur [51]. La numérisation de la ligne instantanée de rivage a d'abord nécessité un travail d'identification et d'extraction des marqueurs pertinents du trait de côte. Ce travail peut se faire manuellement sur les images satellitaires. Les marqueurs peuvent être directement visibles sur l'image si celle-ci a une haute résolution comme c'est le cas des images utilisées dans cette étude.

Les résultats de mesure des taux d'évolution du trait de côte, quelle que soit l'approche par analyse spatiale, souffrent de plusieurs sources d'erreurs ([43]; [65]; [66]). La qualité des résultats d'une analyse diachronique est donc intimement liée à la connaissance de la marge d'erreur [62]. En effet, les marges d'erreur permettent de caractériser la situation (érosion, stabilité, accrétion) sur une période bien déterminée. L'estimation de ces risques d'erreurs doit conduire à l'élaboration d'une marge d'erreur qui sera prise en compte dans l'interprétation des résultats [67]. C'est la raison pour laquelle les erreurs les plus récurrentes en cinématique du littoral, particulièrement en ce qui concerne l'analyse du trait de côte, sont principalement les erreurs de positionnement et les erreurs techniques. L'erreur globale, appelée Erreur de Position globale du trait de côte, est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés de chaque erreur : erreur de pixel, de géoréférencement, de numérisation et d'oscillation [66].

Le calcul des statistiques relatives à l'évolution du trait de côte a été effectué avec l'application DSAS 4.3 qui fournit une méthode normalisée qu'on peut répéter pour le calcul de l'évolution statistique tout en analysant les changements passés, présents et futurs du littoral [7]. Le calcul du taux d'évolution du trait de côte nécessite au préalable la mise en place d'au moins deux traits de côte numérisés à différentes dates. Le principe général de l'outil DSAS est de mesurer les écarts entre les traits de côte d'une même série et de calculer les statistiques des taux d'évolution (en m/an) sur chaque transect. Pour cela, l'exploitation de l'outil demande au préalable une mise en forme rigoureuse des données dans une géodatabase personnalisée. Il s'agit notamment de créer deux entités : une première entité contenant une ou plusieurs lignes de référence nommées baseline. Celle-ci se situe en retrait du trait de côte, et les transects générés lui sont perpendiculaires. On a une seconde entité constituée de traits de côte déjà numérisés sur ArcMap nommée shorelines. Ces deux entités sont incluses dans la zone tampon (buffer shoreline) qui permet de stabiliser l'espace linéaire dans lequel les traits de côte ont été numérisés. Lorsque tous les paramètres d'entrée sont correctement renseignés, le DSAS génère automatiquement les transects selon le pas de mesure choisi. Il est nécessaire d'estimer l'incertitude liée à la méthode ainsi que le choix des indices relatifs à l'évolution du trait de côte ([66]; [51]). Les plages étudiées évoluent de façon très différente les unes par rapport aux autres. Leur orientation, leur morphologie et leurs caractéristiques granulométriques respectives impliquent une réponse différente des agents de la morphogénèse. Leur évolution naturelle va dépendre de deux facteurs importants dont les effets peuvent s'ajouter ou se soustraire [68]. (i) les oscillations relatives du niveau marin au niveau du rivage en favorisant les phénomènes d'érosion côtière et (ii) les paramètres hydrodynamiques, notamment l'énergie déployée par le vent, au niveau de la flèche littorale et par les houles dont la turbulence intense due au déferlement érode les côtes sableuses et alimente la dérive littorale. De ce fait, l'ensemble du système sableux change de configuration et de morphologie en donnant des zones d'accrétion et des zones d'érosion.

L'évolution du littoral centre algérien est également liée à des facteurs anthropiques, notamment l'intensification des aménagements, des activités industrielles et l'urbanisation croissante. Ces activités socio-économiques ont conduit à la mise en place, ces dernières années, d'un certain nombre d'infrastructures et de travaux de construction et de nombreux ouvrages le long du littoral conduisant ainsi à des modifications dans la distribution des sédiments et à une dégradation de l'environnement naturel de ces zones [69]. Dans la zone d'étude, certaines actions anthropiques peuvent avoir un lien direct avec ce déséquilibre et de là entraîner le recul du trait de côte.

Dans les zones où les changements à moyen terme les plus importants ont été enregistrés, il y a une coïncidence générale entre les tendances indiquées par la ligne instantanée du rivage et les dunes. D'autre part, les plages sont plus dynamiques et changeantes et présentent des seuils d'érosion importantes [37] et leur réponse aux changements des conditions hydrodynamiques est beaucoup plus rapide. Ainsi, l'avancée de la ligne de rivage dans les plages d'accrétion peut ne pas se refléter dans une tendance positive du pied de dune. En ce sens, les conditions des plages le long de la côte étudiée montrent une grande variabilité spatiale en fonction de variables telles que l'orientation côtière, la granulométrie de la plage, les conditions hydrodynamiques ou les caractéristiques de l'arrière-plage. Par conséquent, à certains endroits, l'excès de sédiments sur une plage d'accrétion ne se traduit pas par la formation de dunes mais uniquement par l'avancée de la ligne de rivage. De même, les ensembles de données satellitaires à haute fréquence offrent la possibilité de détecter les oscillations du littoral et les changements à court terme, offrant un degré de confiance et une puissance d'interprétation plus élevés lors de l'évaluation des changements du littoral à l'échelle décennale [70].

1.5 CONCLUSION

L'image satellite est une source d'information extrêmement importante, en particulier les images à très haute résolution spatiale en raison de leur précision sub-métrique. Le choix d'une image satellite avec une résolution spatiale spécifique dépend de l'objectif du traitement à réaliser. Ainsi le choix est lié à la disponibilité de l'image, car ce type d'image est coûteux. C'est pourquoi nous avons choisi de travailler sur les images issues de Google Earth pro qui est une plateforme gratuite dont la méthodologie mise en œuvre dans cette étude répond à un réel besoin de facilité le téléchargement des images Google Earth pro ainsi que leur rectification pour une meilleure cartographie du trait de côte.

L'analyse d'images satellites consiste avant tout à choisir l'image et la composition colorée qui visualise mieux l'objet géographique à traiter, le choix est donc dicté par l'objectif d'interprétation fixé a priori. Une image en couleurs peut apporter beaucoup plus d'informations qu'une image en niveaux de gris. La couleur d'un objet dépend de la partie du spectre dont il réfléchit plus le rayonnement. L'analyse d'images satellites en couleurs à très haute résolutions consiste à reconnaître les objets pertinents, présents dans la scène, à les dissocier de leur environnement et à les classer pour une exploitation ultérieure.

Cette étude a fourni l'évaluation dans le temps de l'évolution du littoral le long de la côte algéroise. Avec la constellation croissante des images à haute résolution, la capacité de

résoudre la dynamique complexe du littoral s'est accrue. Ceci est d'une grande importance pour les géoscientifiques. La télédétection convient à la collecte d'informations à grande échelle et à haute fréquence. Ainsi, le SIG est un outil fonctionnel pour gérer diverses données. À cet égard, il démontre sa capacité d'affichage et d'interprétation immédiate. De plus, avec la croissance du traitement d'images et de la vision automatisée dans la recherche, les anciennes méthodes d'observation visuelle et des descriptions disparaissent de plus en plus. La technique d'apprentissage en profondeur est un moyen efficace pour extraire des caractéristiques des zones d'étude, intégrer des données multi-sources et déterminer les taux d'évolution.

La méthodologie développée pour l'étude des changements du littoral le long de la côte étudiée entre 2002 et 2019 présente un intérêt majeur pour la quantification numérique de l'érosion. Nous nous sommes intéressés également à caractériser chaque plage par sa capacité d'accueil représentée par la surface de la plage.

Au terme de ce travail, nous avons mis en place une base de données des images satellites de très haute résolution spatiale (0.2 m). Ensuite, nous nous sommes intéressés à digitaliser les images pour créer une base de données des traits de côte et de la géométrie de toutes les plages (126 plages) de notre zone d'intérêt.

Nous avons pu définir le problème d'exploitation des images Google Earth Pro dans notre application, et mettre une méthodologie pour les rectifier en utilisant les outils du SIG. Cela nous a permis une transformation minutieuse du trait de côte en forme vecteur et la superposition des traits de côte des dates différentes.

Dans cette partie, nous avons mis au point une méthode d'extraction et de suivi de la ligne instantanée de rivage en nous basant sur la nature de la côte, le matériel, mais aussi les données disponibles. Ensuite l'outil DSAS nous a permis de faire un diagnostic sur la dynamique des plages. Cette étude a montré que ce littoral a connu une accrétion après 2002 due à la mise en place des ouvrages de protection. Elle constitue également un outil d'aide pour la réalisation des cartes permettant à la fois d'estimer la vulnérabilité des côtes, et de fournir les informations requises pour la définition des éventuelles stratégies d'aménagement et le dimensionnement des projets, afin de préserver ces géo systèmes. Ainsi, le phénomène analysé est très complexe, car très changeant sur une même portion du littoral. Les cartes élaborées apportent une contribution à la compréhension du fonctionnement du littoral centre algérien et constitueront des informations clés pour surveiller, valoriser et qualifier les plages.

2.1 INTRODUCTION

La compréhension et l'interprétation des processus côtiers sont essentielles pour décrire et suivre correctement les changements dans la zone côtière. L'analyse spatio-temporelle des évolutions du trait de côte est essentielle pour comprendre les facteurs moteurs de l'évolution du littoral [71]. Par conséquent, ce chapitre est consacré au suivi spatiotemporel du trait de côte et des plages en relation avec l'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire car les littoraux sont menacés par la combinaison d'une multitude de facteurs parfois naturels et le plus souvent anthropiques. Ensuite les côtes sablonneuses sont des environnements complexes qui sont soumis à une grande variété de phénomènes. Tels que l'énergie des vagues et les nombreuses activités humaines qui jouent un rôle fondamental dans le risque d'exposition à l'érosion côtière et qui contribuent à des bilans sédimentaires négatifs ([11]; [12]; [13]). Afin de mieux comprendre le changement du trait de côte le plus souvent vulnérable et son évolution dans le temps, et devant le besoin de prévenir les risques côtiers vu le réel danger que présente cette érosion par ses conséquences économiques et environnementales [72]. Nous avons choisis une zone touristique qui connaît une pression anthropique importante, un oued qui apporte une quantité considérable des sédiments et l'installation des ouvrages de protection sur la côte de cette région. La présente contribution est dans le but d'une planification territoriale locale et de développement durable de cette zone côtière. Puisque la zone d'étude est locale il est important d'effectuer une étude à très haute résolution spatiale. Pour atteindre notre objectif nous avons utilisé les images satellites avec une résolution spatiale de 0.2 m pour les années 2002, 2008, 2014 et 2020 d'une part et d'autre part le modèle SWAN à haute résolution. Pour l'étude diachronique nous avons utilisé ArcGIS pour réaliser une mosaïque d'images, rectifier ces mosaïques et calculer les distances qui séparent les

traits de côte prises sur différentes dates. Les énergies des vagues régissent la réfraction-diffraction des vagues et la concentration de cette énergie sur certaines zones. L'intérêt de cette démarche est de permettre des calculs statistiques d'extrapolation et des calculs de tendance utilisés en analyse diachronique de la dynamique du trait de côte. Cette méthode permet d'obtenir une représentation cartographique et graphique des résultats statistiques sur l'évolution historique du trait de côte. Les méthodes statistiques du taux de régression linéaire (LRR), de taux au point final (EPR) ont été utilisées pour estimer et prévoir les taux de changement du littoral [73]. Dont le LRR joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la position du rivage en réduisant l'erreur aléatoire potentielle et la variabilité à court terme [74]. Ce chapitre s'intéresse aux facteurs explicatifs de cette dynamique destructive et intègre le fonctionnement hydrodynamique côtier, la morphologie côtière des plages (topographie, granulométrie) liée aux sources des sédiments qui les alimentent et d'autre part, à l'énergie mise en jeu dans leur transport et leur dépôt, la bathymétrie et les différentes formes d'intervention humaine. Ainsi peu de travaux ont été réalisés pour approfondir la compréhension des réponses du littoral à l'égard des facteurs hydrodynamiques qui influencent cette évolution diachronique. Dont la question à laquelle nous avons essayé de répondre est la suivante :

- peut-on exploiter les résultats de quantification de la célérité et la hauteur significative des vagues pour expliquer l'évolution du trait de côte ?

Cependant, avec l'avènement des technologies géospatiales et des données de télédétection des mesures plus précises de la longueur du littoral peuvent être effectuées à l'aide de données à très haute résolution. [75]. En essayant de répondre à la question :

- Quelle est la longueur du trait de côte de la région centre algérienne mesurée à très haute résolution ?

2.2 METHODOLOGIE

Environ 4000 images satellites ont été acquises lors de travaux récents de 2002 à 2020 sans aucun effet de nuage et de bonne qualité. Évaluation et cartographie des modifications du littoral nécessaires pour disposer d'une géodatabase pour la zone côtière algéroise. Toutes les images sont des produits géo référencée. Elles sont en effet dans le datum du système géodésique mondial (WGS 84) et les systèmes de projection Universal Transverse Mercator (UTM), 31 hémisphère Nord. À l'aide du logiciels ArcGIS, environ 50 points de contrôle au niveau 0 m ont été utilisés pour exécuter la rectification de tous les mosaics.

La méthode Transect nécessite des décisions du sujet qui affectent les résultats. La première décision concerne le dessin de la ligne de base. Les lignes de base doivent suivre la tendance générale des rivages, ce qui signifie que la ligne de base doit être approximativement parallèle à la tendance des rivages ([76]; [77]). Les rivages ont été tracés et numérisés manuellement dans le logiciel SIG ESRI ArcMAP en utilisant la ligne de démarcation humide/sèche comme approximation du rivage. Il s'est avéré être un proxy fiable dans des conditions similaires, sur les plages voisines [78]

Après avoir converti les images de raster en vecteur "Vectorisation". DSAS v4.3 a permis le calcul statistique à partir des différents traits de côte extraits des images utilisées. Cet outil a pour avantage de donner une évolution graphique et statistique du trait de côte suivant des transects perpendiculaires aux lignes à comparer.

Pour cette étude, nous avons utilisé comme pas de mesures 10 m entre les transects longues de 300 m. Le maillage fin (10 m) permet de mieux apprécier l'évolution du littoral dans le détail et préciser le comportement du littoral localement. Comme la zone d'étude était vaste (c'est-à-dire environ 360 km de long), la zone d'étude a été divisée en trois parties, à savoir la côte de Tipaza, d'Alger et de Zemmouri. La première représentation est basée sur la classification des transects sur ArcGIS, permettant de voir le taux d'évolution entre deux traits de côte. La seconde représentation graphique est sous forme d'aire. Ainsi, sur l'axe des ordonnées on a l'étendue linéaire des plages et, sur l'axe des abscisses, l'évolution du trait de côte.

2.3 RESULTATS

2.3.1 La côte centre algérienne

2.3.1.1 *L'évolution morpho- dynamique du trait de côte*

Les résultats obtenus à partir des techniques d'analyses mentionnées dans la partie méthodologie ont été présentés dans ce chapitre. Pour une meilleure compréhension des résultats de la présente étude obtenus par l'analyse diachronique des changements du trait de côte et par des méthodes de calcul automatique, nous résumerons l'évolution du changement pour cette période de temps d'étude (2002-2020)

L'analyse des changements côtiers à moyen terme révèle que la côte étudiée présente une grande variété de tendances d'évolution du trait de côte enregistrées entre 2002-2020 et présentées dans les figures 2.1- 2.3. Les résultats suggèrent que la plupart des

transects pour l'ensemble de la côte sont accrétionnelles et moins érosives entre 2002 et 2020 pour la baie d'Alger. Dans d'autres secteurs, une tendance inverse est observée dont l'érosion domine dans la baie de Zemmouri et l'accrétion dans la baie de Bou Ismail. Néanmoins, les modifications du littoral pour l'ensemble de la zone d'étude sont spatialement irrégulières et la stabilité du littoral prévaut sur la plupart des zones rocheuses. La longueur de l'érosion du littoral est plus importante que celle de l'accrétion du littoral, tandis que le taux d'accrétion est plus important du taux d'érosion. Cela est dû principalement à l'installation des ouvrages de protection.

Les résultats d'analyse des changements de la position du rivage de notre zone d'intérêt ont été effectués le long de 25258 transects sur une série temporelle entre 2002 et 2020, ces transects espacés de 10 mètres et répartis sur la région côtières des trois baies ont abouti à la réalisation des cartes d'érosion côtière de la côte centre algérienne.

Les distances linéaires d'évolution du trait de côte pour chaque carte ont montrées sur une distance totale de 360 km, soit une récession, soit une accrétion, les parties stables sont des parties où il n'y a pas eu d'évolution du trait de côte.

L'instabilité spatio-temporelle du rivage sableux est due aux multiformes et profondes agressions anthropiques telles que l'urbanisation, l'aménagement côtier, la construction des ports et l'extraction abusive du sable. Elle est ainsi contrôlée par les processus naturels, tels que les facteurs climatiques, hydrodynamiques et géométriques (l'action de la dérive littorale, les caractéristiques physiques de la houle, l'orientation et la morphologie de la côte) ([19]; [79]) Tous ces paramètres conduisent périodiquement à des oscillations de l'allure de la ligne de rivage le long de la côte. Ces variations de trait de côte se traduisent par des phénomènes d'érosion et d'accrétion des zones côtières ([38]; [39])

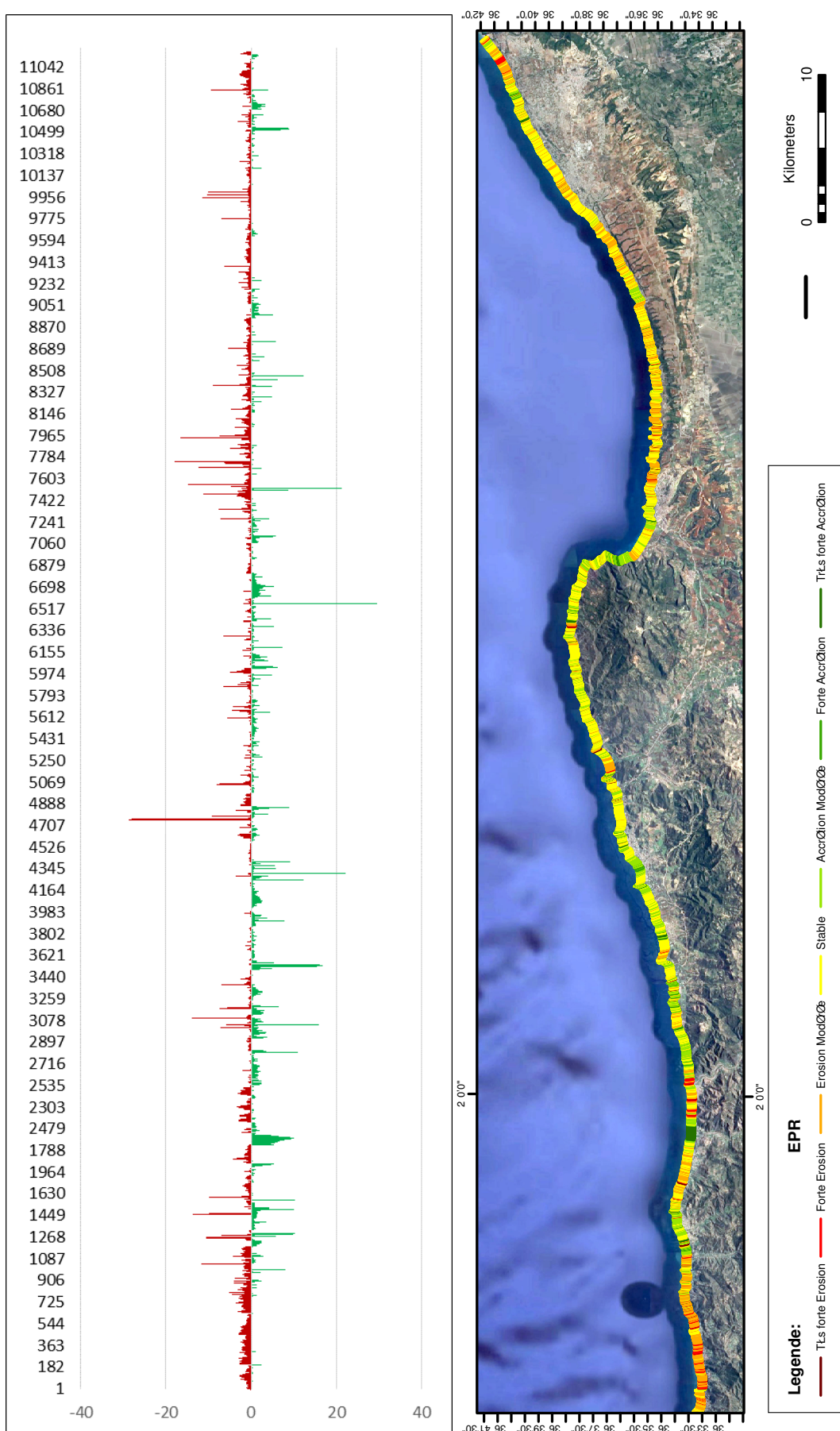


FIGURE 2.1 – Représentation de la surface des plages de la région de Bou Ismail en 2020

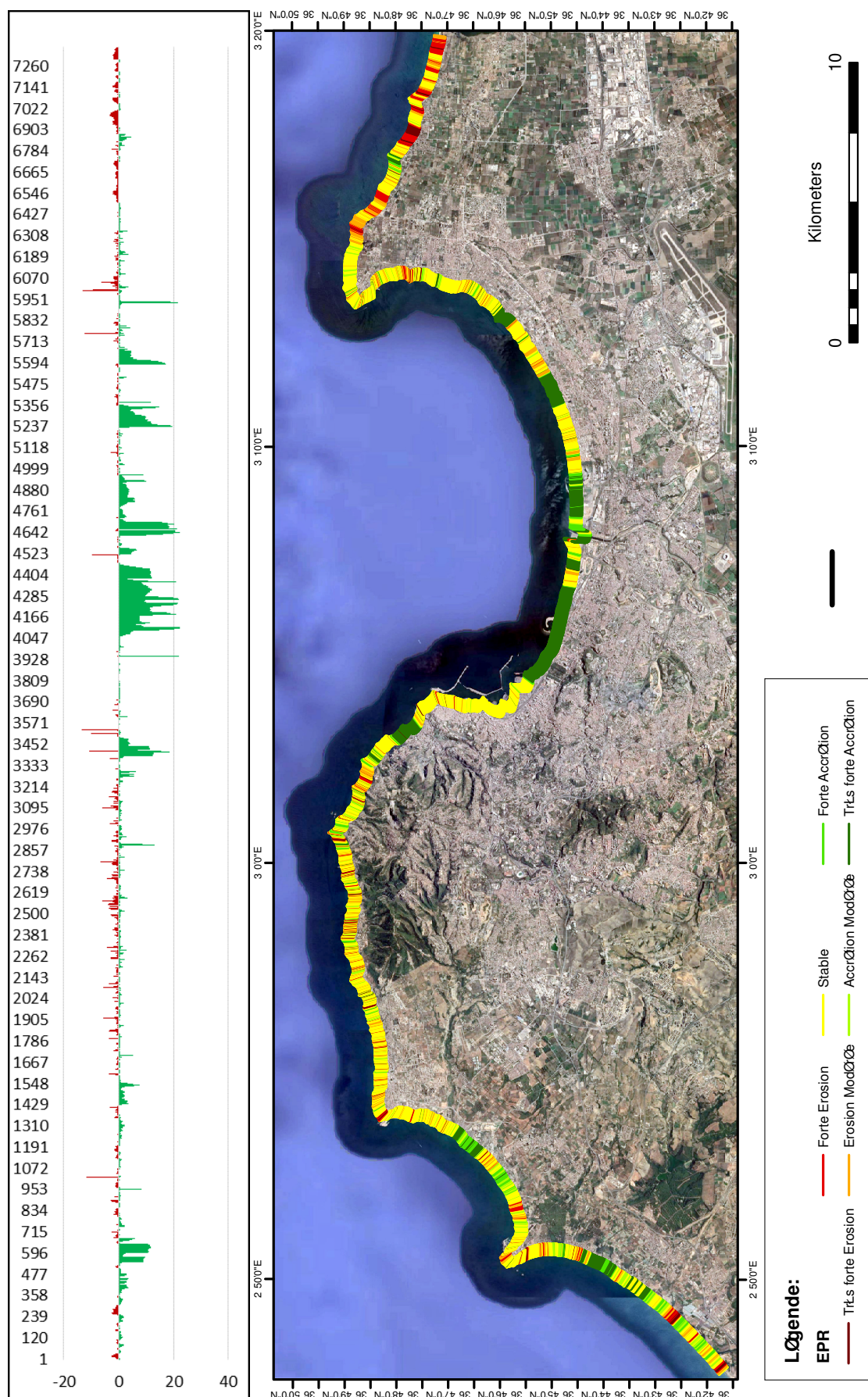


FIGURE 2.2 – Représentation de la surface des plages de la région d'Alger en 2020

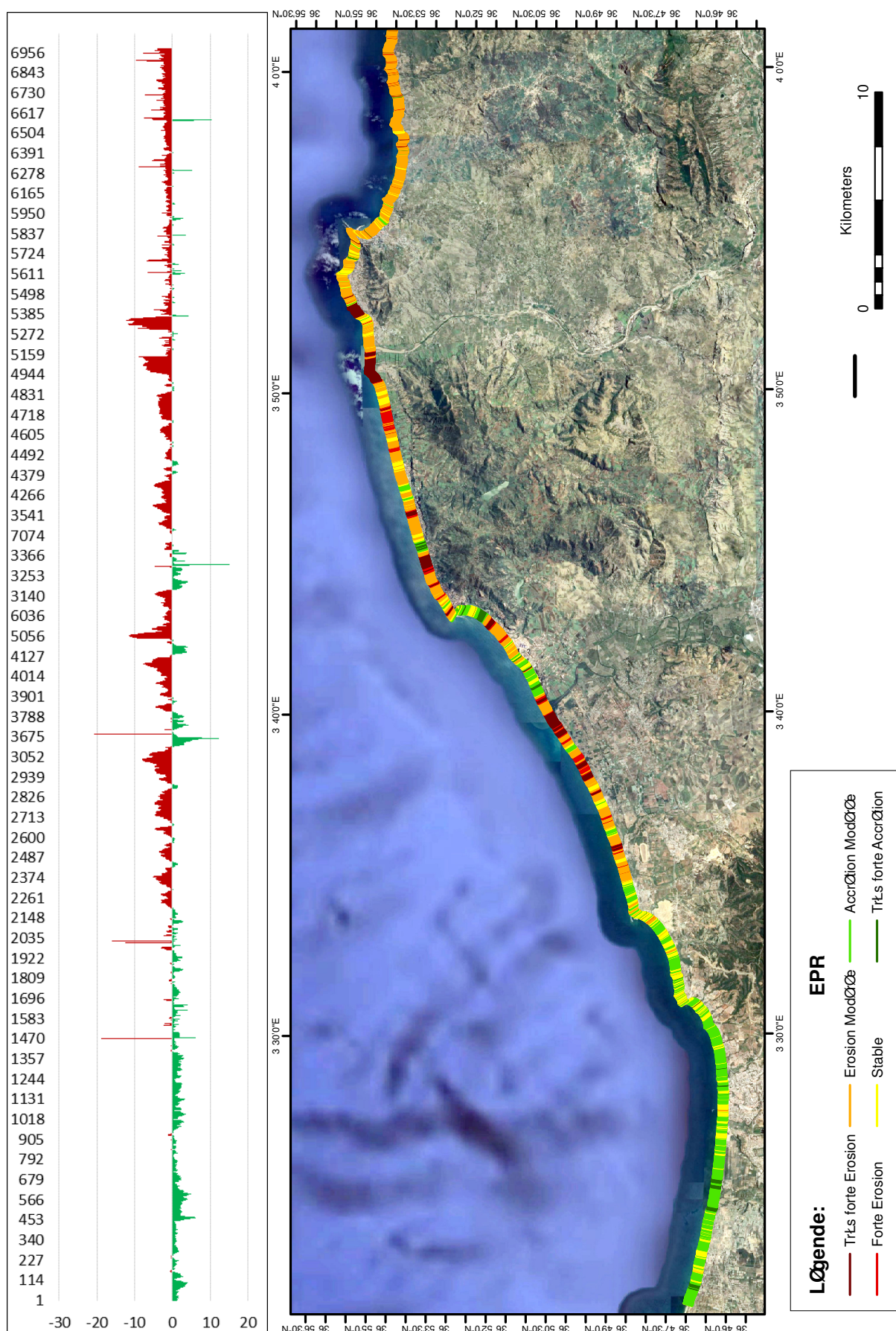


FIGURE 2.3 – Représentation de la surface des plages de la région de Zemmourri en 2020

2.3.1.2 Calcul des surfaces des plages le long de la côte

Les surfaces de toutes les plages de la côte centre algérienne ont été calculées et représentées sous forme d’histogrammes. Figures 2.4- 2.6.

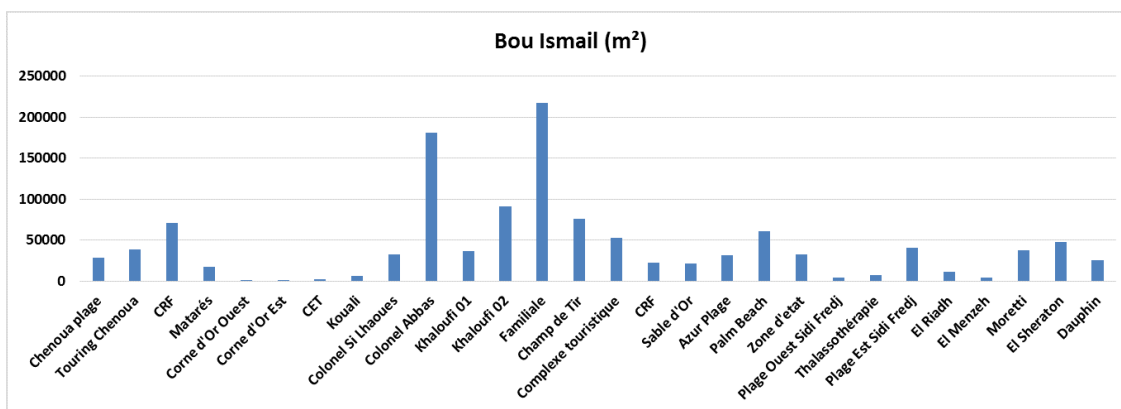


FIGURE 2.4 – Représentation de la surface des plages de la région de Bou Ismail en 2020

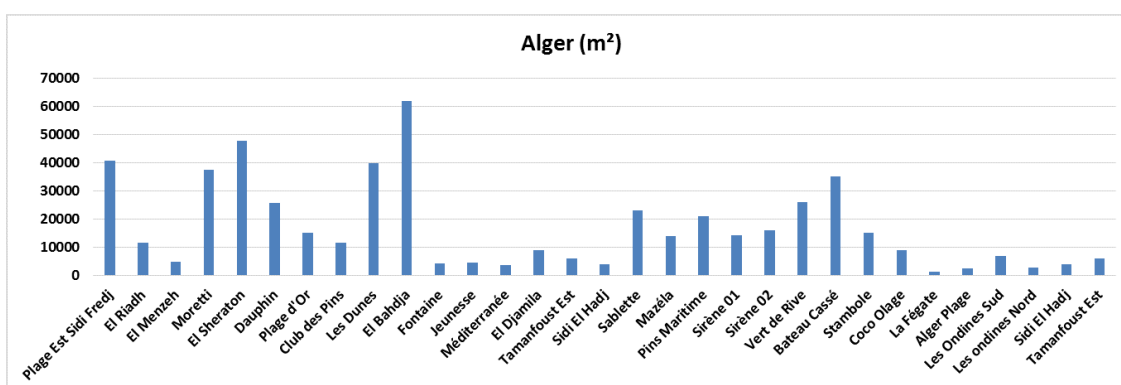


FIGURE 2.5 – Représentation de la surface des plages de la région d’Alger en 2020.

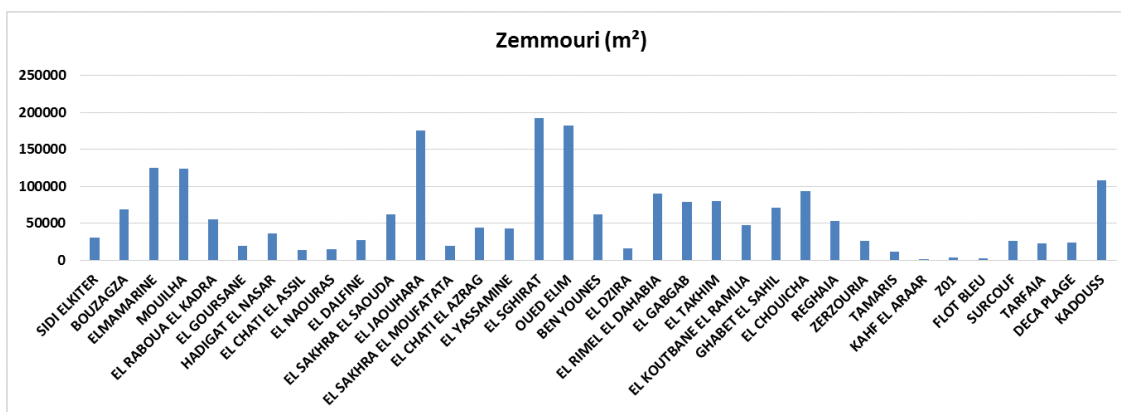


FIGURE 2.6 – Représentation de la surface des plages de la région de Zemmouri en 2020.

Les plages de la côte ont enregistré au cours de la période globale (2002-2020) des successions des phases de gain et de perte surfacique, les principales causes de l'érosion dans notre zone d'étude sont liées aux vagues et aux courants, à la construction des ports et des infrastructures, à l'extraction du sable et à la réduction des apports solides des oueds.

2.3.1.3 Discussion

La variabilité spatiale et temporelle des modifications du littoral sur la côte algéroise peut être liée à la fois à l'hétérogénéité mentionnée ci-dessus de la côte et à la diversité des facteurs contribuant aux processus d'érosion-accrétion dans la zone. Parmi les facteurs naturels, celui qui pourrait agir à l'échelle spatiale la plus large est le changement récent du niveau relatif de la mer. Un facteur naturel très important à l'origine de l'érosion du littoral dans la zone d'étude est l'action des tempêtes, qui, sur cette côte, provoquent généralement l'aplatissement de la plage, des escarpements d'érosion sur la plage, des dunes et des processus de débordement en particulier sur les pentes les plus abruptes. Les plages en raison de leur plus grande sensibilité aux changements du régime des vagues [80] sont les plus vulnérables. Outre les tempêtes, le principal facteur naturel déterminant l'évolution du littoral dans la zone d'étude est constitué par le cadre côtier, y compris la bathymétrie littorale et l'orientation côtière. À court terme, les rechargements artificiels des plages peuvent masquer les tendances naturellement érosives révélées à moyen terme. Dans certains cas, ce type d'interventions peut contribuer à une stabilité globale prolongée non seulement dans la zone réapprovisionnée mais aussi dans les zones en aval [81]. Parmi les facteurs déterminant le comportement des plages, il apparaît que les aspects liés au contexte géologique côtier (tels que le plan de plage ou la morphologie du littoral) sont la principale raison des tendances contrastées du littoral observées le long des plages. Les vagues atteignent généralement la côte avec un certain angle d'approche, donnant lieu à un transport côtier important et à un transport transfrontalier mineur ; par conséquent, il s'agit principalement de plages alignées sur la dérive selon [82]. Elles ont tendance à se développer dans les zones directement affectées par l'apport de sédiments fluviaux [83]. Cependant, la bathymétrie littorale sur certaines plages rectilignes peut concentrer l'énergie des vagues et produire une érosion localisée. En fait, une alternance irrégulière de tendances côtières érosives, accumulatives et stables peut être trouvée dans cette zone, en raison d'une combinaison de facteurs, y compris la réduction globale de l'apport de sédiments, les travaux d'alimentation artificielle et d'affaiblissement des dunes par le transit humain. En effet, là où la dérive littorale a été interrompue par des structures artificielles, des modifications du littoral se sont produites très rapidement [84].

2.3.1.4 Mesure de la longueur du rivage

Dans cette étude, la longueur de la côte algéroise, pour l'année 2020 a été calculée à partir d'images satellite Google Earth. La longueur des rivages a été mesurée à l'aide de la fonction de calcul de la géométrie dans ArcGIS 10.2. La longueur du littoral change lorsqu'elle est mesurée à partir de données de télédétection de résolution différente ou lorsqu'elle est mesurée à différentes échelles. Elle change également lorsqu'elle est mesurée à la même échelle à partir de données de télédétection de même résolution à des intervalles de temps différents. La raison de cette variabilité temporelle est le changement de forme du littoral associé à l'érosion et à l'accrétion. La longueur du littoral de la côte centre algérienne à partir d'images Google earth pro a été mesurée à la même échelle à partir des données de télédétection de même résolution spatiale, la longueur du littoral a été trouvée différente selon les années en raison du changement de forme du littoral avec l'érosion et l'accrétion associées, et est de 363.750 Km, sachant que la longueur de Tipaza est de 154.892 km, ainsi celle d'Alger est de 122.715 km et est de 86.142 km pour la côte de Zemmouri. Sur une période de 20 ans, le littoral change sur la côte des trois baies en tant que source d'évaluation plus large de la vulnérabilité côtière. Les informations à grande échelle doivent être complétées par des recherches plus intensives à l'échelle locale qui quantifient la tendance d'évolution par rapport aux différents facteurs.

2.3.2 La région de Zeralda

Nous allons développer les résultats concernant le littoral de la région de Zeralda, située à l'Ouest de la zone étudiée en termes de recul et d'avancé du trait de côte, leur réponse aux changements des conditions hydrodynamiques et d'estimer les impacts des aménagements et les apports de l'oued Mazafran sur l'évolution des plages.

2.3.2.1 La cinématique du trait de côte

Après l'acquisition des levées du trait de côte, nous avons procédé à une analyse diachronique pour évaluer la dynamique des plages et son évolution entre 2002/2008/2014/ et 2020. Cette analyse consiste à déterminer les distances d'évolution (Avancement/Recul) du trait de côte, et du linéaire affecté par plage pour la zone étudiée. Pour ce faire, nous avons eu recours à l'extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS) intégrée dans l'environnement ArcGIS 10.2. Les paramètres que nous avons calculés sont le NSM (Net Shoreline Movement), Il reporte la distance (en mètres) entre le trait de côte le plus ancien

et le plus récent au niveau de chaque transect. [7]. Le taux du point final (EPR) est calculé en divisant la distance (en mètres) séparant deux rivages par le nombre d'années entre les dates des deux rivages. Cette méthode est la plus répandue pour calculer les taux du mouvement du littoral, et elle est largement utilisée par différents chercheurs côtiers ([85]; [86]; [47]; [87]). La troisième méthode utilisée pour calculer les taux d'érosion consiste à Régression de fréquence linéaire (LRR). Cette méthode consiste à ajuster aux moindres carrés une ligne de régression à plusieurs points de position sur le rivage pour un transect particulier. Tandis que la régression linéaire pondérée (WLR) fournit des données plus fiables et plus d'importance ou de poids pour déterminer la ligne la mieux adaptée avec un intervalle de confiance de 99,9% [87]. Le taux de régression linéaire pondéré est déterminé en traçant les positions du littoral par rapport au temps. Le poids (w) est défini en fonction de la variance de l'incertitude de la mesure [86]. Ensuite le DSAS restitue les résultats sous forme de tables attributaires. L'estimation de la cinématique du trait de côte et la cartographie des taux d'évolution sont basées sur l'analyse de ces tables attributaires. [88]. La valeur négative de NSM, EPR, LRR et WLR indique le déplacement du littoral vers la terre, tandis que la valeur positive indique migration vers la mer [89]. Ensuite la cartographie nous a permis une visualisation simple et efficace de nos résultats, dont nous avons défini des classes qui représentent l'état d'érosion, d'accrétion et de stabilité du trait de côte.(Figure 2.7)

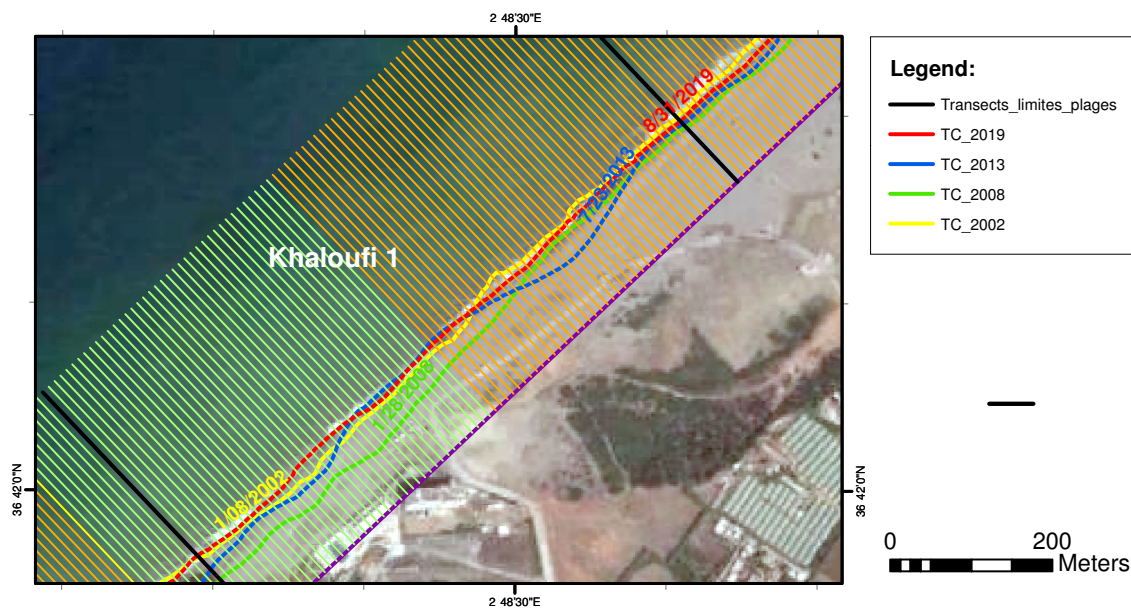


FIGURE 2.7 – Représentation des traits de côte des dates différentes et des transects générés sur une partie de la zone étudiée.

2.3.2.2 Hydrodynamisme

Nous avons utilisé le modèle SWAN qui fournira un modèle rétrospectif pratique pour qualifier et quantifier le potentiel d'énergie des vagues les jours de tempête sur la côte étudiée. Les résultats de la quantité d'énergie dissipée pour huit stations à proximité des côtes de la région étudiée (Figure 2.8), constituent une information clé pour identifier les zones qui présentent un risque d'érosion.

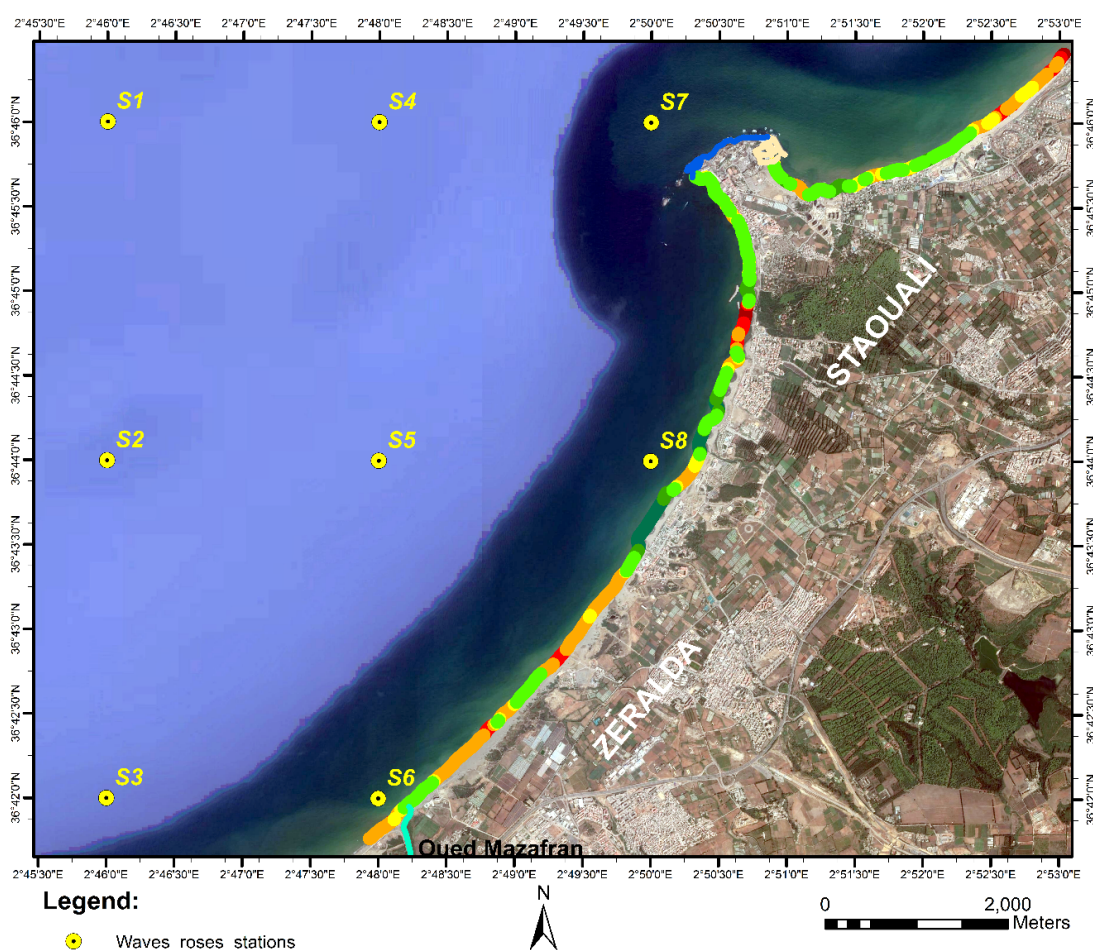


FIGURE 2.8 – Localisation des 8 stations des roses des vagues près de notre zone d'étude.

Les roses des vagues (la direction et la hauteur significative) pour les stations situées près de la région de Zeralda sont représentées dans la (Figure 2.9).

A partir des moyennes des roses des vagues des différentes stations, on peut distinguer que les hauteurs significatives des stations situées vers l'Ouest sont plus importantes que pour celles situées vers l'Est de notre zone d'intérêt. (Tableau 2.1) Cette forte amplitude combinée à une élévation du niveau de la mer causée par l'oscillation des vagues, présente

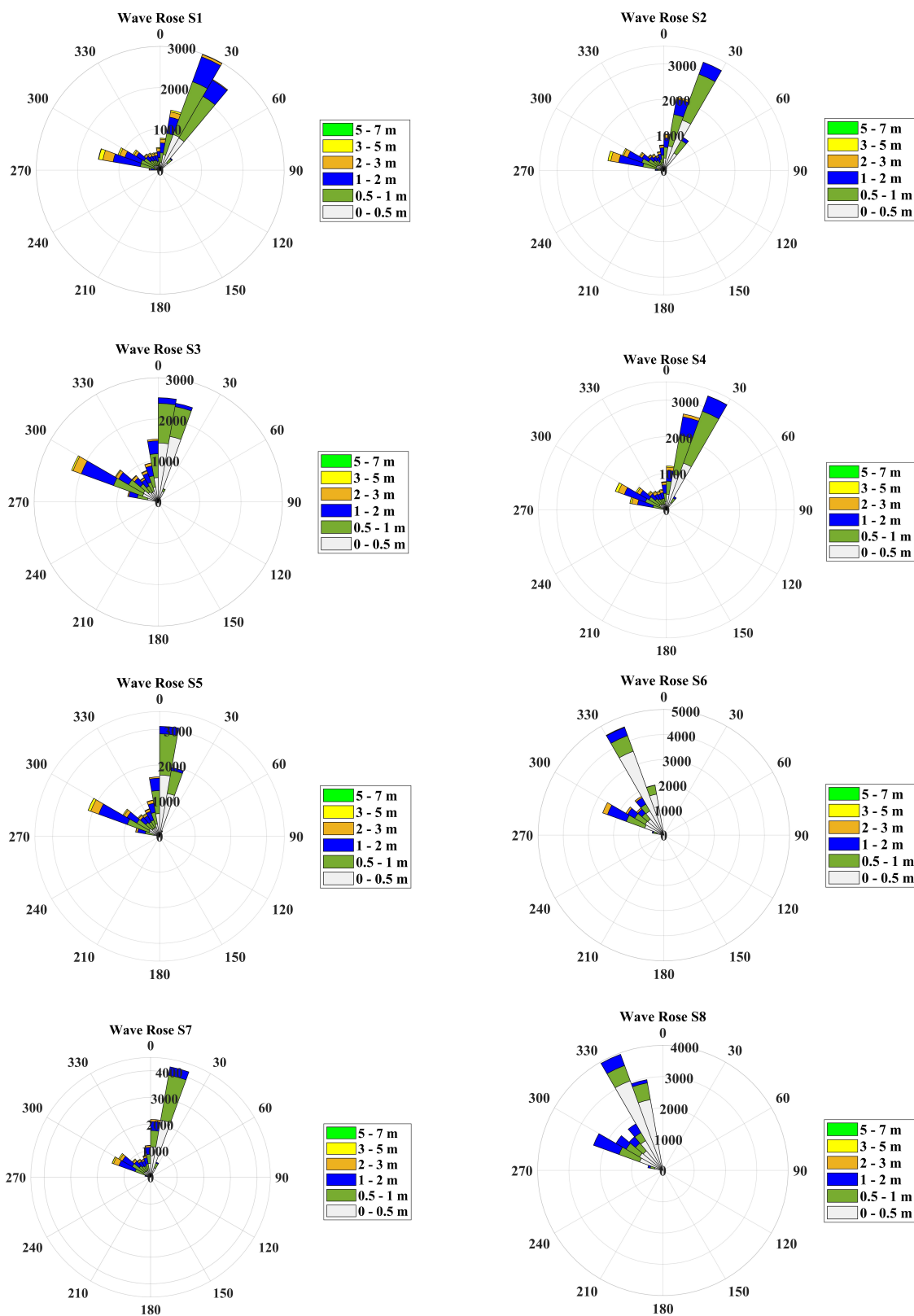


FIGURE 2.9 – Représentation des roses de vagues (la direction et la hauteur significative)

un réel risque de submersion, et une énergie énorme qui se dissipe directement sur le rivage.

TABLE 2.1 – Variations de la hauteur significative des vagues et des directions enregistrées pour huit stations.

Stations	Minimum	Maximum	Moyenne	Direction
S1	0.094	6.481	1.002	WNW-NNE
S2	0.075	5.825	0.888	WNW-NE
S3	0.057	5.124	0.743	WNW-NNE
S4	0.084	6.203	0.94	WNW-NE
S5	0.066	5.49	0.808	NW-NNE
S6	0.024	2.864	0.563	WNW-NNW
S7	0.071	5.928	0.825	WNW-NNE
S8	0.02	1.794	0.497	WNW-NNW

Ce résultat est similaire pour les stations situées dans la baie de Zemmouri près de la plage Corso. (Figure 2.10)

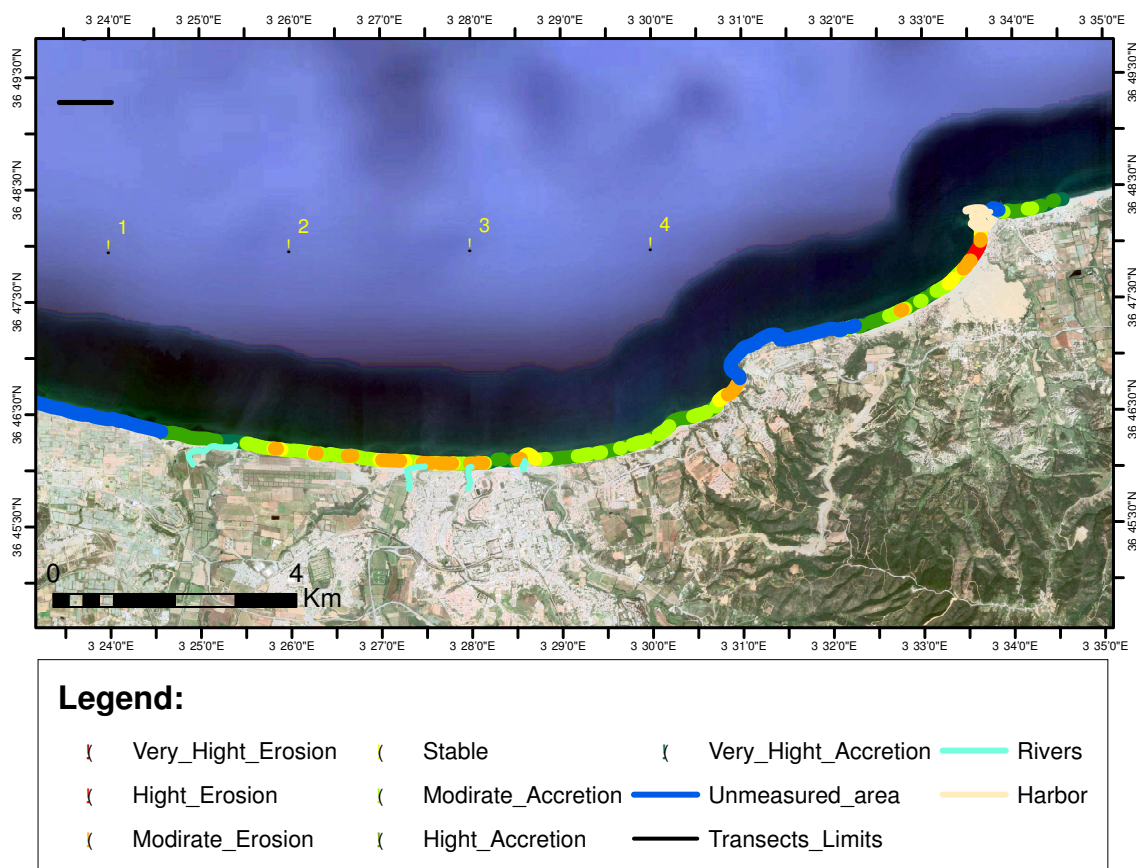


FIGURE 2.10 – Localisation des 4 stations des roses des vagues près de notre zone d'étude.

Ensuite, la représentation de la hauteur significative des vagues à haute résolution dans 8 stations proches de notre zone d'intérêt a révélé que la propagation des ondes énergétiques du large vers la côte se fait d'une manière régressive dont nous avons enregistré des valeurs moins importantes pour les stations situées vers le rivage que les

stations situées vers le large. La direction de ces ondes énergétiques est la même pour les points situés parallèlement à la côte dont les stations S2 et S4 ont la même direction ainsi que les stations S3, S5 et S7 ensuite les stations S6 et S8 sont de direction WNW-NNW.

Le (Tableau 2.2) représente la hauteur significative des vagues pour quatres stations situées près de la plage Corso.

TABLE 2.2 – Variations de la hauteur significative des vagues pour quatre stations près de la plage Corso.

Stations	Minimum	Maximum	Moyenne
1	0	6.9204	0.9581
2	0	6.9666	0.9551
3	0	6.8931	0.9300
4	0	6.2787	0.8576

En effet, l'énergie des vagues du large est plus importante que celle des vagues côtière [32], mais les zones côtières n'ont pas le même potentiel énergétique [90] la distribution de cette énergie hydrodynamique dépend de plusieurs facteurs, dont la morphologie côtière [28].

2.3.2.3 Résultats et interprétation

2.3.2.4 Analyse d'évolution du trait de côte

L'évolution des positions littorales sur une série temporelle entre 2002 et 2020 indique que toute la zone côtière étudiée est très dynamique. Mise à part quelques parties stables nous avons enregistré soit une érosion, soit une accrétion. En outre, cette étude a révélé que, pendant cette période, 46.276 % du littoral correspondant à 6705 m est en l'érosion, 46.694% de la côte correspond à 6765 m est en accrétion et seulement 7.028 % soit 1018 m de la côte sont stables. Les distances linéaires d'évolution (NSM) du trait de côte pour chaque plage ont montrées sur une distance totale de 14489 m, soit une récession, soit une accrétion, les parties stables sont des parties ou il n'y pas eu d'évolution du trait de côte. Notre zone d'étude comporte plusieurs plages différentes par rapport à l'évolution du trait de côte. Cette région se situe à l'Est de l'Oued Mazafran qui a une influence sur son évolution. (Figure 2.11)

L'interprétation des résultats est basée aussi sur la méthode (EPR), les autres paramètres (LRR, WLR) ne sont représentés que pour les corrélations sur la (Figure 2.12). Les valeurs positives et négatives de l'EPR affichées dans le (Tableau 2.3) indiquent l'accrétion et l'érosion du trait de côte. Les résultats statistiques obtenus au cours de cette période (18 ans) sur l'ensemble de la zone d'étude montrent que le littoral oscille entre un maximum

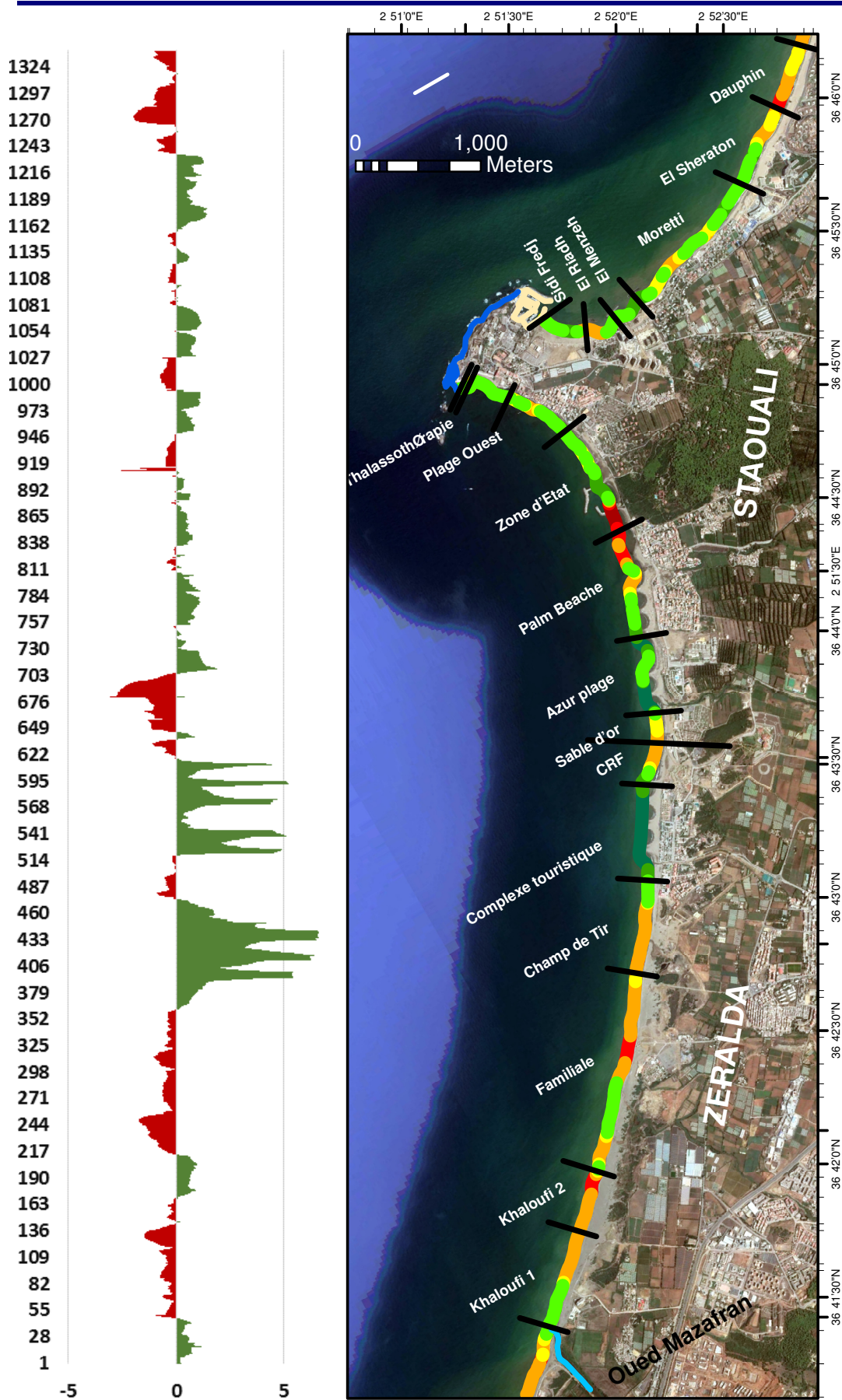


FIGURE 2.11 – Représentation des évolutions du trait de côte le long de notre zone d'intérêt.

d'érosion de -3.07 m / an et un maximum d'accrétion de 6.61 m/an avec une moyenne d'évolution du trait de côte de 0.263 m/an. La plupart des rivages en érosion sont situés à l'Ouest, tandis que les rivages en accrétion sont observés sur les plages de la partie Est, près des ouvrages de protection. Les valeurs moyennes d'érosion avec des (EPR) de -0.676 m/an. L'accrétion moyenne enregistrée sur les plages de la zone étudiée est de 1.21 m/an. Sur l'ensemble de la commune de Zeralda les résultats montrent que le littoral oscille entre un maximum d'érosion de -44.16 m sur la plage khaloufi 2 et un maximum d'accrétion de 40.2 m sur la plage Complexe touristique. Le taux de variation net moyen calculé à partir des méthodes d'EPR et du LRR, est de 0.263 et 0.218 m/an respectivement. Les taux du changement du littoral calculés par les méthodes EPR et LRR montrent que 46.276% des transects étaient soumis à l'érosion, avec un maximum de retrait de -45.21 m. L'avancée la plus importante du littoral avec un taux maximum de 116.6 m due à l'installation des ouvrages de protection sur 46.694% de transects en accrétion.

TABLE 2.3 – Représentation des variations du NSM et EPR du trait de côte le long de notre zone d'intérêt

Secteur	Nombre de transects	plages	Moy EPR m/an	Moy NSM m	
Commune de Staoueli	1335-1400	Dauphin	-0.7886 m/an	-13.9016 m	
	1274-1334	El Sheraton	-0.0804 m/an	-1.4204 m	
	1127-1273	Moretti	0.3674 m/an	6.4721 m	
	1101-1126	El Menzeh	0.8392 m/an	14.8113 m	
	1065-1100	El Riadh	-0.1375 m/an	-2.4208 m	
	1003-1064	Sidi Fredj	0.4548 m/an	8.0185 m	
	Zone non mesurée				
	935-941	Thalasso	0.01 m/an	0.1914 m	
	836-934	Plage Ouest	0.4252 m/an	7.4995 m	
	738-834	Zone d'état	-0.0193 m/an	-0.3386 m	
Commune de Zeralda	641-737	Palm beach	0.3155 m/an	5.5678 m	
	582-640	Azure plage	2.4062 m/an	42.4476 m	
	555-581	Sable d'Or	-0.0962 m/an	-1.6955 m	
	520-554	CRF	0.2494 m/an	4.3991 m	
	443-519	Complexe touristique	3.9920 m/an	70.4175 m	
	370-442	Champs de tir	-0.1568 m/an	-2.7616 m	
	204-369	Familiale	-0.2917 m/an	-5.1497 m	
	134-203	Khaloufi 2	-0.709 m/an	-12.651 m	
62-142	Khaloufi 1	0.121 m/an	2.189 m		

Les valeurs des taux de changement du littoral obtenus le long de tous les transects (1437) de la zone d'étude au cours de la période (2002-2019) par les méthodes EPR et LRR sont très proches dans toute la zone d'étude [55]. (Figure 2.12)

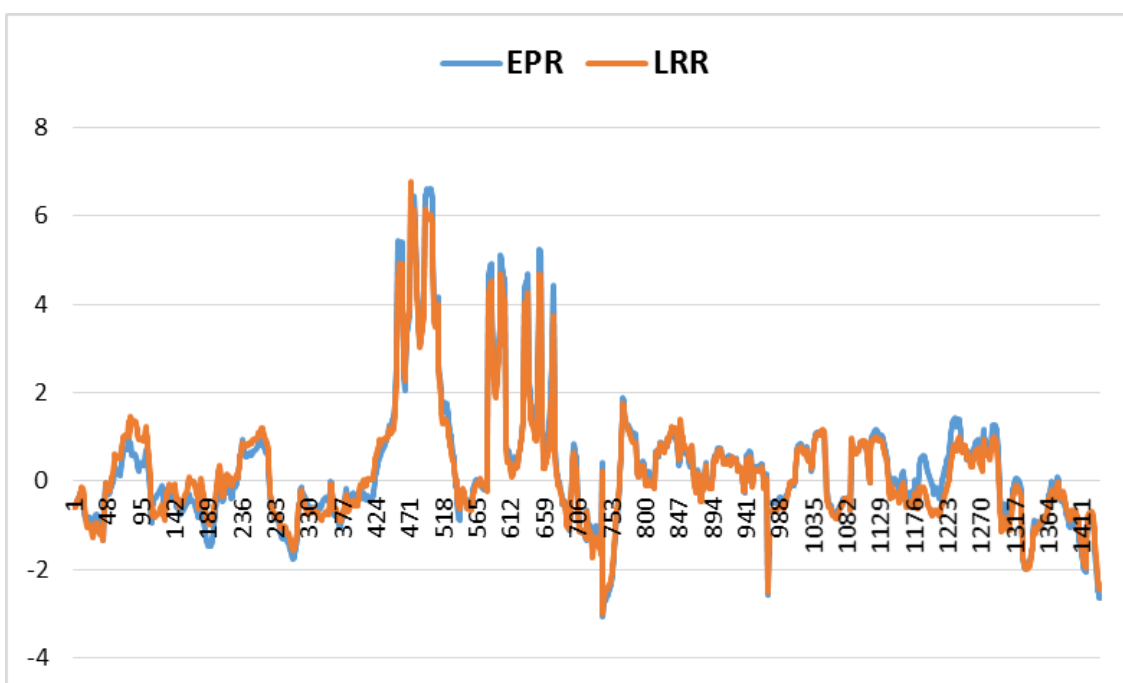


FIGURE 2.12 – Représentation des valeurs d’EPR et du LRR pour tous les transects de la zone d’étude.

Les taux de changement du littoral obtenus par deux approches statistiques (EPR et LRR) ont été comparés aux valeurs EPR vs LRR. La valeur du coefficient de détermination (R^2) obtenu indique une bonne corrélation entre les variables au cours de cette période. (Figure 2.13)

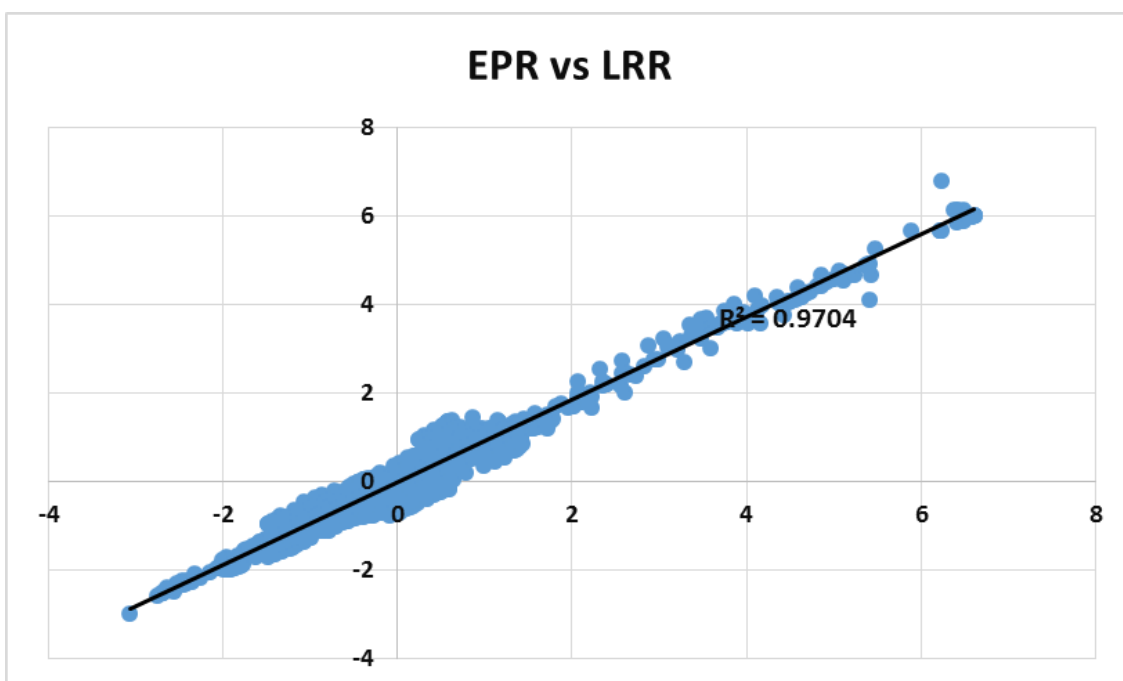


FIGURE 2.13 – Corrélation des valeurs EPR et LRR calculés le long de tous les transects.

La dynamique sédimentaire dans cette région est en fonction de trois facteurs essentiels :

- ◀ La dynamique (hydrologique et géomorphologique) de l'oued Mazafran ; d'un côté par l'engraissement du trait de côte en face de l'embouchure à cause du débit plus ou moins élevé et des apports sédimentaires importants déposés à côté de l'embouchure. Une quantité considérable va être transportés par la suite vers l'Est le long des plages adjacentes.
- ◀ L'orientation côtière contribue à l'érosion en augmentant l'exposition aux ondes énergétiques par différentes directions.
- ◀ L'hydrodynamisme qui est représenté par deux paramètres la célérité et la hauteur significative des vagues enregistrées pour le mois de février et le mois de septembre 2019. Les cartes élaborées avec une résolution de 3 km montrent que les plages de la commune de Zeralda sont très exposées à la houle par contre les plages de la commune de Staoueli se situent là où l'activité de hydrodynamisme est moins intense, même pour les jours de tempête (figures 7 - 16). Ainsi les conséquences de la mise en place des brise-lames et des épis au niveau des plages de cette région se manifestent par l'apparition des zones d'accrétion artificielle. On peut conclure que les courants côtiers (le courant algérien) importent une quantité considérable de sédiments dans la partie Ouest qui vont être piégés par les ouvrages maritimes sur les plages de la partie Est.

2.3.2.5 Bilan d'évolution des surfaces

Selon nos résultats, nous observons que le secteur Ouest est dominé par une accumulation progressive et des surfaces gagnées entre 2002 et 2019, cela peut s'expliquer par les apports sédimentaires de l'oued Mazafran et son débit élevé ce qui engendre une accrétion en face de l'embouchure qui est très dynamique. D'autres conditions principalement les facteurs hydrodynamiques et l'exposition à la houle avec une hauteur significative de 2.5-3.2 m et une célérité de 3.3-4.8 m/s en mois de février et qui sont moins intenses pour le mois de septembre ainsi le transport sédimentaire long shore ont provoqué des zones d'érosion.

La partie Est est marquée par une alternance des surfaces stables, des surfaces gagnées et des surfaces perdues, cette tendance est due probablement à un hydrodynamisme faible, avec une hauteur significative des vagues de 1.7-2.8 m avec une célérité de 2.5-4 m/s ceci pour le mois de février, mais sont plus faibles pour le mois de septembre. Ainsi que la modification de l'hydrodynamisme côtier par la mise en place des ouvrages de protection et par conséquence la modification de la répartition des dépôts sédimentaires.

Les surfaces actuelles des plages des deux communes Zeralda et Staoueli en 2019 sont représentées dans les (figures 2.14 et 2.15) respectivement.

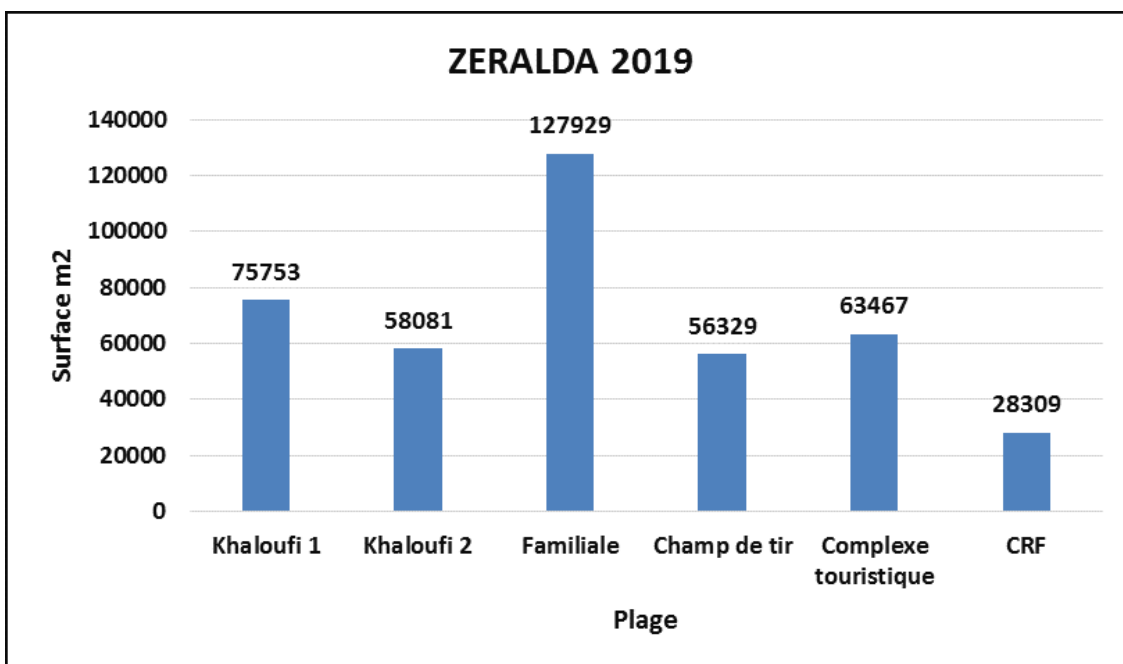


FIGURE 2.14 – surfaces des plages de la commune de Zeralda 2019.

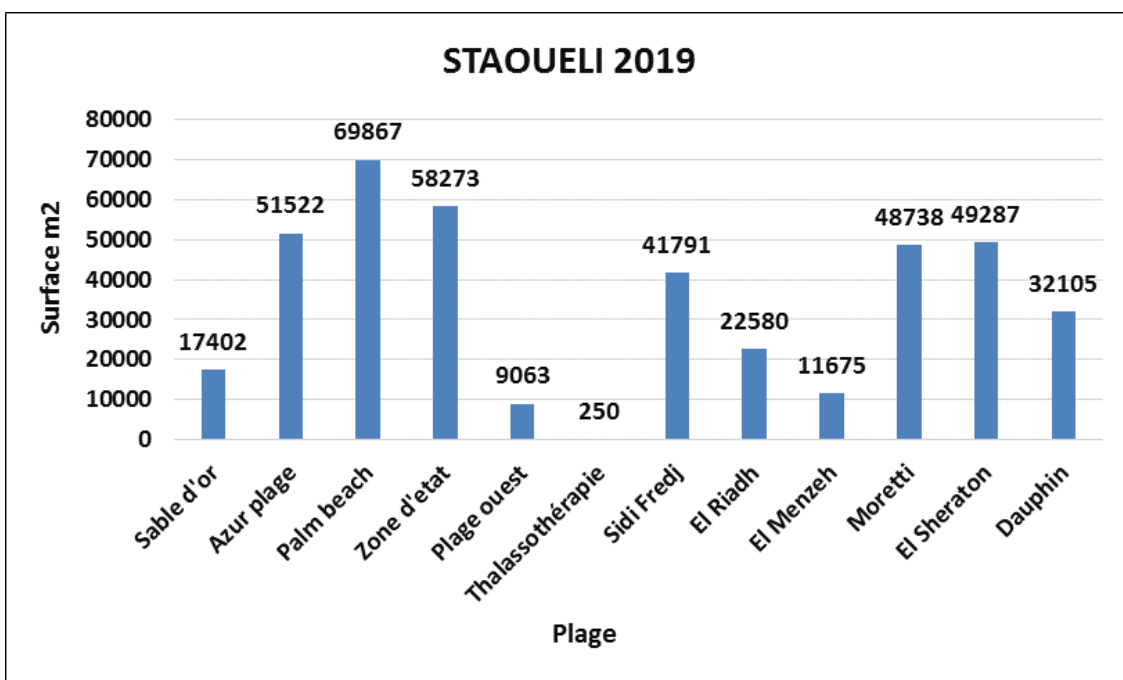


FIGURE 2.15 – Surfaces des plages de la commune de Staoueli 2019.

Le bilan surfacique d'érosion/accrétion des plages est représenté dans la (Figure 2.16) et montre des évolutions sur la période entre 2002 et 2019.

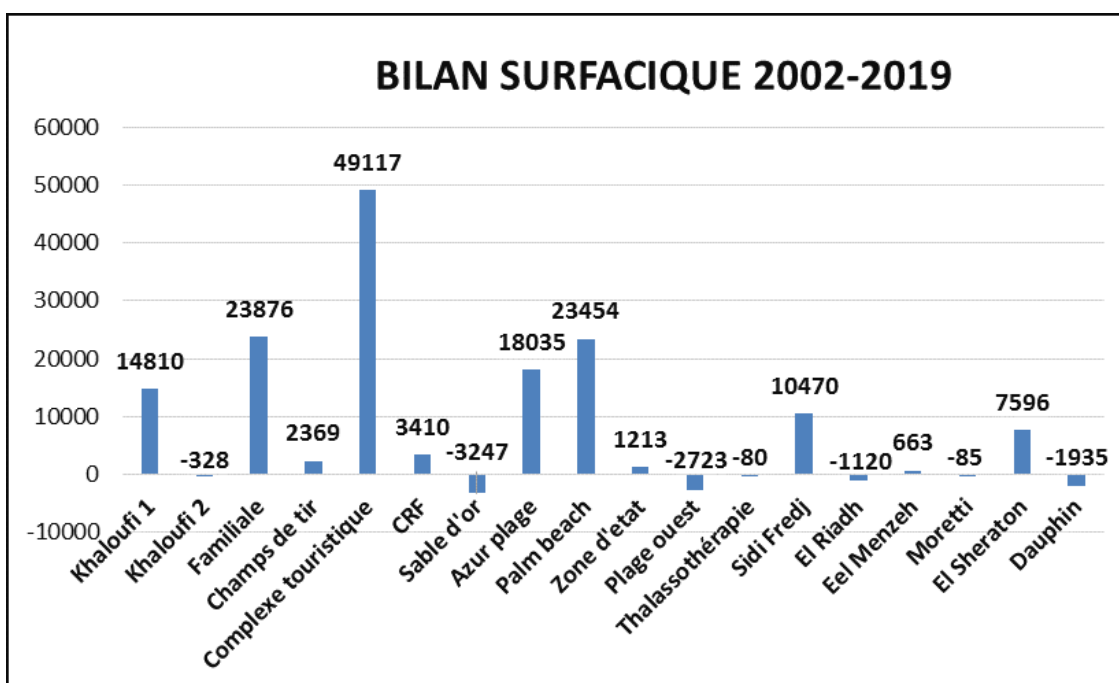


FIGURE 2.16 – Bilan surfacique d'érosion/accrétion pour les plages des deux communes Zeralda et Staoueli sur une série temporelle entre 2002 et 2019.

Les changements linéaires de la position du rivage complétée par le calcul des bilans de surface offre une vision de la cinématique côtière en deux dimensions.

Cette étude a montré que ce littoral a connu une accrétion après 2002 due à la mise en place des ouvrages de protection alors $155013m^2$ de plages ont été gagnés, tandis que pendant la même période seulement $-9519m^2$ de plage ont été perdus sur l'ensemble de la zone d'étude.

Selon nos résultats, nous observons que le secteur Ouest est dominée par une accumulation progressive et des surfaces gagnées entre 2002 et 2019, La partie Est est marquée par une alternance des surfaces stables, des surfaces gagnées et des surfaces perdues.

À cet effet, les bilans de surface de toutes les plages de la zone étudiée ont montré que les plages gagnées au cours de la période 2002-2019 pour l'ensemble de la côte de Zeralda ont atteint $93254m^2$ et pour la côte de Staoueli est de $52241m^2$.

La plage khaloufi

La plage khaloufi présente les deux phénomènes érosion et accrétion du littoral et a été choisi comme site de prélèvements. Elle présente un trait de côte d'une longueur de 800 m marqué par une évolution de différentes amplitudes. Pendant cette période, 45 transects montrent une accrétion, tandis que 35 transects ont révélé une récession. La

distance moyenne (NSM) d'évolution du trait de côte de la plage khaloufi est de 2.189 m, avec un taux moyen d'érosion du littoral (EPR) de 0.12 m / an. (Figure 2.17)

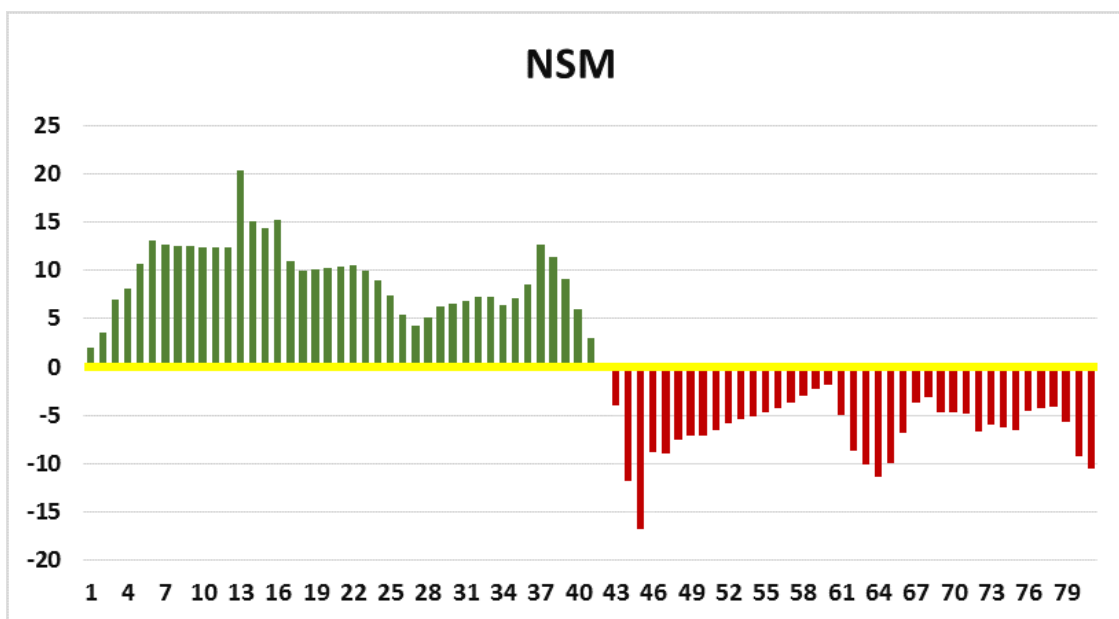


FIGURE 2.17 – Les valeurs de NSM indiquant l'érosion / l'accrétion de la plage khaloufi.

Le trait de côte de la partie Ouest à proximité de l'embouchure de l'oued Mazafran est très dynamique, nous observons une accrétion significative qui est supérieur à 0.4896 m/an en moyenne, la distance d'accrétion moyenne du trait de côte est de 9.423 m, en s'éloignant de l'embouchure nous observons une érosion d'une moyenne de -0.36 m/ an dans la partie Est de la plage. La distance d'érosion le long du trait de côte de cette plage est d'une moyenne de -6.3462 m. 80 transects espacés de 10 m sur la plage khaloufi montrent une érosion qui varie entre un maximum de -16.8 m et un minimum de -1.87 m, l'accrétion dans la zone oscille entre un minimum de 0.44 m et un maximum de 20.39 m avec une accrétion moyenne estimée à 8.6832 m enregistrée sur une série temporelle entre 2002 et 2019. Selon les résultats obtenus la surface gagnée est de $14810m^2$ par conséquent le bilan surfacique pour la plage khaloufi est positif. La surface de cette plage en 2019 est de $75753m^2$.

La plage Corso

Présente une alternance des trois phénomènes ; érosion, accrétion et stabilité du trait de côte sur une série temporelle entre 2003 et 2019. Alors 30 transects montrent une accrétion, 29 une érosion et une stabilité sur 21 transects. La distance moyenne (NSM) d'évolution du trait de côte de cette plage est de 2.64 m. (Figure 2.18) et un taux moyen d'érosion du littoral (EPR) de 0.162 m / an.

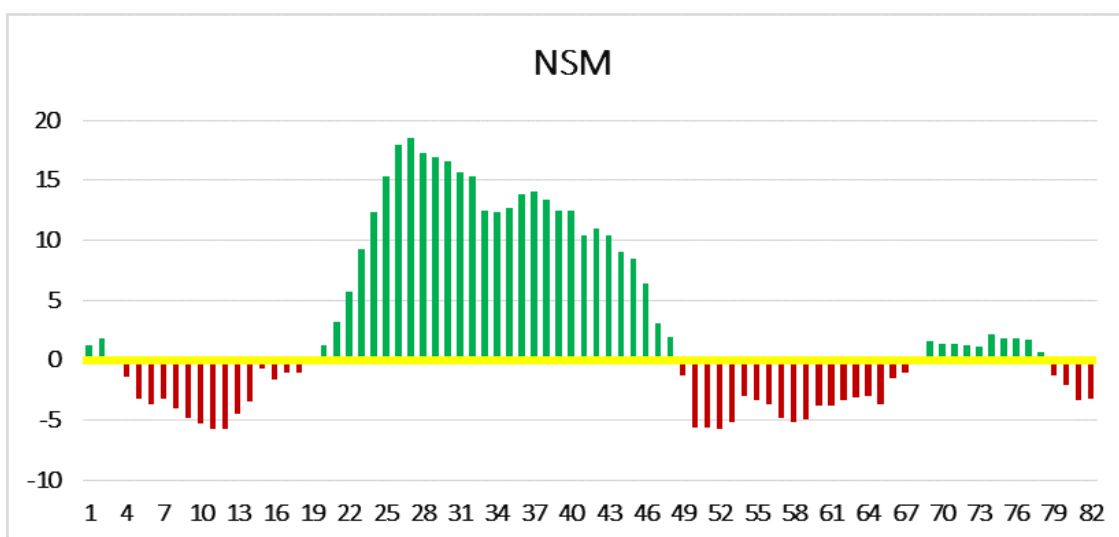


FIGURE 2.18 – les valeurs de NSM indiquant l'érosion / l'accrétion de la plage Corso.

Le trait de côte en face de l'embouchure de l'oued Corso présente une accrétion d'une moyenne de 10.5 m, due aux apports en sédiments, et des zones d'érosion loin de l'embouchure d'une moyenne de -4.15 m.

2.3.2.6 L'évaluation de l'erreur

Différentes sources d'incertitude influencent la précision du positionnement du trait de côte et donc la fiabilité de la mesure à l'échelle décennale. L'incertitude peut être divisée en deux groupes. Premièrement, l'incertitude associée à la mesure du trait de côte et aux méthodes d'analyse, tandis que la seconde incertitude est associée à des sources de données erronées ([43]; [91]).

Avant toute analyse, il était nécessaire d'évaluer les erreurs liées à chaque position de la ligne de rivage. En effet, des mesures d'automatisation génèrent un certain nombre d'erreurs potentielles associant à la qualité des données utilisées (erreur de pixel (E_p)), géoréférencement des images (erreur quadratique RMSE (ERM)), l'extraction et digitalisation des traits de côte (erreur de numérisation (E_d)) et l'incertitude de position du niveau de la marée haute (E_v). Ces erreurs sont considérées comme aléatoires et non corrélées, les erreurs totales (E_t) sont données par la racine carrée de la somme des carrés des différentes variables [92].

$$E_t(m) = \sqrt{(E_p^2 + E_{RMSE}^2 + E_d^2 + E_v^2)} \quad (2.1)$$

Il est possible de limiter les erreurs liées au géoréférencement et à la numérisation. Une autre possibilité de réduction de l'incertitude concerne le géoréférencement et la meilleure détection de l'interface sable/eau. [93]

Dans cette étude, l'erreur totale a été estimée à partir de deux sources (Tableau 2.4) :

- ◀ (1) l'erreur totale liée à la position du littoral qui a été calculée par équation (2.1), pour quatre dates des images satellitaires ;
- ◀ (2) L'erreur annualisée de transects associée au calcul de taux de changement de la ligne de rivage à tout transects donnés. Elle a été calculée sur trois courtes périodes de temps : (2002 à 2008, 2008-2013 et 2013 -2020), et sur une période globale (2002 à 2020).

L'erreur annualisée a été calculé en utilisant l'équation (2.2). L'incertitude annualisé sur une période de temps de 18 ans est donc 0,12 m / an.

$$Ea(m/an) = \frac{\sqrt{(Et_1)^2 + (Et_2)^2 + (Et_3)^2 + (Et_4)^2}}{Totalperiod(years)} \quad (2.2)$$

Récemment, l'incertitude associée au calcul du point final (EPR) est calculée automatiquement dans l'application de DSAS. Le résultat de ce calcul est spécifié que la confiance du calcul du taux de point final (ECI) [87]. L'ECI est calculée en utilisant l'équation (2.3) suivante :

$$ECI(m/an) = \frac{\sqrt{(Et_A)^2 + (Et_B)^2}}{date(A) - date(B)} \quad (2.3)$$

- ◀ (EtA) : L'incertitude de la position du rivage A.
- ◀ (Et B) : L'incertitude de la position du rivage B.
- ◀ Date (A) : Date de rivage A.
- ◀ Date (B) : Date de rivage B.

L'ECI est calculée sur trois courtes périodes de temps : (2002-2008, 2008-2013 et 2013 -2020), et sur une période totale (2002-2020). (Tableau 2.4)

TABLE 2.4 – Estimation des erreurs de la position et la période de calcul du taux de changement pour chaque ligne de rivage

Erreur totale (Et) de position de trait de côte(m)	2002	2008	2013	2020
	1.54	1.37	1.18	1.04
Erreur annualisé (18 ans)(m/an)	0.12			
La marge d'erreur (ECI) (m/an)	2002-2008	2008-2013	2013-2020	2002-2020
	0.21	0.3	0.28	0.08

Ces erreurs doivent être calculées avant de tirer des conclusions sur l'évolution du littoral ([58]; [43]; [63]).

2.4 DISCUSSION

Pour observer le déplacement du littoral au cours des 18 dernières années (2002-2020) des images multi-temporelles ont été utilisées. Ces images de Google earth fournissent des données THRS pour quantifier les changements du trait de côte dans le temps. Cette étude a pris en compte quatre dates pour surveiller le déplacement du littoral. Compte tenu de la moindre couverture nuageuse, cette étude a pris en compte les images de la saison sèche pour analyser le déplacement du littoral dans la côte algéroise. Les changements du littoral le long de la côte sont contrôlés par les processus naturels exacerbé par les actions anthropiques. En effet la région de Zeralda, par sa configuration et son orientation ouverte vers le NW, et est principalement atteint par des hauteurs significatives venant de directions WNW-NNE. Sa partie Ouest est très exposée à la houle contrairement à sa partie Est où l'installation des ouvrages de protection sur un linéaire considérable a modifié l'hydrodynamisme côtier. La plus part des rivages en érosion sont des plages sableuses atteintes par des vagues d'une hauteur significative plus importante que ceux enregistrées près des rivages en accrétion où des enrochements sont installés. L'orientation côtière contribue à l'érosion en augmentant l'exposition aux ondes énergétiques par différentes directions.

Les plages de la zone d'étude se situent à l'Est de l'oued Mazafran qui contribue de manière significative au bilan sableux des plages de cette région. Les apports considérables en sédiments de cet oued sont orientés et déposés près des plages situées vers l'Est. Ensuite, la mise en place des ouvrages de protection à l'Est de cette zone a une influence sur cette évolution diachronique et la modification de la répartition des dépôts sédimentaires. Dans les conditions de vagues du Nord-Ouest et le courant de dérive littorale, il est observé, sur une période de 17 ans des changements morphologiques du littorale sur une grande surface. D'autre part, l'embouchure de cet oued est très dynamique c'est pourquoi la plage Khaloufi est en évolution. Ces résultats confirment davantage qu'il existe une

relation significative entre la dynamique des plages et les facteurs hydrodynamiques. Cette plage se situe à l'Est de l'Oued Mazafran qui a une influence sur son évolution, l'embouchure de cet oued est très dynamique du fait que nous avons une accrétion en face de l'embouchure et une érosion progressive sur la partie Est.

La houle incidente qui arrive directement du large est atténuée par la présence des ouvrages maritimes créant une zone d'ombre en arrière des brises lames, des épis et du port. En effet, les simulations de la houle montrent qu'il y'a une diminution significative de l'énergie des vagues, expliquée par la diffraction des houles provenant du nord-ouest. Cette diminution de l'énergie est très remarquable dans la partie Est de la zone étudiée (commune de Staoueli). Alors que le côté Ouest de cette zone (commune de Zeralda) est exposé à des niveaux plus élevés de l'énergie de la houle incidente.

Les résultats obtenus montrent que ; courant de retour, courant de dérive, contrôlent une grande partie du transport sédimentaire dans la zone, le courant de retour induit un intense transport sédimentaire vers le large en particulier pendant les épisodes de forte énergie, provoquant un mouvement important des sables. L'incidence de la houle oblique, énergétiquement forte, induit un courant de dérive important qui contribue au transit sédimentaire en déplaçant des volumes importants de sédiments de l'Ouest vers l'Est. Ainsi à l'Ouest de cette zone, le courant sagittal transporte une grande quantité de sédiments au large. La situation à l'Est est complètement à l'inverse dont la zone présente un secteur protégé de la houle incidente, caractérisé par des faibles courants de retour. Ainsi la diminution de l'intensité du courant de dérive favorise le transport et le dépôt des sédiments vers le rivage.

Entre autres, l'évolution décennale des rives sablonneuses est analysée afin d'enquêter sur les relations entre les modèles de changement du littoral et la diversité morphologique et les aspects dynamiques de la zone d'étude. Cela nous a permis de mieux comprendre les différents facteurs qui contrôlent les processus d'érosion / d'accrétion et évolution des plages, en classant les plages en fonction de leurs caractéristiques et du comportement du littoral. Cela aiderait à la conception de modèles de prédiction à moyen terme du changement de rivage, contribuant finalement à une meilleure évaluation des aléas liés à l'utilisation et à l'évolution des zones côtières [37]. Les évaluations des risques côtiers sont des ressources utiles pour soutenir la prise de décision et la gestion côtière.

En fonction de la source de données d'origine, chaque littoral présente une incertitude de position associée à des erreurs de géoréférencement, de numérisation, d'interprétation des lignes humides/sèches, de la taille des pixels et/ou des décalages proxy du littoral ([43]; [63]). Nous avons ensuite utilisé DSAS pour calculer une estimation de l'incertitude à chaque transect pour chaque taux de changement de rivage (historique et récent) dans

un intervalle de confiance de 90 %. Des valeurs SCRD positives (négatives) indiquent que le littoral devient de plus en plus accrétionnel ou moins érosif (de plus en plus érosif ou moins accrétionnel). Si le taux d'avance/recul du littoral est le même de l'historique au récent, alors le SCRD sera nul [94].

2.5 CONCLUSION

Les changements du littoral le long de la côte algéroise au cours des dix-huit dernières années montrent une grande variabilité spatiale et temporelle. Les fortes différences dans les tendances d'évolution observées entre les secteurs Est, centre et Ouest de la côte algéroise sont dues à diverses raisons. Celles-ci comprennent une plus grande dépendance des plages à l'approvisionnement en sédiments fluviaux, la stabilité générale des plages fermées et les niveaux plus élevés d'intervention humaine dans le secteur centre, y compris les ouvrages d'art côtiers et l'occupation de l'arrière-plage. Cependant, d'autres facteurs liés aux contraintes hydrodynamiques et géologiques locales ont également une influence majeure sur l'évolution du trait de côte.

Selon les résultats obtenus, nous avons constaté la présence d'érosion/ accrétion sur des plages voisines, ainsi nous avons remarqué une concordance entre la distribution des énergies des vagues et l'évolution du trait de côte. Ces résultats confirment d'ailleurs qu'il existe une relation significative entre la dynamique des plages et les facteurs hydrodynamiques.

La côte de Zeralda est envahie par de fortes pressions et vue la complexité de ce géosystème, la mise en évidence de l'évolution historique du trait de côte et l'identification des zones d'évolution due aux différents processus principalement l'hydrodynamisme nous a permis de constater que les trois phénomènes accrétion, érosion et stabilité sont observées parfois sur une petite distance (sur la même plage). Ensuite, nous nous sommes intéressés à digitaliser les images pour créer une base de données des traits de côte et de la géométrie de toutes les plages (18 plages) de notre zone d'intérêt.

De plus, l'activité hydrodynamique le long de cette côte a considérablement affecter le stock sédimentaire et a généré des impacts sur la dynamique côtière. En effet la vérification de la cartographie de l'érosion côtière par l'étude de la hauteur significative des vagues nous a permis une meilleure interprétation de la dynamique du trait de côte et de l'évolution des plages par l'identification des zones à fort potentiel énergétique. Les roses des vagues des stations étudiées montrent que la moyenne de la hauteur significative est plus importante pour la zone située à l'Ouest que pour la zone située à l'Est.

Les résultats obtenus permettent de conclure, que les zones ouvertes aux fluctuations des agents hydrodynamiques sont généralement très agitées, et plus assujetties aux échanges avec le large. Cependant, les zones abritées et protégées présentent des zones calmes favorisant l'accumulation des sédiments fins.

3.1 ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

3.1.1 INTRODUCTION

Un rivage change constamment en raison des sédiments continuellement érodés d'un endroit et déposés à un autre. De nombreux facteurs jouent un rôle derrière ces changements. La surveillance des changements du littoral est très cruciale dans la gestion et la planification côtières. Un certain nombre de processus océanographiques influencent les caractéristiques des sédiments, accrétion et érosion des sédiments et distribution des minéraux [95]. De plus, le bilan sédimentaire le long d'une plage est influencé par la provenance des sédiments, la morphologie de la plage, les conditions hydrodynamiques et le tri hydraulique des sables ([96]; [97]). Compte tenu des développements qui se sont produits au cours des dernières décennies sur et autour des côtes, il était nécessaire de comprendre, sa sédimentologie et sa minéralogie, d'évaluer la dynamique des sédiments et d'identifier les sites vulnérables à l'érosion/accrétion. Les plages de sable ouvertes évoluent constamment en réponse à de multiples facteurs environnementaux se produisant à différentes échelles de temps, rendant la dynamique du littoral sableux fortement sensible [98]. L'objectif de notre étude est de cartographier les paramètres granulométriques et minéralogiques influencés par la dynamique sédimentaire dans deux plages sablonneuses de la côte algéroise. La plage de sable est au centre de l'étude de la morphodynamique littorale et est la zone la plus dynamique en raison des processus côtiers tels que la réflexion, la réfraction, le frottement du fond, le haut-fond et le déferlement des vagues ([99]; [100]). Dans ce contexte, la morphologie des plages et les processus côtiers impliquant le transport de sédiments contribuent à une meilleure compréhension de l'évolution spatio-temporelle des plages. Les profils des plages transversales et la granulométrie des

sédiments fournissent des indices sur les conditions de transport et de dépôt [101]. Les changements morphologiques de la plage sont observés en raison des variations dans la direction du transport des sédiments le long des côtes [102]. Les vagues s'approchent de la côte en biais pour générer des courants côtiers responsables du mouvement des sédiments le long du rivage [103]. Le volume de sédiments de plage, le changement de trait de côte, la granulométrie des sédiments, le taux de transport des sédiments sont les paramètres essentiels pour décrire la vulnérabilité d'une plage et pour planifier les mesures de conservation [104]. Les études sédimentologiques (granulométriques et minéralogiques), permettent de déterminer la relation entre les caractéristiques des sédiments (la taille, la nature.) et leurs conditions de sédimentation [105]. Cependant, en raison de la construction des digues, le schéma de sédimentation du littoral est perturbé davantage [74]. Les sources de sédiments alimentant les plages sont très diverses : la charge solide des cours d'eau, la dérive littorale, les apports du large et les dunes. Le déplacement des sédiments le long des côtes est essentiellement lié à l'hydrodynamique marine [19]. Il est également influencé par la granulométrie du sédiment source ([53]; [106]; [36]; [107]). À cet égard, [108] a souligné le rôle du bilan sédimentaire dans la stabilité côtière, particulièrement influencé par les changements des bassins hydrographiques, et structures de protection du rivage. Nous avons visé aussi à comprendre la dynamique sédimentaire et l'équilibre naturel des plages ainsi que les facteurs qui contrôlent cette dynamique. En essayant de répondre à la question : Peut-on caractériser les faciès sédimentaires par l'extrapolation des différents indices granulométriques et des résultats des analyses minéralogiques sur la surface de la plage? Les gradients de transport des sédiments entraînant des déplacements dans les zones à risque d'érosion ([109]; [110]). À mesure que les côtes changent en réponse à ces forçages, la tendance des humains à exercer une influence sur la dynamique côtière est également susceptible d'augmenter (par exemple, [111]) et a souvent des effets néfastes qui modifient considérablement les flux de sédiments et la migration naturelle des environnements côtiers ([11]; [112]). Nous abordons en outre les questions de savoir : Comment la morphologie du littoral réagit au changement de forçage hydrodynamique? Et Comment les systèmes couplés homme/littoral sur les littoraux aménagés répondent lorsque la stabilisation locale du littoral empêche la morphologie du trait de côte de s'ajuster comme elle le ferait sur un littoral non aménagé? Les variations de la morphologie côtière et des sédiments dépendent principalement des conditions environnementales locales, du type de sédiment apporté, des conditions de vagues, de la nature des plages, des zones de surf (dissipatives ou réfléchissantes ou intermédiaires) et de la configuration côtière. Les variations temporelles et spatiales résultent non seulement de la morphologie des dépôts mais aussi du comportement hydrodynamique de la zone côtière [113]. Les modifications du débit fluvial contrôleront également directement la

quantité de sédiments reçus par les côtes et ensuite transportés sur les plages. Les changements dans l'apport de sédiments fluviaux à la côte affecteront la submersion et l'érosion des zones côtières de faible pente, car les plages sont la première ligne de défense contre les risques côtiers ([114]; [115])

3.1.2 Objectifs

L'objectif est de connaître et de cartographier la répartition des faciès sédimentaires dans deux plages khaloufi et corso. Pour ce faire, différentes méthodes de mesures et d'analyses classiquement utilisées en sédimentologie ont ainsi été conduites en laboratoire. Il s'agit d'évaluer la granulométrie et la composition minéralogique des sédiments superficiels. Par conséquent, les études sédimentologiques servent uniquement à caractériser les faciès des sédiments des plages dans le but de comprendre les relations avec la quantification numérique de l'érosion et la répartition des dépôts sédimentaires. Bien que les résultats des analyses puissent servir de support à la cartographie, les mesures sédimentologiques servent essentiellement à la description des sédiments en relation avec le recul et l'avancée du trait de côte.

Dans ce chapitre, on se propose d'étudier les caractéristiques granulométriques et minéralogiques des sédiments superficiels des plages. L'analyse granulométrique permet de déterminer la texture des sédiments de l'arrière plage et au niveau du trait de côte, leur origine et leur mode de déplacement. Elle permet aussi de déterminer la dynamique des sédiments en rapport avec leur répartition spatiale, leur taille et les caractéristiques des paramètres hydrodynamiques tels que les houles et les courants associés (courants de dérive littorale, courants transversaux...). Les analyses minéralogiques servent à connaître aussi la constitution minéralogique des sédiments. (Figure 3.1)

L'objectif de cette étude est de comprendre les mécanismes actifs, à la fois naturels, tels que le climat et le régime des vagues, et les interventions anthropiques sur les voies sédimentaires. La connaissance de la texture et de la composition des sédiments est d'une grande importance pour déchiffrer la nature sédimentaire, l'environnement de dépôt et le mode de transport.

3.1.3 Choix de sites d'échantillonnage

Nous avons choisi deux plages qui sont cibles des deux phénomènes d'érosion et d'accrétion. Alors la plage Khaloufi située à la baie de Bou Ismail et la plage corso située à

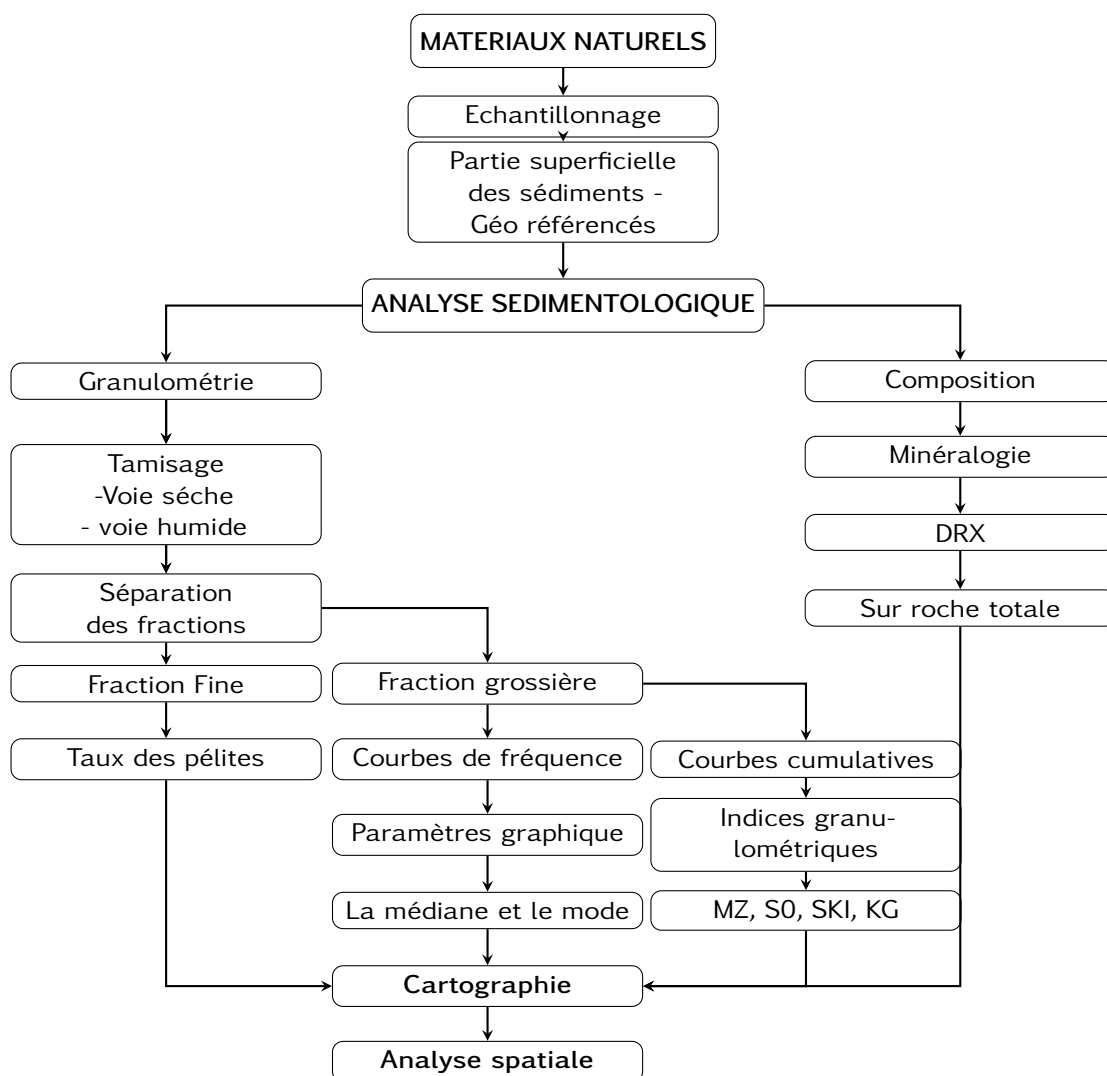


FIGURE 3.1 – Diagramme schématisant les différentes étapes de l'étude sédimentologique

la baie de Zemmouri ont été analysées sur site pour vérifier les conséquences de l'évolution côtière sur la dispersion des sédiments superficiels de ces plages car elles présentent une évolution sur une série temporelle entre 2002 et 2019 d'après l'étude diachronique à très haute résolution.

Les plages de Khaloufi et Corso souffrent d'une érosion et d'une perturbation de leur équilibre sédimentaire. Cette étude faite, s'est intéressée à déterminer la dynamique sédimentaire de la côte, et confirme la fragilité de cette frange littorale. En effet, l'évolution du trait de côte (de 2002 à 2020) montre un recul vers la côte et un engraissement. La perte de la stabilité de cette frange littorale est la résultante des effets conjugués des actions naturelles (houles et courants de dérive, apports des oueds) et des effets anthropiques tels que la dégradation des dunes bordières à cause de l'extension de l'urbanisation

touristique et balnéaire à leur niveau, la perturbation du transit sédimentaire suite aux aménagements portuaires et l'installation des ouvrages de protection.

3.1.4 Sortie sur terrain

Le travail de terrain, réalisé durant l'année 2019 a consisté en un prélèvement de 54 échantillons de sédiments superficiels à l'aide d'un GPS pour chaque plage. Les prélèvements ont été faits d'une façon précise selon des radiales orientés perpendiculairement à la ligne de rivage. La longueur de la plage Khaloufi est de 800m et est la même pour la plage Corso. L'espacement entre deux radiales juxtaposés est d'environ 50 m et entre les trois prélèvements successifs sur la même radiale dépend de la largeur de la plage. Des échantillons de sédiments de plage ont été prélevés à partir de l'arrière-plage, de la berme, et de la ligne de rivage. (Figures 3.2 et 3.3)

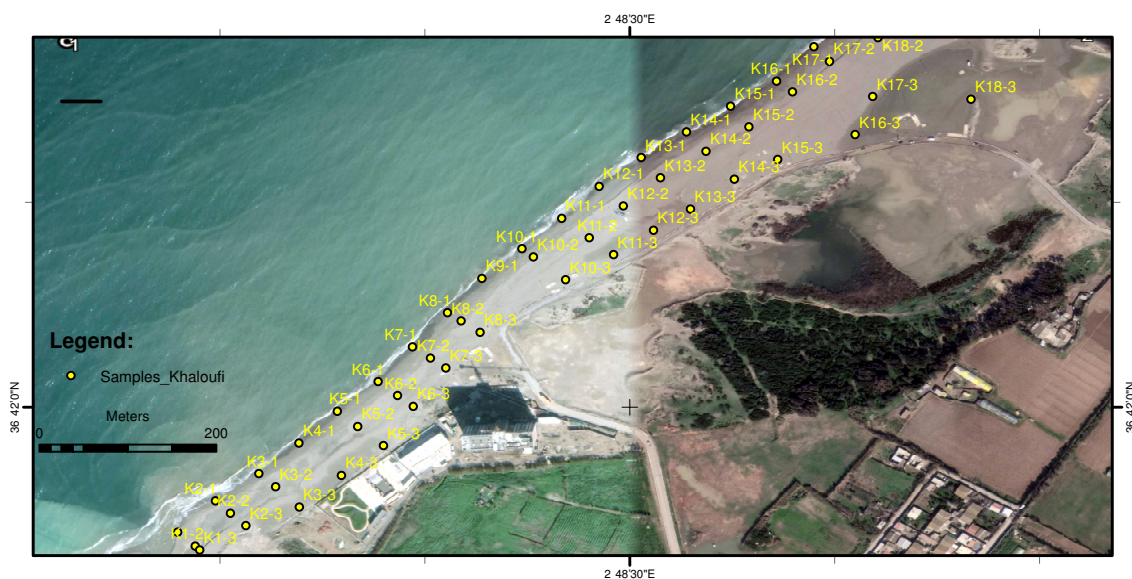


FIGURE 3.2 – Localisation des stations d'échantillonnage pour la plage Khaloufi.

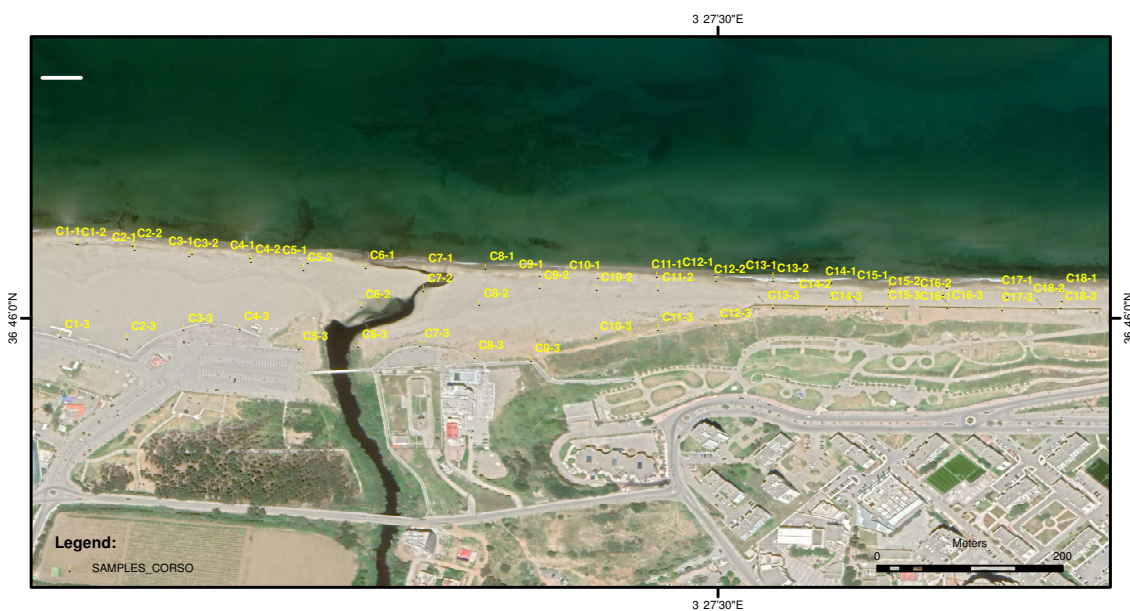


FIGURE 3.3 – Localisation des stations d'échantillonnage pour la plage Corso.

Pour le choix des échantillons, nous avons tenu compte :

- ◀ du contexte sédimentaire,
- ◀ de la granulométrie,
- ◀ de la composition.

Afin d'établir une comparaison entre les différents faciès sédimentaires et les données numériques.

3.1.5 Méthodologie d'échantillonnage

Le mode de prélèvement des échantillons a été adapté à notre objectif. L'un de ces objectifs étant de confronter les données issues de télédétection à celles de terrain, les carottages sont inutiles à la résolution de notre problème. Nous avons donc raclé la partie superficielle des sédiments, environ quelques centimètres. La partie superficielle est recueillie au moyen d'une petite pelle à bord droit. Nous ne passons qu'une seule fois à la surface de la station. La superficie raclée est d'environ 10 cm³ de manière à obtenir un échantillon moyen. Au cours des différentes missions de terrains, un total de 108 échantillons a été collecté. Quelques échantillons n'ont pas été retenus pour les analyses pour des raisons essentiellement de représentativité. Chacun des échantillons a pu être positionné et géoréférencé grâce à un GPS de précision métrique. Le plan d'échantillonnage a été orienté de manière à ce qu'il soit le plus représentatif possible des faciès sédimentaires, c'est-à-dire, différentes granulométries, diverses compositions.

Bien que les échantillons aient été collectés sur l'ensemble de la plage, le choix des sites de prélèvements a été fait préférentiellement à proximité des oueds.

Notre attention s'est naturellement portée sur cette portion de baie car les données numériques couvrent essentiellement cette zone. Le choix de sites préférentiels a été guidé par les connaissances acquises antérieurement, à savoir, les zones de gain et les zones de perte en sable. En règle générale, nous avons prélevé les sédiments dans des espaces littoraux différents (trait de côte, miestran et pied de dune). Des prélèvements de sédiments ont également été réalisés sur la plage au voisinage des environnements représentant des structures sédimentaires remarquables (débris coquilliers). Il est évident que bien que nous ayons 108 échantillons, il est impossible de caractériser en terme de faciès la totalité de la zone étudiée, il est cependant possible d'extrapoler nos mesures à certains secteurs tout en conservant une démarche robuste et logique.

Un GPS a été utilisé pour acquérir les coordonnées géographiques de 16 profils de plage. Nous avons divisé la zone d'étude en deux secteurs en fonction de la présence de rivières, de criques et de changement de BP. La pente est douce à modérée dans l'arrière plage dans la plage de Khaloufi, mais est modérée à raide dans la plage de Corso

3.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique permet de décrire le sédiment à partir de différentes fractions minérales regroupées en classes. Afin de mettre en évidence la relation entre la granulométrie des sédiments et leurs répartitions sur les plages sableuses, les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une analyse granulométrique classique. Les paramètres analysés sont la taille moyenne des grains (Mz), l'indice de classement ($S0$), l'indice d'asymétrie (SK) et l'indice d'aplatissement (KG). Il existe plusieurs méthodes pour calculer ces paramètres. Il a été choisi d'appliquer la méthode logarithmique proposée par [116] pour la présente étude, qui apparaît comme étant la plus robuste pour comparer des sédiments variés [117]. Cette méthode offre quant à elle l'opportunité de convertir les valeurs des paramètres en termes descriptifs des sédiments au programme GRADISTAT v. 8.0. Cela nous permettra de comparer les échantillons, de déterminer les paramètres graphiques et de cartographier les différents indices granulométriques. Des variations granulométriques au sein des apports sédimentaires peuvent refléter différents types de processus tels que le mélange de populations sédimentaires d'origines et de granulométries différentes ou des mécanismes sélectifs se produisant lors du transport ou du dépôt [118].

Nombreuses sont les techniques qui visent à déterminer de manière directe la taille des particules. Parmi elles nous pouvons citer : la granulométrie laser, le tamisage à sec ou humide. Néanmoins, chaque technique d'investigation présente des gammes granulométriques qui lui sont spécifiques. Dans cette étude, les sédiments ont fait l'objet d'une analyse granulométrique classique. Le tamisage des sédiments a principalement permis de séparer les grandes fractions granulométriques ce qui a permis le tracé des courbes granulométriques du sédiment total. Il existe de grandes variations dans la texture des sédiments selon la proportion relative de sables, de limons et d'argiles qu'ils renferment [119]. Les sédiments peuvent alors être de plusieurs types selon leur teneur respective de ces trois composés [120].

3.2.1 Analyse au laboratoire

L'analyse granulométrique (108 échantillons) a été réalisée sur 200 g de sédiment séché dans une étuve à 105°C. Pour chaque échantillon, nous avons utilisé une colonne de 16 tamis de la série « AFNOR » à mailles carrées comprise entre 0,080 mm et 2 mm et agité pendant 20 min. A la fin du tamisage, le sable collecté sur chaque tamis représente une classe granulométrique qui sera calculée en fréquences de pourcentage en poids et en

fréquences de pourcentage en poids cumulées. Ces analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de Géologie de l'ENSSMAL.

3.2.2 Traitement des données

Pour chaque fraction grossière ($> 80\mu m$), on a tracé une courbe cumulative semi logarithmique qui représente le pourcentage cumulatif du refus en fonction du diamètre correspondant des grains du sédiment. Cela nous permettra de comparer les échantillons et de déterminer graphiquement les différents paramètres grâce auxquels nous calculerons les indices granulométriques.

3.2.2.1 La fraction fine (F. F.)

C'est la fraction qui représente la part la moins importante des sédiments. Elle est essentiellement constituée d'argiles et de silts. Les deux familles granulométriques constituant cette fraction fine laissent apparaître en moyenne un mode silteux et un mode argileux et se trouvent préférentiellement aux arrières plages.

3.2.2.2 La fraction grossière (F. G.)

Elle est constituée de graviers de sables fins à très fins. L'observation révèle la présence de nombreux grains de quartz, plus ou moins arrondis. Les éléments de type feldspaths, les débris coquilliers et les débris de végétaux apparaissent le plus souvent dans les fractions supérieures à 2 mm. Il convient de noter que la quantité des silts et des sables varie énormément selon les lieux de prélèvement. Les sables sont plus représentés que les fractions fines et se trouvent près du trait de côte.

3.2.3 Distributions granulométriques

3.2.3.1 Courbes de fréquence

Les sédiments sont caractérisés par des courbes de fréquences des classes granulométriques. En effet, ces courbes fournissent des indications sur le mode qui correspond au diamètre le plus fréquent des grains. Dans le cas d'un sédiment bien classé, il est possible de noter une bonne symétrie dans la courbe des fréquences. Ceci signifie que

sur l'ensemble du prélèvement, l'échantillon se caractérise par une seule et même classe sédimentaire.

Pour certains échantillons au contraire, nous constatons plusieurs "pics" sur les courbes de fréquences. Ainsi ces échantillons font apparaître plusieurs modes caractérisant en fait plusieurs stocks sédimentaires. Les sédiments des plages type sablo-vaseux font souvent apparaître des distributions bimodales à polymodales, car majoritairement composés d'un mélange de silts et d'argiles et d'une composante sableuse. Une allure plus gaussienne des courbes granulométriques est corrélée à un meilleur classement et à un dégagement du mode.

3.2.3.2 *Courbes cumulatives*

Nous décrivons les traits essentiels des courbes granulométriques cumulatives des échantillons de sédiments analysés par les différents indices granulométriques. Ces courbes cumulatives du sédiment total sont généralement de plusieurs aspects étalés, symétriques et redressées et traduisent des faciès mixtes. Les fractions grossières et fines ressortent bien sur les courbes de fréquence. D'aspect très peu étalé, les courbes cumulatives traduisent le caractère uniforme des fractions granulométriques des sédiments étudiés. Elles montrent l'homogénéité des sédiments.

3.2.4 **Calculs des moments statistiques**

À partir des courbes granulométriques, un grand nombre de paramètres statistiques peut être généré, le but premier étant d'optimiser les comparaisons entre les sédiments et d'interpréter les résultats obtenus en termes de processus sédimentaire. Bien que cette démarche mathématique offre l'opportunité non négligeable de classer les échantillons en fonction de leur environnement sédimentaire. Les statistiques peuvent être calculées, soit par la méthode des moments arithmétiques (en unité métrique), soit par la méthode des moments géométriques (en unité phi). La méthode des moments géométriques repose sur une distribution log-normale et nous offre la meilleure approximation de la distribution granulométrique. Ce dimensionnement permet de visualiser aisément les petites différences entre les particules grossières et les particules fines.

La méthode proposée par [116] offre quant à elle l'opportunité de convertir les valeurs des paramètres en termes descriptifs des sédiments. Dans la littérature, il ne semble pas y avoir de consensus clairement établi concernant l'analyse granulométrique. Aucune étude

ne mentionne le choix d'une méthode plus pertinente qu'une autre. Pour calculer les moments statistiques à partir des courbes granulométriques, nous avons adapté les classes granulométriques propres au programme GRADISTAT v. 8.0, écrit en Visual Basic [117]. Ce programme propose une description structurale des échantillons selon les paramètres statistiques de [121] et [116]. Les moments statistiques de [116], ici utilisés, intègrent essentiellement quatre grands groupes de paramètres : le diamètre moyen, le degré d'asymétrie (Skewness), le classement (Sorting) et le degré d'aplatissement (Kurtosis) correspondant également au degré de concentration. Une approximation des paramètres peut être établie à partir des représentations des courbes de distribution en fréquence et en fréquence cumulée. Des paramètres statistiques alternatifs peuvent également être calculés pour différencier les sédiments, le grain médian D50, la dispersion des sédiments à partir des percentiles D90 et D10 ou encore à partir des interquartiles D25 et D75. Dès lors que les analyses sont polymodales, il convient de donner les valeurs des modes. Il a été choisi d'appliquer la méthode logarithmique [116] pour la présente étude, qui apparaît comme étant la plus robuste pour comparer des sédiments variés [117]. Cette méthode offre l'opportunité de convertir les valeurs des paramètres en termes descriptifs des sédiments.

3.2.5 Analyse granulométrique de la fraction fine

3.2.5.1 *La plage Khaloufi*

Nous remarquons que la teneur de la fraction fine augmente, généralement, en allant de l'Ouest à l'Est. Les sédiments prélevés au niveau du trait de côte de la partie Est sont formés essentiellement par une fraction grossière. Tandis que les échantillons prélevés au niveau de l'arrière plage présentent des teneurs plus ou moins importantes des pélites. Cela peut être justifié par la proximité de la dune bordière ainsi que l'influence de l'hydrodynamisme qui mobilise la fraction fine au niveau du trait de côte. La partie Ouest de la plage est caractérisée par une fraction grossière causée par l'accrétion de la plage et le dépôt des sédiments dus aux apports de l'oued Mazafran. (Figures 3.4 et 3.5)

3.2.5.2 *La plage Corso*

Nous remarquons que la teneur de la fraction fine est plus importante à la partie Ouest de la plage tandis que la partie Est est caractérisée par des teneurs faibles en pélites. Les sédiments prélevés au niveau de l'arrière plage de part et d'autre de l'oued Corso ont des

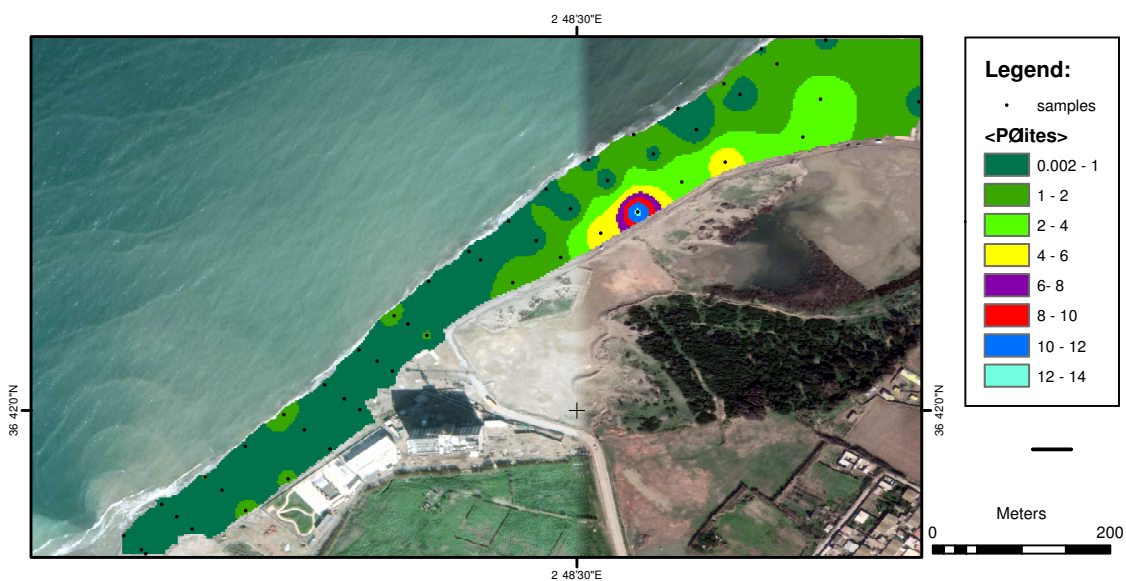


FIGURE 3.4 – Répartition spatiale de la fraction fine pour la plage Khaloufi.

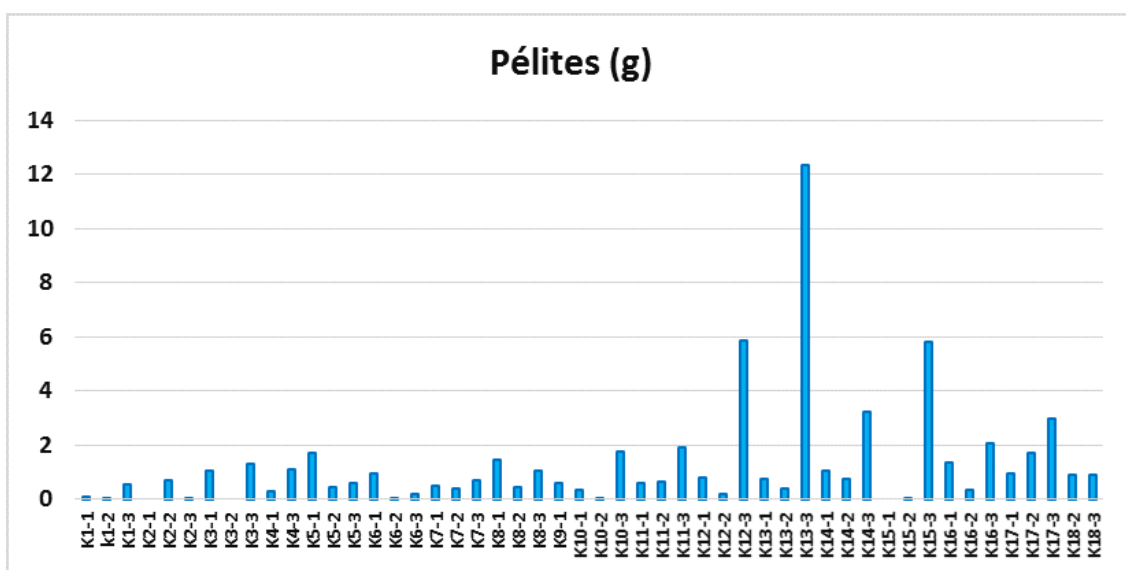


FIGURE 3.5 – Histogramme représentant la teneur en fraction fine de chaque station pour la plage Khaloufi.

teneurs plus ou moins importantes en pélites contrairement aux stations prélevées au niveau du trait de côte. (Figures 3.6 et 3.7)

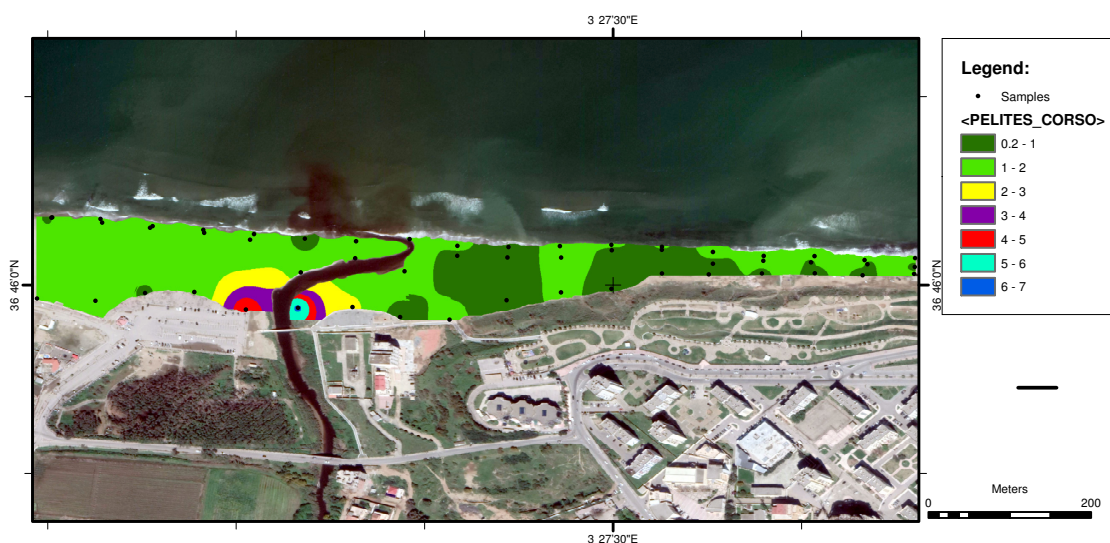


FIGURE 3.6 – Répartition spatiale de la fraction fine pour la plage Corso.

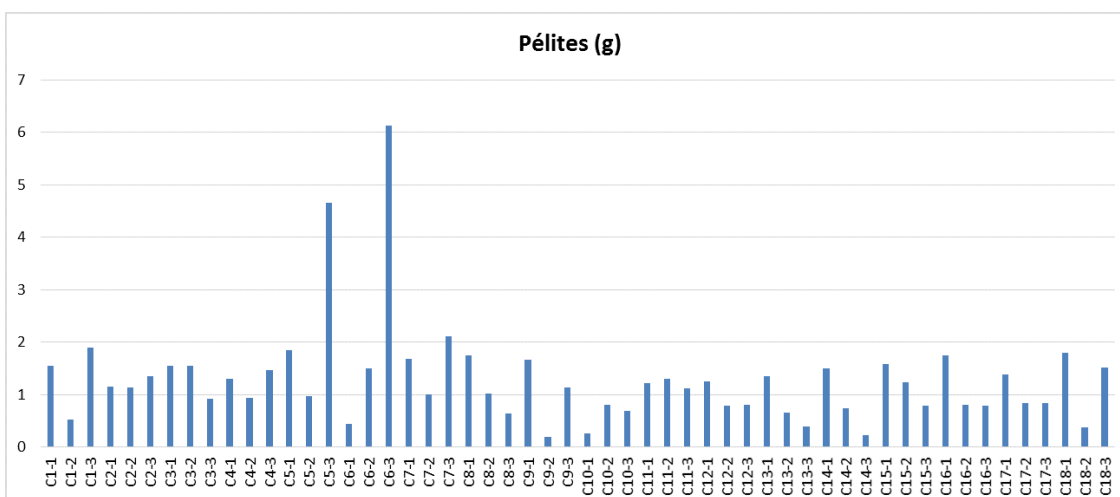


FIGURE 3.7 – Histogramme représentant la teneur en fraction fine de chaque station pour la plage Corso.

3.2.6 Analyse granulométrique de la fraction grossière

3.2.6.1 Les paramètres graphiques

médiane (2ème quartile)

Le Q50 Correspond au diamètre du grain moyen dont l'ordonnée est à 50 % du poids total du sédiment. La moyenne de la médiane montre donc que la constitution du sédiment superficiel de la plage Khaloufi et la plage Corso est majoritairement du sable moyen. Les écarts de médianes très peu prononcés témoignent des conditions identiques qui ont présidé à leur dépôt. [24]

mode

Le mode est le diamètre du tamis qui correspond à la fraction sédimentaire dominante [122]. On distingue trois courbes.

- 1) unimodale : représente une dominance d'un seul stock sédimentaire ;
- 2) bimodale : représente la dominance de deux stocks sédimentaires.
- 3) plurimodale : représente la dominance de plusieurs stocks sédimentaires.

Une allure plus gaussienne des courbes granulométriques est corrélée à un meilleur classement et à un dégagement du mode.[24]

Ces paramètres nous montrent la part des sédiments grossiers et des sédiments fins dans un échantillon. Dans le cas d'un sédiment bien classé, il est possible de noter une bonne symétrie dans la courbe des fréquences. Ceci signifie que sur l'ensemble du prélèvement, l'échantillon se caractérise par une seule et même classe sédimentaire.

Les sédiments de la partie Est de la plage Khaloufi sont en grande partie de distribution unimodale et bimodale. Pour certains échantillons au contraire, nous constatons plusieurs "pics" sur les courbes de fréquences. Ainsi ces échantillons font apparaître plusieurs modes caractérisant en fait plusieurs stocks sédimentaires. Les sédiments de la partie Ouest de cette plage font souvent apparaître des distributions bimodales à polymodales, car majoritairement composés d'un mélange de graviers et de sables. (Figure 3.8)



FIGURE 3.8 – Carte de répartition du mode pour chaque station dans la plage Khaloufi.

Les sédiments de l'arrière plage sont en grande partie de distribution uni-modale. La plus part des échantillons prélevés près du trait de côte présentent des distributions bimodales et seulement 5 échantillons ont des distributions tris-modales à polymodales. (Figure 3.9)



FIGURE 3.9 – Carte de répartition du mode pour chaque station dans la plage Corso.

3.2.6.2 Les indices granulométriques

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

$$\phi(X) = -(\log(qx)) * 3.3219 \quad (3.1)$$

Avec qx : la taille des grains (mm) qui correspond à x% du poids cumulé.

3.2.6.3 Le grain moyen

La moyenne définit la taille moyenne des grains (Folk and Ward 1957) :

$$Mz(enPhi) = \frac{Q_{16} + Q_{50} + Q_{84}}{3} \quad (3.2)$$

Elle permet d'individualiser les faciès suivants :

- ◀ Sables grossiers et graviers : $Mz < 1\phi$ ($Mz > 500\mu m$)
- ◀ Sables moyens : $1\phi < Mz < 2\phi$ ($250 < Mz < 500\mu m$)
- ◀ Sables fins : $2\phi < Mz < 3\phi$ ($125 < Mz < 250\mu m$)
- ◀ Siltes et argiles : $Mz > 4\phi$ ($Mz < 63\mu m$)

Les valeurs de la moyenne de tous les échantillons sont comprises entre -1 et 3ϕ , ce qui indique des sables grossiers, des sables moyens à fins.

La taille moyenne des sédiments de la plage Khaloufi diminue, généralement, en allant de l'Ouest vers l'Est de la plage. Les diamètres des sables présentent un affinement du

trait de côte vers l'arrière plage. Il s'agit, d'un tri granulométrique effectué par les courants de dérive littorale. (Figures 3.10 et 3.11)

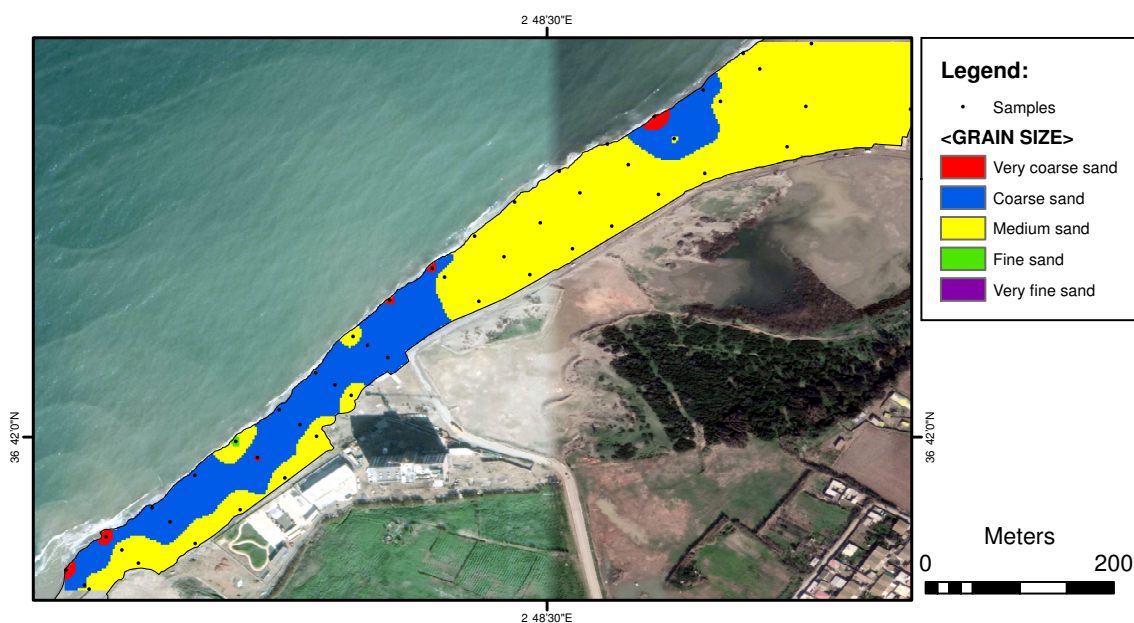


FIGURE 3.10 – Carte représentant la répartition spatiale du grain moyen pour la plage Khaloufi.

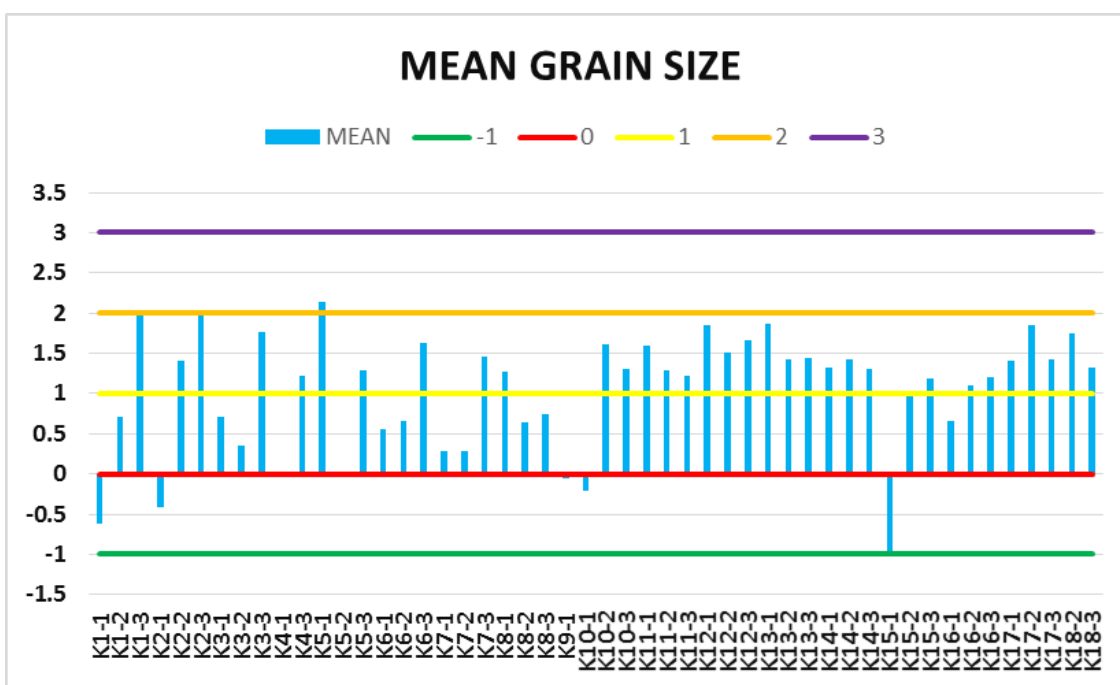


FIGURE 3.11 – Carte représentant les normes du grain moyen pour la plage Khaloufi.

La taille des grains de sédiments diminue en allant du trait de côte à l'arrière plage. Il existe, donc, un tri granulométrique au niveau du trait de côte effectué par les courants

de houles, spécialement les courants de retour, qui mobilisent les particules, de taille très petite et laissent celles de taille plus importante à leur place. (Figures 3.12 et 3.13)

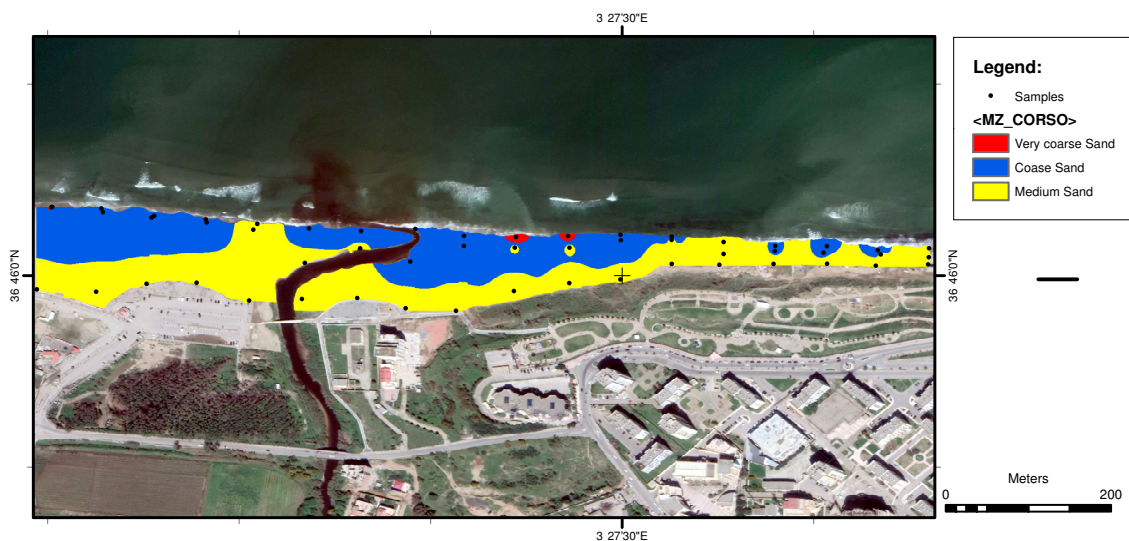


FIGURE 3.12 – Carte représentant la répartition spatiale du grain moyen pour la plage Corso.

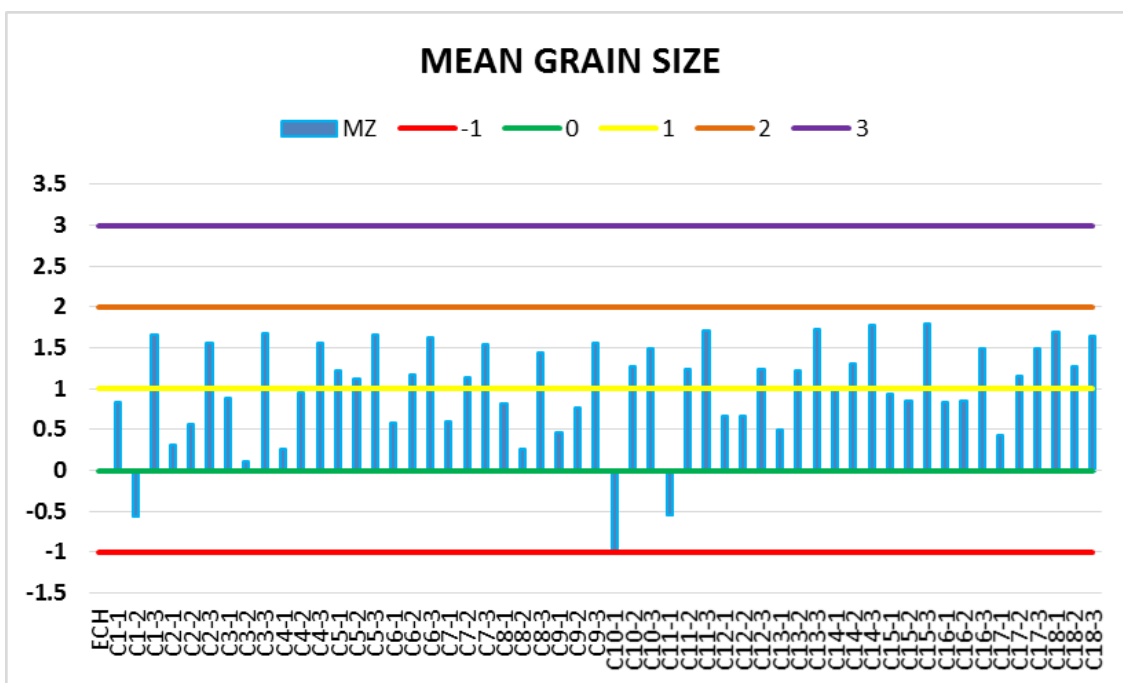


FIGURE 3.13 – Carte représentant les normes du grain moyen pour la plage Corso.

3.2.6.4 Indice de classement (S0)

Le classement (Ecart type) indique la dispersion des tailles du sédiment par rapport à la médiane, définissant ainsi le tri des sédiments lors de son transport ou de son dépôt. Il

se calcule par la relation suivante :

$$\sigma(enPhi) = \frac{Q_{84} - Q_{16}}{4} + \frac{Q_{95} - Q_5}{6.6} \quad (3.3)$$

Suivant sa valeur selon la méthode logarithmique de Folk et Ward, on distingue plusieurs types de sables :

- ◀ Sables très bien classés : $\sigma < 0,35\phi$
- ◀ Sables bien classés : $0,35\phi < \sigma < 0,5\phi$
- ◀ Sables modérément bien classés : $0,5\phi < \sigma < 0,7\phi$
- ◀ Sables modérément classés : $0,7\phi < \sigma < 1\phi$
- ◀ Sables mal classés : $1\phi < \sigma < 2\phi$
- ◀ Sables très mal classés : $2\phi < \sigma < \phi$

La majorité des sables prélevés au niveau du trait de côte de la partie Ouest de la plage sont caractérisés par des sédiments mal classés en grande partie, ainsi que ceux situés à proximité de la dune bordière de la partie Est de la plage au niveau des stations 13-3 14-3 et 15-3 et la station 16-1 prélevé au niveau du trait de côte ont un écart type compris entre 1 et 2 ϕ . Ces sédiments sont, donc, mal classés. Il existe donc un tri granulométrique de l'Ouest vers l'Est. (Figures 3.14 et 3.15)

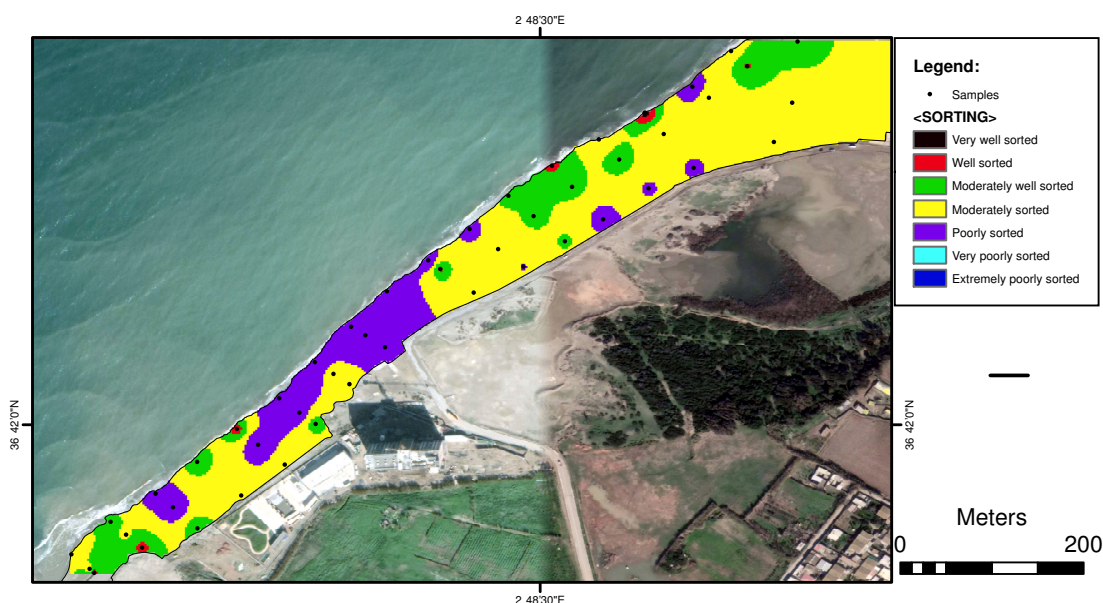


FIGURE 3.14 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice de classement pour la plage Khaloufi.

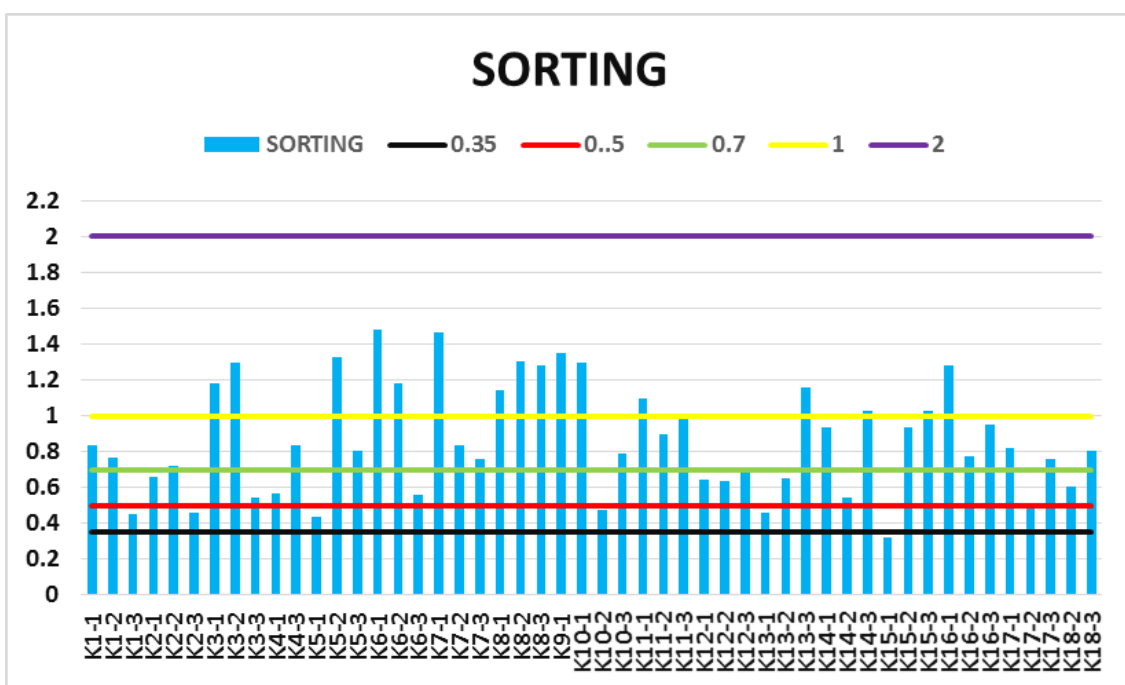


FIGURE 3.15 – Carte représentant les normes de l'indice de classement pour la plage Khaloufi.

La majorité des sédiments prélevés au niveau de l'arrière plage sont modérément bien classés. Il existe un tri granulométrique de l'arrière plage vers le trait de côte dont les sédiments de l'arrière plage sont en grande partie bien classés à l'exception de certaines stations qui présentent un sédiment mal classé. (Figure 3.16 et 3.17)

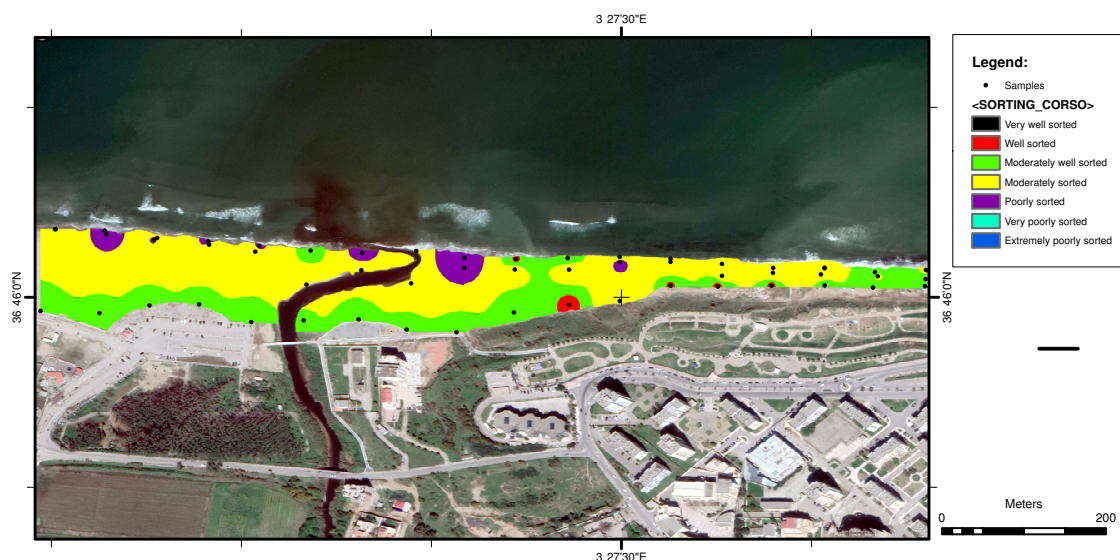


FIGURE 3.16 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice de classement pour la plage Corso.

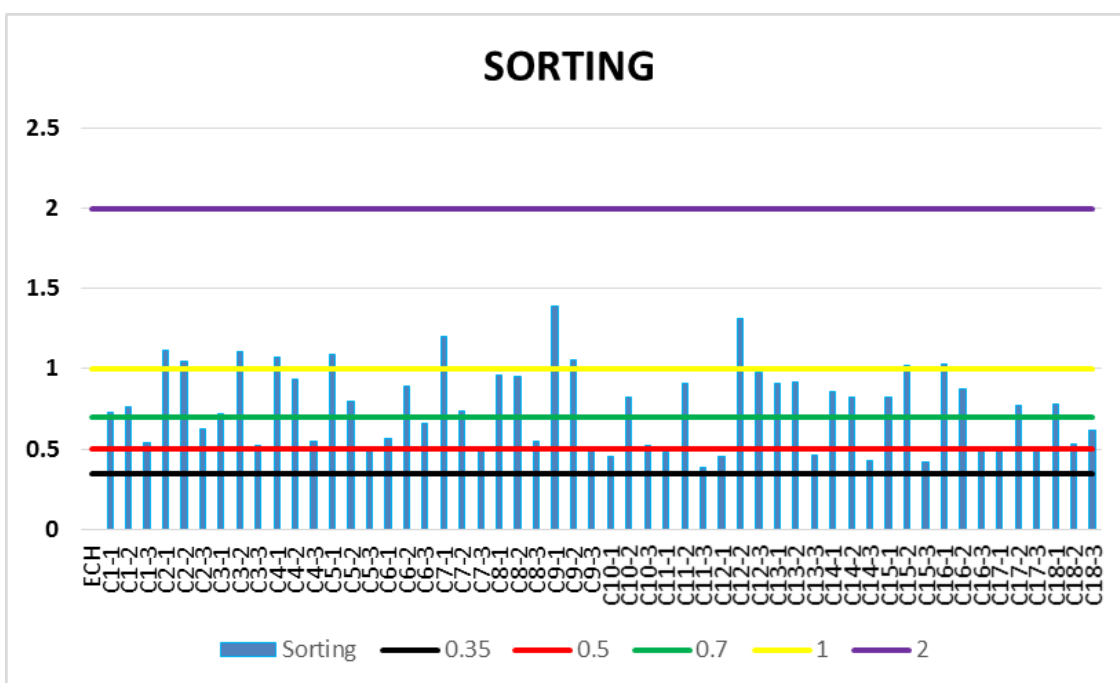


FIGURE 3.17 – Carte représentant les normes de l’indice de classement pour la plage Corso.

3.2.6.5 Indice d’asymétrie ou Skewness (*Ski*)

L’asymétrie renseigne la prédominance, ou non, de particules fines ou grossières par rapport au grain moyen de l’échantillon. Elle contribue à la caractérisation du milieu de dépôt. Elle permet de déterminer la déviation de la courbe granulométrique par rapport à la courbe de Gauss.

Elle est donné par l’expression suivante :

$$Ski(enphi) = \frac{Q_{16} + Q_{84} - 2Q_{50}}{2(Q_{84} - Q_{16})} + \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{2(Q_{95} - Q_5)} \quad (3.4)$$

En fonction de sa valeur, on distingue :

- ◀ $-1\phi < Ski < -0,30\phi$: Courbe très asymétrique vers les grossiers.
- ◀ $-0,30\phi < Ski < -0,10\phi$: Courbe asymétrique vers les grossiers.
- ◀ $-0,10\phi < Ski < 0,10\phi$: Courbe presque symétrique.
- ◀ $0,10\phi < Ski < 0,30\phi$: Courbe asymétrique vers les fins.
- ◀ $0,30\phi < Ski < 1\phi$: Courbe très asymétrique vers les fins.

La partie Ouest de la plage khaloufi est dominée par des courbes cumulatives qui montrent une asymétrie et une asymétrie vers les particules fines donc la fraction grossière

est très étalée, à l'exception de la radiale 8. L'indice d'asymétrie pour les échantillons de la partie Est est supérieur à 1 ce qui fait que le classement soit maximal du côté des grossiers alors que la fraction fine est étalée. (Figures 3.18 et 3.19)

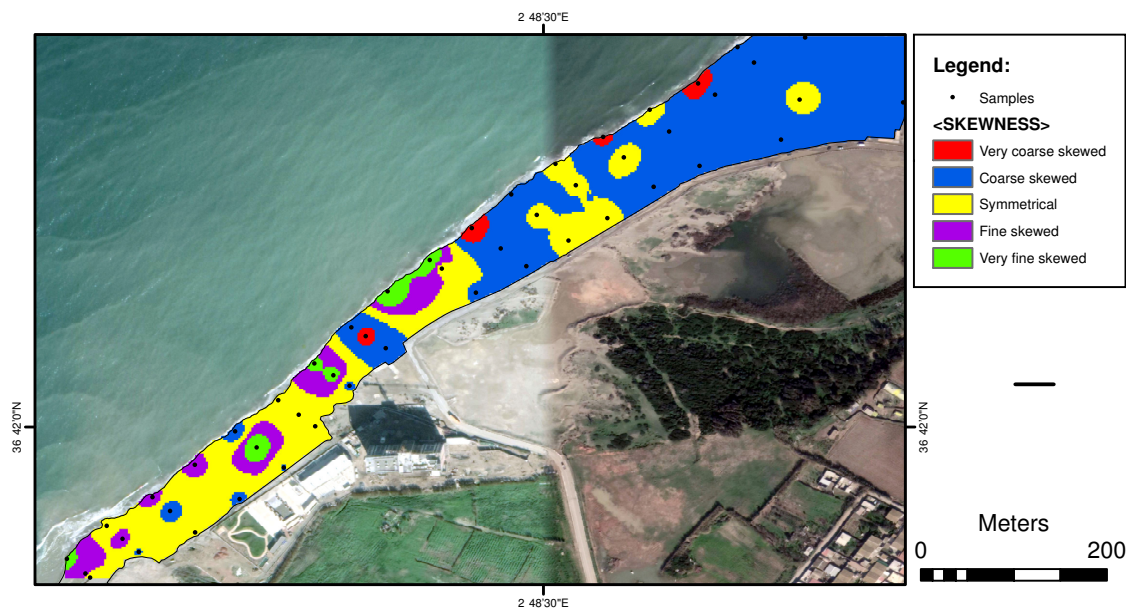


FIGURE 3.18 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'asymétrie pour la plage Khaloufi.

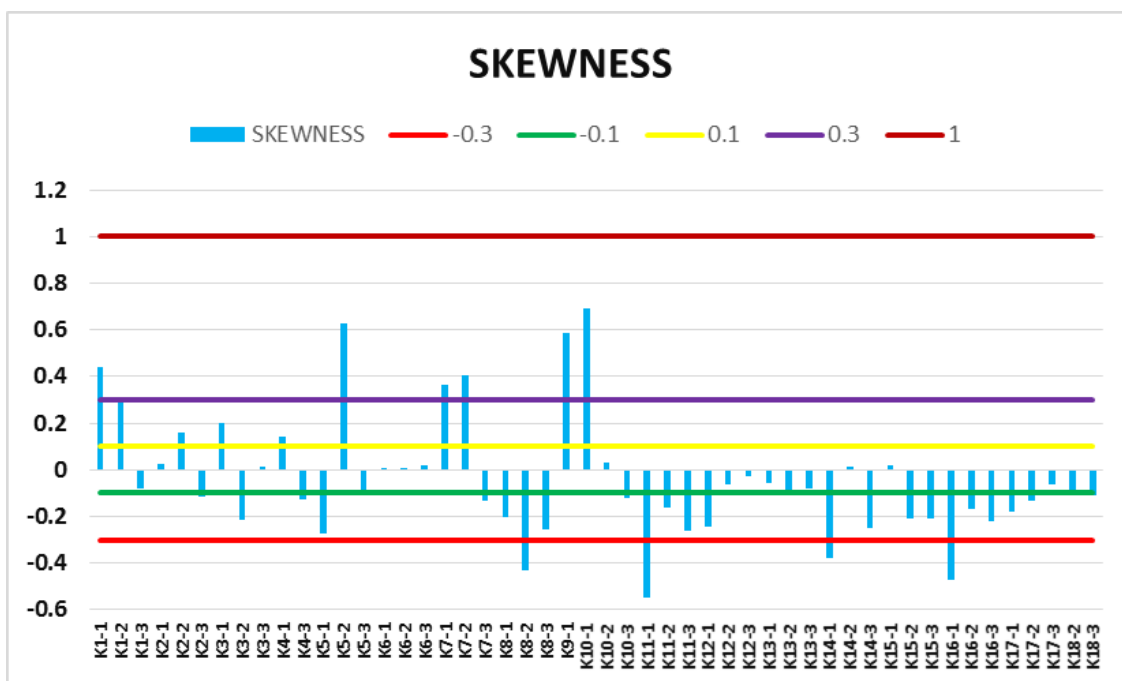


FIGURE 3.19 – Carte représentant les normes de l'indice d'asymétrie pour la plage Khaloufi.

On peut distinguer trois types de courbes cumulatives pour les sédiments de surface de la plage Corso dont le côté Est et la surface près de l'Oued Corso montrent des valeurs

d'indice d'asymétrie supérieures à 1, donc le classement est maximal du côté des grossiers et la fraction fine est étalée. La partie ouest de la plage présente des courbes cumulatives avec une asymétrie sur la quasi-totalité des sédiments superficiels de cette plage. (Figures 3.20 et 3.21)

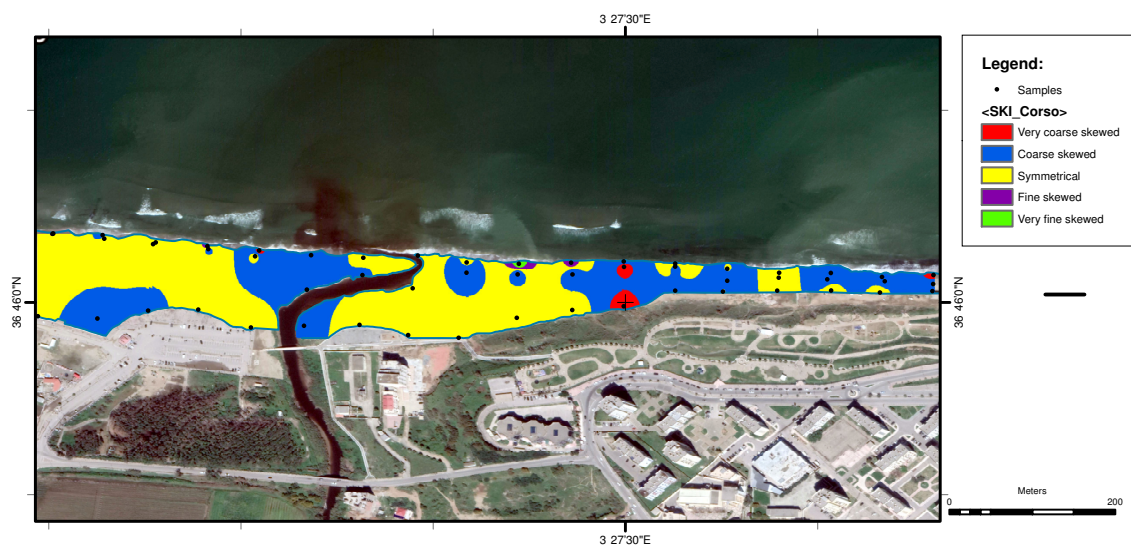


FIGURE 3.20 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'asymétrie pour la plage Corso.



FIGURE 3.21 – Carte représentant les normes de l'indice d'asymétrie pour la plage Corso.

3.2.6.6 Indice d'aplatissement

Il se calcule par la relation suivante :

$$KG(enphi) = \frac{Q_{95} - Q_5}{2.44Q_{75} - Q_{25}} \quad (3.5)$$

Cet indice décrit la forme des courbes granulométriques par rapport à la courbe de Gauss.

- ◁ $KG < -0.67 \phi$: courbe Very platykurtic.
- ◁ $0.67 \phi < KG < 0,90 \phi$ courbe platykurtic.
- ◁ $0.9 \phi < KG < 1.11 \phi$ courbe Mesokurtic.
- ◁ $1.11 \phi < KG < 1.5 \phi$ courbe Leptokurtic.
- ◁ $1.5 \phi < KG < 3 \phi$ Very Leptokurtic.
- ◁ $KG > 3 \phi$ courbe Extremely leptokurtic.

La majorité des courbes cumulatives des sédiments de la partie Ouest sont étalées et très étalées, tandis que les courbes cumulatives de la partie Est sont en grande partie symétriques et redressées à forte pente. (Figures 3.22 et 3.23)

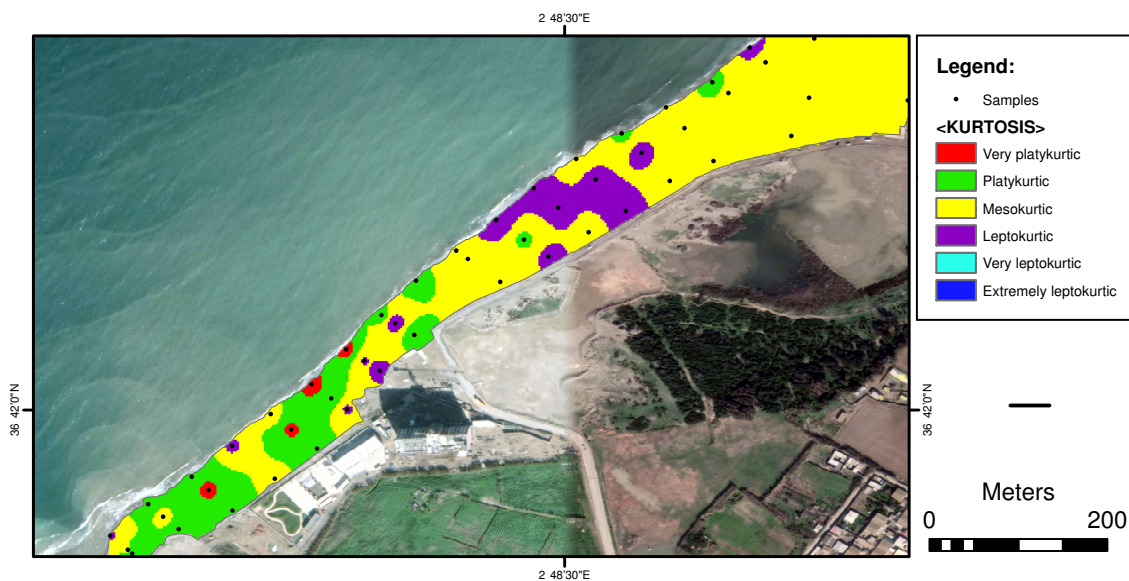


FIGURE 3.22 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'aplatissement pour la plage Khaloufi.

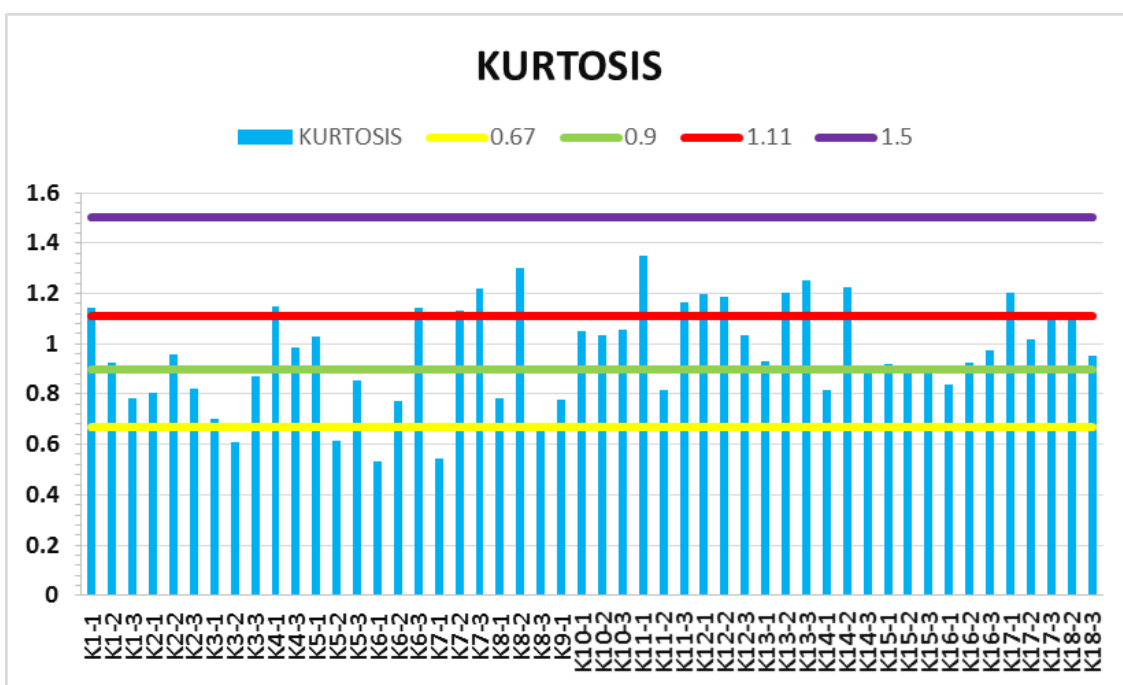


FIGURE 3.23 – Carte représentant les normes de l'indice d'aplatissement pour la plage khaloufi.

Les courbes cumulatives des sédiments superficiels de cette plage sont quasiment symétriques et redressés à forte pente mis à part quelques stations prélevées au niveau du trait de côte, qui présentent des courbes étalées et très étalées. (Figures 3.24 et 3.25)

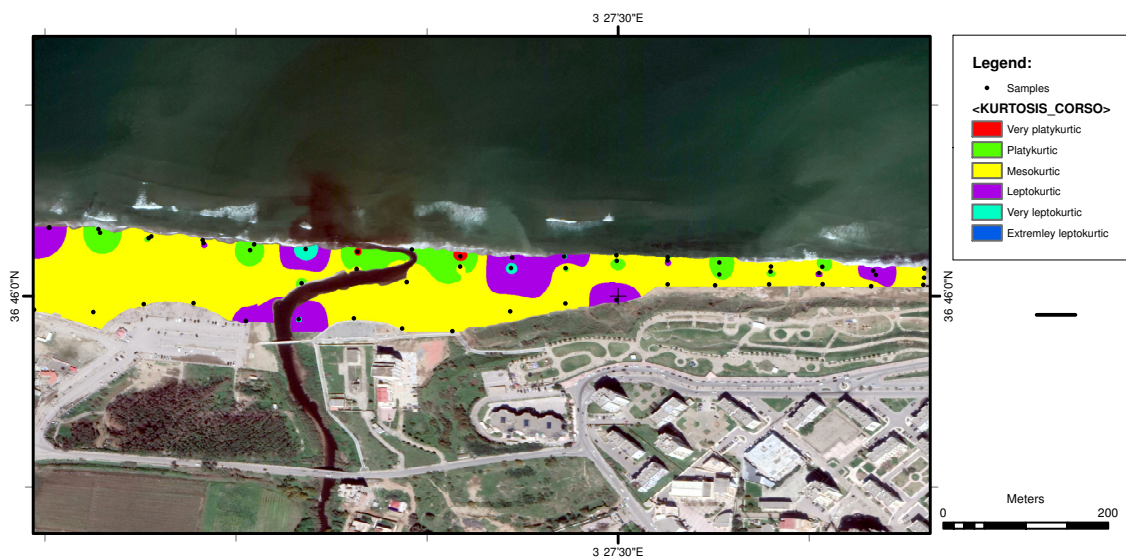


FIGURE 3.24 – Carte représentant la répartition spatiale de l'indice d'aplatissement pour la plage Corso.

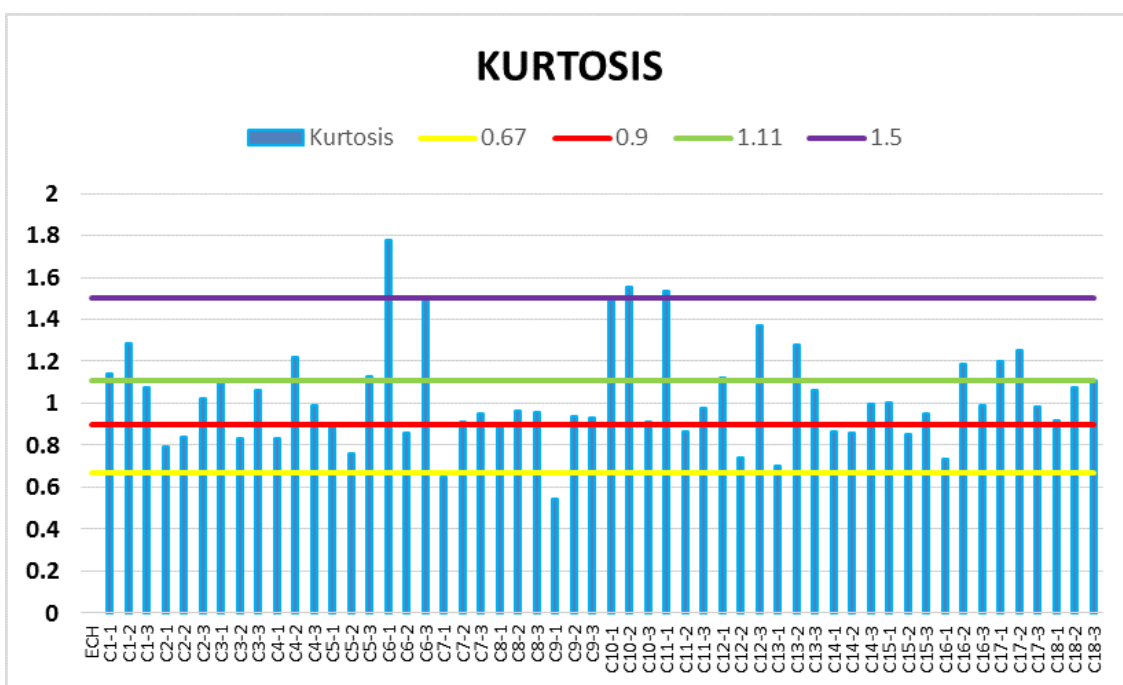


FIGURE 3.25 – Carte représentant les normes de l'indice d'aplatissement pour la plage Corso.

3.2.6.7 Coefficient d'uniformité (U)

Le coefficient d'uniformité U est défini par la relation suivante :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.6)$$

Avec : d_{60} : taille des grains (mm) correspondant à 60% du poids cumulé

et d_{10} : taille des grains (mm) correspondant à 10% du poids cumulé

Il permet de qualifier la granulométrie des sables :

$U < 2$: granulométrie uniforme

$U > 2$: granulométrie variée.

Le coefficient d'uniformité est inférieur à 2 pour les échantillons prélevés près du trait de côte dans la partie Est de la plage Khaloufi, donc ces sédiments présentent une granulométrie uniforme. Tandis que les sédiments prélevés près de la dune bordière dans cette partie présentent une granulométrie variée. L'indice d'uniformité pour la partie Ouest de cette plage est supérieur à 2 en grande partie donc les sédiments de ces points d'échantillonnage présentent une granulométrie variée. (Figures 3.26 et 3.27)

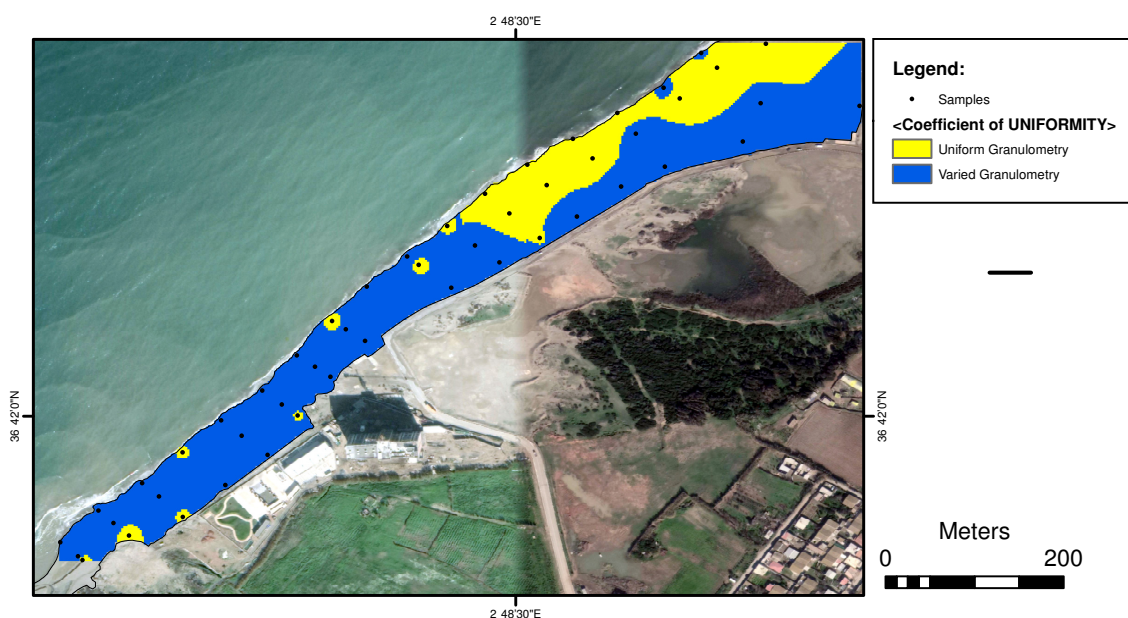


FIGURE 3.26 – La répartition spatiale du coefficient d’uniformité pour la plage Khaloufi.

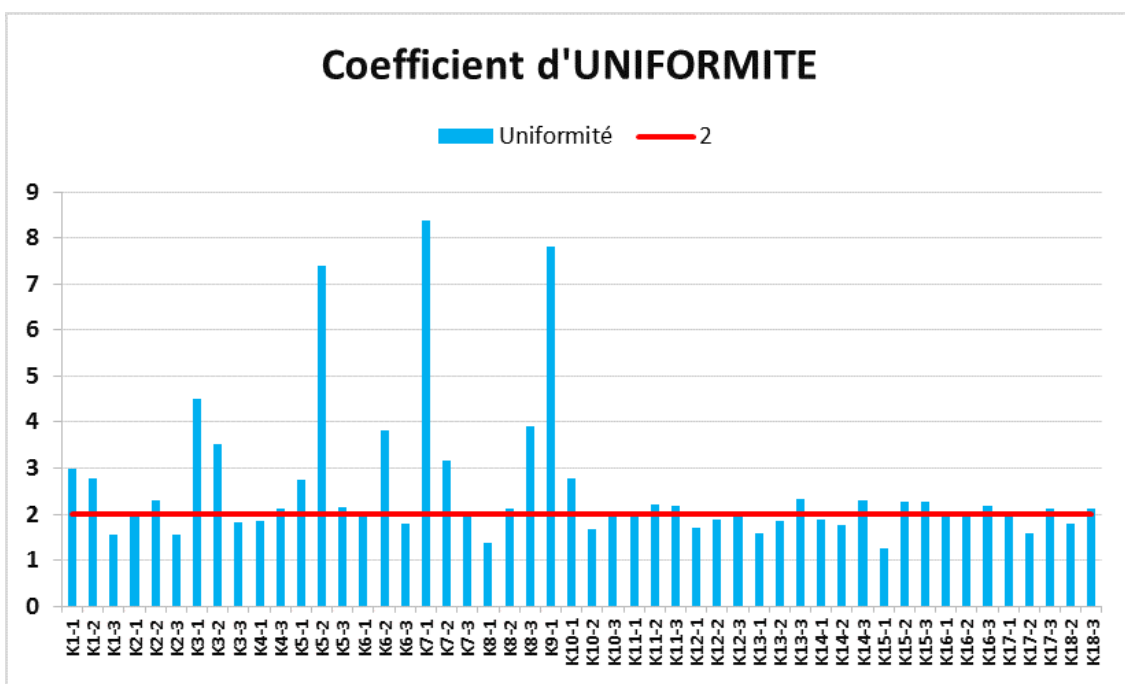


FIGURE 3.27 – Carte représentant la norme du coefficient d’uniformité pour la plage Khaloufi.

Le coefficient d’uniformité est inférieur à 2 pour les échantillons prélevés de l’arrière plage, donc ces sédiments présentent une granulométrie uniforme. Tandis que les sédiments prélevés près du trait de côte présentent une granulométrie variée. (Figures 3.28 et 3.29)

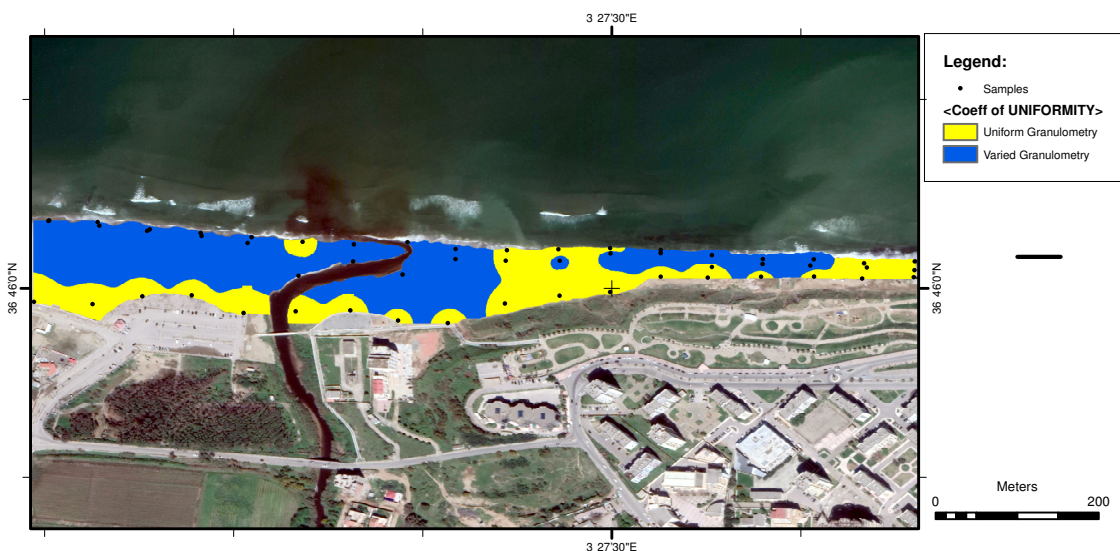


FIGURE 3.28 – La répartition spatiale du coefficient d’uniformité pour la plage Corso.

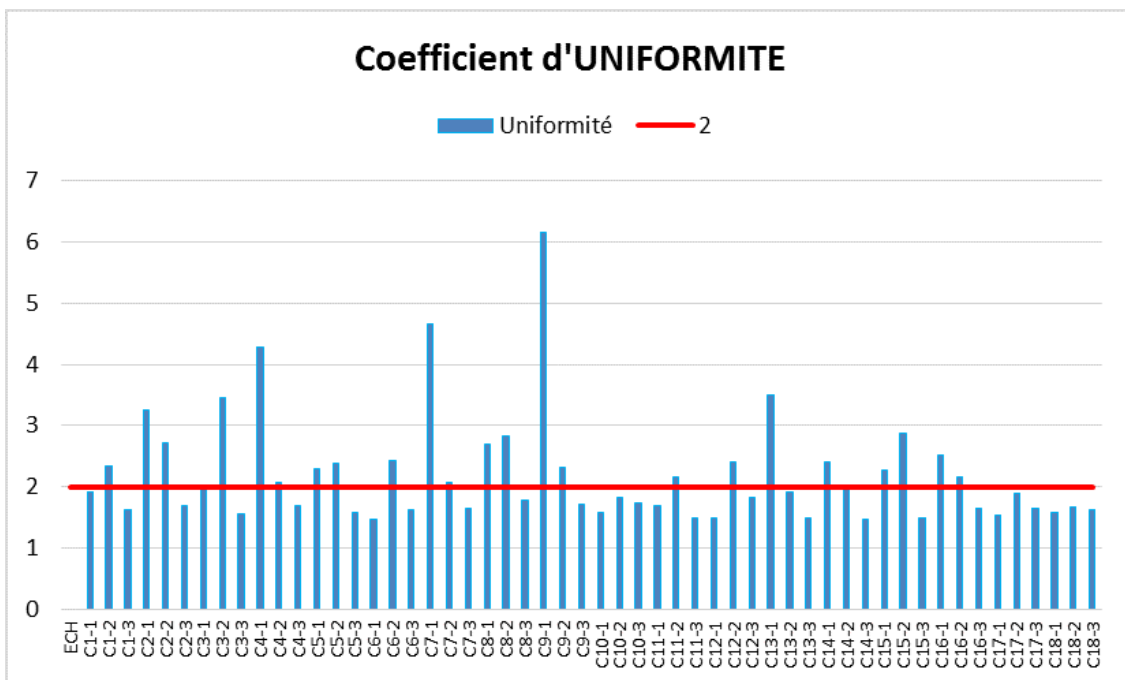


FIGURE 3.29 – Carte représentant la norme du coefficient d’uniformité pour la plage Corso.

3.2.7 Diagramme triangulaire et faciès granulométriques

Les faciès granulométriques sont déterminés sur le diagramme triangulaire suivant leur teneur en sables, silts, argiles. Les teneurs fractionnelles sont définies selon les normes adaptées pour la description granulométrique des faciès. L’étude granulométrique des échantillons nous conduit à distinguer trois grandes familles de sédiments, nettement distinctes sur le diagramme triangulaire de Folk.

- 1) les Sable très grossier de 2 à 1 mm,
- 2) les sables grossiers de 1 à 0.5 mm,
- 3) les sables moyens de 500 à 250 μm ,
- 4) les sables fins de 250 à 125 μm .

L'ensemble des échantillons représentés sur le diagramme laisse ressortir trois grandes catégories de faciès granulométriques type : les sables, les sables graveleux et les graviers sableux. Par contre, les faciès granulométriques proches des pôles (sable et argile) sont faiblement représentés dans le diagramme de Folk (Figure 3.30).

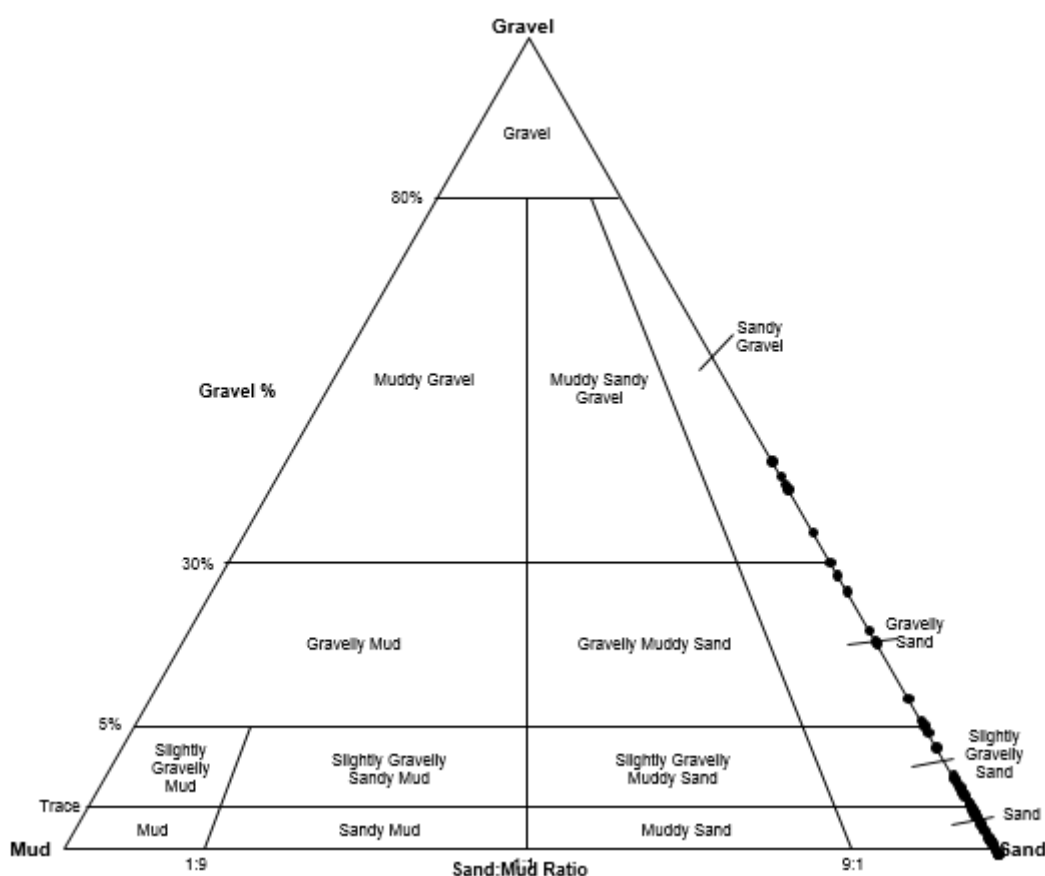


FIGURE 3.30 – Diagramme triangulaire -Sable-Silt-Argile- représentant les faciès granulométriques de l'ensemble des sédiments superficiels prélevés sur la plage Khaloufi.

L'ensemble des échantillons représentés sur le diagramme laisse ressortir trois grandes catégories de faciès granulométriques type : les graviers de sables, sable graveleux, sable légèrement graveleux et sables.

La majorité des échantillons prélevés sur la plage Corso sont des sables, sable légèrement graveleux et sable graveleux. A l'exception de l'échantillon 10-1 qui est constitué d'un gravier de sable. Hormis quelques différences pour la répartition des échantillons sur le

diagramme triangulaire de Folk et Ward, les deux plages présentent les mêmes faciès granulométriques. (Figures 3.31)

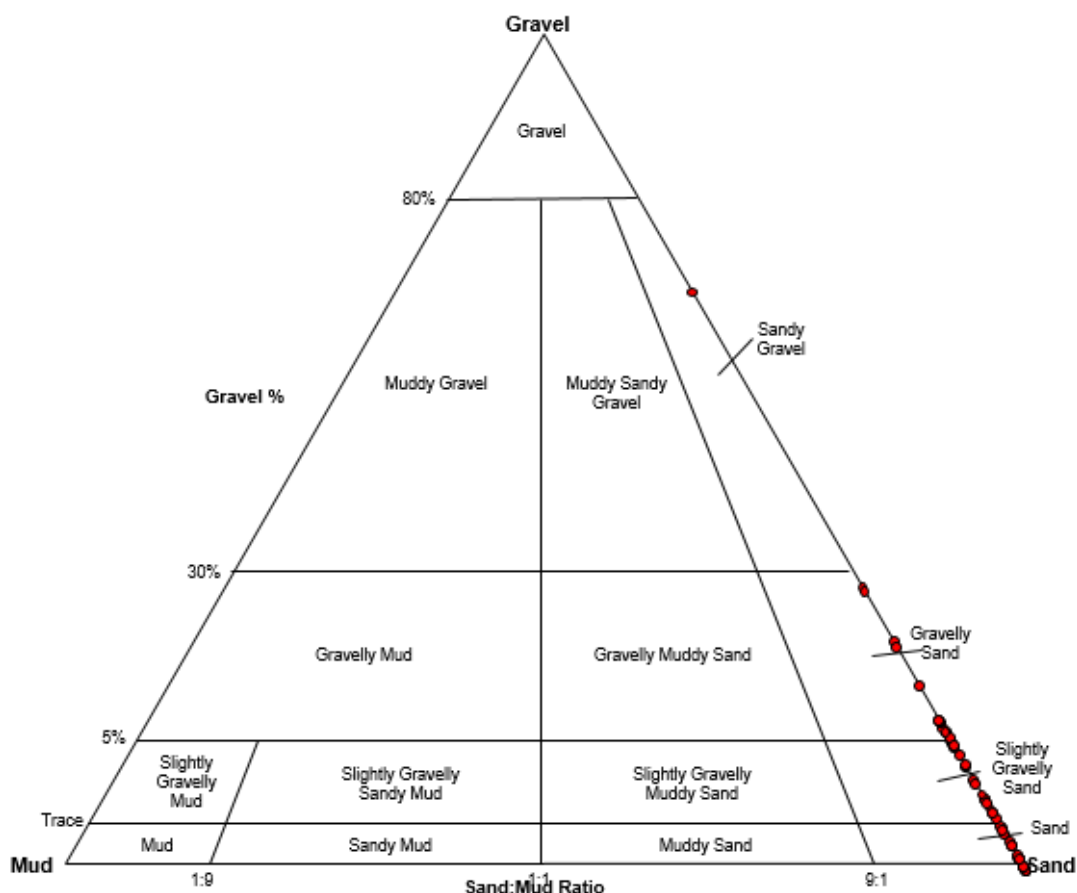


FIGURE 3.31 – Diagramme triangulaire -Sable–Silt–Argile- représentant les faciès granulométriques de l’ensemble des sédiments superficiels prélevés sur la plage Corso.

3.2.8 INTERPRETATION

3.2.8.1 Taille moyenne

La granulométrie moyenne d’une plage est fonction de l’énergie des vagues incidentes et de la nature et la disponibilité du sable. La granulométrie moyenne des échantillons de sédiments prélevés sur la plage Khaloufi était de l’ordre de 1.05ϕ et de 1.01ϕ pour la plage Corso. Dans la zone déferlante nous avons un sédiment grossier, la taille des sédiments dans la berme indique un faciès mixte et que l’arrière plage est principalement composée de sable moyen à très fin, ce qui indique des sédiments riches en HM.

3.2.8.2 Coefficient de tri

L'échelle logarithmique de base (ϕ) est utilisée ici pour décrire la distribution granulométrique des sédiments. Le coefficient de tri mesure la quantité d'étalement d'une distribution granulométrique à partir de la moyenne [116]. Les coefficients de tri des sédiments de différents endroits sont donnés dans les histogrammes. La majorité des échantillons de sédiments pendant relève de la catégorie modérément à modérément bien triée. Les variations du coefficient de tri au niveau de la zone arrière plage, et du trait de côte sont comprises entre 0,324 et 1,478 / (Moyenne de 0,927) et 0,447 et 1.281 / (Moyenne de 0,816) respectivement, ce qui indique un mauvais tri dans la zone du trait de côte avec une amélioration progressive vers l'arrière plage. Les échantillons collectés dans la partie Est de la plage sont légèrement mieux triés par rapport à ceux prélevés près de l'oued avec une légère variation du coefficient de tri entre les différents endroits. Les échantillons de l'arrière plage montrent une large gamme de caractéristiques de tri avec une domination du matériel modérément bien classé. Sur la base de l'analyse des caractéristiques de tri des échantillons de sédiments de plage prélevés sur le tronçon côtier de la plage Khaloufi, on peut déduire que les échantillons de cette plage présentent un mauvais tri, progressivement vers l'ouest. Cela indique en outre que les sédiments sont généralement de type mixte montrant une accrétion vers l'ouest près de l'embouchure de l'oued. Ces observations corroborent également bien les changements morphologiques observés qui montrent une accrétion au niveau de l'oued. Cependant, au niveau de la plage corso qui s'érode et se situe de part et d'autre de l'oued Corso, les sédiments sont mieux triés avec une taille moyenne des sédiments "sablonneux" comprise entre -1.02 et 1.78 ϕ , indiquant un type de sable fin à très fin.

L'indice de classement témoigne de l'uniformité du sédiment dès lors que les sédiments apparaissent bien classés avec des valeurs d'indice de classement (S_0) inférieures à 2. Ce bon classement est confirmé par le caractère unimodal des courbes de fréquence. Nous pouvons souligner que c'est parmi les sables fins que nous trouvons les sédiments les mieux classés. Le classement est généralement connu pour être une fonction du grain moyen. En effet, les fractions moyennes et fines sont mieux classées que les argiles, silts et graviers [116].

3.2.8.3 Skewness et Kurtosis

Les résultats montrent la relation entre Skewness et Kurtosis, qui représente un outil efficace pour interpréter la genèse des sédiments, en quantifiant le degré de normalité

de sa distribution granulométrique [123]. Tous les sédiments ont des valeurs d'asymétrie négatives, indiquant un enrichissement en particules grossières bien triées et une élimination préférentielle des particules fines. Généralement, les asymétries négatives caractérisent le sable littoral où le sable fin est éliminé par vannage [124]. Néanmoins, leur aplatissement montre une nature différente. En effet, la plupart des sédiments analysés sont de nature leptokurtique suggérant une gamme granulométrique homogène. Seuls quelques échantillons des dépôts de plage sont de nature mésokurtique, où les populations granulométriques sont presque en proportions égales. Pourtant, le sédiment fluvial présente une nature platykurtique reflétant une hétérogénéité de population. Le dépôt près de l'embouchure est très platykurtique (valeur extrêmement élevée) suggérant qu'une partie du sédiment a réalisé son tri dans un environnement à haute énergie [125], ce qui est argumenté par les galets des oueds.

3.2.9 DISCUSSION

Les plages étudiées présentent les deux phénomènes érosion et accrétion du littoral et ont été choisies comme sites de prélèvements. L'analyse granulométrique des sédiments de surface pour ces plages présente un faciès sableux. La teneur de la fraction fine augmente, généralement, en allant de l'Ouest à l'Est pour la plage Khaloufi et du trait de côte vers l'arrière plage pour la plage Corso. Cela peut être justifié par la proximité de la dune bordière et les apports des oueds qui sont en partie responsables de cette distribution par les dépôts importants à proximité de l'embouchure. À partir des courbes granulométriques, un grand nombre de paramètres statistiques peut être généré, dans le but d'optimiser les comparaisons entre les sédiments et d'interpréter les résultats obtenus en termes de processus sédimentaires. L'évolution granulométrique des échantillons peut se visualiser facilement par des diagrammes comparatifs de ces divers paramètres entre eux. Une approximation des paramètres peut être établie à partir des représentations des courbes de distribution en fréquence et en fréquence cumulée. Des paramètres statistiques ont été également calculés pour différencier les sédiments, le grain médian D50 et le mode. Le programme GRADISTAT v. 8.0 propose une description structurale des échantillons selon les paramètres statistiques de [121] et de [116].

Les cartes élaborées sous ArcGIS affichent les résultats des paramètres et indices granulométriques des échantillons bruts par l'extrapolation des valeurs des indices sur toute la zone d'étude, cela nous a permis de visualiser facilement l'évolution granulométrique des deux plages.

Toutefois, il ressort de ces cartes que la granulométrie est généralement plus grossière de l'Ouest vers l'Est pour la plage Khaloufi. Il existe un gradient d'affinement du trait de côte à l'arrière plage pour la partie Ouest qui varie des sables grossiers aux sables moyens. Pour la partie Est de cette plage, les sédiments semblent s'affiner avec principalement des sables moyens à fins. La taille moyenne des sédiments de la plage Khaloufi diminue, généralement, en allant de l'Ouest vers l'Est. Il s'agit, d'un tri granulométrique effectué par les courants de dérive littorale. Ce grano-classement n'est pas vérifiable pour quelques stations. On peut conclure aussi que les courants côtiers (le courant algérien) importent une quantité considérable de sédiments dans la partie Ouest qui vont être piégés sur la partie Est de la plage (dérive littorale). Les courants de houles, spécialement les courants de retour mobilisent les particules de taille très petite et laissent celles de taille plus importante à leur place. Les particules les plus fines sont, ensuite, transportées et déposées au niveau des petits fonds ou bien des plages adjacentes.

Les sédiments de la partie Ouest de la plage Khaloufi font souvent apparaître des distributions bimodales à polymodales, car majoritairement composés d'un mélange de graviers et de sables.

La partie Est de la plage est caractérisée par une fraction fine, cela peut être justifié par la proximité de la dune bordière ainsi que l'influence de l'hydrodynamisme qui mobilise la fraction fine au niveau du trait de côte qui va être transportée et déposée au niveau de la plage sous-marine. La partie Ouest de la plage est dominée par une fraction grossière causée par l'accrétion de la plage et le dépôt des sédiments dus aux apports de l'oued Mazafran en raison probablement de son débit élevé et ses apports en sédiments. L'analyse granulométrique des sables de la plage a permis de mettre en évidence la distribution et la cartographie des différents indices granulométriques et de comprendre les différents agents de dépôt. Les différentes cartes granulométriques présentées montrent que tous les paramètres analysés présentent une évolution transversale et longitudinale. La partie Est de la plage Khaloufi est caractérisée par des valeurs faibles des grains moyens et des valeurs élevées des deux coefficients d'asymétrie et du triage. Ceci indique un milieu de faible énergie [105]. Cependant, dans la partie Ouest de la plage la taille du grain moyen est plus importante, alors que les deux autres coefficients présentent des valeurs faibles. Ceci montre que la zone est très agitée vu qu'elle est directement ouverte aux actions de la houle incidente ainsi que les apports considérables de l'oued.

Les sédiments de la plage Corso proviennent principalement de l'oued Corso, les zones à grains grossiers ont des sables asymétriques négativement car les sables fins seraient transportés au large en raison du vannage par les vagues et du transport aérien. Les sédiments avec une asymétrie mixte suggèrent qu'ils sont dans un état de flux tandis

qu'une asymétrie positive indique une accrétion [126]. Les sédiments extrêmement leptokurtiques réaffirment leur dérivation fluviale. L'énergie et la direction des vagues côtières qui transportent et redéposent efficacement les sédiments côtiers sont influencées par la topographie du fond, la profondeur de l'eau, la configuration côtière, la nature du vent et des marées, entre autres facteurs ([127]; [113]). La réfraction des vagues dépend de la profondeur de l'eau et de l'amplitude des vagues, ce qui fait que les vagues se déplacent parallèlement et se brisent à un angle par rapport à la côte. Par conséquent, les courants déplacent les sédiments le long des côtes sous forme de dérive littorale [128]. Ces facteurs entraînent le transport de grains fins de faible densité à des distances éloignées de la source, tandis que les grains grossiers à haute densité sont déplacés vers des distances plus courtes et/ou se déposent ensemble à la source ou à proximité [129]. La réfraction des vagues influence les changements saisonniers dans le transport et le dépôt des sédiments [130], la formation des caractéristiques du littoral [131] et la distribution des minéraux ([127]; [132]). Les courants côtiers ininterrompus sont responsables de l'enlèvement et du remplacement simultanés du matériel de plage, grâce à quoi, la plage présente également un équilibre dynamique cyclique [133]. D'autre part, chacune des plages étudiée a des caractères morphodynamiques définis en fonction de la géométrie de la plage, des caractéristiques topographiques littorales, de la texture des sédiments, des processus de dépôt et d'érosion, des processus océanographiques (vagues, courants) et de la réponse de la plage à différentes conditions. En général, la texture plus fine des sédiments dans cette zone est également responsable de l'érosion intense, puisque les plages avec des sédiments plus fins sont moins stables et sujettes à l'érosion que celles avec des sédiments grossiers [134]. En plus de ceux-ci, les bilans sédimentaires le long du rivage sont également affectés par les structures artificielles ([135];[136]). L'équilibre dynamique est donc perturbé. Les changements saisonniers de l'estran et leurs caractéristiques texturales donnent un aperçu du bilan sédimentaire et de sa dispersion.

3.2.10 CONCLUSION

L'étude de la dynamique sédimentaire en se basant sur l'étude granulométrique des sédiments superficiels et l'extrapolation des différents indices granulométriques sous ArcGIS nous a permis de montrer la répartition de différents faciès sédimentaires sur les surfaces des plages étudiées. D'autre part la combinaison des résultats obtenus et l'analyse granulométrique ont permis d'expliquer la distribution des classes sédimentaire. L'étude granulométrique des échantillons prélevés montre que les sédiments ont une taille moyenne comprise entre -1 et 2 ϕ . Les sédiments prélevés le long du trait de côte sont généralement des sables grossiers à moyens, cependant, les sédiments prélevés près

de la dune bordière sont des sables moyens à fins. Il s'agit d'un tri granulométrique effectué de l'Ouest vers l'Est par les courants de dérive littorale, qui mobilisent les sables fins, de la zone située près du trait de côte. Les courants perpendiculaires induisent un transit sédimentaire du trait de côte vers l'arrière page.

Sur la base de la distribution spatiale de la taille moyenne des sédiments dans les plages, on peut déduire que le type fin de sédiment sableux est dominant dans l'arrière plage alors que sur le trait de côte le sable grossier domine. Qui est caractérisé par un mélange de sédiments de type gravier, sable moyen et sable fin. On remarque que la majorité des sédiments sableux sont de catégorie bien triée à moyennement bien triée, alors que les sédiments grossiers sont mal triés.

Les différenciations morphologiques et la répartition des faciès sédimentaires sont fortement dépendantes du schéma de circulations des eaux. Il faut prendre en considération les effets généraux des houles sur le littoral ; les différenciations morphologiques ; la mobilité des sédiments sous l'influence des agents de la dynamique littorale ; les effets des vents locaux et l'influence de l'hydrodynamisme.

En outre, les mêmes conclusions ont été mises en évidence par ([137]; [138]), qui ont également conclu que la répartition spatiale des sédiments indiquait que la partie amont présente un faciès vaseux, alors que la partie aval est sableuse. Ce changement de faciès sédimentaire s'explique par une modification des conditions qui contrôlent la distribution des sédiments telles que les conditions hydrodynamiques [137]. Les activités humaines sont le deuxième facteur contrôlant la distribution des sédiments [137]. Une bonne corrélation avec les taux d'accumulation de sédiments, les taux de sédimentation et l'évolution de la taille des grains. Cette distribution est caractérisée par la dominance des fractions fines à moyennes, dans la totalité des sédiments transportés vers la côte, elle est liée essentiellement à l'hydrodynamisme fluvial et à une forte dynamique marine. Cette répartition granulométrique résulte des effets des actions naturelles (houle, courant de dérive), qui trient et remontent sur les plages les sédiments accumulés dans les emboucheurs et aussi d'une forte action des vents, qui transportent une quantité des sédiments de la plage vers les dunes.

3.3 ANALYSE MINÉRALOGIQUE

La suite de ce chapitre sera consacrée à la description de la méthode utilisée par la Diffraction des Rayons X. Notons que nous avons utilisé cette technique dans le but d'acquérir essentiellement des informations sur la composition des sédiments. Les différents échantillons prélevés ont fait l'objet d'une analyse minéralogique par diffraction des rayons X. La méthode utilisée a pour but de déterminer la composition minéralogique d'un échantillon de sable. Elle repose sur l'application de la loi de Bragg et sert à connaître la constitution minéralogique du sédiment total. La connaissance de la source des sédiments qui forment les stocks sédimentaires (plages, dunes) renseigne essentiellement sur la dynamique morphosédimentaire du littoral. Les minéraux lourds sont d'excellents traceurs pour l'identification des origines des dépôts sédimentaires, dans les plages et les cordons littoraux ([139]; [140]; [129]). En conséquence, l'étude des minéraux lourds nous permet de donner une identité aux formations détritiques, où plusieurs recherches sont entreprises pour préciser l'origine et les mécanismes de leurs formations ([141]; [142]; [143]; [144]). Pour déterminer la source des sédiments, à travers ce chapitre, des analyses minéralogiques ont été effectuées sur les échantillons prélevés près des deux oueds qui débouchent dans les baies de Bou Ismail et Zemmouri et sur les sédiments de la frange littorale (les échantillons des plages et des pieds des dunes). Les résultats finaux de cette analyse minéralogique ont été comparés entre eux. Ensuite les minéraux lourds sont fréquemment présents dans les environnements côtiers et leur approvisionnement est principalement fonction de la disponibilité des sédiments et des processus sélectifs (par exemple, le remaniement après le dépôt dans les environnements côtiers) qui ont lieu pendant le transport de la source au puits ([145]; [146]). Par conséquent, des assemblages spécifiques de minéraux lourds peuvent fournir des informations sur l'origine, les voies de transport et les environnements de dépôt ([147]; [148]). L'accumulation de minéraux lourds le long d'une partie de la côte donne un aperçu de la provenance sédimentaire et du transport par la dérive littorale. En particulier, des travaux récents se sont concentrés sur les minéraux lourds comme traceurs pour déterminer la distribution minérale selon les cellules de transport côtier. Il existe également des preuves du transport de minéraux lourds par les oueds.

Le but de l'étude minéralogique est :

- 1) De déterminer les différents composants du sable et d'identifier son évolution spatiale en tenant compte des différents paramètres influençant cette dynamique.
- 2) Caractériser la variation spatiale des contenus en minéraux lourds dans une zone côtière.
- 3) Evaluer la contribution des dynamiques sur la distribution minérale le long de cette zone côtière.
- 4) Fournir des contributions sur la provenance des minéraux dans ces plages.

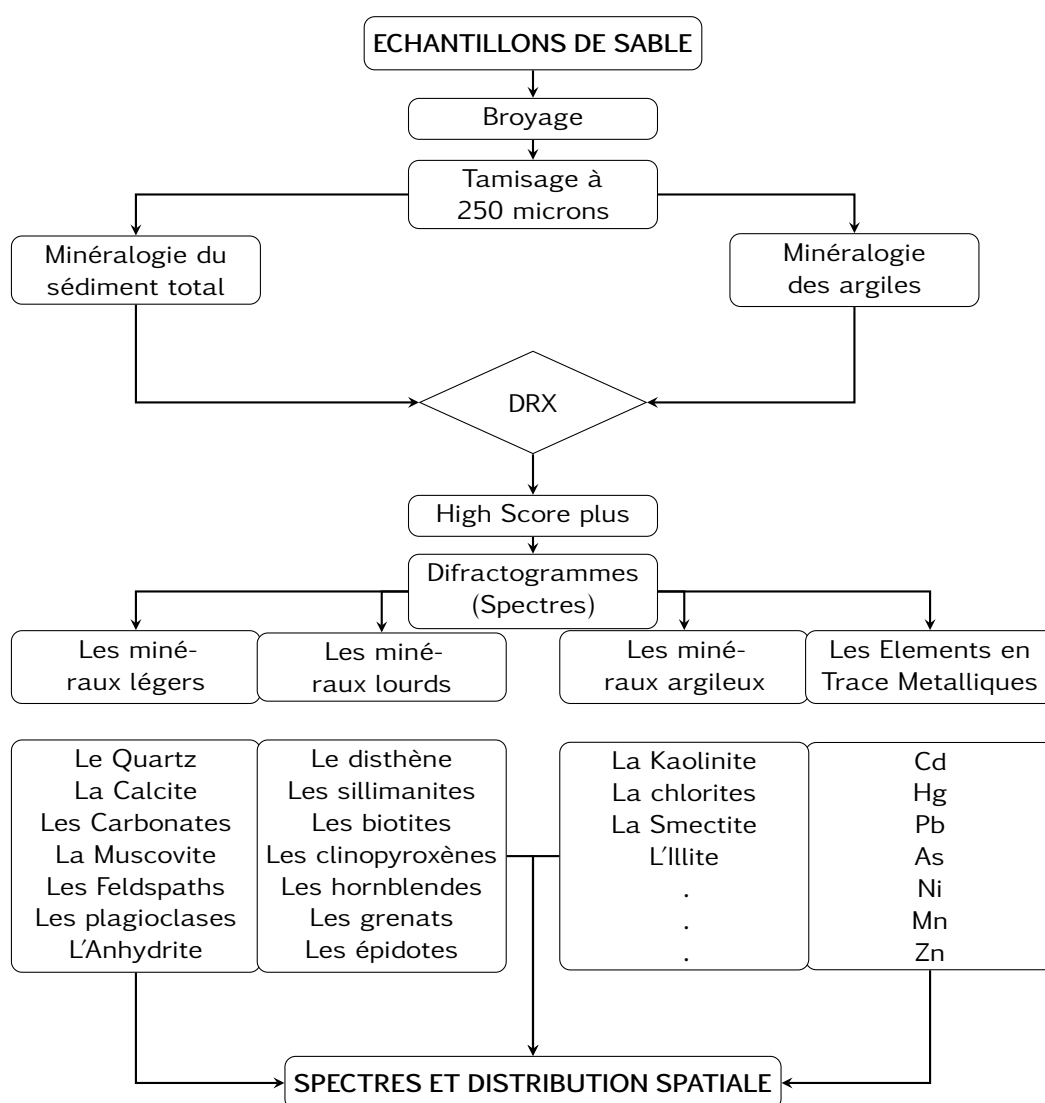


FIGURE 3.32 – Diagramme schématisant les différentes étapes de l'analyse minéralogique.

3.3.1 CREATION DE LA BASE DE DONNEES

3.3.2 Préparation des échantillons pour la minéralogie totale

Le protocole d'analyse minéralogique a été mené de la manière suivante : Afin de respecter les conditions naturelles d'observation, les analyses références ont été réalisées sur des échantillons bruts dits de "roches totales". Tous les échantillons subissent au préalable une succession de préparations :

Pour la minéralogie totale du sédiment, on prend 1 à 2 g de l'échantillon brut, broyé manuellement au mortier en agate. Après le tamisage 250 microns, une étape d'homogénéisation visant à dé-floculer les sédiments dont la fraction totale de ces derniers est dispersée par agitation mécanique, ensuite l'échantillon est monté sur un porte échantillon, compacté régulièrement et délicatement afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux (méthode de [149]). Les échantillons préparés en séries de 10, passent au diffractomètre (Panalytical). La procédure « poudre avec rotation » est la plus adaptée pour une analyse entre 2 et 60° (2θ). L'acquisition du spectre de diffraction X est obtenue par interface numérique (logiciel Panalytical). L'interprétation des spectres a été effectuée sur le logiciel de traitement (HighScore *plus*), pour identifier les phases minéralogiques existantes.

3.3.3 Conditions d'analyses

En diffractométrie des rayons X, les conditions d'analyses sont intimement associées aux modes de préparation des échantillons. Nous rappelons que la méthode des poudres a été préconisée pour analyser la fraction totale. Chaque diffractogramme a fait l'objet d'une analyse qualitative et d'une analyse semi-quantitative.

En effet, sachant que les pics du spectre correspondent aux différents rayons diffractés en fonction du rayon incident, il est donc possible d'identifier chaque minéral qui compose le cortège minéralogique du sédiment. Les positions des pics signent l'espèce minérale, tandis que la forme des pics renseigne sur l'état de cristallisation du matériel.

L'évaluation semi-quantitative est de $\pm 5\%$. Les pourcentages de chaque minéral sont évalués par analyse quantitative des pics des diffractogrammes. Le but de l'analyse quantitative est de traduire l'abondance relative d'un minéral par rapport aux autres minéraux qui composent l'assemblage minéralogique [150]. La méthode préconisée consiste à mesurer les hauteurs des réflexions basales des différents minéraux à déterminer. La somme

de ces hauteurs de pics est rapportée à 100 % et les proportions de chaque minéral sont calculées. Dans ce travail, seules les abondances des minéraux types présentant des pics intenses ont été calculées. Il s'agit du quartz, des feldspaths, des micas, de la calcite, de la dolomite, de l'halite, des argiles. Nous constatons que le quartz est extrêmement fréquent et en proportion assez importante. Les abondances en quartz sont confirmées par les médianes granulométriques, car le principal constituant de la fraction grossière et moyenne est le quartz. Pour les autres minéraux (minéraux lourds), nous nous sommes juste contentés de les identifier. Les diffractogrammes ont été examinés à l'aide du Logiciel High Score *Plus*. Ce logiciel propose une identification des phases minérales cristallines et l'analyse semi-quantitative des échantillons. Des problèmes majeurs peuvent être rencontrés. Ils sont en partie liés aux petites tailles ou à leur faible cristallinité.

3.3.4 TRAITEMENT

3.3.5 La Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est la technique la plus couramment utilisée pour étudier les caractéristiques de la structure cristalline et pour déterminer la minéralogie des sédiments et la séparation des minéraux lourds. L'échantillon est fourni sous forme de poudre cristalline par broyage. L'analyse DRX fournit un résultat de la diffraction et des intensités. Les analyses par (DRX) ont été réalisées au laboratoire science et génie des matériaux à l'USTHB au moyen d'un diffractomètre Panalytical doté d'une source de rayon X constituée d'une anticathode couplée à un monochromateur primaire utilisée pour filtrer les raies $K\alpha_1$ du cuivre et éventuellement la fluorescence de l'échantillon et un détecteur en position $1 - D$.

3.3.6 Principe de la DRX

L'identification minéralogique repose sur l'application de la loi de Bragg qui stipule que tout corps cristallisé peut faire l'objet d'une analyse par diffraction des rayons X. Les diffractogrammes des rayons X ont donc été réalisés avec un diffractomètre par « la méthode de poudre ». Cette méthode consiste à irradier l'échantillon bien broyé par les rayons X. Les cristaux ont la particularité d'être constitués de plans atomiques équidistants les uns des autres (Figure 3.33), repérés par les indices de Miller (hkl). En raison de cette périodicité, des diffusions intenses dans des directions précises peuvent

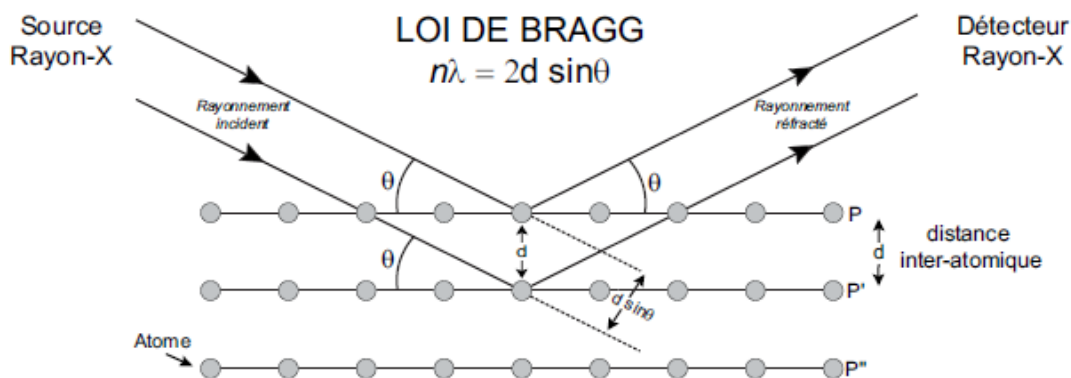


FIGURE 3.33 – Principe de diffraction des rayons X (DRX) par les atomes maillant la structure cristalline d'un minéral donné, avec d la distance interréticulaire entre les plans cristallographiques $P - P'$ et $P' - P''$, θ l'angle de Bragg.

être observées. Les paramètres expérimentaux sont déterminés par la relation de Bragg (Équation 3.7).

$$n\lambda = 2d_{(hkl)} \sin(\theta) \quad (3.7)$$

Où n est l'ordre de diffraction (nombre entier); λ la longueur d'onde de la source; $d_{(hkl)}$ la distance interréticulaire, c'est-à-dire l'espacement entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin et θ l'angle de Bragg, c'est-à-dire l'angle que fait le faisceau plan incident avec une famille de plans réticulaires de distance $d_{(hkl)}$ (Équation 3.7).

Dans la méthode des poudres, λ est fixé par le monochromateur $K\alpha_1$ et suit les variations d'énergie diffractée en fonction de l'angle de Bragg θ . Après amplification et intégration, le signal est enregistré avec une vitesse de défilement choisie. Nous obtenons un diagramme $I(\theta)$ traduisant les intensités des pics de réflexion correspondant aux différents plans (hkl) rencontrés. Dans le cas où les cristaux ne présentent pas d'orientation préférentielle. L'aire des pics mesurée au-dessus du bruit de fond (ligne de base) est proportionnelle à la fois au facteur de structure et au volume diffractant.

3.3.7 La reconnaissance qualitative et quantitative des minéraux

À l'aide du logiciel HighScore *plus*, l'intensité relative est calculée et la structure cristalline est adaptée à toute composition minérale spécifique. La base de données ouverte de cristallographie est utilisée pour l'appariement des phases minérales dans ce logiciel.

L'enregistrement des spectres et l'identification qualitative des phases minéralogiques ont été effectués sur ce logiciel à partir de la comparaison entre les spectres (les diffractogrammes) traités des échantillons avec des fiches (des phases minéralogiques) connues à partir des bases de données existantes.

La suite Highscore avec l'option Plus est le logiciel d'analyse de diffraction de la poudre commerciale de Panalytical. Il a été en développement constant dans ses dernières versions et est devenu un produit très complet et mature. Dans le même temps, un nombre croissant de modèles de référence pour l'identification de phase ont été complétés en ajoutant des données de structure cristalline, et des modèles de poudre de référence calculés à partir de données de structure monocristalline remplissaient rapidement les bases de données.

L'utilisateur peut effectuer l'identification sur la base des positions des pics (espacement d et intensités relatives) et/ou sur la base du profil net complet du motif expérimental. Cependant, souvent la combinaison des deux méthodes obtient les meilleurs résultats, couvrant les phases majeures et mineures. Cela signifie que le logiciel moderne d'analyse des modèles de poudre doit non seulement traiter les pics, le fond, le profil et les données de référence, mais doit également gérer les structures cristallines, prendre en charge les transformations des groupes spatiaux et toutes sortes d'ajustements, et devrait faciliter les méthodes associées telles que l'analyse de la microstructure.

3.3.8 Quantification des phases avec des structures cristallines partiellement connues ou inconnues

La méthode classique de Rietveld peut traiter une large gamme de matériaux en utilisant les informations sur la structure cristalline connue. Cependant, cela devient plus difficile lorsque ces matériaux contiennent des phases cristallines avec des structures cristallines inconnues, ou lorsqu'ils contiennent même des phases totalement amorphes. Pour quantifier ces phases, une méthode alternative complétant l'approche classique de Rietveld est nécessaire. L'idée est de caractériser de tels matériaux, un par un avec un standard cristallin bien connu. Cette caractérisation est effectuée avec une cellule unitaire décrivant une phase cristalline inconnue, ce qui nécessite une indexation préalable. Alternativement, elle est réalisée avec une cellule unitaire arbitraire décrivant l'ensemble du profil d'une phase amorphe. Cette méthode a été décrite pour la première fois par [151] et est maintenant implémentée dans HighScore Plus.

Ensuite la Régression partielle des moindres carrés (PLSR) est une méthode d'exploration de données populaire avec de nombreuses applications diverses. Comme ajouté dans

la version 4.0 de HighScore, PLSR peut être utilisé comme un outil de modélisation souple pour découvrir et prédire les corrélations "cachées" directement à partir des analyses brutes DRX.

Les informations contenues dans les modèles DRX qui ne sont pas directement liées à la cristallographie peuvent être basées sur des propriétés physiques, chimiques ou structurales telles que la cristallinité, la température, la dureté ou l'état d'oxydation. Encore plus de paramètres de matériaux qui sont importants pour les processus industriels peuvent être dérivés directement du modèle DRX par PLSR, sans demander que des phases pures ou des structures cristallines soient disponibles. PLSR nécessite un ensemble d'échantillons pour l'étalonnage. Il montre clairement que le DRX en combinaison avec le PLSR est une alternative robuste et rapide aux méthodes chimiques humides chronophages et coûteuses. Plus important encore, cette méthode permet d'accéder à des informations non cristallographiques.

3.3.9 RESULTATS

Les résultats de l'analyse minéralogique des échantillons représentatifs des sédiments superficiels par diffraction aux rayons X (méthodes des poudres), montrent que le cortège minéralogique de la fraction totale est formé de quartz, plagioclase, calcite, anhydrite...etc et la fraction de l'argile totale avec des teneurs différentes d'un échantillon à l'autre. Les minéraux non argileux sont déterminés à partir de l'analyse minéralogique du sédiment total par le pourcentage semi-quantitatif de chaque minéral qui est déterminé par le rapport de hauteur du pic principal du minéral sur la somme des hauteurs des pics principaux des autres minéraux présents.

3.3.9.1 *La plage khaloufi*

L'analyse semi quantitative pour les échantillons de la plage Khaloufi est résumée dans les figures 3.34 et 3.35. Elle est constituée majoritairement de quartz d'origine terrigène mais elle renferme également une fraction siliceuse d'origine biogénique. La calcite a également été identifiée. Des problèmes majeurs peuvent être rencontrés. Ils sont en partie liés aux petites tailles ou à leur faible cristallinité.

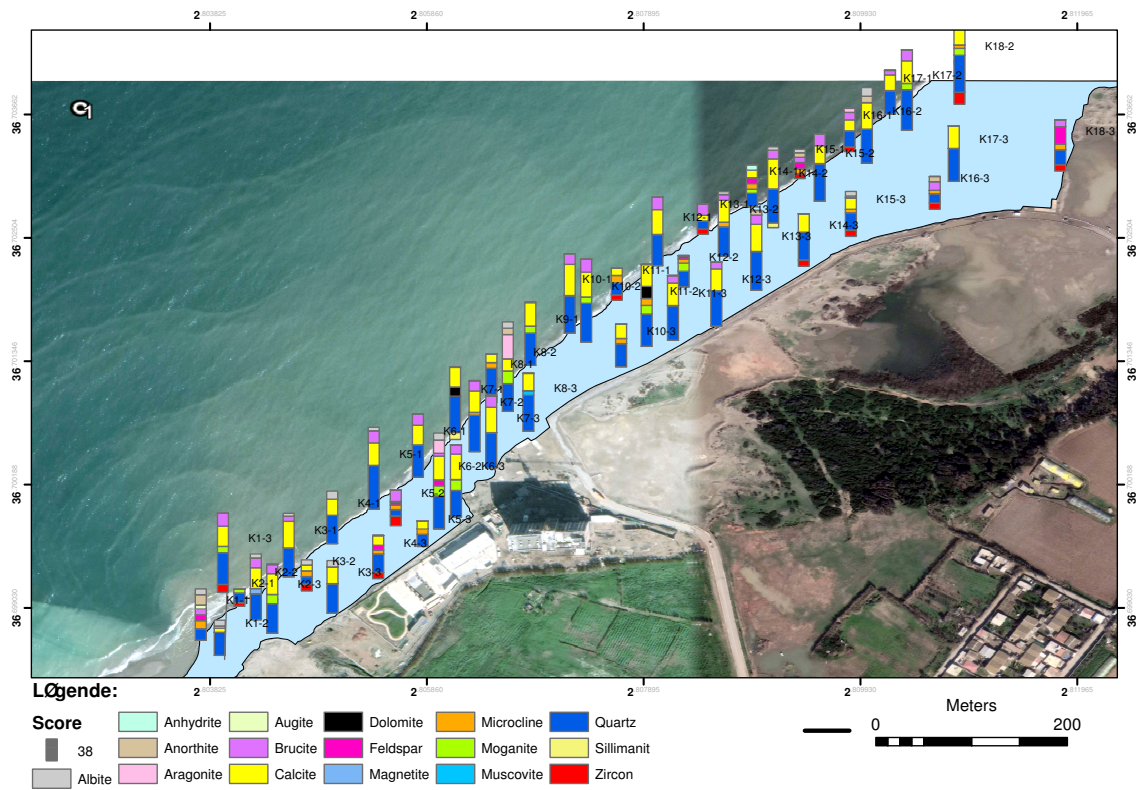


FIGURE 3.34 – Représentation du score des minéraux pour chaque échantillon

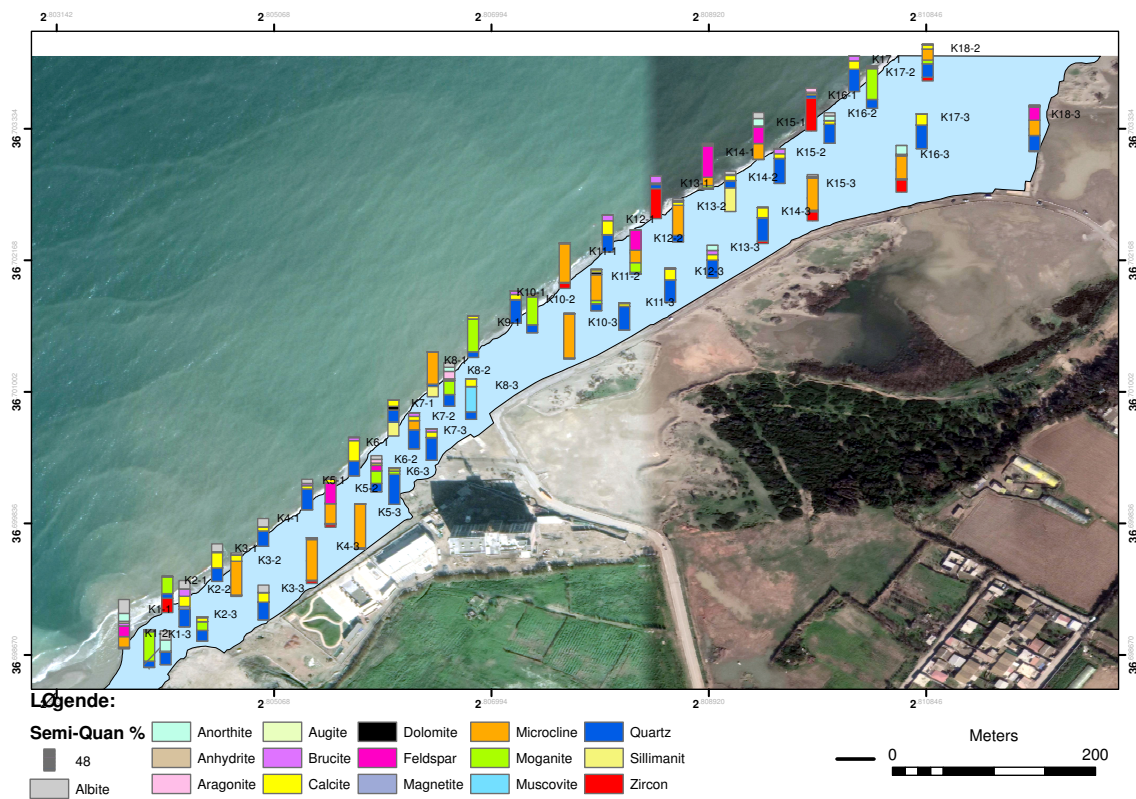


FIGURE 3.35 – Représentation des pourcentages des minéraux pour chaque échantillon

La répartition des pourcentages semi-quantitatifs de ces minéraux montre que : Le Quartz est le minéral le plus dominant. De manière générale, les carbonates et la matière organique peuvent présenter des valeurs supérieures à celles de quartz. Cela s'explique par le fait que les sables sont coquilliers et qu'ils contiennent également une importante fraction de nombreux débris provenant des continents.

Le Quartz

L'analyse minéralogique montre la prédominance de la fraction terrigène représentée principalement par des grains de quartz dont la majorité d'entre eux sont présents dans le secteur ouest près de l'Oued. Le secteur Est de la plage caractérisé par l'interaction avec le large est riche en Calcite. La figure 3.36 représente la répartition de taux de quartz pour la plage Khaloufi. Il est présent avec des teneurs variant de 3% à 65%.

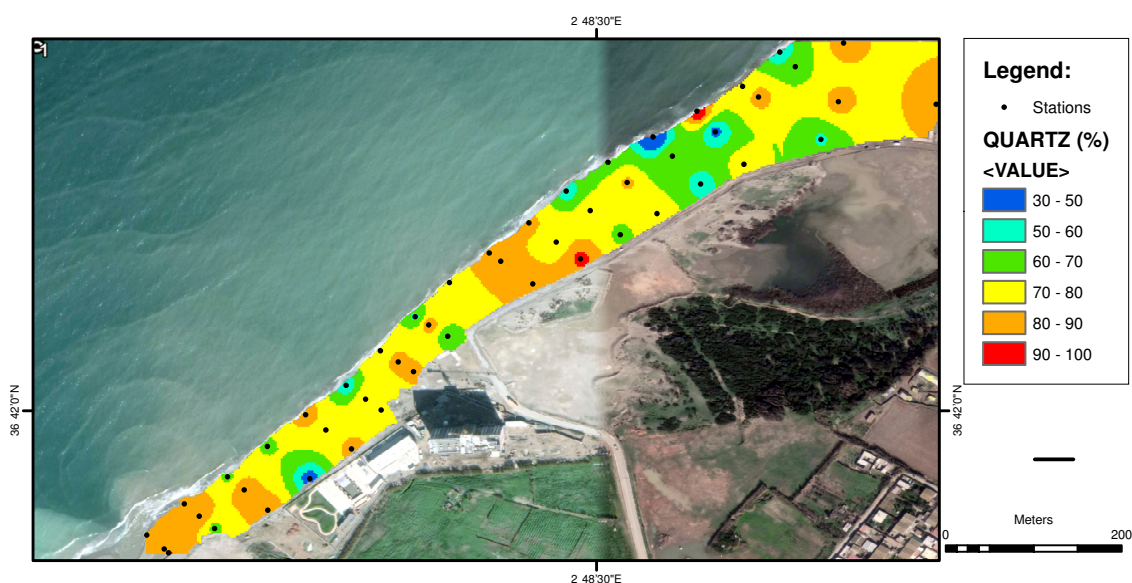


FIGURE 3.36 – Carte représentant la répartition spatiale des pourcentages de Quartz sur la surface de la plage Khaloufi.

Les Carbonates

Les carbonates sont représentés dans la zone d'étude par la calcite et la dolomite. La calcite est présente dans presque la totalité des échantillons, à l'exception des échantillons de l'Oued et les échantillons des pieds de dunes avec des teneurs comprises entre 2 à 44%. La dolomite est presque absente dans la zone d'étude, elle est présente uniquement loin de l'embouchure de l'oued avec une proportion de 5% à 8%, cette absence est due à sa

forte solubilité dans les eaux de ruissellement qui sont riches en CO₂ selon Parffenoff et al. 1970.

Pour les 51 échantillons analysés le pourcentage de calcite par rapport au quartz varie entre 0 % et 70 %. La carte représente le pourcentage par rapport à la proximité de l'oued Mazafran qui contribue à une variation longitudinale. La teneur en quartz est presque identique pour tous les profils représentatifs en allant de l'oued vers la limite de la partie Ouest de la plage. Le pourcentage de calcite augmente en s'éloignant de l'oued dans la partie Est.(Figure 3.37).

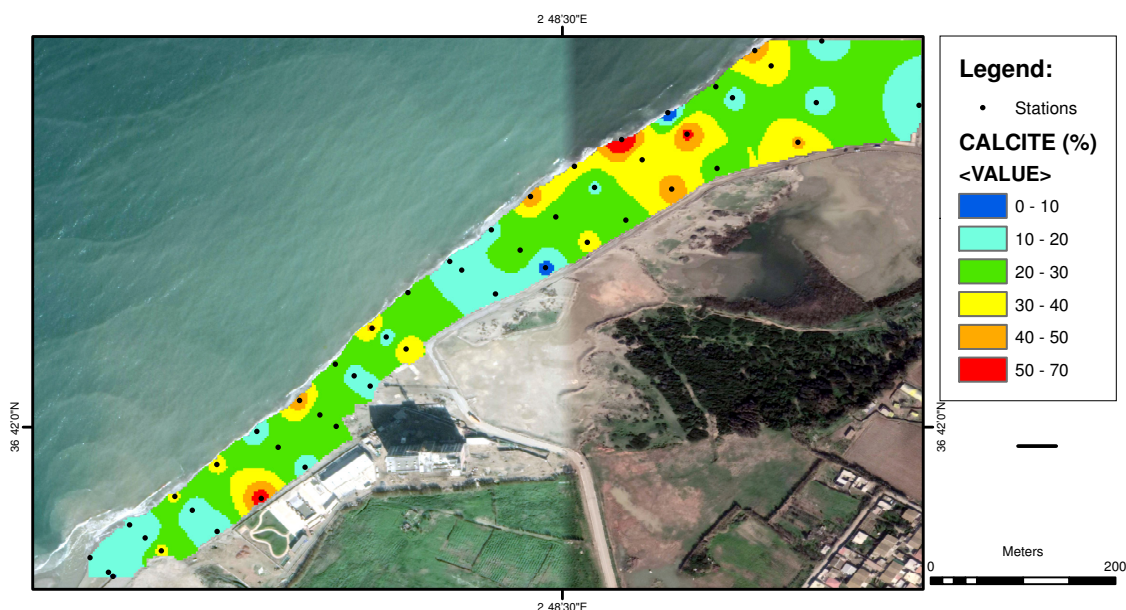


FIGURE 3.37 – Carte représentant la répartition spatiale des pourcentages de Calcite sur la surface de la plage Khaloufi

L'évolution transversale de la teneur en fragments de coquilles indique que ce dernier est de plus en plus important quand la zone est ouverte aux fluctuations des agents hydrodynamiques, ce qui permet d'enrichir les sables de cette partie en débris de coquilles provenant de la dérive ou du large. Par contre au niveau des zones près de l'oued, la teneur est faible ce qui indique que les échanges avec le large sont limités et les dépôts de l'oued sont importants. Dans la plage khaloufi, la calcite est concentré dans la partie Est de la plage et représente la fraction grossière dans cette partie. Par contre dans la moitié Ouest il s'agit de sable grossiers. Nous pensons que cela est à mettre au profit des apports de l'oued qui canalise les apports terrigènes. (Figure 3.37)

Les Feldspaths

Les Feldspaths, sont présents dans la plage avec une teneur variant entre 3 à 68%, ces minéraux proviennent essentiellement de l'altération des roches granitiques.

Les Microclines

Les Microclines sont présents dans le secteur Est, au niveau de l'oued Mazafran, la plage Khaloufi et le cordon dunaire, avec une teneur variant entre 18 à 95%, ces minéraux proviennent essentiellement de l'altération des roches granitiques

Les Plagioclases

Les plagioclases sont représentés par l'albite et l'anorthite. Au niveau du secteur oriental, ils présentent des teneurs très faibles qui varient entre 4 à 30 %. Au niveau du secteur Ouest, les plagioclases sont présents dans les sédiments de l'oued et dans les stocks sédimentaires côtiers.

L'Anhydrite

L'Anhydrite se détruit très rapidement au cours du transport, elle est présente dans quelques échantillons avec des teneurs très faibles comprises entre 1 à 8%.

Pour la majorité des échantillons ces quatre minéraux sont totalement absents et donc la répartition spatiale n'est pas significative.

Les Eléments En Traces Métalliques (ETM)

La composition en ETM (Cd, Hg, Pb, As, Ni, Mn et Zn) sur les figures 3.38 et 3.39 montre que cette composition varie très nettement d'un échantillon à un autre. Cette étude nous a permis d'analyser l'évolution de la teneur en ETM.

L'analyse des résultats obtenus permet de constater que les teneurs les plus faibles en ETM sont retrouvées dans la partie Est de la plage, avec des pourcentages différents. Si nous supposons que l'alimentation de la plage khaloufi en sédiment se fait uniquement

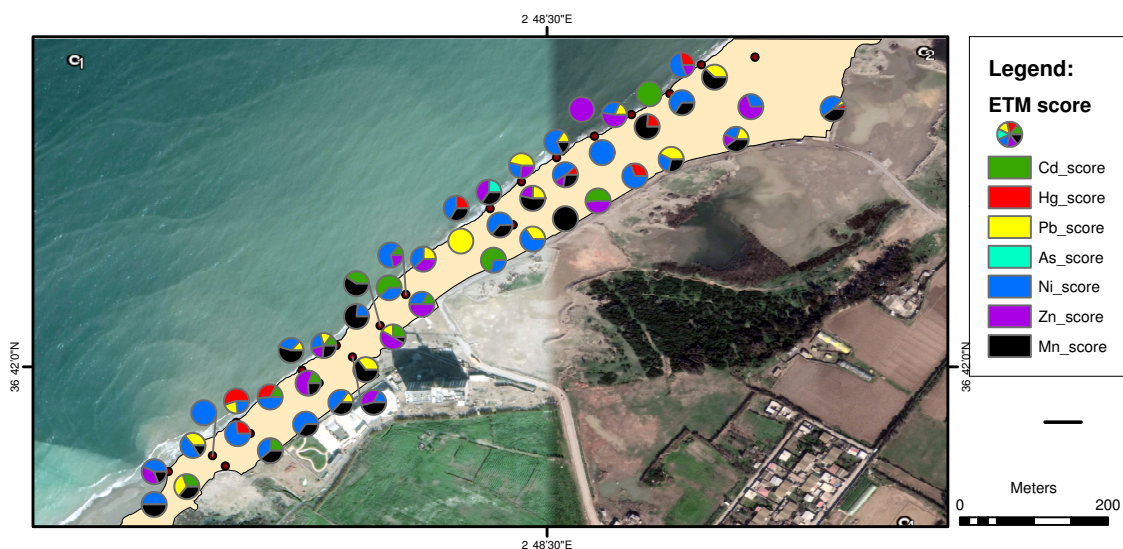


FIGURE 3.38 – Représentation des scores des ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Khaloufi.

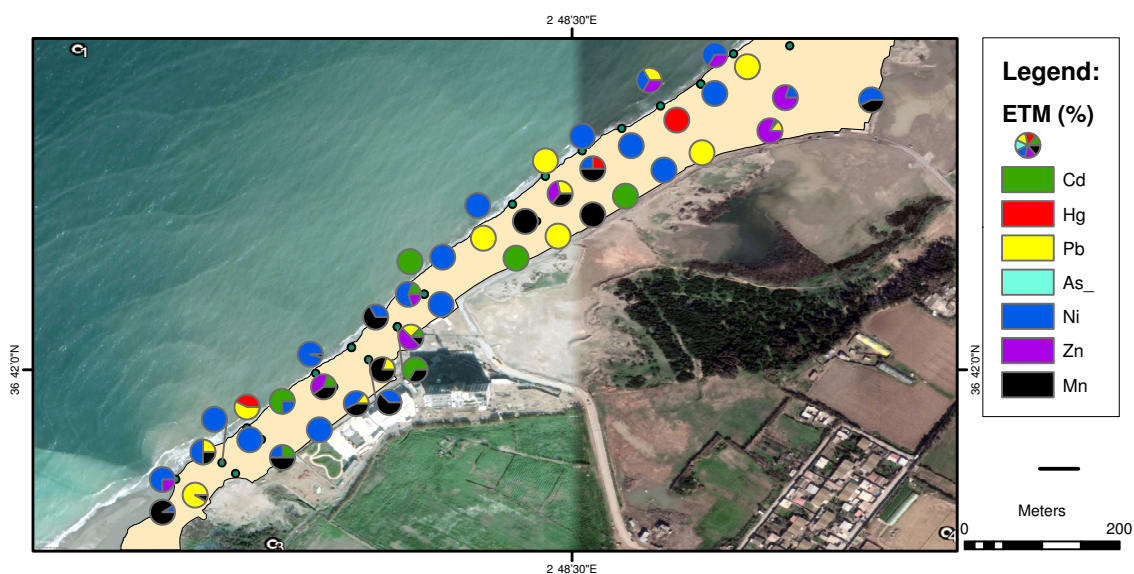


FIGURE 3.39 – Représentation des pourcentages en ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Khaloufi.

par l'oued Mazafran et la dérive littorale, nous devrions avoir la même composition sur les deux parties Est et Ouest de la plage. Ceci n'est pas du tout le cas puisque leur proportion est plus élevée dans les sédiments de la partie Ouest par rapport aux sédiments de la partie Est. Ceci confirme la présence d'autres sources de sédiments alimentant la plage khaloufi en ETM [152].

3.3.9.2 La plage Corso

Une distribution similaire est observée pour la plage corso. Les figures 3.40 et 3.41 montre la distribution de différentes espèces minérales dans la plage corso.

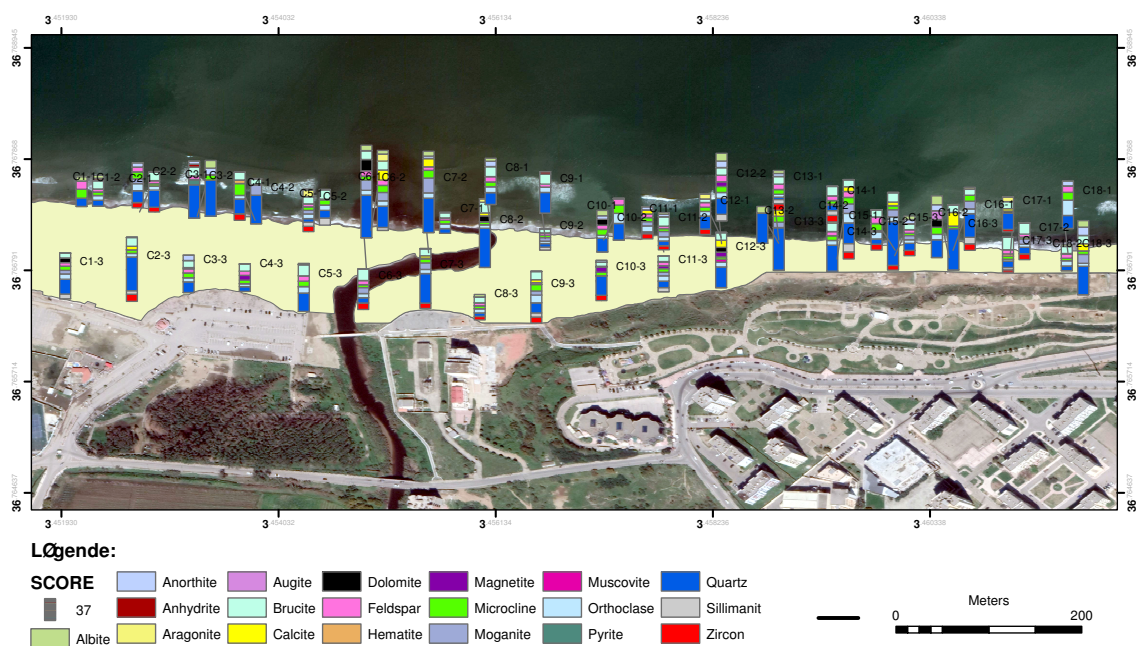


FIGURE 3.40 – Carte représentant les Scores des minéraux pour la plage Corso

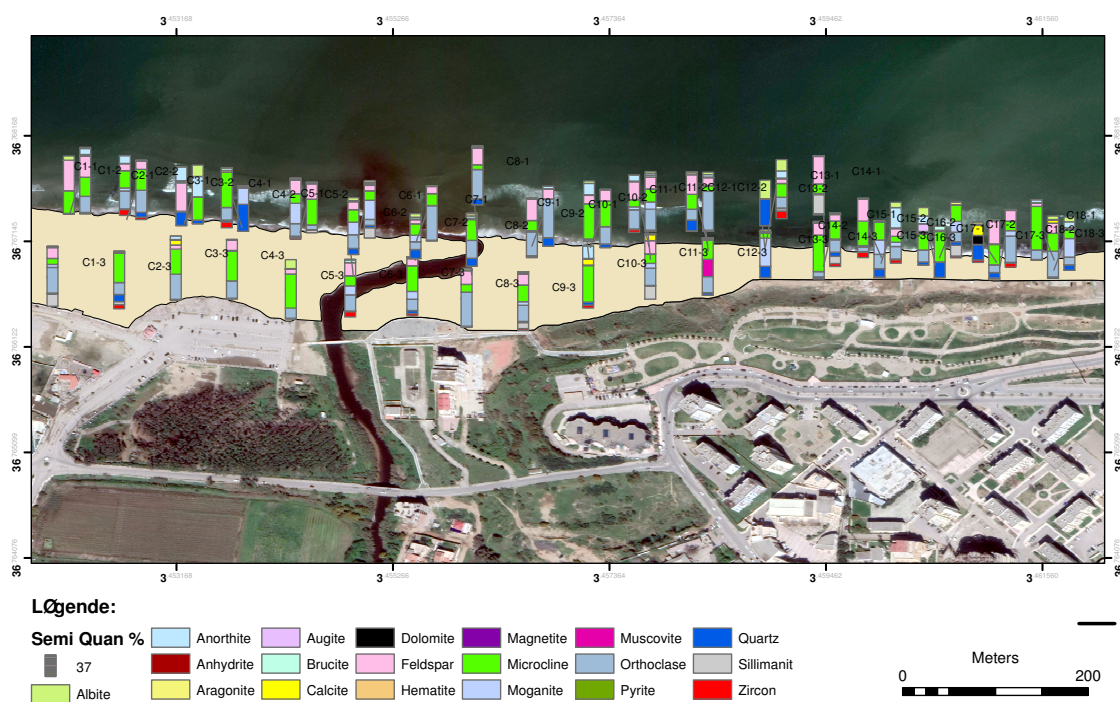


FIGURE 3.41 – Carte représentant les pourcentages des minéraux pour la plage Corso

Cette distribution montre une importante zone d'enrichissement près de l'oued avec une concentration qui est beaucoup plus élevée par rapport aux autres emplacements. Cependant une distribution aléatoire des minéraux est observée en allant vers l'Est et l'Ouest de la plage loin de l'oued.

Le Quartz

Le Quartz présente des teneurs comprises entre 40% et 85% par rapport à celle de la Calcite. Une comparaison de la concentration de Quartz le long de cette plage indique un schéma de concentration plus ou moins similaire à la plage Khaloufi avec un pourcentage élevé près de l'embouchure. L'impact des apports terrigènes sur la concentration du Quartz a également été observé pour les deux plages. (Figure 3.42)

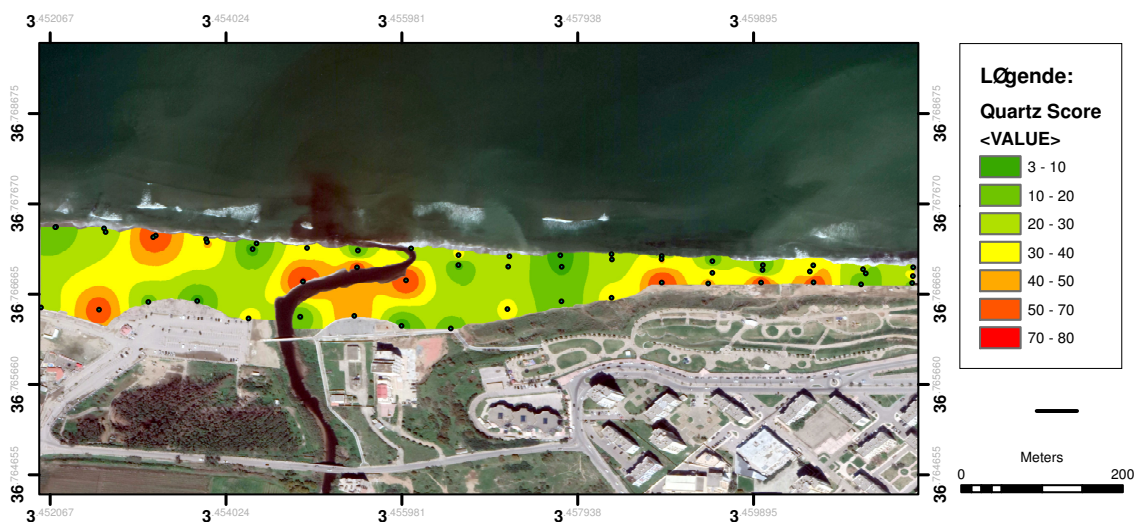


FIGURE 3.42 – Carte représentant la répartition spatiale du Quartz pour la plage Corso

La Calcite

La Calcite a un pourcentage généralement, faible. Sa répartition ne présente pas une zonation et elle devient, généralement, de plus en plus fréquente loin de l'oued. Elle aurait pour origine les débris coquilliers. (Figure 3.43)

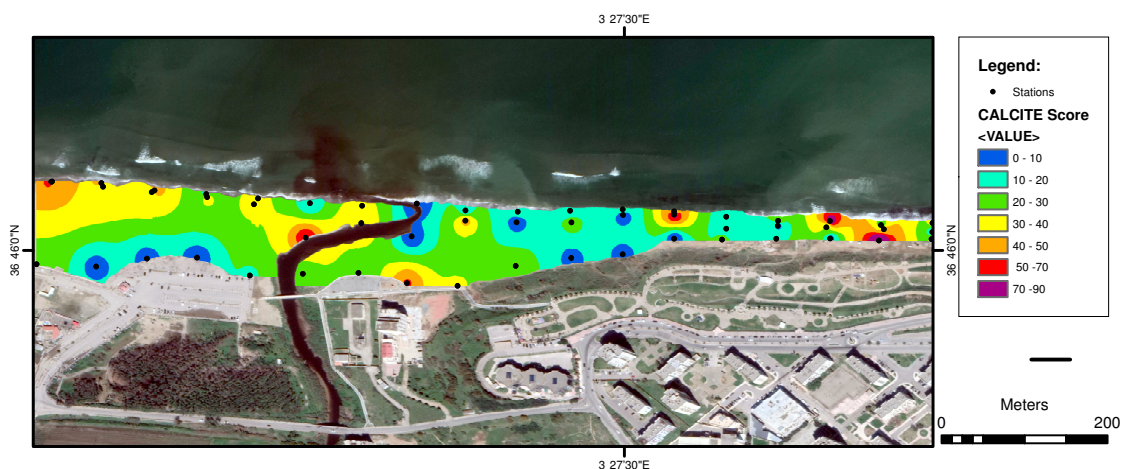


FIGURE 3.43 – Carte représentant la répartition spatiale de la Calcite pour la plage Corso

Les Feldspaths, Les Microclines et L'Orthoclase

De riches concentrations de ces minéraux légers ont été signalées de manière aléatoire dans les sédiments de cette plage. Ce résultat émane de cette étude lancée pour comprendre les mécanismes qui manifestent les changements signalés dans la morphologie et la minéralogie le long de la côte étudiée. L'étude a confirmé la présence des concentrations différentes en minéraux légers sur cette plage. Figures 3.44, 3.45 et 3.46

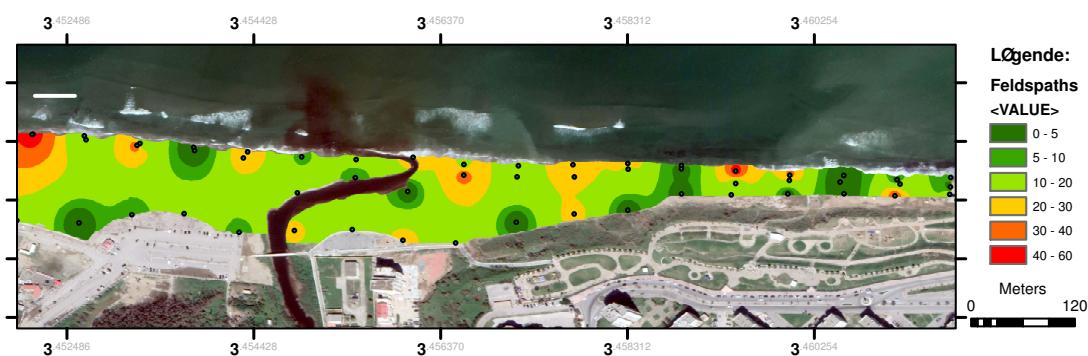


FIGURE 3.44 – Carte représentant la répartition des Feldspaths pour la plage Corso

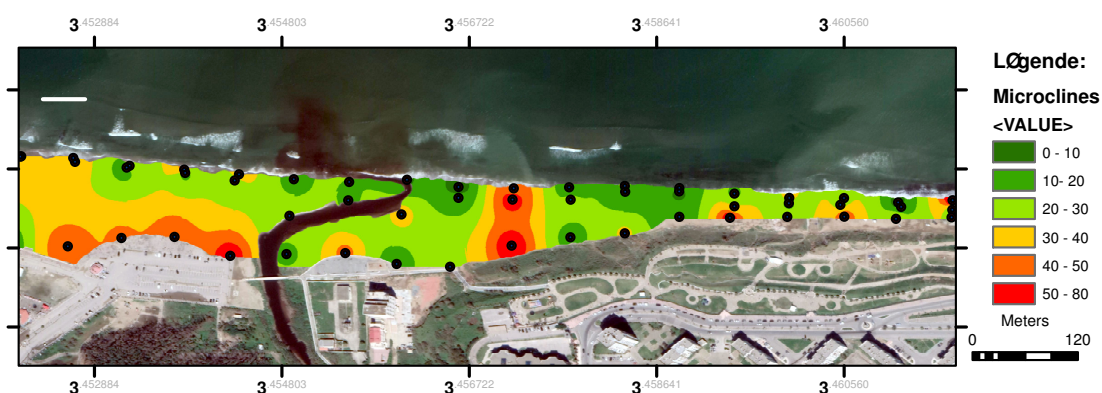


FIGURE 3.45 – Carte représentant la répartition des Microclines pour la plage Corso

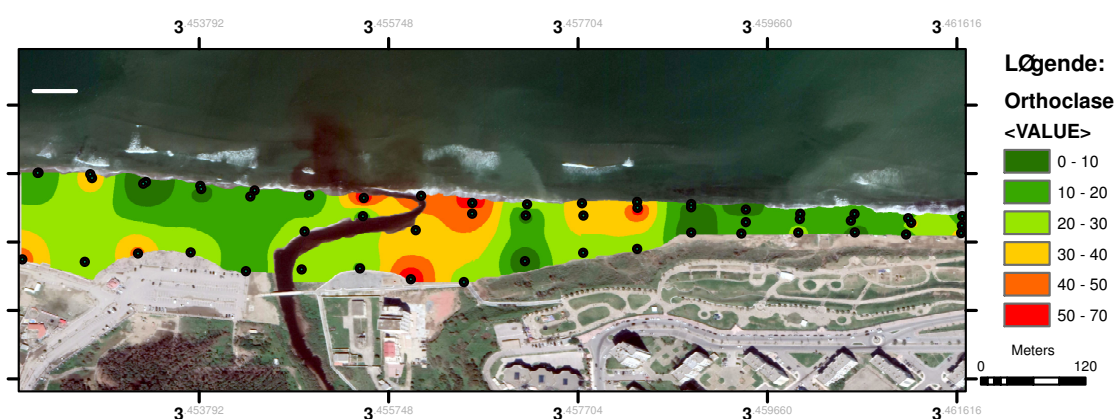


FIGURE 3.46 – Carte représentant la répartition de l'Orthoclase pour la plage Corso

Les Plagioclases

Les plagioclases sont représentés par l'albite et l'anorthite. Au niveau du secteur oriental, ils présentent des teneurs très faibles qui varient entre 4 à 30 % dans les sédiments de plage et du cordon dunaire. Au niveau du secteur Ouest, les plagioclases sont présents dans les sédiments de l'oued et dans les stocks sédimentaires côtiers.

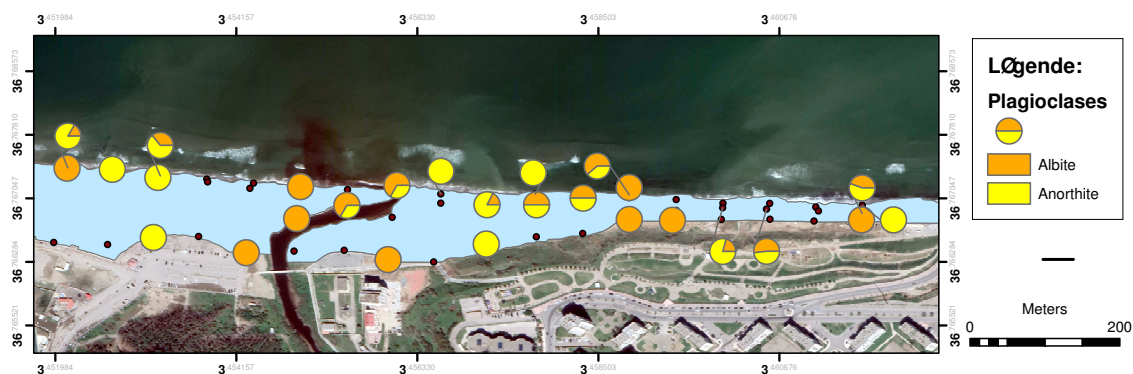


FIGURE 3.47 – Carte représentant la répartition des plagioclases pour la plage Corso

Les ETMs

La distribution des ETM à la ligne de rivage et à différents endroits de la plage est présentée dans Les figures 3.48 et 3.49. On voit que les concentrations les plus élevées sont observées près de l'embouchure. La concentration la plus faible est observée à l'Est de la plage. La distribution des ETM dans les plages indique une augmentation de la concentration dans la zone littorale par rapport à l'arrière plage. De faibles concentrations sont observées loin de l'oued.

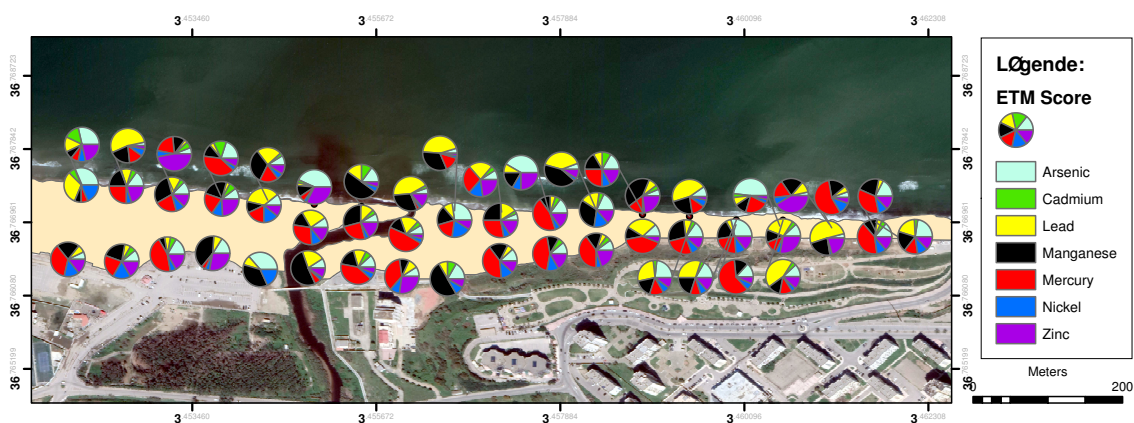


FIGURE 3.48 – Représentation des scores des ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Corso.

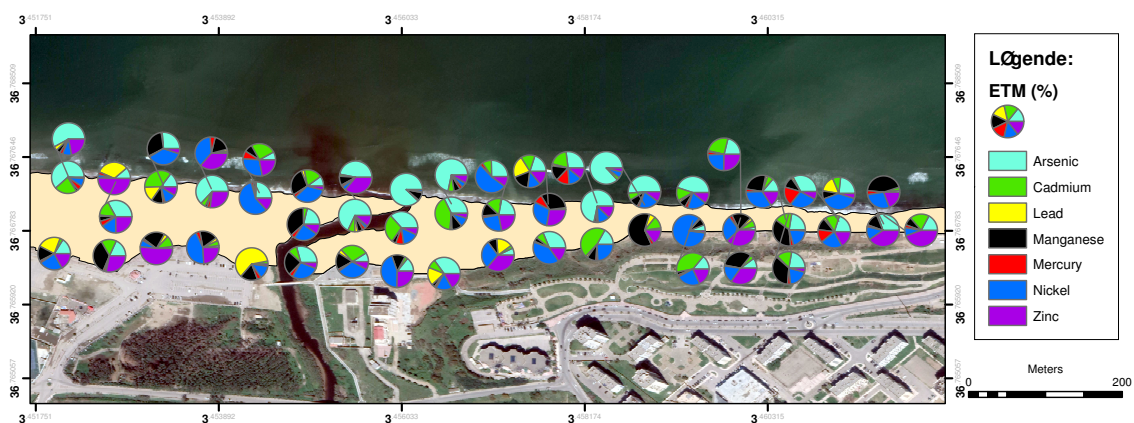


FIGURE 3.49 – Représentation des pourcentages en ETMs pour chaque échantillon analysé sur la surface de la plage Corso.

3.3.9.3 Minéralogie des argiles

Les minéraux argileux sont reconnus sur les diffractogrammes grâce à leurs raies caractéristiques. Vu que la fraction fine des sédiments superficiels de la frange littorale étudiée est très faible, l'étude minéralogique pour les argiles est faite juste pour avoir une idée sur la nature des minéraux argileux existants.

Les minéraux argileux identifiés à partir des diffractogrammes des échantillons analysés sont la Kaolinite, les chlorites, la Smectite et l'illite. Ces minéraux existent dans l'arrière plage vue l'existence d'une fraction fine relativement importante. Mais ces minéraux n'ont pas été cartographiés à cause de leur faible concentration.

Notant enfin, que les diffractogrammes présentent aussi des pics d'autres minéraux qui n'ont pas été cités dans l'analyse semi-quantitative de la fraction totale, à cause de leur présence en quantités négligeables tels que l'hématite et le grenat.

3.3.9.4 Les minéraux lourds

Les minéraux lourds de la côte étudiée présentent une petite partie des sédiments. Ils ont une densité supérieure à 2.89, sont le plus souvent utilisés comme traceurs naturels pour identifier la source des sédiments dans les différents environnements géologiques ([143]; [153]; [154]). Puisqu'ils sont plus denses que le quartz et les feldspath, ils se comportent différemment pendant le transport et le dépôt. Les proportions des cortèges minéralogiques présents dans les sédiments de la côte, diffèrent d'une unité morphologique à l'autre, elles dépendent de la densité du minéral et sa résistance aux agents de transport et d'altération.

3.3.9.5 Nature des espèces et associations minéralogiques identifiées

Les résultats des analyses qualitatives et semi-quantitatives de la minéralogie lourde, des sédiments de la côte montrent la prédominance de la muscovite, la chlorite, le disthène, les sillimanites, les biotites, les clinopyroxènes, les hornblendes, les épidotes et l'association des minéraux ubiquistes sous forme de pourcentage de l'index ZTR. L'indice ZTR représente la somme des pourcentages de zircon, tourmaline et rutile, ce sont des minéraux résistants aux agents de l'altération qui représentent les minéraux les plus efficaces pour le traçage de la dynamique sédimentaire le long de la côte [153]

3.3.10 Répartition des minéraux lourds au niveau

3.3.10.1 Des Oueds

La fraction lourde dans les sédiments résulte de l'érosion et l'altération physique et chimique des roches superficielles des bassins versants de l'arrière-pays, transportés

dans les environnements fluviaux, contrôlés : (1) par l'hydrodynamique fluviale, (2) la rencontre des obstacles, (3) la morphologie des oueds et (4) par la taille et la densité des grains des minéraux ([148]; [155]). Les cortèges des minéraux lourds transportés vers les embouchures, montrent une prédominance de l'association des minéraux opaques dans les embouchures des deux oueds, avec des proportions qui diminuent en s'éloignant des oueds.

3.3.10.2 Des Plages

Au niveau des plages, la minéralogie lourde des échantillons de sable analysés montre que les proportions des espèces minéralogiques de forte densité et forte dureté sont beaucoup plus importantes au niveau de la plage de Khaloufi, située sur la rive droite de l'embouchure d'oued Mazafran qu'au niveau de la plage Corso localisée sur la rive de l'embouchure d'oued Corso. Ces résultats témoignent d'une forte relation entre les plages et les embouchures d'oueds qui les alimentent par des flux de minéraux lourds. Cela peut être justifié par la pente des plages. Nous avons en effet remarqué que la pente de la plage khaloufi est faible par rapport à la pente de la plage Corso.

Ces flux sont beaucoup plus orientés vers la plage par les agents hydrodynamiques marins dominants (courant longshore, et le jeu des vagues) où ils forment des concentrations de sable lourds. Les autres minéraux comme les Muscovites et les chlorites, sont présents par des proportions faibles par rapport à celles trouvées dans l'embouchure à cause de leurs faibles résistances aux agents de l'altération marine (les houles et les courants).

Dans la plage Khaloufi, la fraction des minéraux lourds des sédiments charriée par l'oued Mazafran qui débouche dans cette partie de la baie, alimentant directement les plages de cette zone. Le cortège minéralogique présent dans les sédiments des plages est essentiellement représenté par des minéraux opaques. Ces résultats démontrent d'un flux de minéraux lourds transféré des embouchures vers les rives par les courants côtiers et forment des concentrations en bas de plages.

3.3.10.3 Des pieds de dunes

Dans l'arrière plage au niveau des dunes, les résultats d'analyses montrent de fortes proportions des fractions denses telles que les minéraux opaques à la base de la dune. Ces teneurs restent relativement élevées en comparaison avec celles trouvées sur les plages. Ces résultats dénotent d'une zone préférentielle d'accumulation des minéraux lourds localisée au pied de la dune bordière suite au transport de sables lourds de la plage vers

le premier cordon dunaire lors des vagues de grandes tempêtes. Les autres minéraux de faible abondance montrent des proportions presque identiques avec celles rencontrées au niveau des plages. L'index ZTR montre un pourcentage de 4% au niveau du trait de côte cette proportion augmente vers le pied de la dune bordière pour atteindre 13%. Cet index est d'autant plus un élément traceur de la dynamique sédimentaire, il renseigne sur les échanges sédimentaires entre le pied de dune et la plage.

3.3.11 DISCUSSION

Les résultats obtenus pour l'analyse minéralogiques sont présentés sous forme de cartes réalisées avec le logiciel ArcGIS par interpolation des valeurs des échantillons pour l'extrapolation des différents profils. Les zones agitées et ouvertes aux actions des agents hydrodynamiques présentent généralement des sables de taille moyenne et des pourcentages en quartz plus élevés (influence des oueds). Tandis que les zones calmes protégées et abritées favorisent la sédimentation des sables de taille assez fine et des pourcentages de calcite plus importants (échanges avec le large). L'étude minéralogique par diffraction des rayons X des échantillons de sables a également permis d'identifier les sources de sédiment alimentant la zone étudiée. Nous avons pu mettre en évidence que ces plages sont principalement alimentées par les sédiments provenant des oueds, contribuent aussi de façon significative à l'alimentation des secteurs éloignés en période de crue.

Les teneurs les plus élevées en minéraux lourds des sables sont enregistrées au niveau de l'embouchure des oueds qui représentent la source principale de ces minéraux vu que les bassins de ces oueds importent la charge solide qui va être déposée sur les côtés des plages et au large. Ces éléments sont redistribués par la houle. Ceci confirme la contribution des apports terrigènes à l'alimentation des zones éloignées des oueds. De telles preuves peuvent être interprétées comme une conséquence de l'effet combiné de l'apport détritique apporté par les deux oueds voisins des deux plages et de l'accrétion dans ces zones.

Les littoraux sableux sont certainement ceux où la mer manifeste le mieux ses possibilités dynamiques d'érosion, de transport et de remblaiement. Il s'agit de matériaux supérieurs à 0,080 mm, à savoir les blocs, les galets, les graviers et les sables. Ces éléments résultent principalement des particules terrigènes apportées par les oueds et des reprises sur les fonds. Dans une moindre mesure, elles résultent de la destruction des roches côtières, des apports des cours d'eau et des vents. En outre, une fraction biogène plus ou moins abondante se mêle aux dépôts précédents par fragmentation des tests d'organismes.

Les sables sont constitués de plusieurs espèces minérales : le quartz, très abondant, des feldspaths, des minéraux lourds et des carbonates. L'étude des composants est intéressante dans la mesure où elle renseigne sur l'origine du sédiment et sur les classements différentiels en fonction de la forme, de la taille ou de la densité. En effet, la mise en mouvement du sédiment modifie sa composition et la répartition dimensionnelle des grains qui le constituent à la faveur des sources d'approvisionnement et des conditions dynamiques locales.

Les modalités de transport dans les zones définies au voisinage des plages et sur les plages dépendent de l'action des courants, des houles et du vent comme moteurs de ces transports. Ils déterminent la morphologie des côtes et les textures des sédiments suite aux mécanismes de sédimentation et/ou de remaniement. Dans les plages la houle agit comme le principal moteur du transport sédimentaire et est considérée comme le principal facteur responsable des variations du profil de plage. Son rôle est primordial tant sur l'évolution qualitative que quantitative des débits sédimentaires. Le processus de transport à faible profondeur à partir de la zone des brisants est régi par un régime hydrodynamique particulier. L'écoulement y est extrêmement turbulent, ce qui impose un important transit des particules sédimentaires en direction des plages. Par conséquent, les débits sédimentaires influencent particulièrement la qualité et la quantité des sédiments déferlant sur les plages. Après que les vagues ont brisé, il se forme un mouvement effectif d'eau en direction de la plage. Suite aux forces de pesanteur, apparaît un courant de retour ; enfin, les matériaux peuvent être aussi repris par la dérive littorale. Dans cette zone, il est difficile d'établir un schéma de la dynamique sédimentaire compte tenu de la complexité du système par des composantes dynamiques fluctuantes.

Dans la zone du jet de rive, le transport sédimentaire présente deux composantes : l'une dirigée vers le haut de plage et l'autre en direction du trait de côte. L'intensité de la seconde composante dépend de l'obliquité des lames arrivant à la côte. Les modalités du transport sédimentaire contrôlent à la fois la mobilité des sédiments et les processus de ségrégation granulométrique des particules dans certains secteurs. Entre la zone de swash et la zone de déferlement se positionne un secteur de haute énergie appelé zone de transition. Les caractéristiques énergétiques de cette zone sont telles que la granulométrie est grossière. De plus, le heurt du courant avec le retrait des vagues favorise l'augmentation du diamètre moyen des grains. Compte-tenu de la grande dispersion des énergies, tant en direction qu'en intensité dans la zone de déferlements, il est probable que les particules grossières soient piégées dans les secteurs où elles ne subissent plus de courants latéraux, en l'occurrence les zones des brisants et de transition. De cette manière, malgré le peu de données disponibles, il est possible de dessiner les grands traits du spectre granulométrique en fonction du spectre énergétique des zones particulières. Des

phénomènes de classement (trilage) des particules sédimentaires sont mis en évidence, conséquences de l'adaptation aux conditions hydrodynamiques. Sur une surface en pente, les grains se réarrangent en fonction de leurs tailles et de leurs densités. En conclusion, les facteurs responsables du tri granulométrique sur l'avant-plage sont : le déferlement, les courants de dérive littorale, les courants de retour, la pente, les irrégularités de fond (rides, irrégularités aléatoires).

Le mode d'action des vagues façonne la morphologie des plages dans ses grands traits. Des houles, marquées par une forte cambrure de vagues, auront tendance à éroder intensément les profils de plages, tandis que des vagues faiblement cambrées auront tendance à engraisser les littoraux. D'une manière générale, l'amaigrissement des plages se produit plus rapidement que les phénomènes d'engraissement.

Le phénomène d'érosion succède dans le temps à celui de sédimentation. Il est responsable de la remise en suspension des particules (biogéniques et terrigènes) à l'origine de la formation des zones de très forte turbidité. L'érosion initie une nouvelle étape du transport des sédiments. Le transport sédimentaire est effectif lorsque la force exercée sur les particules est suffisante pour les déplacer.

L'une des priorités de la communauté scientifique est d'améliorer la compréhension des processus en relation avec la dynamique sédimentaire et ceci dans la perspective de tendre vers une meilleure qualité de gestion des espaces côtiers. Il est clair que l'érosion et la stabilité des sédiments ne dépendent pas seulement du forçage hydrodynamique induit par la houle mais aussi des paramètres intrinsèques au sédiment.

3.3.12 CONCLUSION

Les résultats des paramètres sédimentologiques réalisés sur la base d'un échantillonnage de sédiments superficiels des plages montrent que les différents types de sédiments prélevés peuvent faire l'objet d'une caractérisation au niveau de leur composition (DRX) mais également au niveau de leurs propriétés physiques (granulométrie).

Les analyses minéralogiques servent à caractériser les sédiments de la frange littorale étudiée. Elles montrent que ces sables sont constitués par deux minéraux principaux qui sont le Quartz et la Calcite, auxquels s'ajoutent les minéraux lourds, en faible proportion. Le Quartz provient, essentiellement, des terrains géologiques limitrophes du littoral, des apports détritiques terrigènes et des apports éoliens en provenance des zones bordières. La teneur en Calcite augmente, généralement, de la côte vers le large. Elle aurait pour origine les débris coquilliers.

L'analyse minéralogique a été effectuée sur chaque échantillon pour déterminer leur composition minéralogique, et notamment le pourcentage pour chaque espèce minérale. En effet, le cortège minéralogique des sables est riche et diversifiée et est composé en moyenne de : Quartz ; Microclines ; Calcite ; Albite... etc. Et autres minéraux indéterminés qui sont probablement inférieures aux limites de détection DRX.

Au terme de ce travail, les résultats obtenus nous ont permis de caractériser les sédiments de surface, de l'embouchure des oueds traduisant une influence fluviale très marquée.

Les analyses minéralogiques montrent des pourcentages élevés des minéraux légers avec une prédominance de quartz, aussi la présence des feldspaths, des plagioclases, et du microcline dans la totalité des échantillons étudiés.

La fraction argileuse est présente avec des proportions faibles dans les pieds de dunes, et dans les embouchures des oueds.

L'étude de la répartition des minéraux lourds dans les différents stocks sédimentaires côtiers et des deux oueds, montrent une association minéralogique constituée essentiellement de muscovite, chlorites, Disthène, sillimanite, biotite, grenats, épidotes et l'abondance des minéraux opaques tels que l'Hématite, Magnétite et d'autres composés d'oxydes et d'hydroxydes de fer et une association de minéraux ubiquistes tel que le zircon.

Les aménagements littoraux influencent l'hydrodynamisme et le transport des sédiments le long de la plage par piégeage des sables. L'hydrodynamisme des sédiments par la dérive littorale vers l'Est, est le facteur responsable de l'accrétion artificielle vers l'Ouest.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La côte de la région centre algérienne subisse des impacts dus aux différents facteurs influents et ses plages sont vulnérables. La réponse du système côtier varie à différentes échelles de temps en raison des changements de la dynamique locale ou des conditions géomorphologiques ainsi que de l'intensité des forces motrices. Ces facteurs sont responsables à la fois de l'érosion et de l'accumulation côtières, ainsi que de l'émergence et de la variabilité des plages, et sont exacerbés par les activités de protection du littoral. Il existe deux principaux types de stratégie de gestion ; la première consiste à stabiliser le littoral existant et à protéger ainsi les zones côtières et avoisinantes des changements futurs. La seconde, plus résiliente et dépendante de l'adaptation humaine aux changements côtiers, accepte qu'à certains endroits la côte ne soit pas protégée et soit laissée dans son état naturel.

Dans le but d'une planification territoriale locale nous nous sommes intéressés à développer une méthodologie en combinant des données multi-sources pour des applications diverses. À l'aide d'une combinaison d'analyse des changements du littoral, d'une exploitation d'analyse des vagues et des analyses sédimentologiques, cela nous a fourni un soutien à notre méthodologie selon laquelle l'effet des changements hydrodynamiques peut être perceptible dans l'évolution et la stabilisation du littoral le long des côtes algéroises.

Cette étude a porté sur le suivi de l'érosion côtière basé sur l'approche de télédétection spatiale et de SIG, elle évalue d'abord les performances de la méthode d'acquisition des images, de la méthode pour l'extraction du littoral sur les surfaces côtières linéaires et non linéaires. Sur la base de cette analyse, on peut conclure qu'en l'absence de sources de données de terrain, la télédétection et le système d'information géographique seraient utiles pour un suivi qualitatif à moyen terme des changements côtiers de manière fiable et efficace en termes de tendances d'accrétion et d'érosion. L'étude a tenté de suivre les déplacements du littoral pendant environ deux décennies de 2002 à 2020, avec d'autres variables le long de la côte algéroise. Cette étude s'est davantage concentrée sur l'utilisation du SIG et de la télédétection dans la mesure de la longueur du littoral et

l'estimation de la superficie des plages. Les résultats montrent que le littoral algérois a sensiblement changé de 2002 à 2020 en raison de processus dynamiques.

Cette étude a révélé que la détection des changements du rivage peut être faite en utilisant des images issues de Google Earth Pro de très haute résolution. Les méthodes développées pour les rectifier dans cette étude se sont avérées efficaces pour la détection et l'évaluation des modifications de la position du littoral le long des traits de côte. Nous avons pu définir le problème d'exploitation des images Google Earth Pro dans notre application, et mettre une méthodologie pour les rectifier en utilisant les outils du SIG. Cela nous a permis une transformation minutieuse du trait de côte en forme vecteur et la superposition des traits de côte des dates différentes. Ensuite l'outil DSAS nous a permis de faire un diagnostic sur la dynamique des plages et la réalisation d'une cartographie d'érosion côtière.

La cartographie de l'érosion côtière à partir de l'analyse minutieuse des images Google Earth pro sous ArcGIS et l'extension DSAS 4.3 nous a permis de sélectionner les plages les plus dynamiques pour la zone étudiée. Nous nous sommes intéressés également à caractériser chaque plage par sa capacité d'accueil représentée par la surface de la plage.

Au terme de ce travail, nous avons mis en place une base de données des images satellites de très haute résolution spatiale (0.2 m). Ensuite, nous nous sommes intéressés à digitaliser les images pour créer une base de données des traits de côte et de la géométrie de toutes les plages (126 plages) de notre zone d'intérêt. La superposition des traits de côte des deux dates différentes nous a permis de contribuer à la réalisation d'un mini atlas cartographique d'érosion côtière qui comporte vingt et une (21) cartes d'érosion pour 21 communes du littoral de la zone d'étude.

L'efficacité de la morphologie mathématique et le système d'analyse numérique du littoral (DSAS) pour l'observation du littoral sont également démontrés dans cette étude. Cette analyse basée sur les techniques statistiques LRR, NSM et EPR, le les taux de changement du littoral sont mesurés pour évaluer les schémas à court et à long terme où la sédimentation et l'érosion continues sont des facteurs fondamentaux pour modifier la morpho-dynamique. Les schémas d'accrétion ont affecté une partie plus importante de la côte, tandis que l'érosion s'est produite de façon spectaculaire à quelques endroits, entraînant un changement majeur du littoral.

La méthodologie développée pour l'étude des changements de littoral le long de la côte étudiée entre 2002 et 2020 présentent un intérêt majeur pour la quantification numérique de l'érosion affectant cette zone d'importance naturelle et socio-économique. Ces changements ont été mesurés selon quatre dates 2002, 2008, 2014 et 2020. L'étude

a révélé des résultats très disparates à l'échelle spatiale et temporelle. La côte de cette région est envahie par de fortes pressions et vue la complexité de ce géosystème, la mise en évidence de l'évolution historique du trait de côte et l'identification des zones d'évolution due aux différents processus principalement l'hydrodynamisme nous a permis de constater que les trois phénomènes accrétion, érosion et stabilité sont observées parfois sur une petite distance. Cependant des interventions humaines pour corriger certaines tendances à érosion dans cette zone côtière ont perturbé le bilan sédimentaire et menacent encore l'équilibre naturel des plages sableuses et la stabilité des dunes bordières, ce qui rend la côte plus vulnérable. En effet la présence des points d'embouchures, l'implantation des ouvrages de protection au près des plages, la morphologie côtière et l'exposition directe à la force des houles sont les principaux facteurs qui régissent la dynamique sédimentaire de la majorité des plages de cette région. Ainsi la géodatabase développée au cours de l'étude de l'hydrodynamisme a permis d'expliquer les phénomènes d'érosion et de submersion marines et de déterminer la vulnérabilité côtière dans les deux commune Zeralda et Staoueli. Les roses des vagues des stations étudiées montrent que la moyenne de la hauteur significative est plus importante pour certaines zones par rapport d'autres. Les énergies des vagues sont distribuées d'une manière non régulière sur toute la côte vu la bathymétrie de la zone, et l'orientation du trait de côte. L'évolution des positions littorales sur une série temporelle entre 2002 et 2020 indiquent que toute la zone côtière étudiée est très dynamique. Cela est dû à l'exposition à la houle par différentes directions ainsi que la morphologie côtière et la rugosité du fond de chaque partie du trait de côte. Dans les conditions de vagues du Nord-Ouest et le courant de dérive littorale, il est observé, sur une période de 18 ans des changements morphologiques du littoral sur une grande surface. En effet la vérification de la cartographie de l'érosion côtière par l'étude de la célérité et la hauteur significative des vagues nous a permis une interprétation de la dynamique du trait de côte et de l'évolution des plages par l'identification des zones à fort potentiel énergétique. D'autre part, l'embouchure de l'oued Mazafran et l'oued Corso sont très dynamiques c'est pourquoi les plages étudiées sont en évolution. Les résultats obtenus confirment davantage qu'il existe une relation significative entre la dynamique des plages et les facteurs hydrodynamiques.

Cette étude se penche également sur l'analyse des aspects morpho-sédimentaires de la plage par l'extrapolation des indices granulométriques. L'étude granulométrique des échantillons de la plage montre que les sédiments prélevés le long du trait de côte sont généralement des sables grossier à moyens, cependant, les sédiments prélevés près de la dune bordière sont des sables moyen à fins. Il s'agit des courants perpendiculaires induisant un transit sédimentaire du trait de côte vers l'arrière plage. Le tri granulométrique

de l'Ouest vers l'Est est effectué par les courants de dérive littorale, qui mobilisent les sables fins de la zone située près du trait de côte.

Les analyses granulométriques et minéralogiques menées dans le cadre de l'étude sédimentologique ont permis de montrer une forte relation entre les caractéristiques des sables de la plage (taille, coefficient d'asymétrie, coefficient du triage ...etc.) et les agents dynamiques (houles, vents et courants) qui sont influencés en partie par les aménagements (port, brises lames, épis, extractions des matériaux...etc.). L'orientation du trait de côte et sa forme représentent les principaux facteurs influençant la complexité hydrodynamique de la zone. Les ouvrages de protection créent une zone abritée à l'Est de la région de Zeralda qui diffracte la houle provenant du secteur Nord-Ouest. En revanche la moitié Ouest de la zone est exposée à l'énergie de la houle. Dans ce secteur, l'angle d'approche de la houle génère un courant littoral qui transporte les sédiments en suspension dans la zone adjacente. Une partie de ces sédiments est stockée derrière le système de défense, tandis que le reste est pris par les courants de retour.

La présente étude a montré l'intérêt des changements de rivage et les données bathymétriques pour comprendre la dynamique sédimentaire. Comme le montre la description des résultats, les changements sont significatifs. Cette étude basée sur des travaux de terrain et caractéristiques des sédiments a révélé les caractéristiques saillantes suivantes de la zone côtière à côté des embouchures des oueds Mazafran et Corso.

L'interaction entre les différents facteurs est déterminante sur la dispersion des sédiments, influençant la pro gradation et les taux d'érosion. L'analyse granulométrique des dépôts des sédiments le long de la plage Khaloufi révèle qu'ils sont majoritairement composés de grains fins à moyens, avec un excès de grains grossiers bien triés et une élimination préférentielle des particules fines au niveau du trait de côte.

L'étude DRX montre que la dynamique du littoral de Zeralda est soumise à une double influence marine et fluviale et les plages évoluent de façon très différente. Leur orientation, leur morphologie et leurs caractéristiques sédimentologiques impliquent une réponse différente des agents de la morphogenèse. Les agents de transport sédimentaire agissent différemment en fonction des unités géomorphologiques de la plage. Le sable des plages montre des grains de nature variée et remaniée, et riches en quartz et des minéraux lourds.

D'un point de vue méthodologique, la mise en évidence des variations historiques du trait de côte par la combinaison des images rectifiées de Google Earth pro de très haute résolution, les techniques géospatiales (logiciel ArcGIS), le code de calcul automatique (DSAS), le modèle SWAN à haute résolution et les résultats de l'analyse granulométrique

et minéralogique a fourni des informations sur la morpho-dynamique côtière afin de surveiller, valoriser et qualifier les plages. Le résultat de l'étude a également souligné qu'il existe une relation entre ces changements et les occurrences actuelles d'hydrodynamisme dans la zone d'étude.

D'un point de vue appliqué, les résultats obtenus sont utiles pour une gestion des zones côtières, afin de maintenir un certain équilibre entre les facteurs naturels et anthropique d'une part et la préservation de ces géo systèmes d'autre part et fournir des informations requises pour la définition des éventuelles stratégies d'aménagement et le dimensionnement des projets. Selon les résultats obtenus, cette étude propose aux acteurs locaux, aux gestionnaires et décideurs côtiers un outil de décision fiable qui peut les aider à évaluer les changements côtiers pour les projets GIZC.

Il est fortement recommandé d'étendre cette étude, de relier les conditions locales qui sont responsables de ces changements et de proposer des solutions pour réduire les effets des facteurs induits par l'homme tout en traitant les processus naturels pour la gestion durable des ressources côtières. Cependant, les limites de notre compréhension et de notre capacité de modélisation des principaux processus à l'origine du changement du littoral, ainsi que les incertitudes associées aux calculs d'évolution et au climat futur sont des sources d'erreurs pour développer une étude qualitative des plages.

ANNEXES

A. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR L'ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE

Il est évident que des prétraitements inappropriés affectent les mesures des tailles de grains et constituent des sources importantes d'erreurs. C'est pourquoi nous avons opté pour un protocole simple et rapide visant à explorer l'intégralité des faciès granulométriques. L'un des objectifs principaux étant de confronter les analyses granulométriques aux données acquises. Traitement des sédiments

Les échantillons de sédiment ont subi une série de traitements consécutifs.

Détermination de la fraction fine

La détermination des teneurs en pélites s'effectue à partir de la différence du poids sec du sédiment estimée à l'analyse granulométrique, avant et après séparation par voie humide sur tamis de $80\mu m$ (Riviere, 1977). Dans cette étude le choix est porté sur le tamis de $80\mu m$ afin de mettre en évidence la répartition et le taux de la fraction fine exprimé généralement par le pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur à $80\mu m$. Mode opératoire :

Dans un premier temps, les échantillons ($>200g$) mis dans des boîtes de pétries, sont placés à l'étuve pendant 24 heures ajustée à une température de $105^{\circ}C$.

Une fois le premier séchage achevé, 200 grammes de sédiments ont été prélevés de chaque boîte de pétri, cette valeur représentera le poids initial de l'analyse granulométrique pour chaque station.

Afin d'éliminer la fraction fine, la quantité de sédiments a subi un rinçage dans un tamis de $80\mu m$ de diamètre, sous un filet d'eau, aidé par une agitation manuelle du tamis.

Une deuxième fois, après l'élimination de la fraction fine, les échantillons, remis dans des boîtes de pétries subiront un autre séchage à l'étuve pendant 24 heures, également à une température de 105°C.

Après ce deuxième séchage, chaque échantillon est pesé, la différence par rapport au poids initial représente la quantité de la fraction fine. La quantité des pélites dans chaque échantillon est exprimée par la formule suivante :

$$P(g) = P1 - P2 \quad (3.8)$$

Où :

P : poids des pélites.

P1 : le poids initial sec a été mis dans des boîtes de pétri (g).

P2 : le poids final après rinçage et séchage (g).

Le pourcentage des pélites dans le sédiment est calculé par la formule suivante :

$$Pelites(\%) = (P1 - P2/P1) * 100 \quad (3.9)$$

B. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE LA FRACTION GROSSIÈRE

Mode opératoire

Nous pourrions procéder aux opérations de tamisage, pour ce faire nous avons utilisé une série de tamis dont l'écartement des tailles se fait selon les normes AFNOR.

L'ordre des tamis se fait par ordre de diamètres décroissent par unités de microns, est le suivant : 2000 μm , 1600 μm , 1250 μm , 1200 μm , 1000 μm , 800 μm , 630 μm , 500 μm , 400 μm , 315 μm , 250 μm , 200 μm , 180 μm , 160 μm , 100 μm , 80 μm .

Le tamisage s'est effectué mécaniquement sur une table vibrante, durant dix minutes, divisé en deux colonnes de tamis, la capacité de la tamiseuse étant limitée à un nombre précis de tamis (8 tamis). A la fin de chaque tamisage, le refus de chaque tamis est pesé avec une balance de précision du centième de gramme.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. A. abuz, “Environmental impacts—coastal erosion and coastline changes,” *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*, pp. 381–396, 2015. (Cited on pages 1 and 2.)
- [2] M. E. Hereher, “Coastal vulnerability assessment for egypt’s mediterranean coast,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 6, no. 4, pp. 342–355, 2015. (Cited on page 1.)
- [3] M. J. Stive, S. G. Aarninkhof, L. Hamm, H. Hanson, M. Larson, K. M. Wijnberg, R. J. Nicholls, and M. Capobianco, “Variability of shore and shoreline evolution,” *Coastal engineering*, vol. 47, no. 2, pp. 211–235, 2002. (Cited on page 1.)
- [4] A. Sancho-García, J. Guillén, V. Gracia, A. C. Rodríguez-Gómez, and B. Rubio-Nicolás, “The use of news information published in newspapers to estimate the impact of coastal storms at a regional scale,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 5, p. 497, 2021. (Cited on page 1.)
- [5] M. Abualtayef, M. A. Rabou, S. Afifi, A. F. A. Rabou, A. K. Seif, and A. Masria, “Change detection of gaza coastal zone using gis and remote sensing techniques,” *Journal of Coastal Conservation*, vol. 25, no. 3, p. 36, 2021. (Cited on page 1.)
- [6] M. Crowell, B. C. Douglas, and S. P. Leatherman, “On forecasting future us shoreline positions : a test of algorithms,” *Journal of Coastal Research*, pp. 1245–1255, 1997. (Cited on pages 2 and 28.)
- [7] E. R. Thieler, E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi, and A. Ergul, “The digital shoreline analysis system (dsas) version 4.0—an arcgis extension for calculating shoreline change,” tech. rep., US Geological Survey, 2009. (Cited on pages 2, 35, 58, and 72.)
- [8] L. Li, A. Vrieling, A. Skidmore, T. Wang, and E. Turak, “Monitoring the dynamics of surface water fraction from modis time series in a mediterranean environment,”

-
- International journal of applied earth observation and geoinformation*, vol. 66, pp. 135–145, 2018. (Cited on pages 2 and 28.)
- [9] A. Hardy, G. Ettritch, D. E. Cross, P. Bunting, F. Liywalii, J. Sakala, A. Silumesii, D. Singini, M. Smith, T. Willis, *et al.*, “Automatic detection of open and vegetated water bodies using sentinel 1 to map african malaria vector mosquito breeding habitats,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 5, p. 593, 2019. (Cited on page 2.)
- [10] B. R. V. Zonkouan, I. Bachri, A. H. J. Beda, and K. A. M. N’Guessan, “Monitoring spatial and temporal scales of shoreline changes in lahou-kpanda (southern ivory coast) using landsat data series (tm, etm+ and oli),” *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 145–158, 2022. (Cited on pages 2 and 23.)
- [11] J. M. Slott, A. B. Murray, and A. D. Ashton, “Large-scale responses of complex-shaped coastlines to local shoreline stabilization and climate change,” *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, vol. 115, no. F3, 2010. (Cited on pages 2, 62, and 92.)
- [12] A. Robinet, B. Castelle, D. Idier, G. Le Cozannet, M. Déqué, and E. Charles, “Statistical modeling of interannual shoreline change driven by north atlantic climate variability spanning 2000–2014 in the bay of biscay,” *Geo-Marine Letters*, vol. 36, pp. 479–490, 2016. (Cited on pages 2 and 62.)
- [13] M. Hakkou, M. Maanan, T. Belrhaba, F. Leone, A. Benmohammadi, B. Zourarah, *et al.*, “Assess and mapping the flooding hazards using geospatial tools and empirical model along kenitra coast, morocco,” *Ocean & coastal management*, vol. 169, pp. 264–272, 2019. (Cited on pages 2 and 62.)
- [14] I. L. Turner, “Discriminating modes of shoreline response to offshore-detached structures,” *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, vol. 132, no. 3, pp. 180–191, 2006. (Cited on page 2.)
- [15] G. Qiao, H. Mi, W. Wang, X. Tong, Z. Li, T. Li, S. Liu, and Y. Hong, “55-year (1960–2015) spatiotemporal shoreline change analysis using historical dis and landsat time series data in shanghai,” *International journal of applied earth observation and geoinformation*, vol. 68, pp. 238–251, 2018. (Cited on page 2.)
- [16] S. Toure, O. Diop, K. Kpalma, and A. S. Maiga, “Shoreline detection using optical remote sensing : A review,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 2, p. 75, 2019. (Cited on page 2.)

-
- [17] E. H. Boak and I. L. Turner, "Shoreline definition and detection : a review," *Journal of coastal research*, vol. 21, no. 4, pp. 688–703, 2005. (Cited on page 2.)
- [18] D. E. M. Valère, B. Fatoumata, K. M. Jeanne, K. A. Jean-Baptiste, M. A. B. Hervé, A. K. Kouamé, T. J. André, and Y. Patricia, "Cartographie de la dynamique du trait de cote a grand-lahou : Utilisation de l'outil digital shoreline analysis system (dsas)," *Eur. Sci. Journal, ESJ*, vol. 12, no. 36, p. 327, 2016. (Cited on page 2.)
- [19] R. E. Scott and S. J. Mitchell, "Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes," *Forest Ecology and Management*, vol. 218, no. 1-3, pp. 193–209, 2005. (Cited on pages 2, 23, 65, and 92.)
- [20] C. Meur-Ferec, P. Deboudt, H. Heurtefeux, H. Flanquart, V. Morel, and S. Roussel, "Vers une stratégie de gestion à long terme de l'érosion côtière : l'apport de l'évaluation de la vulnérabilité," in *Colloque international "Interactions nature-société, analyse et modèle"*, pp. 5–p, 2006. (Cited on page 2.)
- [21] J.-C. Dionne, "Paskoff, roland (1994) les littoraux. impact des aménagements sur leur évolution. paris, masson, 2e édition, 256 p.(isbn 2-225-84324-4)," *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 39, no. 106, pp. 129–130, 1995. (Cited on page 3.)
- [22] G. Zhou, Q. Pan, T. Yue, Q. Wang, H. Sha, S. Huang, and X. Liu, "Vector and raster data storage based on morton code," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, p. 3, 2018. (Cited on pages 9 and 56.)
- [23] R. Paskoff, *Côtes en danger*. Masson Paris, 1993. (Cited on page 12.)
- [24] C. Verpoorter, *Téledétection hyperspectrale et cartographie des faciès sédimentaires en zone intertidale : application à la Baie de Bourgneuf*. PhD thesis, Université de Nantes, 2009. (Cited on pages vii, 13, 103, and 104.)
- [25] P. D. Kunte, B. Wagle, and Y. Sugimori, "Littoral transport studies along west coast of india—a review," 2001. (Cited on page 13.)
- [26] A. Akpınar and B. Bingölbali, "Long-term variations of wind and wave conditions in the coastal regions of the black sea," *Natural Hazards*, vol. 84, pp. 69–92, 2016. (Cited on page 15.)
- [27] S. Musić and S. Nicković, "44-year wave hindcast for the eastern mediterranean," *Coastal Engineering*, vol. 55, no. 11, pp. 872–880, 2008. (Cited on page 15.)

-
- [28] K. Amarouche, N. Bachari, F. Houma, and A. Boughrira, "Development of a numerical code to simulate the hydrodynamic energy potential, applied at bou ismail bay," *Journal of Renewable Energies*, vol. 20, no. 3, pp. 377–388, 2017. (Cited on pages 15 and 76.)
- [29] N. Booij, R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen, "A third-generation wave model for coastal regions : 1. model description and validation," *Journal of geophysical research : Oceans*, vol. 104, no. C4, pp. 7649–7666, 1999. (Cited on page 15.)
- [30] L. Sartini, L. Mentaschi, and G. Besio, "Evaluating third generation wave spectral models performances in coastal areas. an application to eastern liguria," in *OCEANS 2015-Genova*, pp. 1–10, IEEE, 2015. (Cited on page 15.)
- [31] J. Bougis, "Les houles périodiques simples," *Institut des Sciences de l'Ingenieur de Toulon et du Var, Universitede Toulon et Du Var*, 1993. (Cited on page 15.)
- [32] S. Shin, K.-H. Lee, D.-S. Kim, K.-H. Kim, and K. Hong, "A study on the optimal shape of wave energy conversion system using an oscillating water column," *Journal of Coastal Research*, no. 65 (10065), pp. 1663–1668, 2013. (Cited on pages 16 and 76.)
- [33] A. Guilcher, "Bilan des méthodes d'étude quantitative d'accrétion et d'érosion dans les marais intertidaux d'europe occidentale," in *Les côtes atlantiques d'Europe, évolution, aménagement, protection, Brest, France, 15-16 mai 1979.*, 1979. (Cited on page 20.)
- [34] S. P. Manual, "Department of the army," *US Army Corps of Engineers*, 1984. (Cited on page 20.)
- [35] A. Miossec, "Paskoff roland, 1993.—les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution," *Norois*, vol. 163, no. 1, pp. 512–512, 1994. (Cited on page 23.)
- [36] J. Ojeda Zújar, L. Borgniet, A. Pérez Romero, and J. Loder, "Monitoring morphological changes along the coast of huelva (sw spain) using soft-copy photogrammetry and gis," *Journal of Coastal Conservation*, vol. 8, no. 1, pp. 69–76, 2002. (Cited on pages 23 and 92.)
- [37] L. Del Río, F. J. Gracia, and J. Benavente, "Shoreline change patterns in sandy coasts. a case study in sw spain," *Geomorphology*, vol. 196, pp. 252–266, 2013. (Cited on pages 23, 59, and 87.)
- [38] D. J. Sherman and B. O. Bauer, "Coastal geomorphology through the looking glass," in *Geomorphology : the Research Frontier and Beyond*, pp. 225–249, Elsevier, 1993.

- (Cited on pages 23 and 65.)
- [39] P. J. Zuzek, R. B. Nairn, and S. J. Thieme, "Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the great lakes basin," *Journal of Coastal Research*, pp. 125–146, 2003. (Cited on pages 23 and 65.)
- [40] M. Yasir, H. Sheng, H. Fan, S. Nazir, A. J. Niang, M. Salauddin, and S. Khan, "Automatic coastline extraction and changes analysis using remote sensing and gis technology," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 180156–180170, 2020. (Cited on page 23.)
- [41] H. Fatima, M. H. Arsalan, A. Khalid, K. Marjan, and M. Kumar, "Spatio-temporal analysis of shoreline changes along makran coast using remote sensing and geographical information system," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Space Science and Technology (ICASE), Islamabad, Pakistan*, pp. 2–4, 2015. (Cited on page 24.)
- [42] L. Gorman, A. Morang, and R. Larson, "Monitoring the coastal environment ; part iv : mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis," *Journal of Coastal Research*, pp. 61–92, 1998. (Cited on page 24.)
- [43] L. J. Moore, "Shoreline mapping techniques," *Journal of coastal research*, pp. 111–124, 2000. (Cited on pages 24, 28, 57, 84, 86, and 87.)
- [44] C. Armaroli, P. Ciavola, Y. Balouin, and M. Gatti, "An integrated study of shoreline variability using gis and argus techniques," *Journal of Coastal Research*, vol. 39, pp. 473–477, 2006. (Cited on page 24.)
- [45] A. Grenier and J. M. DUBOIS, "Evolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique," *Photo interprétation (Paris)*, vol. 29, no. 6, pp. 3–7, 1990. (Cited on page 24.)
- [46] A. Guilcher, "Gestion des rivages : Roland paskoff, côtes en danger," in *Annales de géographie*, vol. 102, pp. 639–640, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 1993. (Cited on page 24.)
- [47] M. Ford, "Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images : Wotje atoll, marshall islands," *Remote Sensing of Environment*, vol. 135, pp. 130–140, 2013. (Cited on pages 24 and 72.)
- [48] E. Güray, *Sujet de these : Reconnaissance d'objets cartographiques dans les images satellitairesa haute résolution*. PhD thesis, université PARIS DESCARTES, 2008. (Cited on page 25.)

- [49] A. Guilcher, “La formation de la mer du nord, du pas-de-calais et des plaines maritimes environnantes,” *Géocarrefour*, vol. 26, no. 3, pp. 311–329, 1951. (Cited on page 27.)
- [50] A. Roubertou and H. Bonneval, “La photographie aérienne en hydrographie marine,” *La photographie aérienne. Panorama intertechnique*, Gauthier-Villars Editeur, Paris, pp. 51–56, 1965. (Cited on page 27.)
- [51] I. B. N. Faye, *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie a la Guinée-Bissau (Afrique de l’Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d’images et analyse de cartes anciennes*. PhD thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2010. (Cited on pages vii, 27, 56, 57, and 58.)
- [52] B. Parker, “Where is the shoreline? : the answer is not as simple as one might expect,” 2001. (Cited on page 28.)
- [53] R. Paskoff, *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. Armand Colin, 2010. (Cited on pages 30 and 92.)
- [54] K. Remmache, N. Bachari, and F. Houma, “Apport de la télédétection très haute résolution pour l’étude diachronique des plages de la région centre algérienne,” 2020. (Cited on page 33.)
- [55] K. Remmache, N. E. I. Bachari, L. Nacef, and F. Houma, “Granulometric indices mapping in relation to hydrodynamic factors for beach characterization and monitoring with very high spatial resolution,” *Data Science and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 5–12, 2020. (Cited on pages vii, 33, and 78.)
- [56] F. Fadhli and N. Bachari, “A fuzzy logic method for extraction of geographic objects from ikonos imagery,” 2015. (Cited on page 34.)
- [57] E. Himmelstoss, “Dsas 4.0 installation instructions and user guide,” *Thieler, ER, Himmelstoss, EA, Zichichi, JL, and Ergul, Ayhan*, pp. 2008–1278, 2009. (Cited on page 35.)
- [58] E. R. Thieler and W. W. Danforth, “Historical shoreline mapping (ii) : application of the digital shoreline mapping and analysis systems (dsms/dsas) to shoreline change mapping in puerto rico,” *Journal of coastal research*, pp. 600–620, 1994. (Cited on pages 35 and 86.)
- [59] B. M. Romine, C. H. Fletcher, L. N. Frazer, A. S. Genz, M. M. Barbee, and S.-C. Lim, “Historical shoreline change, southeast oahu, hawaii ; applying polynomial

- models to calculate shoreline change rates,” *Journal of Coastal Research*, vol. 25, no. 6, pp. 1236–1253, 2009. (Cited on page 35.)
- [60] E. Charou, M. Stefouli, D. Dimitrakopoulos, E. Vasiliou, and O. Mavrantza, “Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources,” *Mine Water and the Environment*, vol. 29, pp. 45–52, 2010. (Cited on page 56.)
- [61] T. U. Omali and K. Umoru, “A survey of remote sensing and gis integration method,” *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science, VIII*, pp. 27–35, 2019. (Cited on page 56.)
- [62] M. Juigner, *La géomatique au service de l’observation du trait de côte-Contribution à l’étude des aléas côtiers sur les littoraux dunaires de la région Pays de la Loire (France)*. PhD thesis, Université de Nantes, 2017. (Cited on pages 56 and 57.)
- [63] R. A. Morton, T. Miller, and L. Moore, “Historical shoreline changes along the us gulf of mexico : a summary of recent shoreline comparisons and analyses,” *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no. 4, pp. 704–709, 2005. (Cited on pages 56, 57, 86, and 87.)
- [64] C. Armaroli and P. Ciavola, “Dynamics of a nearshore bar system in the northern adriatic : A video-based morphological classification,” *Geomorphology*, vol. 126, no. 1-2, pp. 201–216, 2011. (Cited on page 56.)
- [65] M. Robin, “Étude des risques côtiers sous l’angle de la géomatique/coastal hazards : a gis approach to the men/nature interaction,” in *Annales de géographie*, pp. 471–502, JSTOR, 2002. (Cited on page 57.)
- [66] M. Juigner, M. Robin, P. Fattal, M. Maanan, C. Le Guern, L. Gouguet, V. Baudouin, and F. Debaine, “Cinématique d’un trait de côte sableux en vendée entre 1920 et 2010,” *Dynamiques Environnementales-Journal international des géosciences et de l’environnement*, no. 30, pp. 29–39, 2013. (Cited on pages 57 and 58.)
- [67] A. I. Gould, N. E. Kinsman, and M. D. Hendricks, *Guide to projected shoreline positions in the Alaska Shoreline Change Tool*. State of Alaska, Department of Natural Resources, Division of Geological . . . , 2015. (Cited on page 57.)
- [68] J. Bonnamour, “Roland paskoff, les littoraux. impact des aménagements sur leur évolution,” *L’Information Géographique*, vol. 62, no. 3, pp. 141–141, 1998. (Cited on page 58.)

-
- [69] M. Amharak, "Evolution récente (occupation du sol et trait de côte) et impacts anthropiques au niveau de l'estuaire de tahaddart (maroc nord occidental)," *Mémoire DESA, faculté des sciences de Tétouan (inédit)*, 2006. (Cited on page 58.)
- [70] M. Thior, A. Sy, I. Cissé, E. Dièye, T. Sané, B. Boubacar Demba, B. Solly, and L. Descroix, "Approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la casamancea cartographic approach of the evolution of the coastline of the casamance estuaryaproximación cartográfica para el estudio de la evolución costera en la ría de casamance," *Mappemonde*, 06 2021. (Cited on page 59.)
- [71] V. Sudhakar, B. Gurugnanam, *et al.*, "Shoreline change study between vembar and tharuvaikulam coastal zones along the coast of thoothukudi district, tamil nadu, india, using remote sensing and gis techniques," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS)*, vol. 50, no. 09, pp. 736–742, 2022. (Cited on page 62.)
- [72] P. Ozer, Y.-c. Hountondji, and F. De Longueville, "Evolution récente du trait de côte dans le golfe du bénin. exemples du togo et du bénin," *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, vol. 41, no. 3, 2017. (Cited on page 62.)
- [73] B. Deepika, K. Avinash, and K. Jayappa, "Shoreline change rate estimation and its forecast : remote sensing, geographical information system and statistics-based approach," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 11, pp. 395–416, 2014. (Cited on page 63.)
- [74] S. Maiti and A. K. Bhattacharya, "Shoreline change analysis and its application to prediction : A remote sensing and statistics based approach," *Marine Geology*, vol. 257, no. 1-4, pp. 11–23, 2009. (Cited on pages 63 and 92.)
- [75] H. Stanchev, A. Palazov, M. Stancheva, and A. Apostolov, "Determination of the black sea area and coastline length using gis methods and landsat 7 satellite images," *Geo-Eco-Marina. Bucharest*, vol. 17, pp. 27–31, 2011. (Cited on page 63.)
- [76] K. O'Brien, J. Stocker, J. Barrett, and B. Hyde, "Analysis of shoreline change in connecticut : 100+ years of erosion and accretion : methodology and summary results," 2014. (Cited on page 64.)
- [77] E. A. Himmelstoss, R. E. Henderson, M. G. Kratzmann, and A. S. Farris, "Digital shoreline analysis system (dsas) version 5.0 user guide," tech. rep., US Geological Survey, 2018. (Cited on page 64.)
- [78] S. G. Viridis, G. Oggiano, and L. Disperati, "A geomatics approach to multitemporal

- shoreline analysis in western mediterranean : the case of platamona-maritza beach (northwest sardinia, italy)," *Journal of Coastal Research*, vol. 28, no. 3, pp. 624–640, 2012. (Cited on page 64.)
- [79] E. Manca, V. Pascucci, M. Deluca, A. Cossu, and S. Andreucci, "Shoreline evolution related to coastal development of a managed beach in alghero, sardinia, italy," *Ocean & coastal management*, vol. 85, pp. 65–76, 2013. (Cited on page 65.)
- [80] J. Cooper, D. Jackson, F. Navas, J. McKenna, and G. Malvarez, "Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline : examples from western ireland," *Marine Geology*, vol. 210, no. 1-4, pp. 261–280, 2004. (Cited on page 70.)
- [81] E. E. Lentz and C. J. Hapke, "Geologic framework influences on the geomorphology of an anthropogenically modified barrier island : assessment of dune/beach changes at fire island, new york," *Geomorphology*, vol. 126, no. 1-2, pp. 82–96, 2011. (Cited on page 70.)
- [82] D. JI, *Geographical variation in coastal development*. Longman, New York, 1980. (Cited on page 70.)
- [83] P. Komar, "Beach processes and sedimentation : Englewood cliffs, new jersey, prentice-hall," 1976. (Cited on page 70.)
- [84] J. Gracia, L. D. Río, C. Alonso, J. Benavente, and G. Anfuso, "Historical evolution and present state of the coastal dune systems in the atlantic coast of cádiz (sw spain) : Palaeoclimatic and environmental implications," *Journal of Coastal Research*, pp. 55–63, 2006. (Cited on page 70.)
- [85] R. Dolan, M. S. Fenster, and S. J. Holme, "Spatial analysis of shoreline recession and accretion," *Journal of coastal research*, pp. 263–285, 1992. (Cited on page 72.)
- [86] A. S. Genz, C. H. Fletcher, R. A. Dunn, L. N. Frazer, and J. J. Rooney, "The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on maui, hawaii," *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no. 1, pp. 87–105, 2007. (Cited on page 72.)
- [87] E. R. Thieler, E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi, and T. L. Miller, "The digital shoreline analysis system (dsas) version 3.0, an arcgis extension for calculating historic shoreline change," tech. rep., US Geological Survey, 2005. (Cited on pages 72 and 85.)
- [88] I. B. N. Faye, F. Gourmelon, and A. t. Diaw, "Évolution du trait de côte à nouakchott

- (mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation,” *Norois*, vol. 208, pp. 11–27, 2008. (Cited on page 72.)
- [89] S. Kermani, M. Boutiba, M. Guendouz, M. S. Guettouche, and D. Khelfani, “Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation : Case of jijelian sandy coast (east algeria),” *Ocean & coastal management*, vol. 132, pp. 46–58, 2016. (Cited on page 72.)
- [90] K. Amarouche, A. Akpınar, N. E. I. Bachari, and F. Houma, “Wave energy resource assessment along the algerian coast based on 39-year wave hindcast,” *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 840–860, 2020. (Cited on page 76.)
- [91] P. Wernette, A. Shortridge, D. P. Lusch, and A. F. Arbogast, “Accounting for positional uncertainty in historical shoreline change analysis without ground reference information,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 13, pp. 3906–3922, 2017. (Cited on page 84.)
- [92] K. Ayadi, M. Boutiba, F. Sabatier, and M. S. Guettouche, “Detection and analysis of historical variations in the shoreline, using digital aerial photos, satellite images, and topographic surveys dgps : case of the bejaia bay (east algeria),” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, pp. 1–12, 2016. (Cited on page 84.)
- [93] M. S. Hossain, M. Yasir, P. Wang, S. Ullah, M. Jahan, S. Hui, and Z. Zhao, “Automatic shoreline extraction and change detection : A study on the southeast coast of bangladesh,” *Marine geology*, vol. 441, p. 106628, 2021. (Cited on page 85.)
- [94] J. M. Johnson, L. J. Moore, K. Ells, A. B. Murray, P. N. Adams, R. A. MacKenzie III, and J. M. Jaeger, “Recent shifts in coastline change and shoreline stabilization linked to storm climate change,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, no. 5, pp. 569–585, 2015. (Cited on page 88.)
- [95] S. D. Iyer, E. V. Babu, P. G. Mislankar, A. R. Gujar, N. V. Ambre, and V. J. Loveson, “Occurrence and emplacement of chromite ores in sindhudurg district, maharashtra, india,” *Acta Geologica Sinica-English Edition*, vol. 84, no. 3, pp. 515–527, 2010. (Cited on page 91.)
- [96] V. Rajganapathi, N. Jitheshkumar, M. Sundararajan, K. Bhat, and S. Velusamy, “Grain size analysis and characterization of sedimentary environment along thiruchendur coast, tamilnadu, india,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 6, pp. 4717–4728, 2013. (Cited on page 91.)

-
- [97] J. S. Armstrong-Altrin, R. Nagarajan, V. Balaram, and O. Natalhy-Pineda, "Petrography and geochemistry of sands from the chachalacas and veracruz beach areas, western gulf of mexico, mexico : constraints on provenance and tectonic setting," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 64, pp. 199–216, 2015. (Cited on page 91.)
- [98] R. Ranasinghe, "On the need for a new generation of coastal change models for the 21st century," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2020. (Cited on page 91.)
- [99] J. George, V. S. Kumar, R. Gowthaman, and J. Singh, "Nearshore waves and littoral drift along a micro-tidal wave-dominated coast having comparable wind-sea and swell energy," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, p. 55, 2020. (Cited on page 91.)
- [100] P. D. Osborne, "Transport of gravel and cobble on a mixed-sediment inner bank shoreline of a large inlet, grays harbor, washington," *Marine Geology*, vol. 224, no. 1-4, pp. 145–156, 2005. (Cited on page 91.)
- [101] A. Shetty and J. K. S., "Proxies for sediment transport patterns and environmental characteristics : A case study of karnataka coast, india," *Journal of Sedimentary Environments*, vol. 6, pp. 107–120, 2021. (Cited on page 92.)
- [102] R. J. Bergillos, A. López-Ruiz, D. Principal-Gómez, and M. Ortega-Sánchez, "An integrated methodology to forecast the efficiency of nourishment strategies in eroding deltas," *Science of the Total Environment*, vol. 613, pp. 1175–1184, 2018. (Cited on page 92.)
- [103] A. Kumar, A. Narayana, and K. Jayappa, "Shoreline changes and morphology of spits along southern karnataka, west coast of india : A remote sensing and statistics-based approach," *Geomorphology*, vol. 120, no. 3-4, pp. 133–152, 2010. (Cited on page 92.)
- [104] S. Arockiaraj, R. Kankara, G. Udhaba Dora, and S. Sathish, "Estimation of seasonal morpho-sedimentary changes at headland bound and exposed beaches along south maharashtra, west coast of india," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no. 17, p. 604, 2018. (Cited on page 92.)
- [105] I. Aouiche, L. Daoudi, F. Ihabach, *et al.*, "Caractérisation minéralogique et granulométrique des sédiments littoraux de la baie d," *Agadir (Maroc atlantique) : dynamique sédimentaire et sources des matériaux Mineralogical and grain size characterization of coastal sediments of the Agadir bay. Sed J Mater Environ Sci*, vol. 7, no. 10,

-
- pp. 3711–3723, 2016. (Cited on pages 92 and 122.)
- [106] A. Rasuly, R. Naghdifar, and M. Rasoli, “Monitoring of caspian sea coastline changes using object-oriented techniques,” *Procedia Environmental Sciences*, vol. 2, pp. 416–426, 2010. (Cited on page 92.)
- [107] A. El Mrini, E. J. Anthony, M. Maanan, M. Taaouati, and D. Nachite, “Beach-dune degradation in a mediterranean context of strong development pressures, and the missing integrated management perspective,” *Ocean & coastal management*, vol. 69, pp. 299–306, 2012. (Cited on page 92.)
- [108] P. D. Komar, “Coastal erosion- underlying factors and human impacts,” *Shore & Beach*, vol. 68, no. 1, pp. 3–16, 2000. (Cited on page 92.)
- [109] P. N. Adams, D. L. Inman, and J. L. Lovering, “Effects of climate change and wave direction on longshore sediment transport patterns in southern california,” *Climatic Change*, vol. 109, pp. 211–228, 2011. (Cited on page 92.)
- [110] P. Ruggiero, M. Buijsman, G. M. Kaminsky, and G. Gelfenbaum, “Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change,” *Marine Geology*, vol. 273, no. 1-4, pp. 127–140, 2010. (Cited on page 92.)
- [111] D. E. McNamara and A. Keeler, “A coupled physical and economic model of the response of coastal real estate to climate risk,” *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 6, pp. 559–562, 2013. (Cited on page 92.)
- [112] N. R. Magliocca, D. E. McNamara, and A. B. Murray, “Long-term, large-scale morphodynamic effects of artificial dune construction along a barrier island coastline,” *Journal of Coastal Research*, vol. 27, no. 5, pp. 918–930, 2011. (Cited on page 92.)
- [113] A. Gujar, P. Ganesan, S. Iyer, S. Gaonkar, N. Ambre, V. Loveson, and P. Mislankar, “Influence of morphodynamic variability over seasonal beach sediments and its probable effect on coastal development,” *Ocean & coastal management*, vol. 54, no. 7, pp. 514–523, 2011. (Cited on pages 92 and 123.)
- [114] F. Dunn, R. Nicholls, S. Darby, S. Cohen, C. Zar, and B. Fekete, “Science of the total environment projections of historical and 21st century fluvial sediment delivery to the ganges-brahmaputra-meghna, mahanadi, and volta deltas,” *Science of the Total Environment Journal*, vol. 642, pp. 105–116, 2018. (Cited on page 93.)
- [115] M. Besset, E. J. Anthony, and F. Bouchette, “Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply : An assessment and

- review," *Earth-science reviews*, vol. 193, pp. 199–219, 2019. (Cited on page 93.)
- [116] R. L. Folk and W. C. Ward, "Brazos river bar [texas]; a study in the significance of grain size parameters," *Journal of sedimentary research*, vol. 27, no. 1, pp. 3–26, 1957. (Cited on pages 98, 100, 101, 120, and 121.)
- [117] S. J. Blott and K. Pye, "Gradistat : a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments," *Earth surface processes and Landforms*, vol. 26, no. 11, pp. 1237–1248, 2001. (Cited on pages 98 and 101.)
- [118] J. T. Liu and G. A. Zarillo, "Distribution of grain sizes across a transgressive shoreface," *Marine Geology*, vol. 87, no. 2-4, pp. 121–136, 1989. (Cited on page 98.)
- [119] F. Ramade, *Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau : biogéochimie et écologie des eaux continentales et littorales*. Ediscience international, 1998. (Cited on page 98.)
- [120] C. Bonnet, *Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés*. PhD thesis, Doctorat Toxicologie de l'environnement, Université de Metz, 2000. (Cited on page 98.)
- [121] R. L. Folk, "The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature," *The Journal of Geology*, vol. 62, no. 4, pp. 344–359, 1954. (Cited on pages 101 and 121.)
- [122] A. Rivière, *Méthodes granulométriques-Techniques et interprétations*. 1977. (Cited on page 104.)
- [123] R. L. Folk, "A review of grain-size parameters," *Sedimentology*, vol. 6, no. 2, pp. 73–93, 1966. (Cited on page 121.)
- [124] H. Chamley and J.-F. Deconinck, "Bases de sédimentologie," 2011. (Cited on page 121.)
- [125] G. M. Friedman, "On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones," *The Journal of Geology*, vol. 70, no. 6, pp. 737–753, 1962. (Cited on page 121.)
- [126] D. B. Duane, "Significance of skewness in recent sediments, western pamlico sound, north carolina," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 34, no. 4, pp. 864–874, 1964. (Cited on page 123.)
- [127] A. R. Gujar, N. Angusamy, and G. V. Rajamanickam, "Wave refraction patterns and their role in sediment redistribution along south konkan, maharashtra, india,"

2008. (Cited on page [123](#).)
- [128] G. Masselink, M. Hughes, and J. Knight, *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Routledge, 2014. (Cited on page [123](#).)
- [129] M. Ergin, Ş. Keskin, A. U. Doğan, Y. K. Kadioğlu, and Z. Karakaş, “Grain size and heavy mineral distribution as related to hinterland and environmental conditions for modern beach sediments from the gulfs of antalya and finike, eastern mediterranean,” *Marine geology*, vol. 240, no. 1-4, pp. 185–196, 2007. (Cited on pages [123](#) and [125](#).)
- [130] C. Pattiaratchi and P. Harris, “Hydrodynamic and sand-transport controls on an echelon sandbank formation : an example from moreton bay, eastern australia, 53 (7), 1101-1113, doi : 10.1071,” *MF01288*, 2003. (Cited on page [123](#).)
- [131] J. M. Slott, A. B. Murray, A. D. Ashton, and T. J. Crowley, “Coastline responses to changing storm patterns,” *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 18, 2006. (Cited on page [123](#).)
- [132] S. Saravanan and N. Chandrasekar, “Wave refraction pattern and littoral sediment transport along the se tamilnadu coast, india,” *Journal of Coastal Research*, vol. 31, no. 2, pp. 291–298, 2015. (Cited on page [123](#).)
- [133] O. Chauhan, “Sedimentological parameters of beach sediments on the east coast of india,” *Journal of coastal research*, pp. 573–585, 1990. (Cited on page [123](#).)
- [134] H. Khoshnavan, “Beach sediments, morphodynamics, and risk assessment, caspian sea coast, iran,” *Quaternary International*, vol. 167, pp. 35–39, 2007. (Cited on page [123](#).)
- [135] K. Jayappa, G. V. Kumar, and K. Subrahmanya, “Influence of coastal structures on the beaches of southern karnataka, india,” *Journal of coastal research*, pp. 389–408, 2003. (Cited on page [123](#).)
- [136] A. Shetty, K. Jayappa, R. Ramakrishnan, and A. Rajawat, “Shoreline dynamics and vulnerability assessment along the karnataka coast, india : A geo-statistical approach,” *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 47, pp. 1223–1234, 2019. (Cited on page [123](#).)
- [137] N. Mejjad, A. Laissaoui, A. Fekri, A. Benmhammed, O. El Hammoumi, and E. K. Cherif, “Does human activities growth lead to biodiversity loss in the moroccan coastal lagoons? a diagnostic comparison study,” in *Proceedings of the 4th Edition*

-
- of International Conference on Geo-IT and Water Resources 2020, Geo-IT and Water Resources 2020*, pp. 1–5, 2020. (Cited on page 124.)
- [138] B. Zourarah, M. Maanan, C. Carruesco, A. Aajjane, K. Mehdi, and M. C. Freitas, “Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution in the lagoon of oualidia (moroccan atlantic coast),” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 72, no. 1-2, pp. 359–369, 2007. (Cited on page 124.)
- [139] M. W. Hounslow and A. C. Morton, “Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates : comparison with heavy mineral analysis,” *Sedimentary Geology*, vol. 171, no. 1-4, pp. 13–36, 2004. (Cited on page 125.)
- [140] N. Okay and B. Ergün, “Source of the basinal sediments in the marmara sea investigated using heavy minerals in the modern beach sands,” *Marine Geology*, vol. 216, no. 1-2, pp. 1–15, 2005. (Cited on page 125.)
- [141] O. E. Frihy and K. M. Dewidar, “Influence of shoreline erosion and accretion on texture and heavy mineral compositions of beach sands of the burullus coast, north-central nile delta, egypt,” *Marine geology*, vol. 114, no. 1-2, pp. 91–104, 1993. (Cited on page 125.)
- [142] J. Abuodha, “Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, malindi bay coast, kenya,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 36, no. 1-2, pp. 41–54, 2003. (Cited on page 125.)
- [143] M. PUJOS, P. Jean-Claude, and M. Parra, “Les minéraux lourds des sables du littoral de la guyane française : bilan sur l’origine des dépôts de la plate-forme des guyanes,” *Oceanologica acta*, vol. 24, pp. 27–35, 2001. (Cited on pages 125 and 142.)
- [144] M. Beiner, D. Harmand, S. Cordier, and S. Occhietti, “The heavy minerals of quaternary fluvial deposits in the moselle basin : New data.,” *Quaternaire (Paris)*, vol. 20, no. 1, p. 63, 2009. (Cited on page 125.)
- [145] R. Lowright, E. Williams, and F. Dachille, “An analysis of factors controlling deviations in hydraulic equivalence in some modern sands,” *Journal of Sedimentary Research*, vol. 42, no. 3, 1972. (Cited on page 125.)
- [146] R. L. Slingerland, “The effects of entrainment on the hydraulic equivalence relationships of light and heavy minerals in sands,” *Journal of Sedimentary Research*, vol. 47, no. 2, pp. 753–770, 1977. (Cited on page 125.)

- [147] P. D. Komar and C. Wang, "Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches," *The Journal of Geology*, vol. 92, no. 6, pp. 637–655, 1984. (Cited on page 125.)
- [148] A. C. Morton and C. R. Hallsworth, "Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones," *Sedimentary geology*, vol. 124, no. 1-4, pp. 3–29, 1999. (Cited on pages 125 and 143.)
- [149] D. M. Moore, R. C. Reynolds Jr, *et al.*, *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press (OUP), 1989. (Cited on page 127.)
- [150] T. Holtzappel, "Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination," *Société géologique du Nord*, vol. 12, pp. 1–36, 1985. (Cited on page 127.)
- [151] N. V. Scarlett and I. C. Madsen, "Quantification of phases with partial or no known crystal structures," *Powder Diffraction*, vol. 21, no. 4, pp. 278–284, 2006. (Cited on page 130.)
- [152] K. Remmache, N. E. I. Bachari, M. Ayache, K. Khenfer, and F. Houma, "Combination of multi-source data and multi-application models to develop a methodology as a qualitative study for beaches with very high spatial resolution," *Earth Systems and Environment*, vol. 5, no. 3, pp. 767–783, 2021. (Cited on page 136.)
- [153] E. Joshua and O. Oyebanjo, "Distribution of heavy minerals in sediments of osun river basin southwestern nigeria," *Research Journal of Earth Sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 74–80, 2009. (Cited on page 142.)
- [154] F. L. Wong, D. L. Woodrow, and M. McGann, "Heavy mineral analysis for assessing the provenance of sandy sediment in the san francisco bay coastal system," *Marine Geology*, vol. 345, pp. 170–180, 2013. (Cited on page 142.)
- [155] B. Tsikouras, G. Pe-Piper, D. J. Piper, and M. Schaffer, "Varietal heavy mineral analysis of sediment provenance, lower cretaceous scotian basin, eastern canada," *Sedimentary Geology*, vol. 237, no. 3-4, pp. 150–165, 2011. (Cited on page 143.)