

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



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

Spécialité : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**ETUDE DE L'EVOLUTION SURFACIQUE ET
VOLUMETRIQUE DU CORDON DUNAIRE D'EL
KADOUS (COMMUNE DE HERAOUA)**

Présentée par : **BELLABAD Fahima**

Soutenu le 12 /11/2020 devant le jury composé de :

M^{me} SOUKANE MOKHBI D.	MCB (ENSSMAL)	Présidente
M. OTMANI H.	MCB (ENSSMAL)	Promoteur
M^{me} KERAGHEL M.	MAA (ENSSMAL)	Copromotrice
M. FERNANE L.	MAA (ENSSMAL)	Examineur
M^{me} MOUHOUBI N. E. I.	Chef de département (LEM)	Examinatrice

Promotion : 2019 – 2020

REMERCIEMENTS

Je suis très heureuse de pouvoir exprimer ma gratitude à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma très grande gratitude à mon promoteur « M OTMANI H.» pour la confiance qu'il m'a apportée, pour son entière disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail et pour ses conseils et ses critiques constructives.

Mes remerciements vont aussi à ma copromotrice « M^{me} KERAGHEL M. » de m'avoir accompagné tout au long de la réalisation de ce travail, et de m'avoir aidée par son expérience, ses idées et ses conseils utiles à la réalisation des objectifs de cette étude.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à M^{me} SOUKANE MOKHBI pour son soutien continu durant tout mon cursus universitaire et de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je tiens aussi à remercier M^{me} MOUHOUBI N. E. I. pour sa contribution à l'aboutissement de certaines parties de mon travail ainsi que d'avoir accepté de juger ce mémoire

Mes remerciement vont aussi à M. FERNANE L. d'avoir accepté d'honorer ce travail par sa disponibilité.

Je voudrais aussi exprimer mes remerciements à M MEZOUAR K. et M^{me} SALEM CHERIF Y. et au personnel de la bibliothèque et de l'administration qui n'ont jamais hésité à m'aider.

Je n'oublie pas de remercier mes enseignants qui m'ont transmis leur savoir tout au long de mon cursus universitaire. Qu'ils trouvent également dans ces lignes le témoignage de ma respectueuse reconnaissance.

Enfin, je remercie ma copine M^{me} BENNALOU I. pour son soutien moral et les informations qu'elle a partagées avec moi.

Dédicace

A mes très chers parents

A mes frères Mohammed, Karim et Adel

A mes jolies sœurs Karima, Ilham et Aicha

A Mon ange Mimi et mon porte bonheur Nlyess

A mon petit lapereau Farouk

A mon oncle Hadj et ma tante Martina

A mon adorable tante Baya et mon oncle Rabah

A mes tantes Nassira et Fouziya

A ma grand-mère Wardiya

A la mémoire de ma chère grand-mère que Dieu offre à son âme le Paradis.

A tous mes amis surtout la promo GPL

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

Je dédie ce travail

Fahima

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	II
DEDICACE.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES	XII
INTRODUCTION GENARALE	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1. SYSTEME DUNAIRE	5
2. MORPHOLOGIE D’UN SYSTEME DUNAIRE	5
3. FACTEURS DETERMINANTS LA MORPHOLOGIE D’UN SYSTEME DUNAIRE	6
4. PROCESSUS DE FORMATION D’UN SYSTEME DUNAIRE	7
5. LES DIFFERENTS TYPES DES DUNES	9
6. ROLES DES DUNES LITTORALES	11
7. FRAGILITE DES DUNES LITTORALES	12
8. GESTION DES DUNES LITTORALES	12
CHAPITRE II : DIAGNOSTIC GENERAL.....	14
1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D’ETUDE.....	15
2. ETUDE CLIMATIQUE	16
2.1. LES PRECIPITATIONS ET LES TEMPERATURES.....	16
2.1.1. VARIATIONS ANNUELLES	16
2.1.2. VARIATIONS MENSUELLES.....	17
2.1.3. LE CLIMAGRAMME D’EMBERGER	17
2.2. LES VENTS SUR LA COTE	18
3. ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE.....	20
3.1. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES.....	20
3.1.1. LES SOURCES D’ALIMENTATION EN EAU.....	20
3.2. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES.....	23
3.3. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES	25
3.3.1. LES PLAGES.....	25
3.3.2. SYSTEME DUNAIRE.....	26
3.3.3. EMBOUCHURE DE L’OUED REGHAIA.....	29
4. ETUDE ANTHROPIQUE.....	30
4.1. URBANISATION DU LITTORAL.....	30
4.1.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE	30
4.1.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	31
4.2. EXTRACTION ABUSIVE DE SABLE	34
4.3. PATURAGE.....	34
4.4. EXPLOITATION TOURISTIQUE INCONTROLEE	34
CONCLUSION	36
CHAPITRE III : DIAGNOSTIC DE DETAIL	38
1. ETUDE DE L’EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.....	39
1.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE	39
1.2. INVENTAIRE SUR LES DONNEES UTILISEES	40

1.3.	ETUDE DIACHRONIQUE DU TRAIT DE COTE	41
1.3.1.	VOLET CARTOGRAPHIQUE	42
1.3.2.	VOLET GRAPHIQUE ET STATISTIQUE	42
1.4.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	43
1.4.1.	PERIODE ALLANT DE 1959 A 2020.....	44
1.4.2.	PERIODE ALLANT DE 1959 A 1980.....	45
1.4.3.	PERIODE ALLANT DE 1980 A 2003.....	45
1.4.4.	PERIODE ALLANT DE 2003 A 2014.....	45
1.4.5.	PERIODE ALLANT DE 2014 A 2020.....	46
2.	ETUDE BATHYMETRIQUE.....	54
2.1.	APPROCHE METHODOLOGIQUE	54
2.1.1.	ACQUISITION DES DONNEES BATHYMETRIQUES	54
2.1.2.	CHOIX DE LA ZONE D'INTERET	55
2.1.3.	REALISATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	56
2.2.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	59
2.	ETUDE HYDRO-SEDIMENTAIRE	64
3.1.	APPROCHE METHODOLOGIQUE	64
3.1.1.	PRESENTATION DE LA SUITE LOGICIELLE MIKE 21/3.....	64
3.1.2.	DONNEES D'ENTREES.....	64
3.2.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	68
	CONCLUSION	73
	CHAPITRE IV: ETUDE DE L'EVOLUTION SURFACIQUE ET VOLUMETRIQUE....	74
	INTRODUCTION.....	75
1.	ACQUISITION DES DONNEES TOPOGRPHIQUES	75
1.1.	LES PRINCIPALES COMPOSANTES D'UN DGPS	76
1.2.	PROPRIETE DE DGPS	77
1.3.	MODE DE LEVE TOPOGRAPHIQUE A PARTIR DE DGPS	77
1.4.	PRINCIPES DU CALCUL DE DGPS EN MODE RTK « BASE FIXE AVEC REPERE »	77
2.	INVENTAIRE SUR LES TROIS COMPAGNES DE MESURES	78
3.	PRETRAITEMENT ET VALIDATION DES DONNEES	79
3.1.	DETECTION DES ANOMALIES DE MESURE D'ALTITUDE.....	79
3.2.	DENSITE DE L'ENSEMBLE DE POINTS TOPOGRAPHIQUES.....	81
3.3.	CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE.....	83
4.	LA REALISATION DES MNT DE HAUTE RESOLUTION	84
5.	TRAITEMENT ET EXPLOITATION DES MNT.....	88
5.1.	ETUDE DE L'EVOLUTION SURFACIQUE.....	88
5.2.	ETUDE DE L'EVOLUTION VOLUMETRIQUE.....	91
5.3.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	93
6.	CORRELATION ENTRE L'EVOLUTION DU CORDON DUNAIRE ET LES FACTEURS DU MILIEU AMBIANT.....	94
	CONCLUSION	95
	CONCLUSION GENARALE	96
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	I
	ANNEXES.....	VI
	ANNEXE 1 : DONNEES DES PRECIPITATIONS ET DES TEMPERATURES	VII
	ANNEXE 2 : DONNEES DE VENTS SUR LA COTE.....	VII
	ANNEXE 3 : LES BANDES LITTORALES DEFINIES PAR LA LOI 02 :02	IX
	ANNEXE 4 : METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRAIT DE COTE.....	X
	ANNEXE 5 : LES PARAMETRES CALCULES PAR L'EXTENSION DSAS	XII

Table des matières

ANNEXE 6 : FREQUENCES D'APPARAISON DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES DES HOULES AU LARGE EN FONCTION DE LA SAISON ET DES ETATS DE MER	XIII
ANNEXE 7:DGPS	XIV
ANNEXE 8: LES PARAMETRES DE CORRELATION	XXI

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Profil théorique d'organisation spatiale d'un système dunaire. 6

Figure 2 : Processus de formation des dunes embryonnaires..... 8

Figure 3 : Processus de formation d'un système dunaire. 9

Figure 4 : Coupe schématique d'un système littoral sableux. 9

Figure 5 : Variations saisonnières du profil de la plage. 11

Figure 6 : Situation géographique de la zone d'étude..... 15

Figure 7 : Les variations annuelles des températures et des précipitations (rp5.ru, 2009/2019)..... 16

Figure 8 : Diagramme Ombrothermique (rp5.ru, 2009/2019)..... 17

Figure 9 : La position de la zone d'étude dans le climagramme d'EMBERGER. 18

Figure 10 : Roses des vents sur la côte, à l'échelle saisonnière et annuelle (rp5.ru, 2009/2019)..... 19

Figure 11 : Réseau hydrographique et délimitation du bassin versant de la zone d'étude. 22

Figure 12: Carte géologique de la zone d'étude..... 24

Figure 13 : Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude. 25

Figure 14 : Détails du cordon dunaire d'El Kadous (BOUNOUA et KACI, 2017)..... 26

Figure 15 : A : **Scilla sp**, B : **Ammophila arenaria**, C : **Pancratium maritimum**. (BOUNOUA et KACI, 2017)..... 27

Figure 16 : Photographie de la mise en œuvre d'un système de restauration (OTMANI, 2015)..... 27

Figure 17 : Formation d'une microfalaise dans la zone d'El Kadous (OTMANI, 2014). 28

Figure 18 : Un large couloir de déflation au niveau des dunes d'El Kadous (OTMANI, 2014)..... 28

Figure 19 : La position de l'embouchure de l'Oued Réghaia en 2017 (Google Earth). . 29

Figure 20 : La position de l'embouchure de l'Oued Réghaia en 2020 (Google Earth). . 29

Figure 21 : Histogramme représentatif des pourcentages des différents niveaux d'occupation du sol sur les quatre bandes littorales..... 32

Figure 22 : le taux d'installation urbaine sur les bandes de 3 km, 800m, 300m et 100m. 33

Figure 23 : Pâturage anarchique (El Kadous, 2016)..... 34

Figure 24 : Les traces de carrosseries et de piétinement (OTMANI, 2014)..... 35

Liste des figures

Figure 25 : Fréquentation touristique (FOUZOL, 2014).....	35
Figure 26 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte.	40
Figure 27 : Proposition de légende pour le trait de côte représenté à plusieurs dates(FAYE et al., 2012).	42
Figure 28: Barre d'outils de l'extension DSAS.....	43
Figure 29 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1959 et 2020.	47
Figure 30 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1959 et 1980.	48
Figure 31: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1980 et 2003.	49
Figure 32: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2003 et 2014.	50
Figure 33 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2014 et 2017.	51
Figure 34 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2017 et 2020.	52
Figure 35 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2014 et 2020.	53
Figure 36 : Représentation de la zone d'intérêt.	56
Figure 37 : A- Fichier de points ; B- MNT, fichier raster ; C- TIN, fichier vecteur.	57
Figure 38 : Schéma explicatif des étapes de réalisation d'un MNT.	57
Figure 39 : Cartes bathymétriques de 2017 et 2020.....	61
Figure 40 : Carte de pente (2017).....	62
Figure 41 : Carte de pente (2020).....	62
Figure 42 : Carte de la variation de la pente entre 2017 et 2020.....	63
Figure 43 : Carte de différentiel bathymétrique entre 2017 et 2020.	63
Figure 44 : La Mesh générée par le MIKE.....	65
Figure 45 : La carte bathymétrique générée par le MIKE.....	65
Figure 46 : Roses de houles à l'échelle saisonnière et annuelle (era5, 1992/2019).	67
Figure 47 : Représentation de la propagation des houles de secteur NE.....	70
Figure 48: Représentation du champ du courants induit par les houles de secteur NE..	70
Figure 49 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NE.	70

Liste des figures

Figure 50 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).	70
Figure 51 : Représentation de la propagation des houles de secteur NNE.	71
Figure 52 : Représentation du champ du courant induit par les houles de secteur NNE.	71
Figure 53 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NNE.	71
Figure 54 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).	71
Figure 55 : Représentation de la propagation des houles de secteur NW.	72
Figure 56 : Représentation du courant induit par les houles de secteur NW.	72
Figure 57 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NW.	72
Figure 58 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).	72
Figure 59 : Organigramme représentatif des étapes de réalisation de cette étude.	75
Figure 60: Les principales éléments constituant un DGPS.	76
Figure 61 : Principe de fonctionnement d'un DGPS.	78
Figure 62 : Nuage de points du levé topographique 2014.	80
Figure 63 : Nuage de points du levé topographique 2017.	80
Figure 64 : Nuage de points du levé topographique 2020.	80
Figure 65 : Mesures topographiques effectuées dans la partie sous-marine (El Kadous, 2014).	81
Figure 66: La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2014.	82
Figure 67 : La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2017.	82
Figure 68: La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2020.	83
Figure 69 : La délimitation du polygone commun.	84
Figure 70: Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2014.	85
Figure 71 : Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2017.	86
Figure 72 : Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2020.	87
Figure 73 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2014.	
Figure 74 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2017.	89
Figure 75 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2020.	89
Figure 76 : Cartes comparatives des courbes de niveau de 3m, 4m, 5m, 6m et de 7m. .	90
Figure 77 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2014 et 2017. .	92

Liste des figures

Figure 78 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2017 et 2020..	92
Figure 79 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2014 et 2020..	92
Figure 80: La route Ain Taya - El Kadous.	93
Figure 81 : Corrélogramme entre l'évolution du cordon dunaire et celle du trait de côte.	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indicateurs (ou descripteurs) de la typologie des dunes (PETIT-BERGHEM, 2012)..... 10

Tableau 2 : Techniques de contrôle de la mobilité des dunes littorales (OUESLATI, 2017)..... 13

Tableau 3 : Données d'entrée pour le calcul du quotient pluviométrique d'EMBRGER. 18

Tableau 4 : Tableau représentatif des caractéristiques principales des plages. 26

Tableau 5 : Tableau représentatif des pourcentages des différents niveaux d'occupation du sol sur les quatre bandes littorales. 32

Tableau 6 : Inventaire des données extraites à partir des photographies aériennes et de DGPS..... 41

Tableau 7: Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres EPR et LRR..... 44

Tableau 8 : Tableau représentatif des principales caractéristiques des deux bases de données bathymétriques (2017 et 2020)..... 55

Tableau 9 : Tableau représentant les caractéristiques des houles choisies..... 66

Tableau 10: Tableau représentatif des différents objectifs d'un levé topographique à partir d'un DGPS. (HUBERT et BERTRAND, 2004). 77

Tableau 11 : Tableau comparatif des principales caractéristiques des levés topographiques réalisés. 79

Tableau 12 : Tableau représentatif des surfaces de chaque polygone délimitant les courbes de niveau pour les trois levés topographiques. 88

Tableau 13 : Tableau comparatif des volumes de sable pour chaque levé topographique. 91

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES

APPL	Agence de P romotion et de P rotection du L ittoral
CNL	Commissariat National du L ittoral
DGPS	D ifferential G lobal P ositioning S ystem
DHI	Institut H ydraulique D anois
GIZC	G estion I ntégré des Z ones C ôtières
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystem
GSM	G lobal S ystem for M obile C ommunications
HD	H ydrodynamic M odel
Hs	H auteur S ignificatives
LEM	Laboratoire des E tudes M aritimes
MNE	M odèle N umérique d'elevation
MNS	M odèle N umérique de S urface
MNT	M odèle N umérique du T errain
ONM	O ffice N ationale de M étéorologie
PPK	P ost P rocessing K inematic
RPG	R éseau G éodésique P ermanent
RTK	R éal T ime K inematic
SCG	S ystème de C oordonnée G éographique
SIG	S ystème d' I nformation G éographique
ST	S and T ransport M odel
SW	S pectral W aves M odel
TC	T rait de C ôte
TIN	T riangular I rrregular N etworks
USGS	U nited S tates G eological S urvey

INTRODUCTION GENARALE

D'après PASKOFF, (1992) : « Les systèmes littoraux constituent des environnements fragiles dans lesquels se manifestent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes», qui sont caractérisés généralement par les notions d'aléas de submersion et d'érosion littorale (MALLET et MICHOT, 2012). Ces dernières affectent principalement les côtes basses et en particulier les littoraux dunaires (DEBOUDT, 1997).

Les systèmes dunaires sont des écosystèmes terrestres situés dans la transition entre le milieu continental et marin, qui répondent à un certain nombre de fonctions uniques telles que la protection du littoral grâce à leur capacité d'amortissement face aux tempêtes et leur rôle de prévention des risques d'inondation (LEY DE LA VEGA DE SEOANE et al., 2012).

Elles constituent un des éléments fondamentaux de la dynamique des systèmes côtiers sableux. Leur stabilité dépend essentiellement de leur capacité à résister aux effets des tempêtes et à se reconstituer après l'érosion ; Elles constituent de plus de bons indicateurs, sur le terrain, de l'équilibre dynamique de la plage. La présence de dunes embryonnaires ou d'une dune bordière en formation reflètent souvent un bilan sédimentaire positif alors que l'absence de la dune bordière ou la présence d'une falaise dunaire indiquent un recul du rivage (ZEMMOUR, 2019).

Les dunes côtières, à l'échelle de la planète, subissent en permanence des pressions d'origine naturelle ou anthropique. La mise en évidence de l'action de ces forçages est difficile car ces milieux sont naturellement très dynamiques. Les modifications morphosédimentaires sont le résultat d'interactions complexes entre la topographie, le couvert végétal et les processus éoliens et hydrauliques (HESP, 2002 ; ANDREWS et al., 2002 ; VALLEJO et al., 2006 auxquelles s'ajoute l'action anthropique (PYE, 1990) in (YAHYAOUÏ et al., 2014).

De ce fait, la compréhension de la mobilité actuelle des littoraux dunaires, particulièrement leur érosion, est devenue une préoccupation commune des géomorphologues et des gestionnaires des espaces côtiers dans le monde entier (HENAFF et al., 2015).

L'Algérie ne fait pas exception à cette tendance (BOUHAMADOUCHE, 1993). Sa capitale « Alger » connaît un fort attrait socioéconomique (BELHAI-BENAZZOUZ et DJELAL, 2010). Son évolution en aire métropolitaine (plus de 6 millions d'habitants (Population data, 2015), engendre une plus forte pression sur l'espace et les ressources, qui se traduit par des impacts plus conséquents sur le milieu littoral. Les littoraux dunaires, se situant au centre et à l'Est de la baie d'Alger, sont les plus sujets à une érosion continue ces dernières années (OTMANI et al., 2019). Ce travail s'intéresse à l'étude des tendances d'évolution du cordon dunaire d'El Kadous qui se situe à l'Est de la baie d'Alger.

Cette étude est fondée sur une analyse diachronique de l'évolution du cordon dunaire d'El Kadous en utilisant des données de haute résolution issues des mesures topographiques à l'aide de DGPS.

Cela constitue une contribution à la thématique de la vulnérabilité des littoraux dunaires face aux aléas naturels en introduisant une nouvelle méthode de suivi de leur évolution en Algérie.

L'objectif de ce travail est de fournir une information fiable et facilement accessible sur la dynamique et la cinématique annuelle du cordon dunaire d'El Kadous afin d'intégrer les spécificités de cette unité géomorphologique dans la politique de planification et de protection du littoral.

La démarche adoptée pour la réalisation de cette étude s'appuie sur plusieurs approches réparties en quatre chapitres :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Ce chapitre représente une revue bibliographique synthétique des notions de base nécessaires pour la bonne compréhension de la thématique étudiée.

Chapitre II : Diagnostic Général

Une approche générale qui permet de mettre le cordon dunaire d'EL Kadous dans son cadre régional (climatique, géomorphologique, hydrologique et anthropique). Ceci permettra de comprendre les mécanismes de leur évolution et les causes de leur dégradation.

Chapitre III : Diagnostic de détail

Ce chapitre permet de mettre le cordon dunaire d'El Kadous dans son contexte global en considérant les échanges permanents, sur le plan bathymétrique et hydrosédimentaire, qui se font au sein d'une même cellule sédimentaire incluant la zone d'étude. Ces interactions influent ainsi sur l'évolution du trait de côte adjacent.

Chapitre IV: Etude de l'évolution surfacique et volumétrique

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'évolution surfacique et volumétrique du cordon dunaire d'El Kadous en s'appuyant sur une approche numérique et topographique qui consiste à la reconstitution des dunes bordières en utilisant des Modèles Numériques de Terrain (MNT) générés à partir de levés topographiques réalisés par un DGPS. Ce chapitre a également pour but de déterminer, selon la disponibilité des données, les relations de dépendance entre l'évolution de la dune et les autres facteurs du milieu ambiant.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. SYSTEME DUNAIRE

Une dune est un milieu dynamique sujet à des échanges sédimentaires permanents avec la plage. Elle résulte de l'accumulation par le vent de sable apporté par la mer, constituant un bourrelet rectiligne parallèle au rivage (PASKOFF, 2010).

Elle présente un profil transversal dissymétrique avec une pente douce du côté du vent et une pente plus raide du côté terre. La dune bordière délimite le haut de la plage par un bourrelet sableux de un à quelques mètres de haut. Sa base correspond à la haute mer et peut être endommagée lors des tempêtes. En arrière de ce premier cordon se développe un champ de dunes montrant des formes différentes : dunes alignées, dunes paraboliques, dunes en râteau... plus ou moins fixées par la végétation (MICHEL, 2010).

Selon la **loi littorale 02-02**, relative à la protection et à la valorisation du littoral et en référence à l'article 2, le cordon dunaire est défini comme une langue de sable formée (dans un golfe ou une baie) de débris déposés par un courant côtier et sur laquelle peut se développer une végétation spécifique.

2. MORPHOLOGIE D'UN SYSTEME DUNAIRE

Le système dunaire peut être décomposé en plusieurs unités paysagères qui se succèdent selon des bandes plus ou moins parallèles au rivage, pouvant aller de plusieurs dizaines à quelques centaines de mètres ; caractérisée chacune par des conditions écologiques particulières (le régime du vent, la salinité, la quantité de sédiments. Etc.), où des végétations/formes spécifiques à chaque bande évoluent (BOUNOUA et KACI, 2017).

De la plage vers l'intérieur de la terre, ces bandes correspondent à (Figure 1) :

- **La dune embryonnaire** : peu élevée, est formée de sable fixé sur l'accumulation de débris naturels apportés par la marée (les laisses de mer).
- **La dune blanche ou la dune mobile** : alimentée par le sable de la dune embryonnaire, constitue la partie la plus élevée du massif. Elle est constamment remodelée par les vents et colonisée par la végétation.
- **La dune fixe** : accueille une végétation rase protégée du sel par la dune blanche. On l'appelle également la dune grise à cause des lichens et des mousses qui la recouvrent, mais aussi parce que le sable y est plus riche en humus. Elle est particulièrement sensible au piétinement.
- **La dune à fourrés et la dune boisée** : protègent le massif dunaire du vent de terre et limite l'érosion du sable vers la mer (GEOCACHIN, 2020).

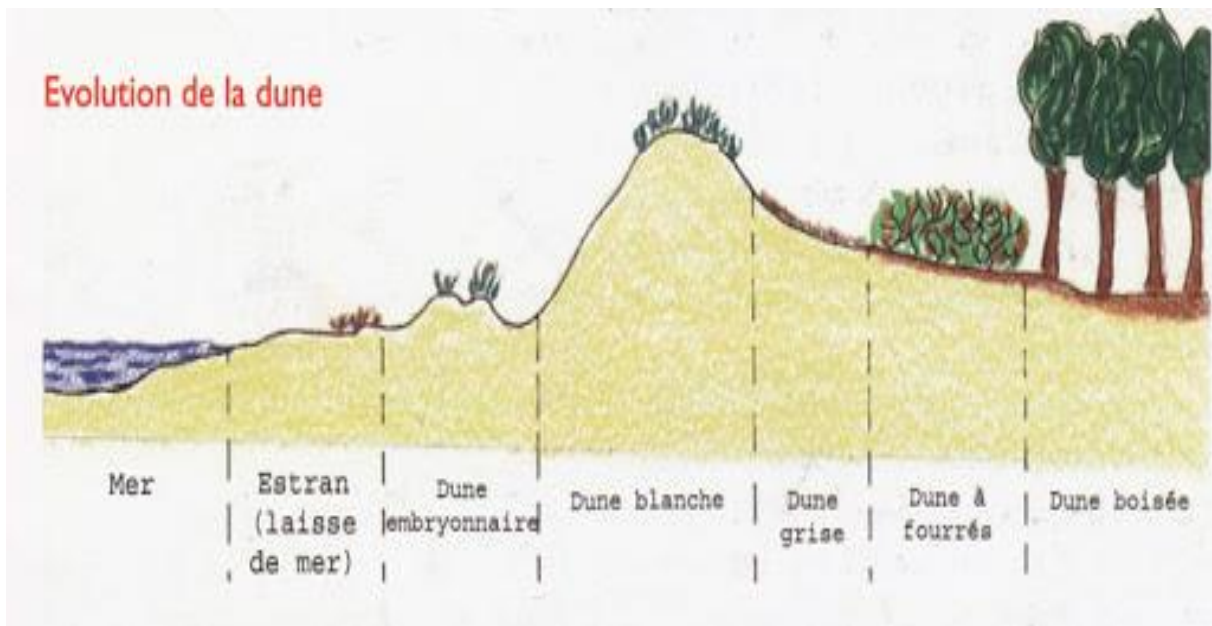


Figure 1 : Profil théorique d'organisation spatiale d'un système dunaire.

(<http://www.mincoin.com/php1/evolution-de-la-dune.php>).

3. FACTEURS DETERMINANTS LA MORPHOLOGIE D'UN SYSTEME DUNAIRE

Les facteurs qui déterminent le type, l'organisation, la taille et l'espacement des dunes sont les suivants :

➤ Nature des sables, notamment taille et classement

La granulométrie des dunes est souvent semblable à celle de la plage, généralement avec une plus forte proportion des fractions fines du fait que le vent sélectionne les grains plus fins. Cependant, les vents intenses peuvent transporter presque la totalité des classes granulométriques, les grains de taille moyenne de la plage, source de sédiments, et de la dune réceptrice sont alors semblables.

➤ Régime de vents et orientation de la plage par rapport à ceux-ci

Les vents dominants exercent une influence plus marquée sur l'emplacement du sédiment dans les champs dunaires, leur efficacité est maximale lorsque la direction du flux résultant est perpendiculaire à la limite plage-dune. En outre, chaque composante du vent, en fonction de son intensité et direction, a tendance à générer une typologie géométrique de dune déterminée.

➤ Apports de sable au système dunaire

La disponibilité d'un volume sableux excédentaire le long de la côte et plus particulièrement sur la plage est une condition indispensable pour la formation d'un champ dunaire.

➤ Couvert végétal

La présence de végétation réduit le transport sédimentaire du fait qu'elle augmente la rugosité de la surface, ce qui réduit le flux de vent sur celle-ci. Elle intercepte les grains en saltation et agit

comme une surface molle qui absorbe une grande quantité d'énergie, favorisant ainsi la sédimentation

➤ **Topographie de la zone terrestre adjacente à la plage**

Le développement des dunes bordières requiert une plage suffisamment large pour permettre l'existence des dunes (POSIDUNE., 2007).

➤ **Niveau de la nappe phréatique**

Le niveau de la nappe phréatique, qui a tendance à se situer à faible profondeur dans ces zones, conditionne la fixation du sédiment sableux et sa participation au développement de certains types de dunes (LEY DE LA VEGA DE SEOANE et al., 2012).

4. PROCESSUS DE FORMATION D'UN SYSTEME DUNAIRE

Les sables des plages et des dunes proviennent, dans la plupart des cas, des produits de l'érosion des terres apportés par les fleuves qui débouchent à la mer. Au niveau de la côte, la fraction la plus fine en suspension est transportée vers la pleine mer et se dépose lentement dans le fond marin, alors que la fraction sableuse est triée, transportée et déposée sur l'avant plage puis sur la plage par les différents agents hydrodynamiques. L'augmentation des températures pendant la journée provoque un assèchement de sédiments sur la plage. Ce phénomène facilite le transport éolien des grains de sable qui se déplacent par saltation (BOUAKLINE, 2009).

A marée haute, la mer ramène avec elle une quantité de matière qu'elle dépose en haut de la plage. Ces laisses de mer accumulés tout au long de la ligne de rivage fournissent des sources de nutriments, d'humidité et d'abris qui favorisent la croissance de la végétation.

Les grains de sable qui se déplacent par saltation sont interceptés par la structure aérienne de la végétation et commencent à s'accumuler en formant des petits monticules qui grandissent au fur et à mesure que grandit la plante sur laquelle ils se forment.

Si la végétation est abondante, les monticules qui se sont formés s'unissent pendant leur croissance et forment une petite dune de 50 à 100 cm de hauteur, dénommée dune embryonnaire (stade natif de l'avant-dune) (Figure 2).

Si la couverture végétale est faible, le degré de développement de la dune embryonnaire sera inférieur, donc aucun cordon linéaire continu ne se formera, mais une zone de monticules isolés ou nebkas (ou encore shadow dune) se forme.

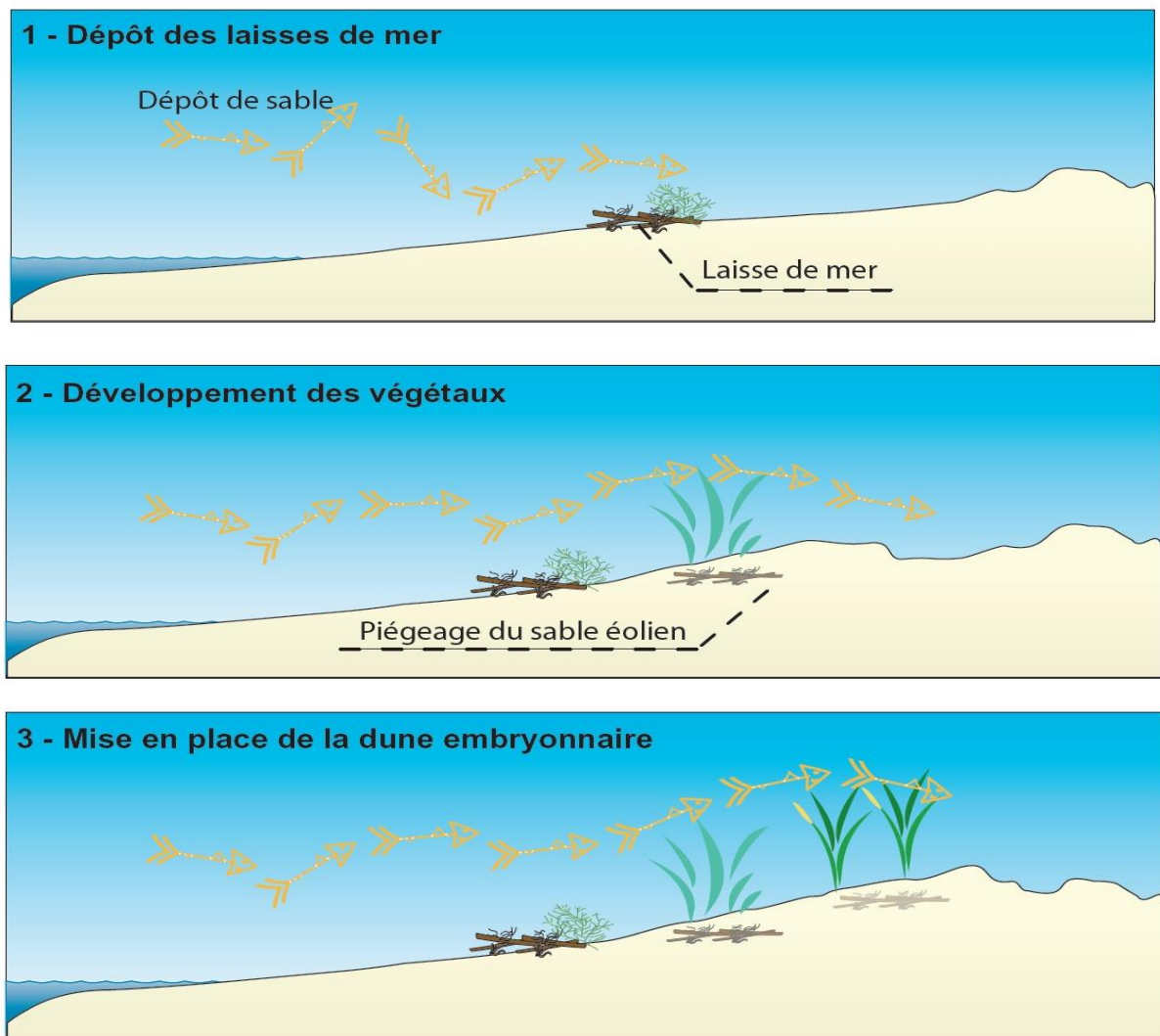


Figure 2 : Processus de formation des dunes embryonnaires.

(<http://cotedegranitrose-septiles.n2000.fr/participer/connaitre-les-bonnes-pratiques/plages-gestion-des-laisses-de-mer/laisses-de-mer-et>).

La formation de la dune côtière continuera jusqu'à ce que le secteur de la côte cesse d'être progradant, ou qu'une nouvelle dune embryonnaire commence à se former.

Dans les deux cas, l'apport de sable à la dune diminue, et le cordon dunaire cesse de croître à la fois en hauteur et en largeur. Dans le cas où une nouvelle dune embryonnaire apparaît, il se produit une succession de cordons dunaires qui sont séparés par des dépressions. Cette succession, caractéristique de nombreux systèmes dunaires côtiers reflète la chronoséquence de leur formation (LEY DE LA VEGA DE SEOANE et al., 2012) (Figure 3).

Au bout de quelques mois, la dune mobile succède à la dune embryonnaire depuis la plage vers l'intérieur des terres. La dune mobile est caractérisée par une végétation essentiellement constituée d'oyats.

En arrière de la dune mobile, des plantations de pins sont souvent réalisées et de nouvelles communautés végétales s'installent et fixent la dune qui évolue en dune semi-fixée ou fixée (ECOLE DU LITTORAL SAINT BREVIN, 2018).

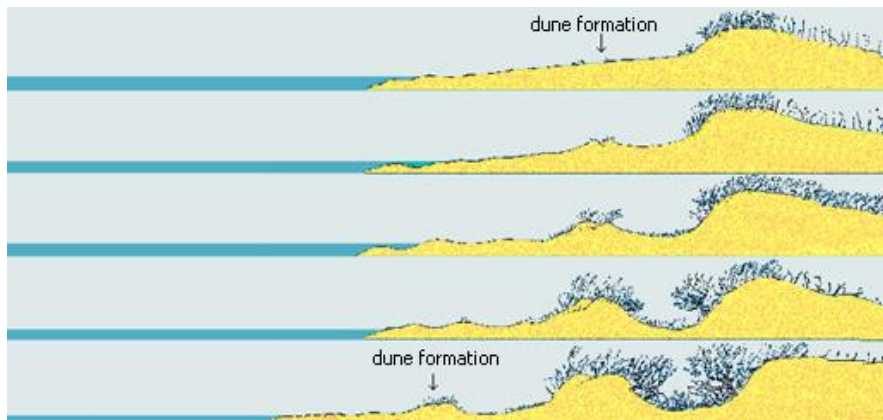


Figure 3 : Processus de formation d'un système dunaire.

(<https://imgproxy.geocaching.com>).

Le bilan sédimentaire des plages conditionne le développement des systèmes dunaires côtiers, et permet de déterminer si le système est stable, en progression, ou en régression (Figure 4) (LEY DE LA VEGA DE SEOANE et al., 2012).

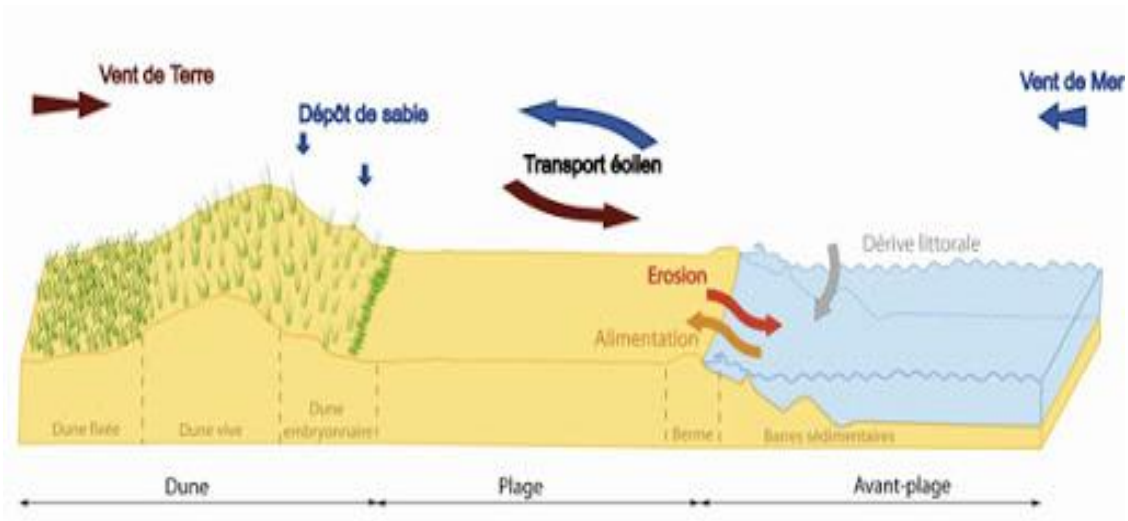


Figure 4 : Coupe schématique d'un système littoral sableux.

(<http://www.eid-med.org/Littoral/connaissances> (accessed 9.30.20))

5. LES DIFFERENTS TYPES DES DUNES

Les différents types de dunes sont classés selon plusieurs indicateurs caractérisés par une coloration avec un taux de saturation (clair, moyen, foncé) proportionnel à l'intensité de l'action (ou du processus). Ces types sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Indicateurs (ou descripteurs) de la typologie des dunes (PETIT-BERGHEM, 2012).

Type	Indicateurs						
	Position	Dimension	Action de la mer	Action du vent	Couvert végétal	Interférence humaine	Dynamique évolutive
Dune pionnière	Plage	Métrique	Importante, surtout en hiver et lors des tempêtes ou des marées de vives eaux	Importante	Faible, plantes pionnières halomicrophiles	Epis, nettoyage des plages	Forte, stabilité précaire
Avant-dune	Haut de plage, bourrelet parallèle au rivage	Déca à hectométrique	Variable	Moyenne, les touffes de végétation forment des obstacles à la déflation	Espèces pionnières psammophiles	Piétinement, enrochement, palissades	Moyenne, extension si large estran et budget sédimentaire positif des plages
Falaise dunaire	En arrière de la plage car forme de remaniement d'une dune ancienne	Métrique à décamétrique	Importante car à l'origine de l'escarpement	Moyenne à forte car plantes pouvant être déchaussées	Couvert non continu pouvant contenir une flore variée (végétation d'avant dune, de pelouse sous laquelle un sol a pu se développer)	piétinement	Forte, recul rapide de son pied sous l'action de la mer, glissements sous l'action de l'eau pluviale ou du piétinement, éolisation par période de beaux temps
Dune perchée	Au sommet d'un escarpement sableux	Déca à hectométrique	Faible, plus forte si démantèlement de la falaise	Forte, entraînement de sable à partir de l'estran et au sommet de l'escarpement sableux	Plantes très variées adaptées au saupoudrage de sable	Piétinement, déchaussement (piétons, VTT, Quad)	Moyenne, liée à la stabilité de la falaise qui la précède et de la continuité du couvert végétal
Cordon dunaire artificiel	En arrière de la plage	Décamétrique (dune recalibrée)	Moyenne à forte action brutale car profil de la dune « contre nature » et inadapté à la dynamique littorale	Forte prise au vent, action moyenne à forte si absence d'entretien et de végétalisation	Couvert végétal plus ou moins continu lié à des opérations de génie écologiques	Forte dès l'origine	Forte, disparition pouvant être rapide (moins de 20 ans) en cas de manque d'entretien ou de budget sédimentaire des plages négatif, fragilité intrinsèque liée à son caractère artificiel
Dune mobile libre	Dune transversale en arrière du rivage (absence de contact avec la plage)	Déca à hectométrique	Faible sauf si démantèlement du système dunaire (incursion de la mer)	Moyenne à forte, en relation avec la continuité du couvert végétal et l'intensité de la fréquentation	Couvert végétal discontinu principalement herbacé	Forte, liée à la fréquentation (cheminement, brèches)	Forte, en raison de son caractère mobile
Dune mobile entravée	Dune transversale à l'arrière du rivage (pouvant être en contact avec des terres de culture ou des marais)	Déca à hectométrique	Faible sauf si démantèlement du système dunaire (incursion de la mer)	Faible à moyenne, en relation avec la continuité du couvert végétal, sa hauteur et sa densité	Dune couverte par des plantes herbacées et / ou ligneuses (arbustes, arbres)	Faible, à moyenne (couvert végétal parfois impénétrable)	Faible, en l'absence d'interventions anthropiques
Dépression dunaire humide ou asséchée	En arrière du rivage	Déca à hectométrique	Faible à moyenne	Faible à moyenne reprise éolienne possible si couvert végétal dégradé	Plantes des milieux humides, variété floristique liée à un gradient d'humidité dynamique arbustive sur le pourtour	Faible, à moyenne Fauche, débroussaillage lorsque des fourrés s'installent	Moyenne, fermeture possible avec assèchement

6. ROLES DES DUNES LITTORALES

La plage et les dunes constituent un ensemble sédimentaire en équilibre dynamique qui est soumis à deux types de mouvements perpendiculaires ou parallèles à la côte dont les moteurs sont la houle dans la zone immergée et le vent dans la zone émergée, et qui se produit pendant des cycles périodiques, le plus important étant le cycle annuel.

Lors des tempêtes, la houle érode la plage et la dune, en transportant le sable vers la mer et le déposant dans une barre sableuse proche de la côte. Cette barre formée par les tempêtes joue un rôle protecteur important, elle provoque le déferlement des vagues avant qu'elles n'arrivent à la plage, réduisant ainsi leur action destructive.

Pendant les périodes de calme, la houle de beau temps (moins haute et moins cambrée) fait remonter le sable lentement, de la barre à la haute-plage. Depuis cette zone, le vent transporte le sable vers la dune où il est retenu par une végétation caractéristique. Au cours de ce cycle annuel, la période destructive se produit en peu de temps, quelques jours par an, alors que la période constructive peut être de plusieurs mois (Figure 5) (LEY DE LA VEGA DE SEOANE et al., 2012).

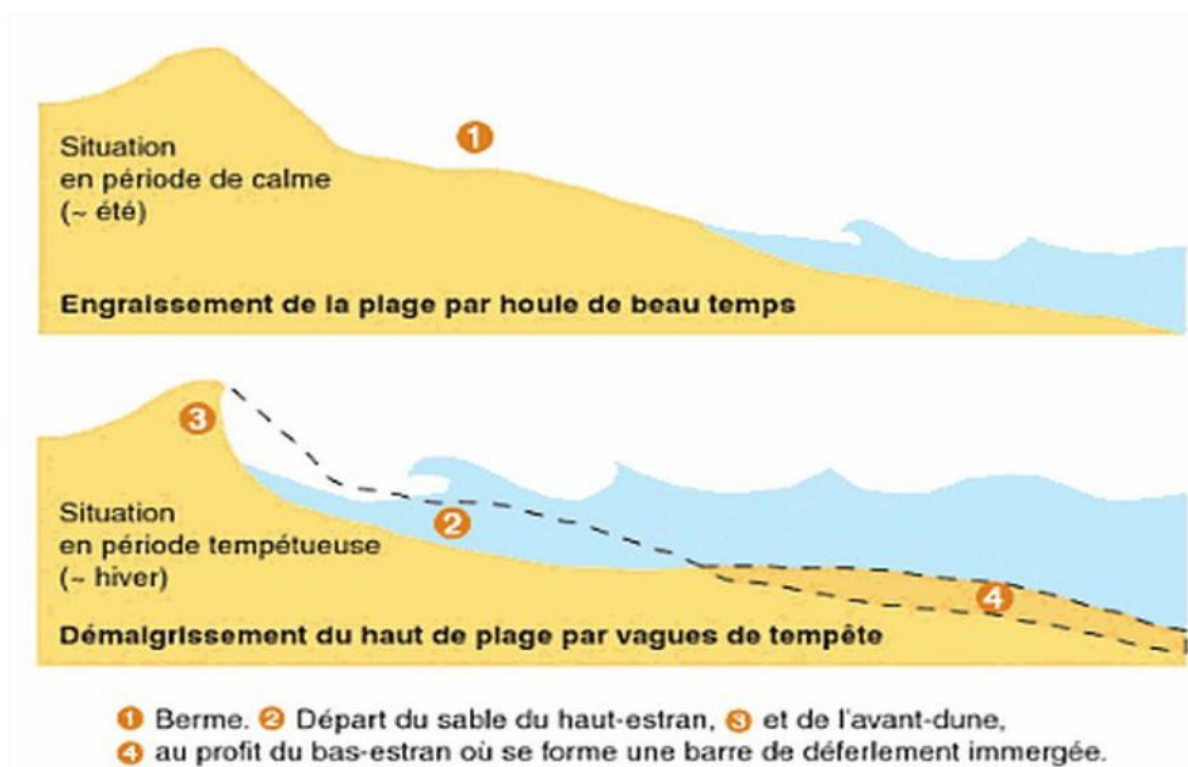


Figure 5 : Variations saisonnières du profil de la plage.

(https://www.oceanmaraisdemonts.fr/var/oceanmaraisdemonts/storage/images/mediatheque/la-communaute-de-communes/preserver-l-environnement/milieux-naturels/littoral/variations-saisonnieres-dune/601030-1-fre-FR/Variations-saisonnieres-dune_large.jpg).

En plus de leur fonction de protection, le système dunaire représente aussi une fonction écologique (un habitat pour de nombreuses espèces végétales et animales) et une fonction esthétique, spirituelle et récréative qui est liée à un lieu de repos. La conservation des systèmes de plage-dune reste essentielle pour le maintien des activités socio-économiques liées au secteur touristique (PASKOFF, 1998 ; BOUNOUA et KACI, 2017).

7. FRAGILITE DES DUNES LITTORALES

Les systèmes dunaires sont soumis aux aléas naturels du territoire dans lequel ils s'inscrivent. Il s'agit principalement de l'érosion du trait de côte, de l'ensablement ou de la submersion marine, liés aux événements météorologiques (tempête, cyclone, forte dépression et vent de mer) ou océanographiques (houle, marée, tsunami) d'ampleurs très inhabituelles.

A l'heure où les effets du changement global se font sentir, où les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) montrent que l'érosion des côtes se fera plus rapide, les submersions et les tempêtes sont de plus en plus fréquentes. Les dunes littorales, jouent un véritable piège à sable naturels, méritent une attention accrue (ONF, 2019).

Par ailleurs, la pression anthropique favorise et amplifie cette dégradation. Quelques études ont montré que l'urbanisation et l'industrialisation des agglomérations côtières, de même que l'intensification de la fréquentation touristique des massifs dunaires, contribuent à accélérer les processus d'érosion des dunes (BACCUS et HORTON, 1980 ; GARES, 1983 ; NORDSTROM et MCCLUSKEY, 1985).

Les gestionnaires devront donc faire preuve de beaucoup d'observation et de pragmatisme pour maintenir la succession la plus complète des habitats dunaires, en suivant les évolutions des milieux naturels, et aussi d'humilité en acceptant parfois de perdre temporairement des faciès durant la translation inéluctable des cordons littoraux (ONF, 2019).

8. GESTION DES DUNES LITTORALES

L'objectif de cette gestion est de permettre à la dune de répondre aux fonctions que l'homme en attend. « Gérer les dunes, c'est assurer la pérennité des services que peut rendre à la société un milieu original, mais fragile » (PINOT, 1998).

Les principales techniques de contrôle de la mobilité des dunes sont la pose de rideaux brise-vent, la plantation de végétaux, le recouvrement par des branchages végétaux, le reprofilage et le rechargement de la dune, et la canalisation de la fréquentation (Tableau 2). Mais tout d'abord, il faut sensibiliser les usagers à l'érosion côtière et à la gestion des espaces dunaires (panneaux

d'interdiction ou réglementaires, panneaux d'information ou outils pédagogiques (OUESLATI, 2017).

Tableau 2 : Techniques de contrôle de la mobilité des dunes littorales (OUESLATI, 2017).

Techniques	Caractéristiques
Rideaux « Brise-vents »	<ul style="list-style-type: none"> • Canaliser la fréquentation touristique ; • Retenir le sable éolien ; • Renforcer le volume des dunes par piégeage éolien.
La plantation de végétaux	<ul style="list-style-type: none"> • Fixer le sable en place et favoriser le développement dunaire par piégeage du sable en conservant les caractéristiques naturelles de la dune ; • Offrir un substrat favorable à la reprise d'une végétation naturelle. • Réaliser des semis ou plantations d'espèces prélevées sur site et adaptées au milieu, en début d'année avant le printemps. • Raisonner le nettoyage des plages : les laisses de mer sont propices au développement de dunes embryonnaires.
Le reprofilage et le rechargement de la dune	<ul style="list-style-type: none"> • Écrêter les dunes fortement érodées : pour réduire les prises au vent et limiter les risques d'effondrement de falaise sableuse. • Reconstituer les dunes par rechargement de sable en cas de risque de submersion (déposer les sédiments d'apport en haut de plage, sur les versants maritimes ou terrestres de la dune) ; • Prévoir des dispositifs complémentaires pour retenir et accumuler le sable et canaliser la fréquentation.
La canalisation de la fréquentation	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en place des chemins d'accès bien encadrés et une signalétique de guidage pour limiter le piétinement sur les dunes (clôtures à fils, grillagées, ganivelles) ; • Renforcer les chemins sensibles à l'érosion par un revêtement adapté (géotextile, caillebotis mobiles, matériel végétal adapté au site...).

CHAPITRE II : DIAGNOSTIC GENERAL

1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Du point de vue administratif, la zone d'étude fait partie de la commune de Heraoua appartenant à la Wilaya d'Alger, qui se situe au centre de la côte algérienne. Elle est localisée à 30Km à l'Est du chef-lieu et à 14km de la ville de Boumerdes. Du point de vue géomorphologique, elle fait partie du secteur Ouest de la baie de Zemmouri.

La zone d'étude est délimitée par la mer Méditerranée au Nord, le lac Réghaia au Sud, l'Oued Réghaia qui traverse la plage de Réghaia à l'Est et les falaises de Surcouf (Ain Taya) à l'Ouest.

Elle est comprise entre : les longitudes $3^{\circ} 18' 30''$ et $3^{\circ} 21' 30''$ Est, et les latitudes $36^{\circ} 45'$ et $36^{\circ} 48'$ Nord (Figure 6).

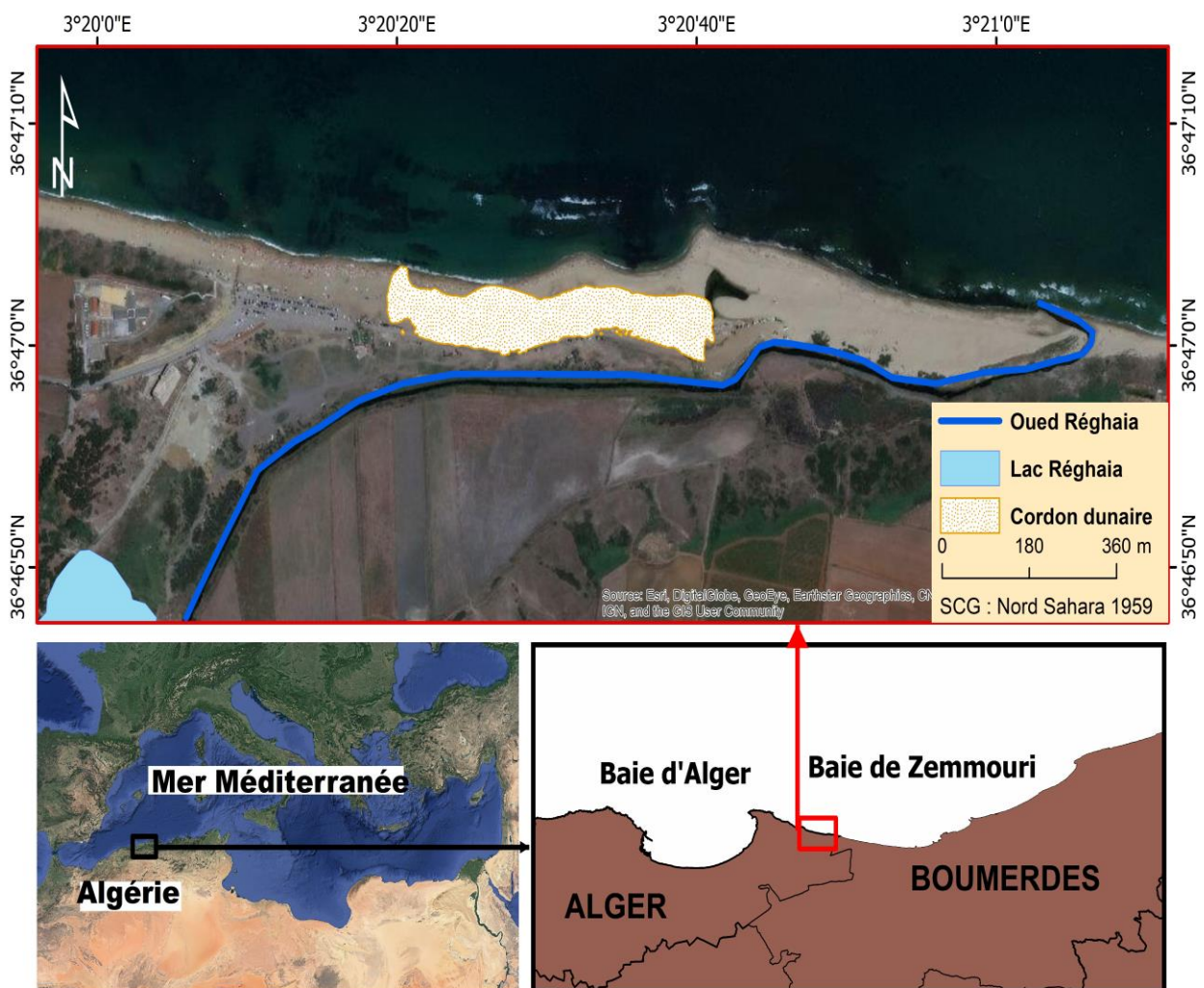


Figure 6 : Situation géographique de la zone d'étude.
(Fond de carte, téléchargé à partir de Google Earth Pro, 2020).

2. ETUDE CLIMATIQUE

Le climat est le facteur décisif du milieu, il contribue à l'accélération des processus d'érosion et d'engraissement des plages et joue un rôle important dans l'évolution morphologique de la côte (KERMANI, 2016).

Il se définit par l'action combinée de plusieurs facteurs : la température, les précipitations, le vent, Etc. Il varie en fonction du relief (altitude) et l'éloignement par rapport à la mer (ADEM, 2014).

L'étude de la variation des paramètres climatologiques s'est basée sur l'analyse des données climatologiques relevées à partir de la base de données du site « Réelle prévision, rp5.ru » qui offre des mesures chaque 3h de 1h à 22h sur une grande période allant de 2009 à 2019 regroupant 30552 observations. Le point d'extraction des données est au niveau de la station la plus proche du site d'étude située à Dar El-Beida.

2.1. LES PRECIPITATIONS ET LES TEMPERATURES

2.1.1. VARIATIONS ANNUELLES

Les taux des précipitations annuelles diffèrent d'une année à une autre. Le bilan global effectué fait ressortir que la zone d'étude a connu des années de sécheresse allant de 2014 à 2017 où les précipitations ont dépassé légèrement les 300mm/an tandis que la température a atteint une valeur moyenne maximale de 18,64°C. Après 2017, la zone a vécu la période la plus pluvieuse sur la période étudiée (allant de 2009 à 2019), durant laquelle la pluviométrie a dépassé les 1000mm en 2018 avec une température moyenne de 17,9°C (Figure 7).

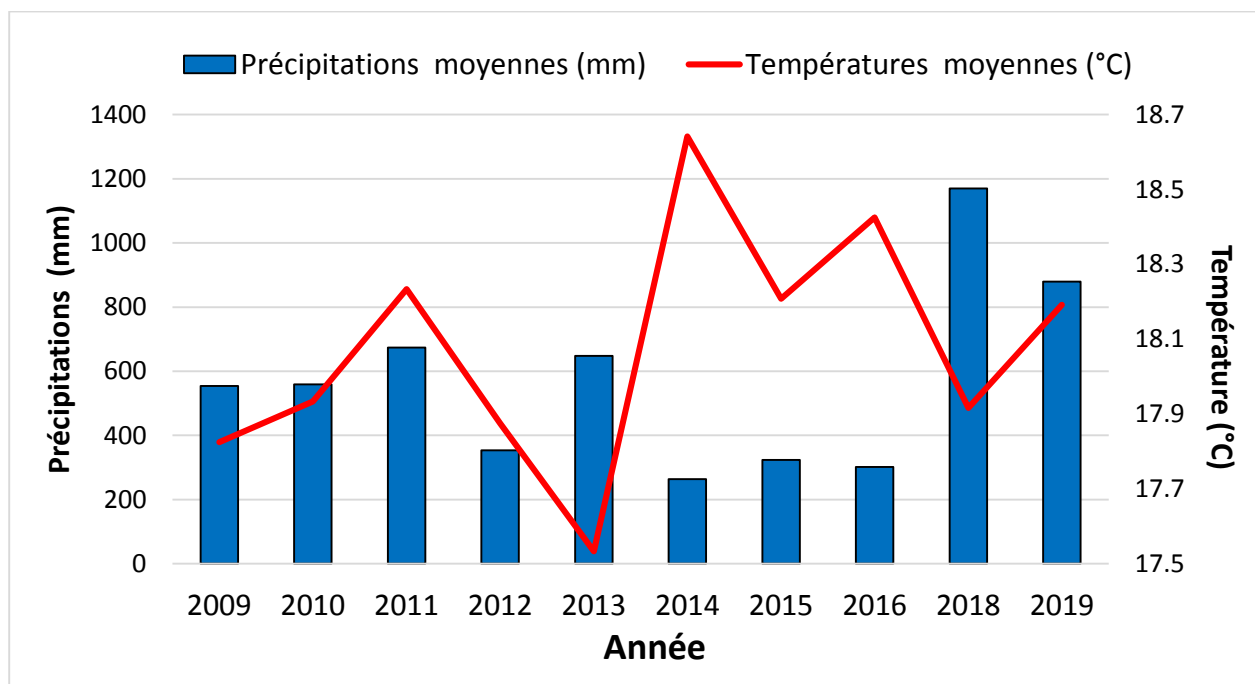


Figure 7 : Les variations annuelles des températures et des précipitations (rp5.ru, 2009/2019).

2.1.2. VARIATIONS MENSUELLES

L'analyse des fluctuations climatiques mensuelles fait ressortir que les mois de Novembre à Avril, représentent les mois les plus froids de l'année avec des températures moyennes douces variant entre 11 et 18°C. Ces mois sont caractérisés par une pluviométrie importante qui a atteint un maximum de 95,11mm pendant le mois de décembre.

Par contre, une augmentation importante des températures durant les mois les plus chauds, correspondante au reste des mois de l'année où les températures moyennes peuvent atteindre 26,2°C, est associée à une disparition quasi totale des précipitations (Figure 8) (voir Annexe 1).

Cela signifie que la zone se caractérise par une saison hivernale de six mois, allant de mi-Octobre à mi-Avril, douce et humide, et une saison chaude et sèche de six mois qui s'étale sur le reste des mois de l'année correspondant à la période estivale.

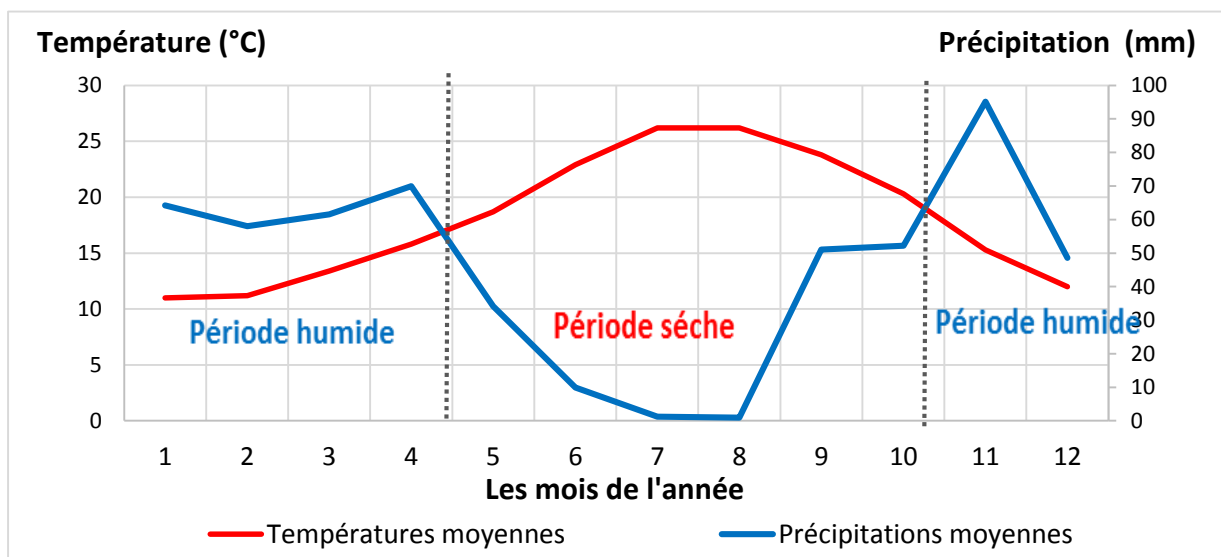


Figure 8 : Diagramme Ombrothermique (rp5.ru, 2009/2019).

2.1.3. LE CLIMAGRAMME D'EMBERGER

Le climagramme d'EMBERGER permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée, grâce au calcul d'un quotient pluviométrique qui est donné par la formule suivante élaborée par STEWART pour l'Algérie et le Maroc (STEWART, 1968) :

$$Q2 = 3,43 * P / (M-m)$$

- P: Pluviométrie annuelle moyenne en mm.
- M: Moyenne maximale du mois le plus chaud en °C.
- m: Moyenne minimale du mois le plus froid en °C.

La valeur du quotient pluviométrique d'EMBERGER Q_2 est égale à **63,47** (Tableau 3). Suivant le climagramme d'EMBERGER (Figure 9), la zone d'étude est située à la limite des climats subhumide tempéré et semi-aride tempéré.

Tableau 3 : Données d'entrée pour le calcul du quotient pluviométrique d'EMBERGER.

Variable	P	M	m	Q2
Valeur	546,87 mm	34,98°C	5,43°C	63,47

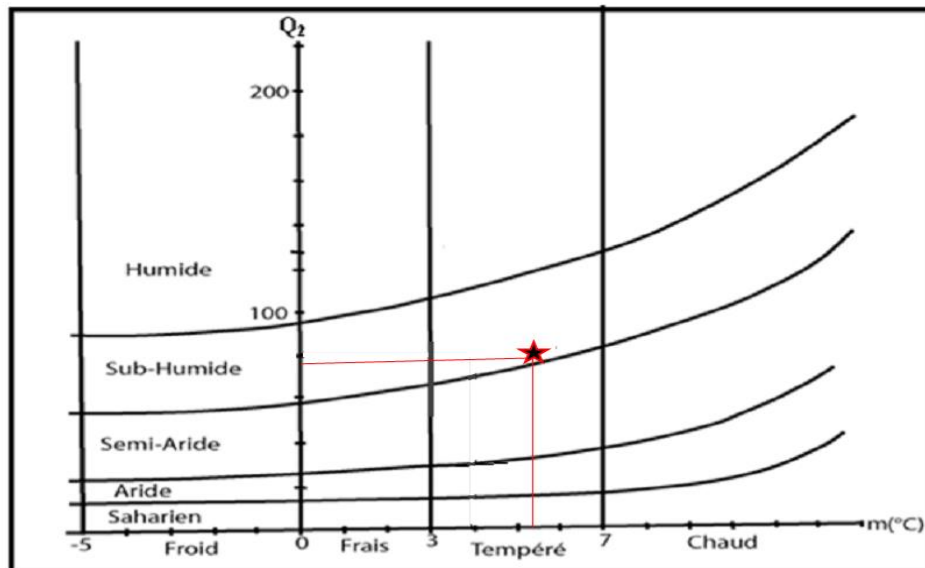


Figure 9 : La position de la zone d'étude dans le climagramme d'EMBERGER. (ABBAS et OUNOUH, 2009), modifié.

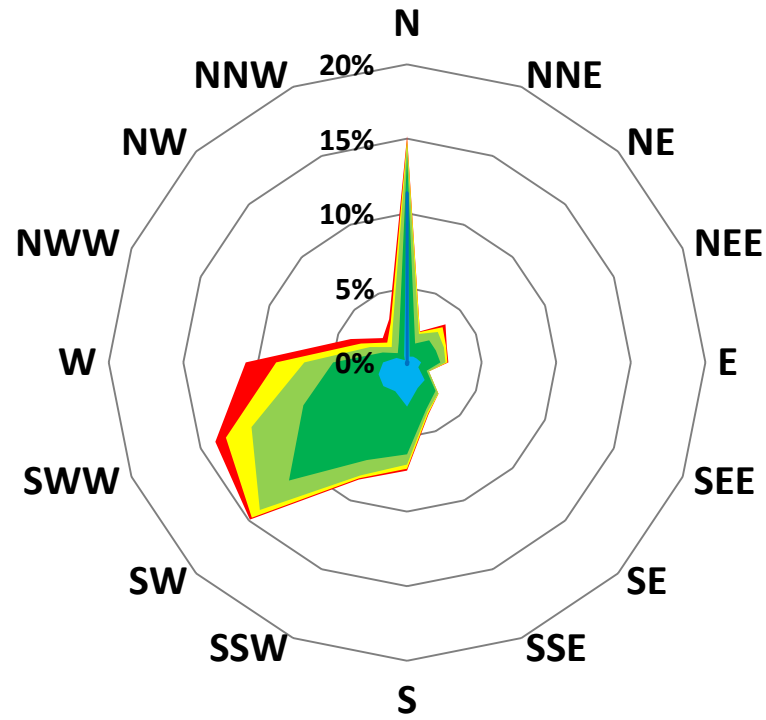
2.2. LES VENTS SUR LA COTE

L'analyse statistique des vents à la côte permet de déterminer leurs fréquences d'apparitions saisonnières et annuelles par direction et par classe de vitesse (selon l'échelle de Beaufort) (voir Annexe 2).

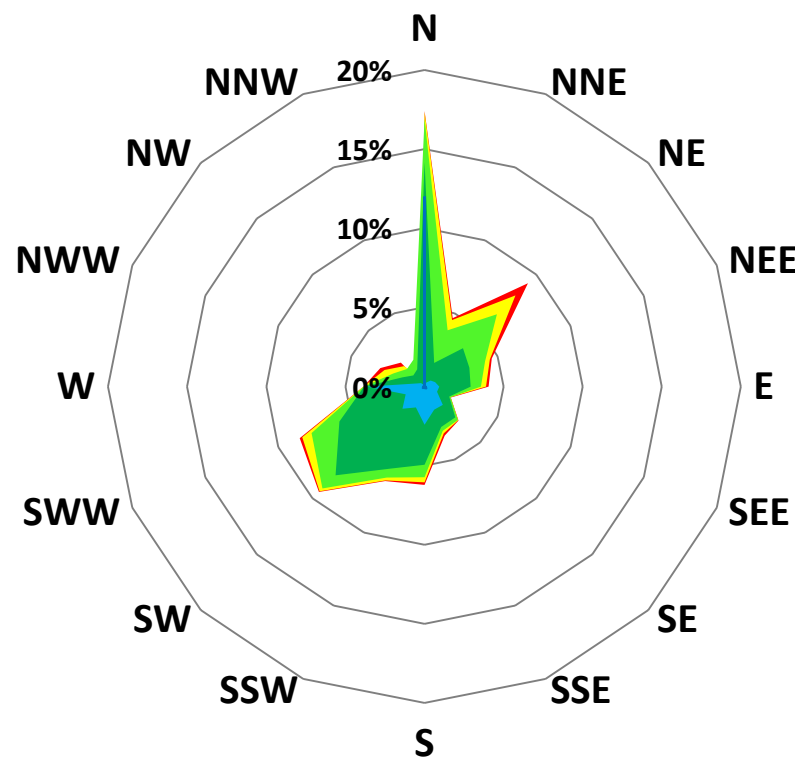
D'après la Figure 10, on distingue que :

- En hiver et en automne, les vents dominants proviennent essentiellement du secteur N avec la prédominance de vents calmes dont la vitesse est inférieure à 1km/h, et du secteur SW avec un champ de vitesse variant entre 6 et 11 km/h.
- Le printemps et l'été sont caractérisés par des vents calmes de secteur N, et par des vents NE à petite brise dont les vitesses varient entre 12 et 19 km/h.
- Annuellement, les vents calmes sont omniprésents et proviennent du secteur Nord avec une fréquence d'apparition supérieur à 9%. Représentant seulement 0,01% du total, les forts coups de vent sont considérés comme des vents rares provenant du secteur NE pendant l'été.

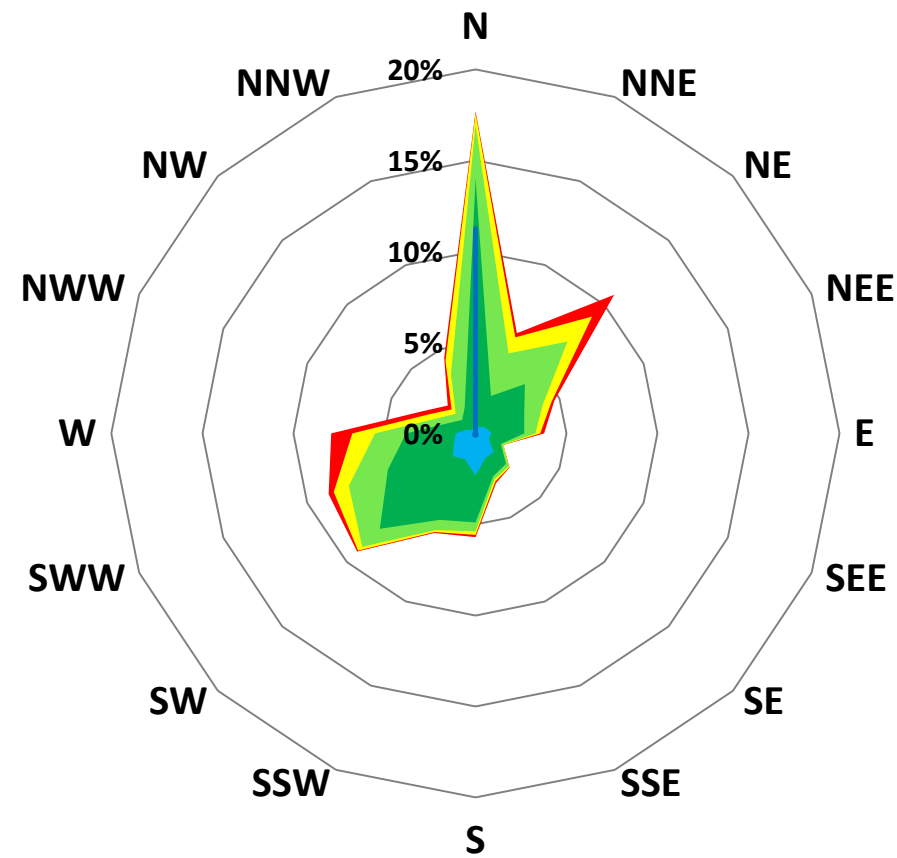
Hiver



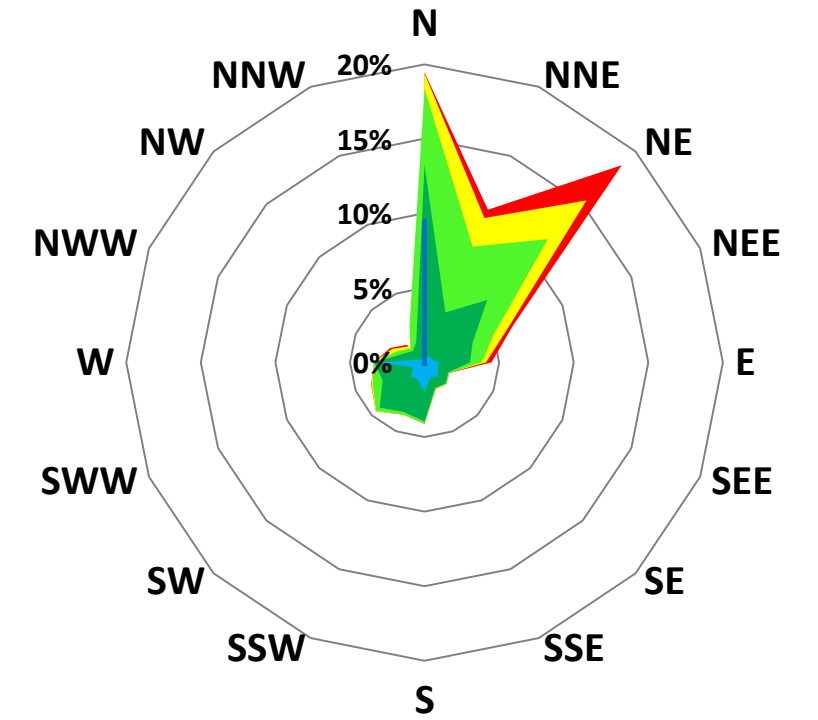
Automne



Annuel



Eté



Pritemps

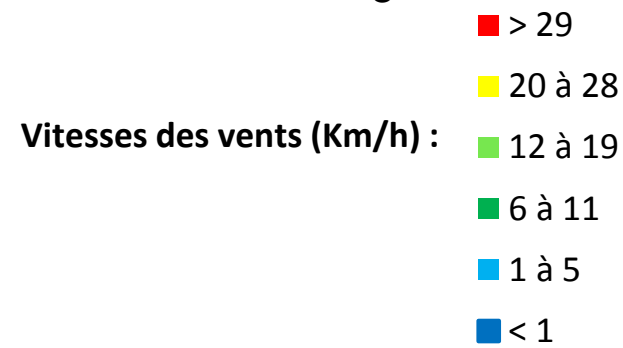
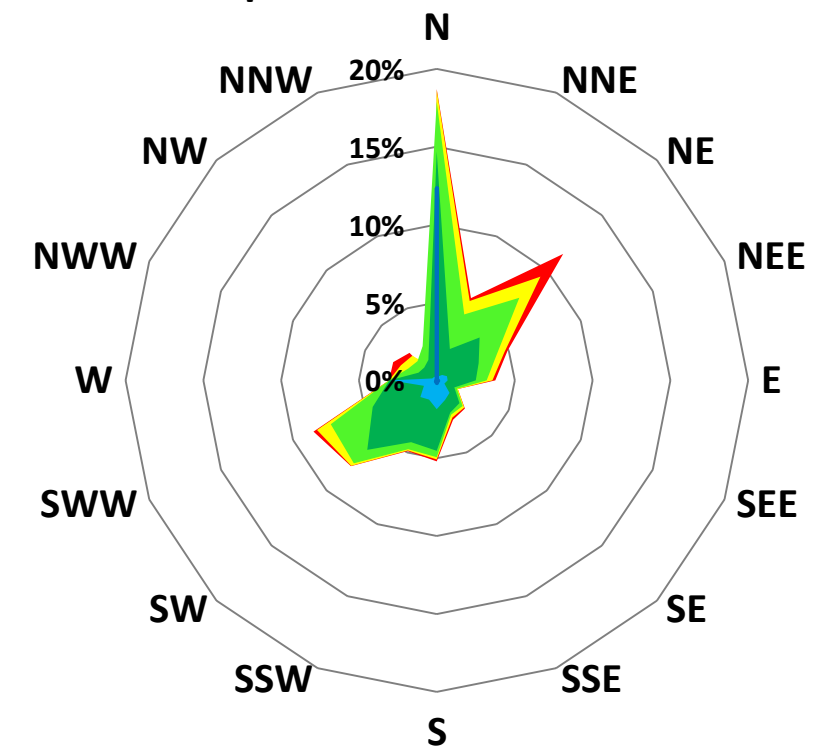


Figure 10 : Roses des vents sur la côte, à l'échelle saisonnière et annuelle (rp5.ru, 2009/2019).

3. ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE

La zone d'étude est caractérisée par un paysage morphologique spécifique qui est fortement influencé par son histoire géologique et hydrographique qui ont commandé son évolution (BOUAKLINE, 2009). Pour cela, la connaissance des aspects géomorphologiques et hydrographiques d'une zone est désormais incontournable, afin de trouver des réponses à des phénomènes d'altération et/ou d'évolution du site, et par conséquent, de définir sa sensibilité face aux attaques et aux agressions marines.

3.1. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES

Les réseaux hydrographiques participent pleinement au cycle de l'eau et représentent un vecteur majeur du transit de sédiments des continents vers le milieu marin (LEDUC, 2013).

La connaissance de la provenance des eaux irriguant la zone d'étude ainsi que leurs principales caractéristiques (origine, débit liquide et solide, pente, dimension de bassin versant, etc.) constitue un élément primordial pour déterminer le chemin et la quantité de sédiments arrachés et transportés jusqu'aux zones d'embouchure.

3.1.1. LES SOURCES D'ALIMENTATION EN EAU

Les sources d'alimentation en eau de la zone d'étude peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

3.1.1.1. ORIGINE NATURELLE

Les eaux du lac proviennent des précipitations et du ruissellement des eaux des nappes vers les Oueds qui sont à l'origine de la formation du marais de Réghaia.

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 des plus hautes altitudes (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 (forêts et cultures labourées, Etc.) (KERMANI, 2016).

En utilisant le logiciel ArcGis, qui est une suite logiciel de Système d'Informations Géographiques (SIG), les différents géo-traitements de l'outil Hydrologie de l'extension d'Arctoolbox ont servi à la réalisation d'une carte représentant le bassin versant et le réseau hydrologique de la zone d'étude (Figure 11). Le traitement a été effectué sur un modèle numérique de terrain, téléchargé sur le site de l'USGS (United States Geological Survey), d'une résolution spatiale de 30m.

Le lac de Réghaia est alimenté par trois Oueds, en plus des eaux souterraines grâce à l’affleurement de la nappe (OULED SAID, 2013) :

- Oued Réghaia : Dont la longueur est de 5Km, il est caractérisé par un écoulement permanent avec un débit variable. La superficie de son bassin versant est de 75km² dont une partie 25km² est constituée d’un territoire monticuleux, le reste est une plaine inclinée vers la mer. Il est alimenté par deux affluents : Oued Guesbai et Oued Berreba.
- Oued El Biar : Sa longueur est de 4075m et son bassin versant est de 20km². L’Oued prend naissance aux environs de la zone industrielle de Rouiba –Reghaïa. Il traverse une grande partie des champs avant de se déverser au niveau du lac.
- Oued Boureah : C’est un affluent de l’Oued El Hamiz, il prend sa source au niveau de Rouiba et draine les eaux de ruissellement des terres agricoles de la Mitidja N-E. Son Bassin versant est de 20km².

3.1.1.2. ORIGINE ANTHROPIQUE

La réserve naturelle du lac de Réghaia est pourvue d’une station de pompage située en aval et équipée de trois pompes verticales. Cette dernière collecte les eaux usées domestiques, industrielles et les eaux pluviales qui se jettent dans le lac (SAYOUD, 2017).

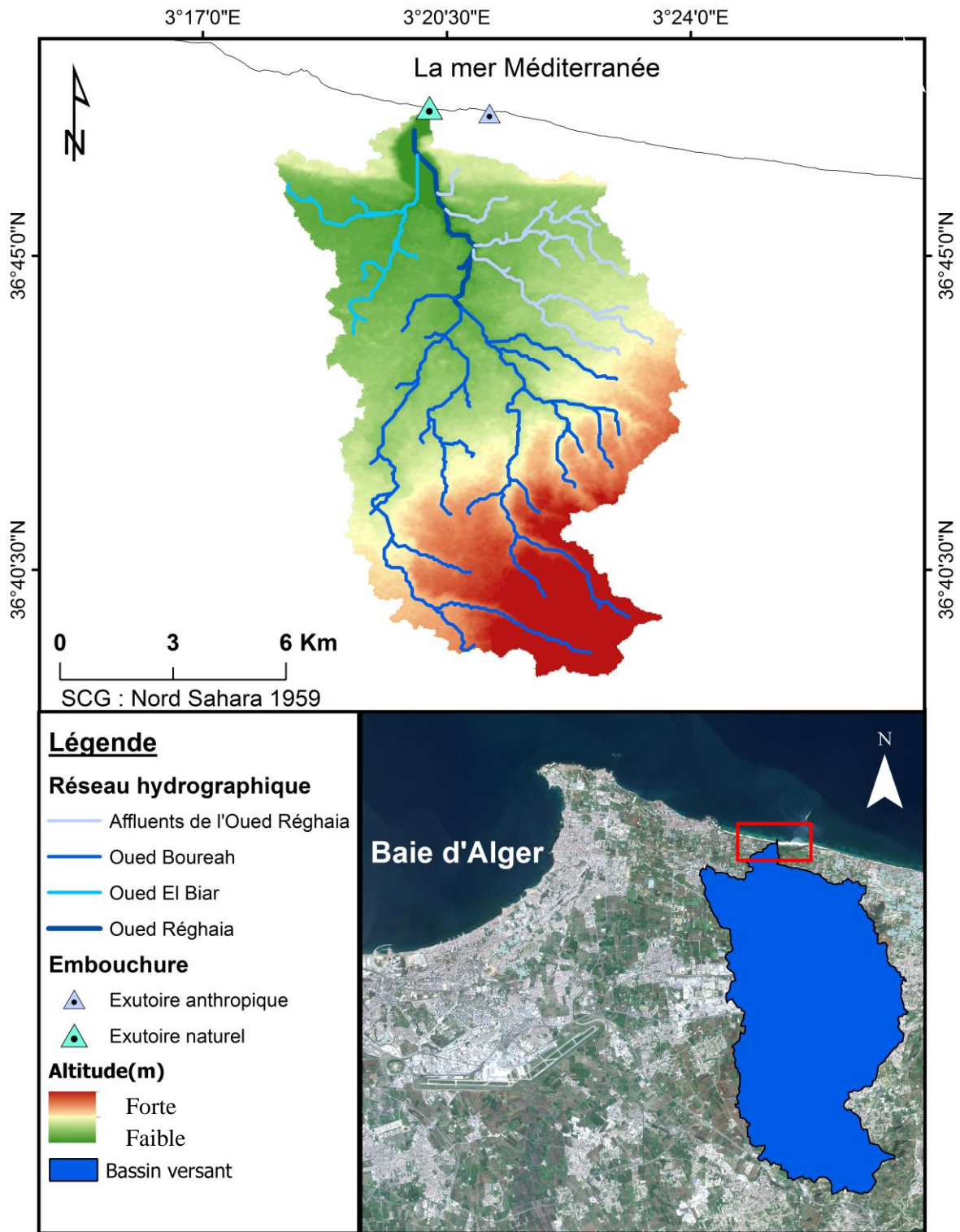


Figure 11 : Réseau hydrographique et délimitation du bassin versant de la zone d'étude. Le fond de carte représente une image du satellite Sentinel 2 d'une résolution spatiale de 10 m, acquise en Février 2020.

3.2. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES

L'analyse de l'environnement géologique et sédimentologique permet, d'une part, de définir les sources ultimes et proximales de sédiments des différents segments du cordon dunaire et des plages de la côte étudiée et, d'autre part, de connaître les processus de leurs mises en place (KERMANI, 2016).

La zone d'étude occupe la partie occidentale de la plaine de la Mitidja, principale plaine côtière de l'Algérois. Elle est délimitée par deux entités géomorphologiques : l'Atlas Blidéen vers le Sud et le Sahel algérois vers le Nord (Figure 12).

D'après THIBAUT et al., (2006), les terrains constituant les alentours immédiats de l'Oued Réghaïa composent la colonne lithostratigraphique suivante (des plus anciens aux plus récents) :

➤ Les faciès d'âge Miocène Moyen (Vindobonien)

Ils présentent un faciès calcareo-gréseux dans l'île Agueli, et un faciès argileux à l'extrémité de l'embouchure de la rive droite de l'Oued Reghaïa.

➤ Le Pliocène Inférieur

Il est constitué de marnes grises qui occupent les rives de la cluse du lac de Réghaïa, et s'étale largement du côté Ouest (Heuraouas à la cote 50m). Elles disparaissent au Sud de la dépression du lac et ne semblent pas dépasser le petit affluent d'El Biar. Ce faciès est vraisemblablement celui retrouvé au fond des sondages effectués sur le marais à la côte.

➤ Le Pliocène Supérieur (Astien)

Il est représenté par un faciès argilo-sableux le long de l'Oued Réghaïa ainsi qu'au niveau des petits affluents (Oued Berraba en particulier).

➤ Le Quaternaire Inférieur (Pléistocène Inférieur : Calabrien)

Ces terrains n'ont pas été reconnus sur le site. Par ailleurs, les alluvions anciennes de la Mitidja représentées par des argiles rouges avec des sables, des galets et des graviers hétérogamétiques sont notées le long d'un axe séparant la ville de Reghaïa de celle de Rouiba. Ils sont attribués au Quaternaire inférieur.

➤ Le Quaternaire Moyen Pléistocène Supérieur (Versilien)

Il affleure sur les rebords Est et Ouest de la cluse du Réghaïa et correspond à des lumachelles, Poudingues, Grés, marins et à d'anciennes dunes consolidées.

➤ Le Quaternaire Supérieur Holocène (Flandrien)

Il correspond au comblement de la cluse de l'Oued Réghaia sur laquelle repose la retenue du lac. Les sondages montrent que ce remplissage se présente sous différents faciès : des galets, des sables coquilliers et des vases.

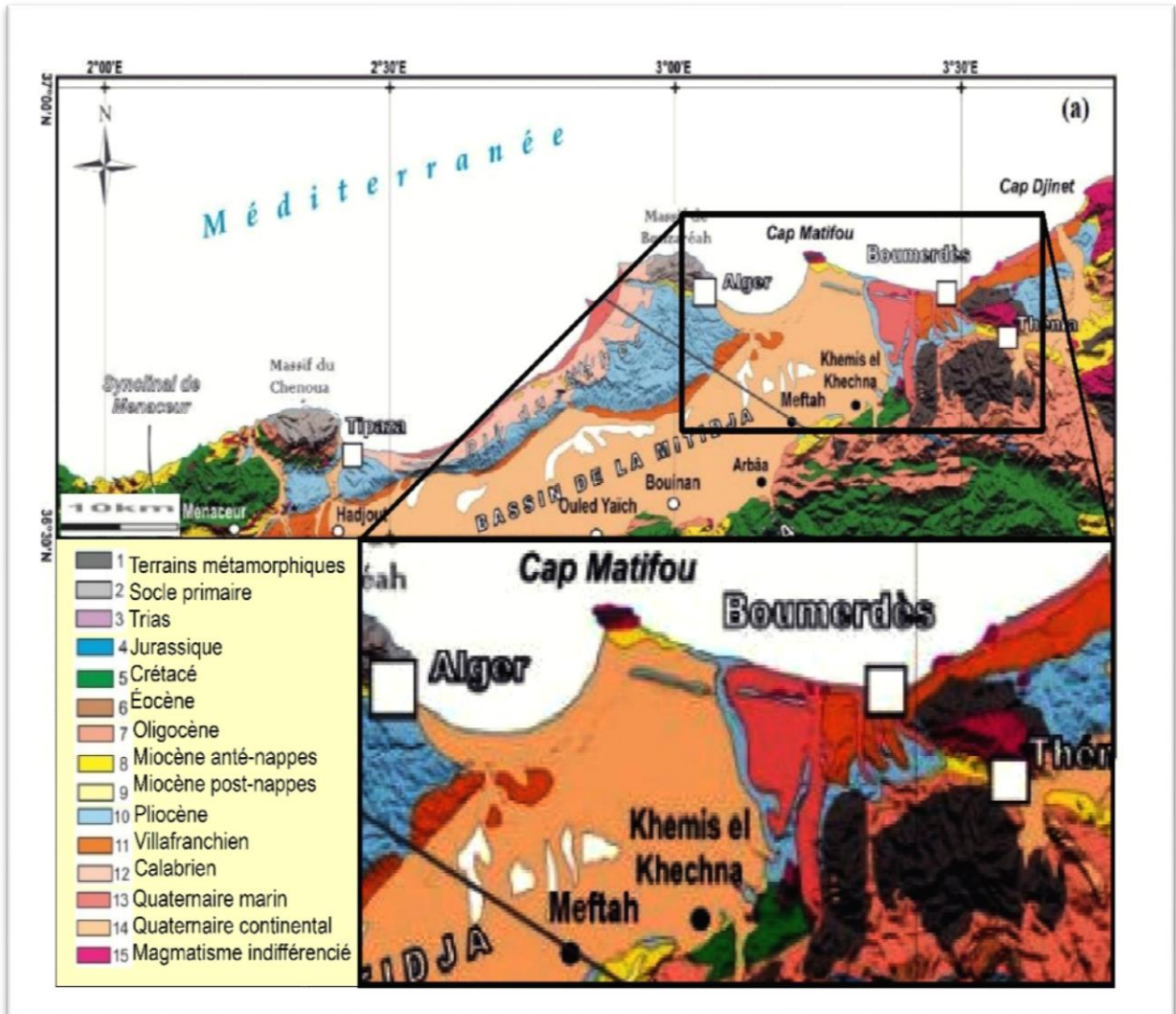


Figure 12: Carte géologique de la zone d'étude.

(source : carte morpho-géologique du bassin de la Mitidja et ses environs, données topographiques SRTM-3 et carte géologique d'Algérie au 1/500000, 2012, modifié) (BOUNOUA et KACI, 2017).

3.3. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES

L'étude morpho-structurale constitue l'élément le plus déterminant de la compréhension de l'évolution géomorphologique de la zone d'étude (KERMANI, 2016). Cette dernière est caractérisée par un paysage morphologique peu diversifié, représentant un territoire de plaines se terminant par des plages et des dunes avec la présence d'un système lacustre en amont qui débouche vers la mer à travers un Oued.

3.3.1. LES PLAGES

La zone d'étude présente une façade maritime d'environ 3Km jalonnée par deux plages autorisées à la baignade : El Kadous et Réghaia. Ces plages sont délimitées à l'Est par la plage de Boudouaou El Bahri et à l'Ouest par la plage de Tarfaya (Figure 13).

A dominance sablonneuse, ces plages sont considérées comme des zones ouvertes et rectilignes orientées dans le secteur NW-SE. Elles sont caractérisées aussi par l'omniprésence du cordon dunaire d'El Kadous en arrière plage.

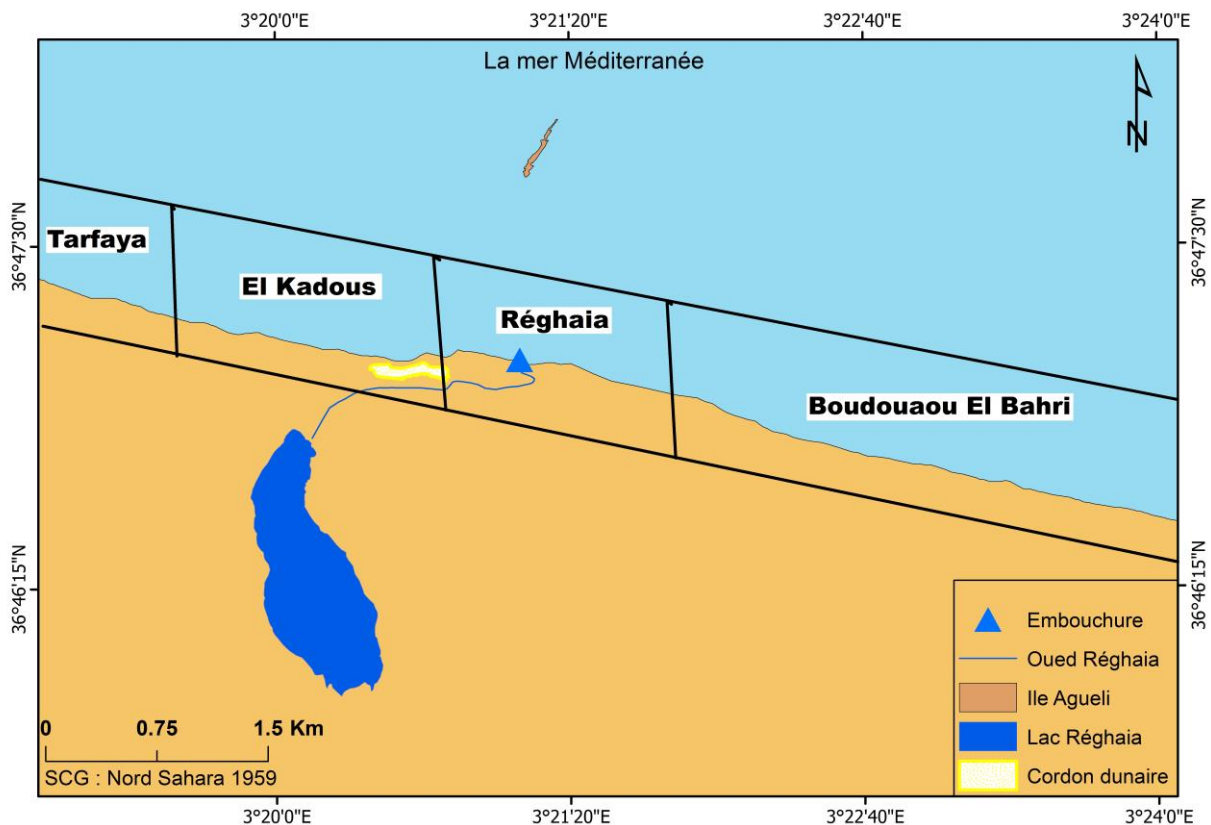


Figure 13 : Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude.

Le Tableau 4 représente un récapitulatif d'une prospection terrain ainsi qu'un traitement basique sous ArcGis de la zone d'étude.

Tableau 4 : Tableau représentatif des caractéristiques principales des plages.

Les plages	Réghaia	El Kadous	Tarfaya	Boudouaou El Bahri
Superficies (m ²)	83	55	40	200
Longueur (m)	1200	1700	590	5300
Largeur (m)	30à150	20à90	40	10à40
Pente	< 3°	3 à 5 %.	/	/
Orientation	NW-SE	NW-SE	NW-SE	NW-SE
Degré d'artificialisation de l'arrière plage	Faible	Faible	Modéré	Modéré
Présence des ouvrages de protection	Non	Non	Non	Oui
Présence des cours d'eau	Oui	Non	Non	Oui
Nature lithologique de l'arrière plage	Sableuse	Sableuse	Sableuse	Sableuse

3.3.2. SYSTEME DUNAIRE

Le cordon dunaire d'El Kadous, barrière naturelle entre la mer et les marais, se distingue par une bande végétale, notamment vers sa partie supérieure (LARID, 2008), assurant essentiellement la protection de l'arrière-pays face aux forces côtières (Figure 14).

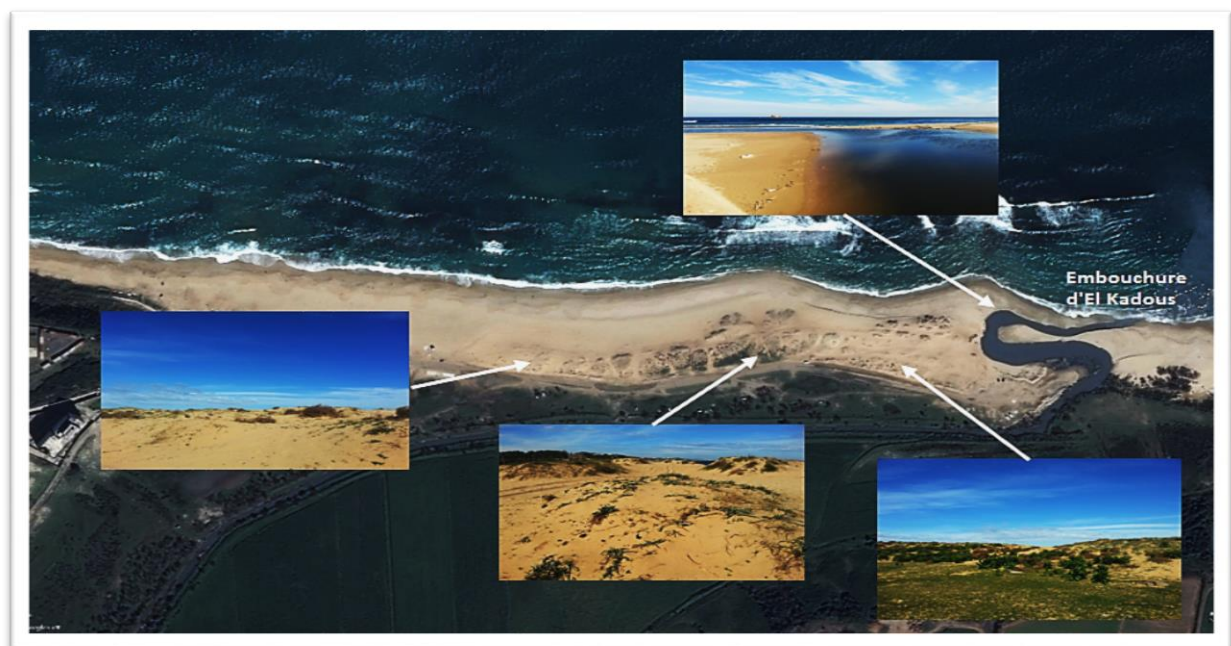


Figure 14 : Détails du cordon dunaire d'El Kadous (BOUNOUA et KACI, 2017).

Il est composé de dunes stabilisées et recouvertes de groupements à **Scilla sp**, **Pancratium maritimum**, **Lotus creticus**, **Ammophila arenaria** et **Chamaerops humilis**.

Cette végétation se développe en bandes étroites le long de la côte, elle arrête et fixe le sable en formant une barrière qui ferme l'embouchure de l'Oued Réghaïa (**Ramsar sites information service**, 2003) (Figure 15).

L'absence de deux espèces **Lotus creticus** et **Chamaerops humilis** témoigne du déséquilibre de cet écosystème naturel.

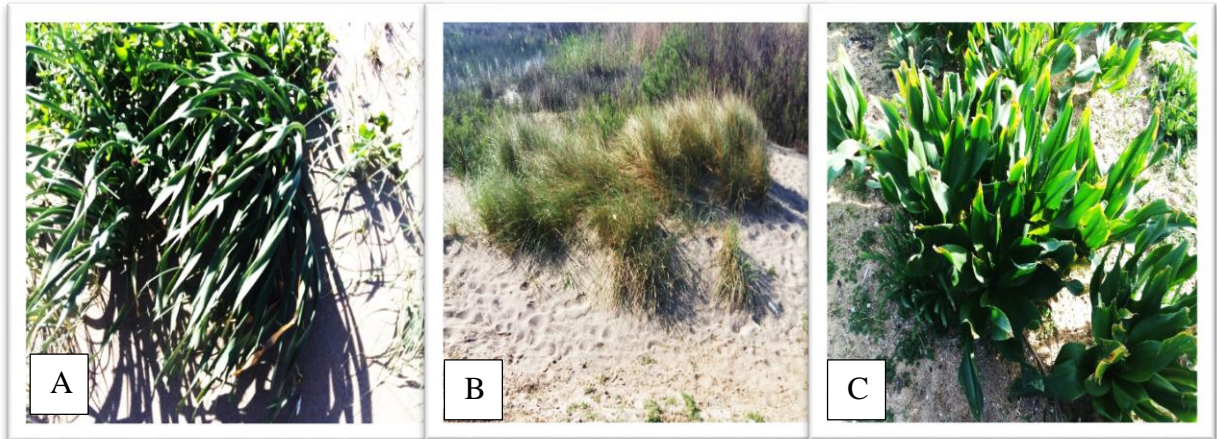


Figure 15 : A : **Scilla sp**, B : **Ammophila arenaria**, C : **Panocratium maritimum**. (BOUNOUA et KACI, 2017).

Dans le cadre de la stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières en Algérie, une activité pilote a été initiée en 2015 pour la réalisation du Plan Côtier de Réghaïa. Au niveau de ce dernier, des actions de restauration ont été initiées par les deux acteurs, que sont l'APPL (Agence de Promotion et de Protection du Littoral) et le CNL (Commissariat National du littoral). L'espèce utilisée pour la fixation se trouve être **Panocratium maritimum** avec l'utilisation des ganivelles (Figure 16). Cela représente la première expérience de gestion dans le cadre de GIZC (Gestion intégré des zones côtières).



Figure 16 : Photographie de la mise en œuvre d'un système de restauration (OTMANI, 2015).

Au cours des fortes tempêtes, le cordon dunaire est entaillé et se présente sous forme d'une microfalaise au niveau de l'avant plage d'El Kadous (Figure 17).



Figure 17 : Formation d'une microfalaise dans la zone d'El Kadous (OTMANI, 2014).

Le cordon dunaire d'El Kadous est découpé par des formes d'érosion éolienne provoquées par l'action du vent qui se développe vers l'intérieur. Ces formes d'érosion sont marquées par la présence de grands couloirs de déflations. Leurs orientations dépendent de la direction des vents dominants (Figure 18).

L'évolution de ces formes de déflation dépend des apports de sable. Elles se combrent progressivement si les apports sont suffisamment élevés, ou bien elles s'élargissent dans le cas contraire (BOUNOUA et KACI, 2017).



Figure 18 : Un large couloir de déflation au niveau des dunes d'El Kadous (OTMANI, 2014).

3.3.3. EMBOUCHURE DE L'OUED REGHAIA

Avant les années 1930, seules les dunes retenaient l'Oued Réghaia et son lit n'avait pas encore été recreusé. Le site n'était constitué que d'un marais naturel très riche en sauvagine.

En 1930 l'administration française a procédé à la construction d'une digue légèrement en amont de l'embouchure de l'Oued Réghaia. L'objectif principal était l'irrigation des terres agricoles fertiles (BENKADI et LEZOUL, 2017), transformant ainsi le lac en une retenue d'eau permanente (LARID, 2008).

La position de l'embouchure de l'Oued Réghaia varie aussi en fonction de la variation de son débit liquide, à l'échelle saisonnière et annuelle (Figure 19 et Figure 20).

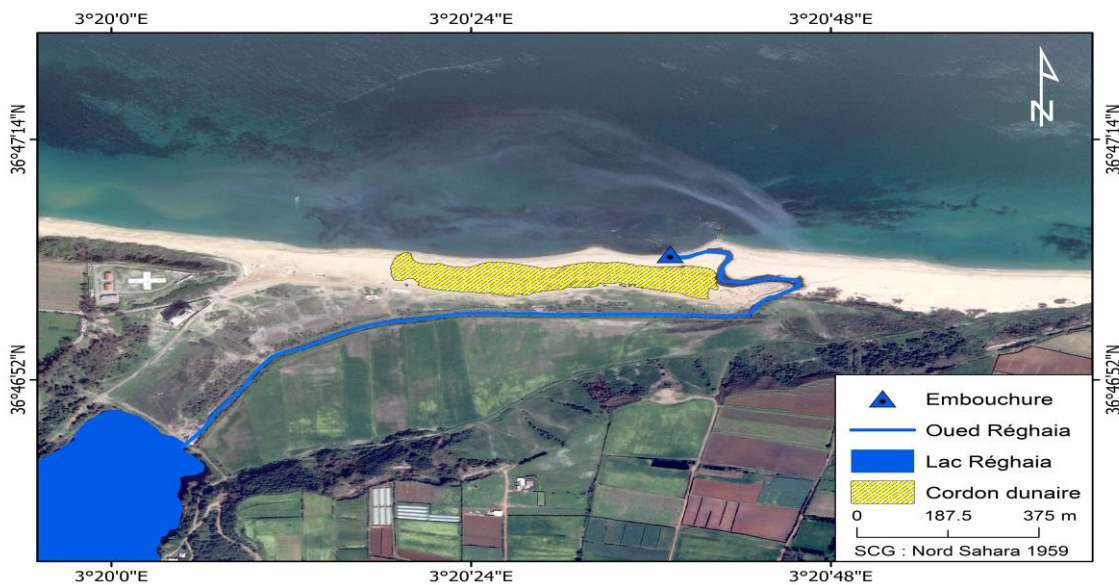


Figure 19 : La position de l'embouchure de l'Oued Réghaia en 2017 (Google Earth).

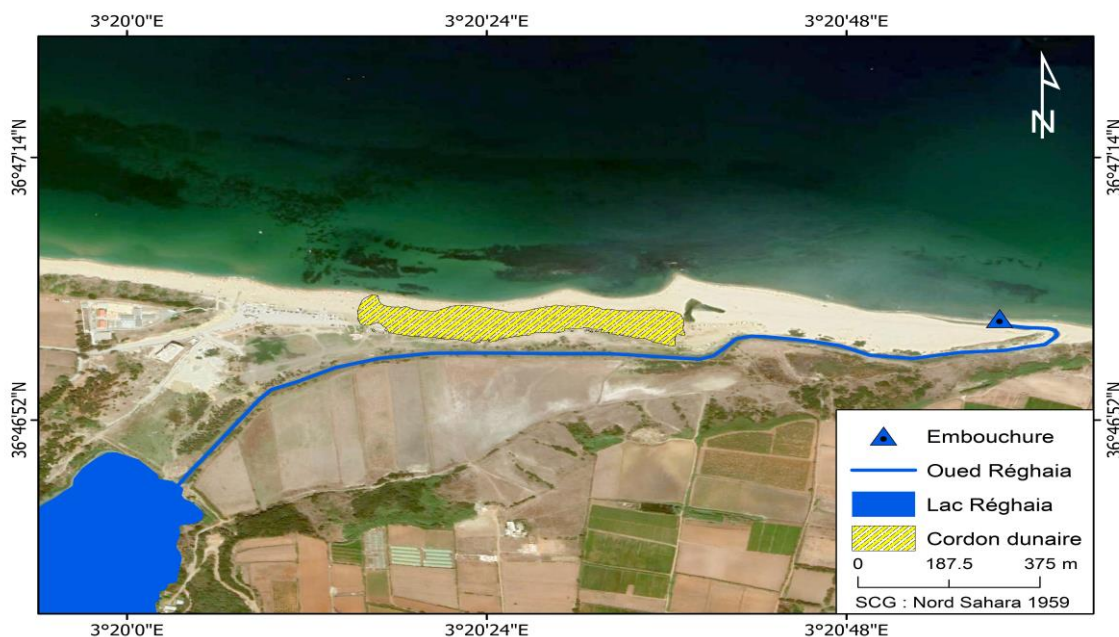


Figure 20 : La position de l'embouchure de l'Oued Réghaia en 2020 (Google Earth).

4. ETUDE ANTHROPIQUE

Les études réalisées jusqu'à présent ont mis en évidence que le milieu dunaire littoral constitue un écosystème gravement perturbé par les interventions irréfléchies de l'homme (la pollution, le pâturage, l'extraction de sable, l'urbanisation et les activités anarchiques du tourisme de masse). Cette zone est très fréquentée et appréciée en période estivale (HANIFI et al., 2007).

4.1. URBANISATION DU LITTORAL

La zone côtière et humide de Réghaia est l'un des derniers sites patrimoniaux du littoral centre du pays. En effet, le littoral de la wilaya d'Alger qui est urbanisé à plus de 80 % de son linéaire côtier est le plus urbanisé de la côte algérienne.

Cette urbanisation s'est faite progressivement et au détriment des zones naturelles côtières. Elle s'est accompagnée ; donc d'une dégradation quasi systématique de tous les cordons dunaires côtiers, des forêts et maquis littoraux. C'est dans ce contexte que la préservation de la zone de Réghaia devient impérative pour maintenir l'un des derniers cordons dunaires de la wilaya et préserver une zone qui renferme un complexe d'écosystèmes interdépendants et patrimoniaux (mer, îlots, plage, lac et marécages) (BENABDI, 2015).

L'artificialisation au détriment des zones dunaires a continué durant ces six dernières décennies. En effet, ces anciennes dunes défrichées (ou enfouies sous des zones urbaines), perdent leur lien écosystémique avec les plages du fait de l'artificialisation intensive, et tendent à disparaître définitivement (les sols dunaires consolidés sont des terrains très favorables à la construction) (OTMANI et al., 2019). Une étude des taux d'occupation du sol est donc l'un des éléments essentiels pour expliquer les causes de dégradation de ces systèmes dunaires à court et moyen termes.

4.1.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'étude s'est effectuée sur une zone qui est délimité à l'Est par la plage Boudouaou El Bahri et à l'Ouest par la plage Tarfaya. En allant vers la terre la délimitation a été faite en se basant sur la réglementation en vigueur, à savoir : la loi (02-02) du 5 février 2002. Cette loi a pour objet l'élaboration et la mise en œuvre d'une politique nationale spécifique d'aménagement et de protection du littoral. Elle délimite trois bandes dans le littoral : la bande des 100m dont la largeur peut atteindre 300 m, la bande des 800m et la bande des 3 km, dans lesquelles sont édictées des restrictions relatives à l'urbanisation (KACEMI, 2009) (voir Annexe 3).

En utilisant le logiciel de SIG « ArcGis », sur un fond de carte téléchargé à partir de Google Earth Pro/2020, une carte d'occupation du sol de la zone d'étude représentant les différents niveaux d'occupation existants (la bâti, les végétations denses, le système lacustre, les plages et les dunes) a été réalisée (Figure 22). La précision de la digitalisation n'est pas importante dans cette étude qui vise seulement à faire le point sur l'état d'urbanisation de la zone.

Les classes d'occupations du sol ont été découpées en fonction des bandes littorales définies auparavant. Les taux d'occupation pour chaque bande ont été estimés en calculant les superficies de chaque classe appartenant à chaque bande. Par la suite, ces résultats ont été traduits en pourcentages (superficie de la classe par rapport à la superficie totale de la bande) (Figure 21 et Tableau 5).

4.1.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Bande des 100m

Cette bande est caractérisée par la prédominance d'un système géomorphologique dune-plage avec un taux d'occupation de 56,85%, alors que l'urbanisation ne représente qu'une surface de 2,41%. Les végétaux et les terres agricoles sont plus ou moins denses et représentent une surface de 23,58% et de 17,15% respectivement.

➤ Bande des 300m et 800m

Chacune de ces deux bandes est caractérisée par des terrains agricoles très importants dont le taux d'occupation est d'environ 80%. Tandis que les zones urbanisées et les végétations denses ne dépassent pas 6% et 10% respectivement.

➤ Bande des 3km

Représentant 34% des zones urbanisées, cette bande est considérée comme la plus urbanisée de la zone étudiée. Elle se caractérise aussi par un taux d'occupation de 5% pour les végétations denses et de 58,44% pour les terrains agricoles.

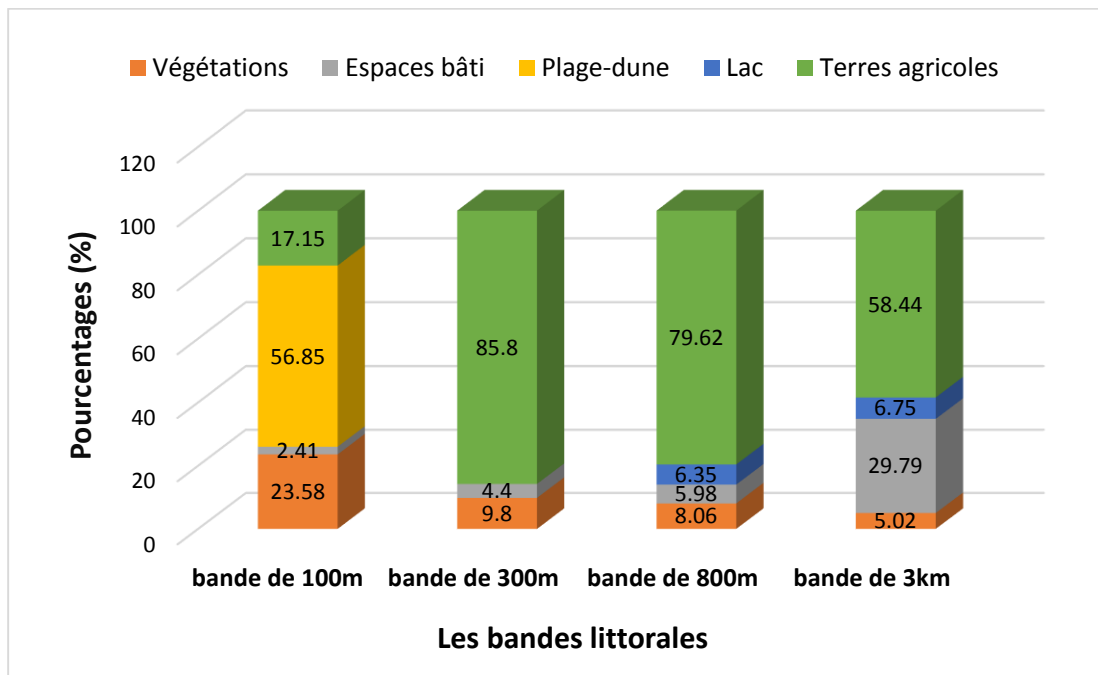


Figure 21 : Histogramme représentatif des pourcentages des différents niveaux d'occupation du sol sur les quatre bandes littorales.

Tableau 5 : Tableau représentatif des pourcentages des différents niveaux d'occupation du sol sur les quatre bandes littorales.

Bande littorale	Bande de 100m	Bande de 300m	Bande de 800m	Bande de 3km
Niveau d'occupation				
Végétations	23.58	9.80	8.06	5.02
Espaces bâti	2.41	4.40	5.98	29.79
Plage-dune	56.85	/	/	/
Lac	/	/	6.35	6.75
Terres agricoles	17.15	85.80	79.62	58.44

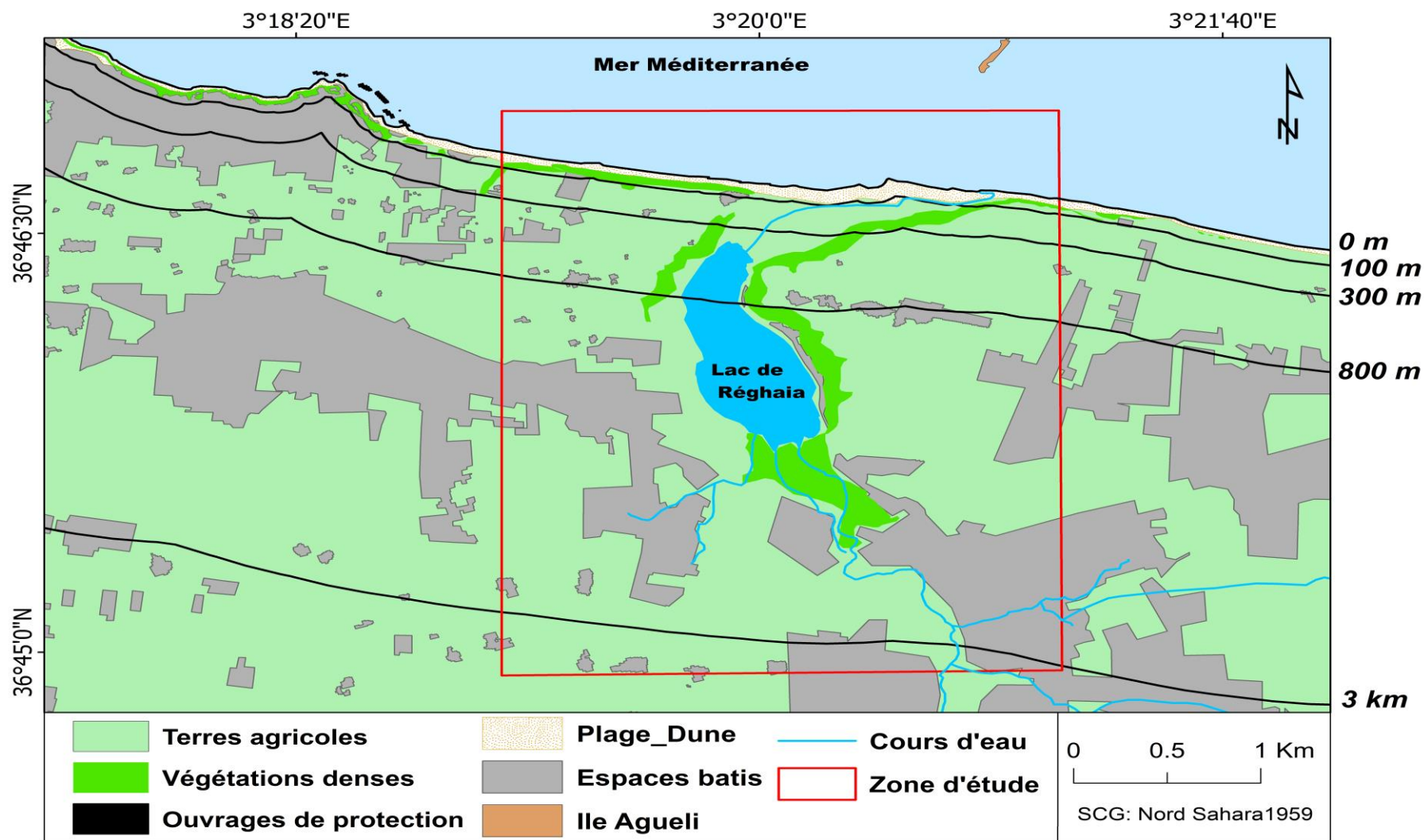


Figure 22 : le taux d'installation urbaine sur les bandes de 3 km, 800m, 300m et 100m.

4.2. EXTRACTION ABUSIVE DE SABLE

Les causes anthropiques de la dégradation des dunes littorales peuvent être aussi rattachées aux prélèvements massifs et arbitraires des quantités requises pour l'essor urbain que connaît la wilaya d'Alger depuis le début des années 1980. Pour répondre à cette forte demande, plusieurs sites d'extraction de sables ont été ouverts le long de la côte Est de la wilaya d'Alger. Ces extractions ont touché simultanément les lits d'Oueds, les plages et le cordon dunaire (BENABDI, 2015).

Cette action n'est plus considérée comme un facteur perturbateur des équilibres naturels depuis l'année 2002 où une loi spécifique au littoral « **loi littorale 02 :02** » a été promulguée qui a mis en place des restrictions relatives à l'urbanisation et a empêché l'extraction abusive de sable.

4.3. PATURAGE

Au niveau des dunes, l'usage extensif le plus habituel est le pâturage. Cette pratique peut aboutir à leur dégradation et à des conséquences importantes sur la mise en mouvement des sables dunaires ainsi que sur l'érosion de la dune et l'envahissement des terres agricoles (BOUNOUA et KACI, 2017) (Figure 23).



Figure 23 : Pâturage anarchique (El Kadous, 2016).

4.4. EXPLOITATION TOURISTIQUE INCONTROLEE

L'altération du cordon dunaire d'El Kadous est due, entre autres, au piétinement des plantes par les estivants et les véhicules (parking), accentuée par la fréquentation permanente durant la saison estivale (Figure 24 et Figure 25), ainsi que les passages de carrosseries.

La dégradation et la disparition de ces cordons dunaires auront inévitablement des conséquences négatives sur le fonctionnement global de la zone humide de Réghaia. De même que les nombreux services qui sont directement rendus par cet écosystème dunaire (écologiques et socio-économiques) (BENABDI, 2015).



Figure 24 : Les traces de carrosseries et de piétinement (OTMANI, 2014).



Figure 25 : Fréquentation touristique (FOUZOL, 2014).

CONCLUSION

La zone d'étude est caractérisée par un paysage morphologique peu diversifié, qui est constitué essentiellement de deux plages (El Kadous et Réghaia) qui s'adossent au cordon dunaire d'El Kadous. Ce dernier est parfois traversé par l'Oued Réghaia dont la position varie en fonction de son débit liquide. Ces formations peu résistantes sont caractérisées par des sables légèrement argileux, des calcaires coquilliers et des poudingues qui datent du Quaternaire Moyen Pléistocène Supérieur (Versilien) et du Quaternaire Supérieur Holocène (Flandrien). Cela relève que l'érosion des formations quaternaires qui affleurent sur les rebords Est et Ouest de la cluse de Réghaia sont la principale source d'alimentation de la zone d'étude. Ces sédiments érodés le long de bassin versant sont transportés par la suite via les réseaux hydrographiques (Oued Réghaia, Oued El Biar, Oued Boureah et leurs affluents) jusqu'aux zones de dépression qui correspondent à l'embouchure de l'Oued Réghaia. La quantité de sédiments mise en mouvement est de plus en plus importante en fonction de l'intensité de la pluviométrie qui enregistre un maximum pendant la saison hivernale durant laquelle les eaux de ruissellement se concentrent et participent à la création de couloirs de déflation au niveau de différents segments du cordon dunaire. Ceci est accompagné à une augmentation du débit liquide et solide de l'Oued Réghaia.

L'augmentation du débit liquide est généralement accompagnée par une réorientation de l'exutoire à travers le cordon dunaire d'El Kadous, ce qui favorise l'arrachement des sédiments de ce dernier et leur déplacement vers la plage sous-marine. Tandis que, l'augmentation du débit solide est considérée comme une source d'alimentation en sédiments d'origine terrigène.

Pendant la période estivale, les accalmies, les apports solides d'origine terrestre qui ont été rejetés à la mer, pendant la saison hivernale, sont repris, transportés et déposés au niveau de la plage par les différents agents hydrodynamiques. L'augmentation des températures pendant la journée favorise l'assèchement des sédiments et facilite leur transport éolien. Cela dépend de la granulométrie de sédiment, de l'existence d'un couvert végétal ou d'un obstacle et de l'exposition de la dune face aux vents. Le site d'étude est soumis à des vents dominants qui soufflent perpendiculairement à obliquement par rapport à la disposition de la zone d'étude. Ce qui induit un transport sédimentaire résultant vers l'arrière plage puis au niveau du cordon dunaire.

La quantité de sédiment mise en mouvement est aussi influencée par les diverses activités humaines s'exerçant au niveau du bassin versant incluant la zone d'études. Notamment l'urbanisation près du littoral, malgré leurs faibles taux, elle contribue à la diminution des débits solides des Oueds débouchant dans la zone d'étude.

Outre la population démographique considérable installée près du rivage, la zone d'étude constitue, d'une part, des terrains libres pour exercer l'activité de pâturage et de carrossage ; d'autre part, elle constitue des aires de baignade pour les estivants. Ces activités ont entraîné une destruction importante de la végétation et une mise en mouvement du sable dunaire qui aboutissent à la dégradation du cordon dunaire d'El Kadous et à l'envahissement des terres agricoles adjacentes.

CHAPITRE III : DIAGNOSTIC DE DETAIL

1. ETUDE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

Le suivi et l'analyse des indicateurs d'évolutions côtières sont des préalables indispensables à la gestion du littoral, ils amènent souvent à utiliser la notion du trait de côte (MALLET et MICHOT, 2012).

La définition du trait de côte, censée représenter la frontière linéaire entre les domaines maritime et terrestre, est problématique et sujette à des controverses selon l'entrée thématique choisie.

En raison de la diversité des critères d'identification, ROBIN, 2002 a relevé plus d'une douzaine de « traits de côte » tandis que BOAK et TURNER, 2005 ont recensé 19 lignes génériques à partir de 45 indicateurs différents. Cette diversité d'indicateurs induit la recherche et la mise au point de nombreuses méthodes pour détecter, extraire et suivre la mobilité du trait de côte (FAYE et al., 2012).

Cette partie du travail s'intéresse à l'étude et l'analyse de la contribution des écosystèmes sableux (barres sableuses, plages et dunes) dans le contexte de l'érosion côtière et en particulier pour déterminer le rôle du cordon dunaire d'El Kadous dans la régulation du recul du trait de côte adjacent.

1.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Le suivi du trait de côte doit s'inscrire dans une logique de progression et d'étapes à entreprendre afin de garantir au mieux la pertinence des résultats. La méthodologie adoptée pour ce volet d'étude est celle proposée par le Bureau de Recherche Géologique et Minière français (BRGM).

L'organigramme ci-dessous (Figure 26) synthétise l'application de ces différentes étapes sur la zone d'étude en se basant sur la méthodologie proposé par MALLET et MICHOT, 2012 (Annexe 4).

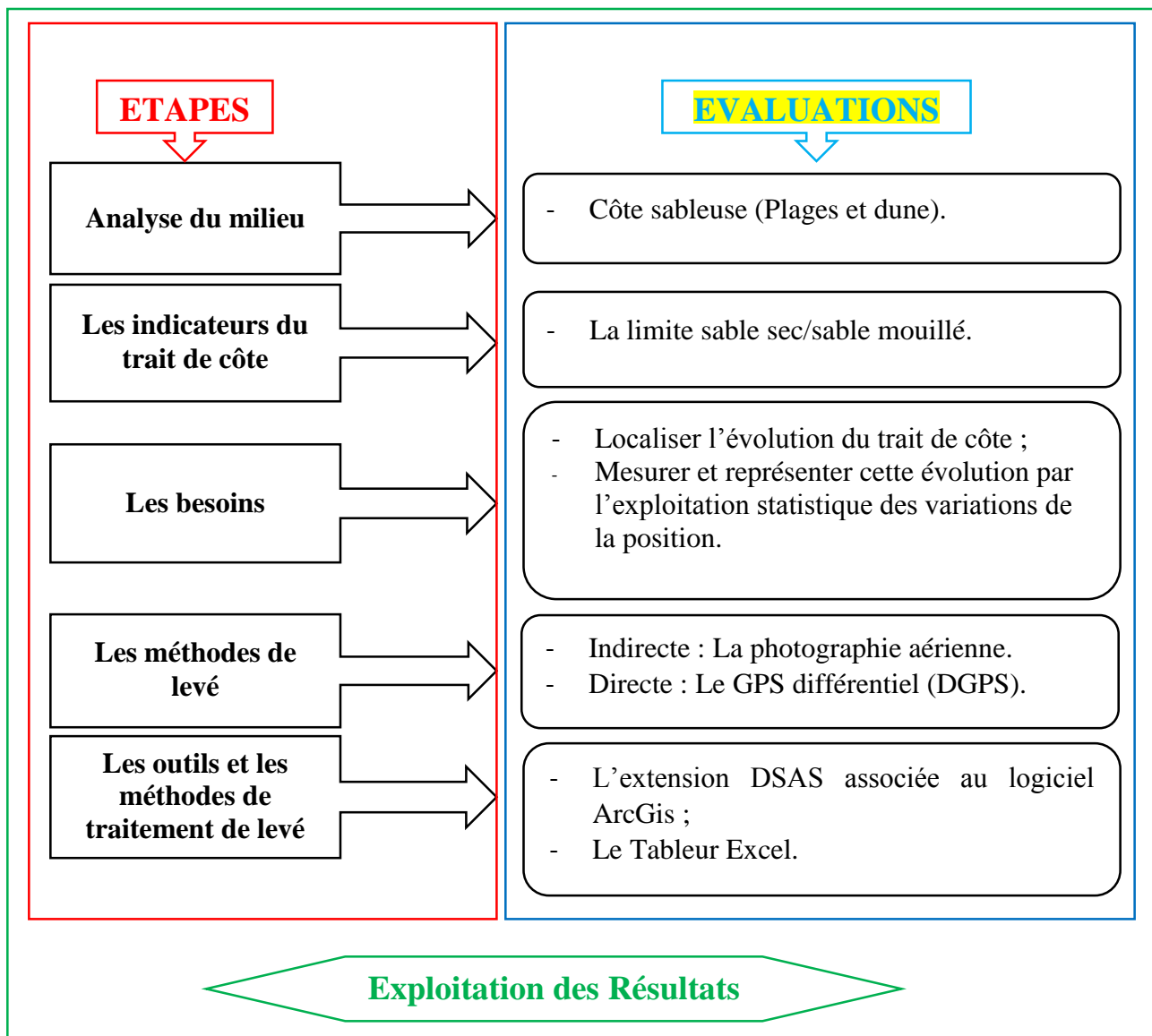


Figure 26 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte.

1.2. INVENTAIRE SUR LES DONNEES UTILISEES

Les trait de côte sont obtenus par photo-interprétation pour les périodes les plus anciennes (digitalisation des photos aériennes); et par mesure sur le terrain à l'aide d'un DGPS pour les périodes récentes et l'actuelles (MALLET et MICHOT, 2012), cette méthode est largement expliquée dans le chapitre IV traitant l'étude surfacique et volumétrique du cordon dunaire. La combinaison de ces deux méthodes de levé permet de travailler sur une période de temps plus étendue (BENGOUFA, 2016).

Les données utilisées pour traiter et analyser la cinématique du trait de côte de la zone d'étude matérialisent une période de 61 ans, allant de 1959 jusqu'à l'année actuelle 2020 (Tableau 6).

Tableau 6 : Inventaire des données extraites à partir des photographies aériennes et de DGPS.

Année d'acquisition	Méthode de levé	Echelle	Provenance	Résolution
1959	Photographies aériennes	1/25000	APPL	Métrique
1972	Photographies aériennes	1/20000	APPL	Métrique
1980	Photographies aériennes	1/10000	APPL	Métrique
1999	Photographies aériennes	1/10000	APPL	Métrique
2003	Photographies aériennes	1/10000	APPL	Métrique
2014	DGPS	/	APPL	Centimétrique
2017	DGPS	/	BOUNOUA et KACI, PFE 2017.	Centimétrique
2020	DGPS	/	LEM	Centimétrique

1.3. ETUDE DIACHRONIQUE DU TRAIT DE COTE

L'indicateur du trait de côte est représenté sur le plan (x, y) sous forme d'une vectrice ligne. L'étude diachronique du trait de côte réside dans la comparaison de l'évolution des lignes levées à des dates différentes (MALLET et MICHOT, 2012).

Les difficultés de représentation des données utilisées dans le cadre de ce travail résident dans :

- Les positions du trait de côte à différentes dates sont représentées par des lignes géoréférencées qui pouvant se croiser ou se confondre.
- Il est difficile de réaliser une séparation visuelle quand les écarts provoqués par la progression ou l'érosion sont trop faibles.
- La vue d'ensemble du littoral est une information importante. Il n'est pas recommandé de tronçonner le trait de côte en une série de carte d'échelles variables.

La représentation du déplacement du trait de côte impose le passage par deux volets :

- Volet cartographique pour localiser l'évolution du trait de côte.
- Volets graphique et statistique pour mesurer et représenter cette évolution.

1.3.1. VOLET CARTOGRAPHIQUE

Pour la représentation du trait de côte, la variable couleur et parfois le figuré linéaire, quand le nombre de trait de côte est grand, est modifiée. Il est judicieux d'éviter de modifier la variable taille des figurés linéaires (représentation hiérarchique).

Il est préférable d'adopter la variable couleur, par convention le rouge évoquera le trait de côte le plus récent, à partir du rouge la variation des couleurs devra respecter les règles de l'ordonnance du spectre solaire jusqu'au bleu qui représente le trait de côte le plus ancien (Figure 27). Les surfaces de progradation à gauche avec une couleur proche de vert et les surfaces d'érosion à droite avec une couleur rouge (FAYE et al., 2012).

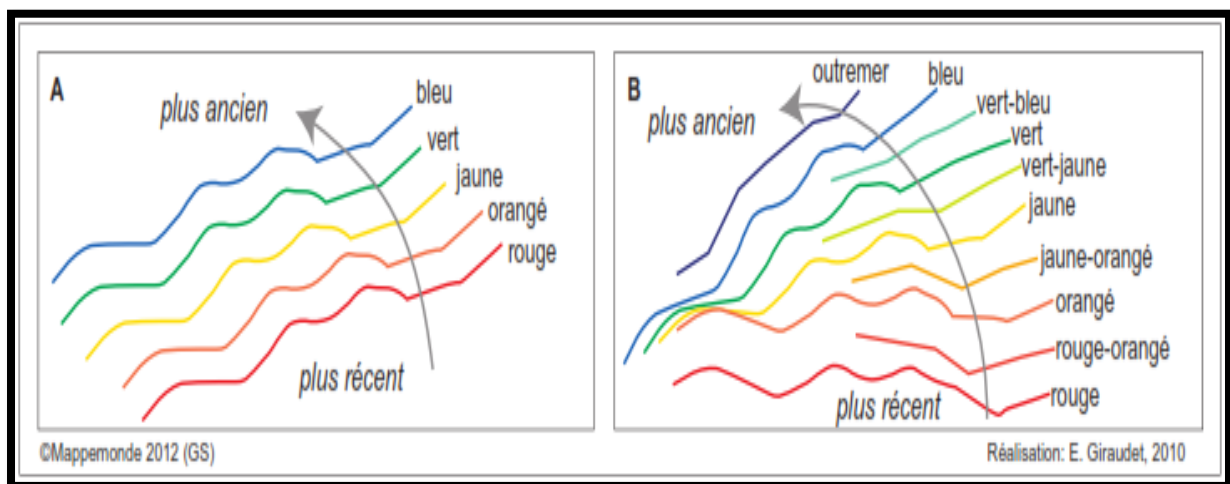


Figure 27 : Proposition de légende pour le trait de côte représenté à plusieurs dates (FAYE et al., 2012).

1.3.2. VOLET GRAPHIQUE ET STATISTIQUE

La base de données extraite à partir des photographies aériennes et des mesures au DGPS est compilée dans un environnement SIG, à l'aide du logiciel ArcGis et ensuite exploitée pour estimer la tendance d'évolution du trait de côte en utilisant l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System).

1.3.2.1. PRESENTATION DE L'EXTENSION DSAS

Le DSAS est une extension gratuite du logiciel ArcGis, développée par USGS (Figure 28). Cet outil permet d'étudier et d'analyser l'évolution passée du littoral (BOUNOUA et KACI, 2017) en calculant la distance de recul ou d'avancée du trait de côte ainsi que la surface perdue ou gagnée par la frange littorale (AYADI, 2016).

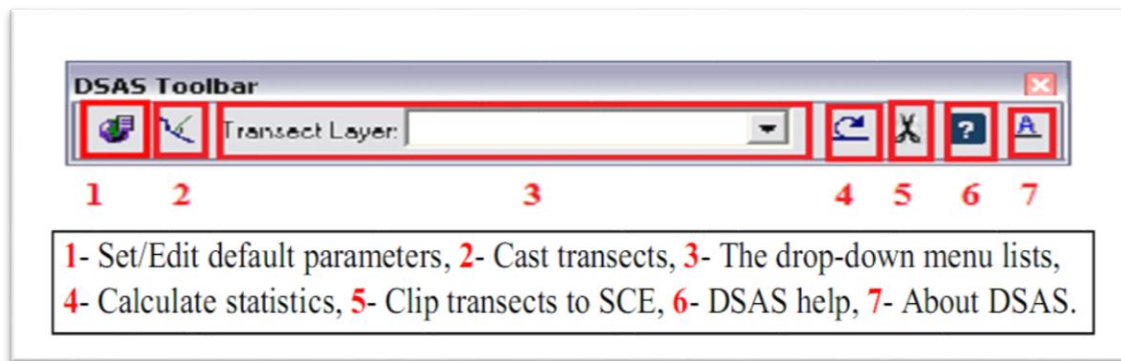


Figure 28: Barre d'outils de l'extension DSAS.

1.3.2.2. ETAPES DE MANIPULATION DE L'EXTENSION DSAS

Cet outil a pour avantage de donner une évolution graphique et statistique du trait de côte. Il fournit une méthode normalisée qui peut être répétée pour le calcul de l'évolution statistique tout en analysant le changement passé, présent et futur du littoral (ANCC, 2019).

L'exécution de cette extension nécessite au préalable la préparation de deux classes d'entités rassemblées au sein d'une seule géodatabase dans ArcCatalog :

- Les traits de côte au format d'une vectrice ligne projetés dans un même système géographique.
- Une ligne de base imaginaire, se trouvant en mer ou en terre, généralement parallèle à la côte.

Le calcul automatique par DSAS consiste à la génération de transects perpendiculaires à la ligne de base ; à partir de laquelle une mesure des écarts entre les traits de côte a été effectuée. Ce calcul est effectué en considérant l'intersection entre les transects et les traits de côte comme des points de mesure de la distance entre chaque trait de côte (BOUNOUA et KACI, 2017). Cela permet de calculer les taux moyens de déplacement du trait de côte le long de chaque transect. Une valeur d'incertitude de 6m a été attribuée aux traits de côte issus des photographies aériennes et de 0.03m pour celles issues de DGPS.

En sortie, le DSAS fournit deux tables différentes :

- Une table contenant les caractéristiques d'identification des points d'intersection (coordonnées, distance par rapport à la ligne de base).
- Une table contenant les statistiques d'évolution, contenant les paramètres statistiques choisis pour cette étude (EPR, LRR, NSM, Etc.) (voir Annexe 5)

1.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'étude diachronique du trait de côte a permis de définir la mobilité du trait de côte entre 1959 et 2020 en se basant sur la variation de plusieurs paramètres statistiques (EPR, LRR et NSM). Il en

ressort que les taux de démaigrissement (valeurs négatives) et d'engraissement (valeurs positives) ont varié durant cette période.

Les calculs des variations de la ligne du rivage sont effectués le long de 256 transects espacés de 10m et ayant une longueur de 250m. Ces transects numérotés de 1 à 256, avec le transect 1 à l'Est et le transect 256 à l'Ouest, sont répartis sur deux plages : Réghaia qui contient 163 transects et El Kadous qui contient 93 transects.

Afin de mieux cerner la dynamique du trait de côte sur une période de 61 ans, des cartes d'aléa à l'érosion ont été réalisées sur quatre périodes : de 1959 à 1980, de 1999 à 2014, de 2014 à 2020 et de 1959 à 2020.

Ces cartes ont été réalisées en se basant sur les valeurs d'EPR. Ces dernières ont été discrétisées en 6 classes représentant le degré de progression ou de dégradation de la zone étudiée (Tableau 7).

Un bilan surfacique a été calculé à partir de la création de polygones à l'aide d'ArcGis entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent pour chaque période étudiée. Les surfaces de chaque polygone représentent la surface de la plage perdue dans le cas du recul du trait de côte (bilan négatif) ou la surface d'engraissement dans le cas d'avancement du trait de côte (bilan positif).

Tableau 7: Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres EPR et LRR.

Taux de changement du trait de côte (m/an)	Classification des traits de côte
>- 2	Erosion très élevée
[-2, -1]	Erosion élevée
[-1, 0]	Erosion modérée
0	Stable
[0, 1]	Accrétion modérée
[1, 2]	Accrétion élevée
> + 2	Accrétion très élevée

1.4.1. PERIODE ALLANT DE 1959 A 2020

L'étude de l'évolution du trait de côte à long terme a permis la quantification de l'érosion linéaire sur une période de 61 ans allant de 1959 à 2020 (Figure 29). Le bilan surfacique net montre une accrétion surfacique de l'ordre de $+103362.26\text{m}^2$ avec un taux d'évolution modéré de $+0,02\text{m/an}$. Cette accrétion sur le plan planimétrique ne peut pas être pris en considération si on ne mis pas la zone d'étude dans son contexte géomorphologique où des échanges sédimentaire entre la plage aérienne et la plage sous-marine se font.

Entre les transects 1 à 3 et 160 à 168, une érosion modérée à très élevée est observée, caractérisé par des taux de recul légèrement supérieur à la marge d'erreur associé aux calculs des EPR ($\pm 0,1\text{m/an}$).

1.4.2. PERIODE ALLANT DE 1959 A 1980

L'allure générale de la carte d'aléa à l'érosion entre 1959 et 1980 (Figure 30) montre que les deux plages sont dans un état d'engraissement. Cette accrétion varie entre 20 à 50m, soit une surface de $+93675,3\text{m}^2$ avec un taux net d'évolution de 1,03 à 2,54m/an. Cela témoigne, probablement, d'un apport sédimentaire par l'Oued Réghaia et/ou par la dérive littorale.

Une érosion modérée a été localisée à l'extrémité Est de la plage El Kadous, entre les transects 163 et 168. Sur lesquels on dénote un recul de -5,89m avec une vitesse de -0,28m/an. Cependant ces valeurs sont comprise dans la marge d'erreur associée aux calculs des EPR ($\pm 0,4\text{m/an}$).

1.4.3. PERIODE ALLANT DE 1980 A 2003

La Figure 31 montre que la zone d'étude a subi une alternance de micro-secteurs en érosion et en accrétion, dont les taux net d'évolution sont légèrement inférieurs ou supérieurs à la marge d'erreur retenue ($\pm 0,45\text{m/an}$). Cette alternance témoigne de la distribution latérale de sédiments depuis les secteurs en régression vers les secteurs en progression.

L'engraissement a été marqué le long des transects (1 à 19), (56 à 96) et (148 à 170), où le rivage s'est introduit en moyenne de 3 à 16m vers la terre. Tandis que le reste de la zone indique un recul de -10 à -12m. Cela est probablement dû aux extensions urbanistiques anarchiques, à partir des années 80, qui ont participé à la diminution de la quantité de sédiments arrachées le long de bassin versant et acheminées vers la côte.

Cette littoralisation a été aussi accompagnée à une extraction de sable le long de la côte et sur les lits d'Oueds, ce qui a réduit le stock sédimentaire côtier, et a causé des modifications importantes de la pente côtière, favorisant ainsi l'arrachement de sédiments par les courants de retour, ces dernières ne sont pas récompensées par la dérive littorale. Ce n'est qu'en 2002 qu'une loi spécifique au littoral « loi littorale 02 :02 » a été promulguée, mettant des restrictions relatives à l'urbanisation et empêchant l'extraction abusive de sable.

1.4.4. PERIODE ALLANT DE 2003 A 2014

Durant cette période, l'évolution de trait de côte a été très différente entre les deux plages Réghaia et El Kadous (Figure 32).

La plage El Kadous montre une accrétion très considérable le long de son rivage qui peut atteindre 27m, soit un taux d'avancée moyenne de +2,57m/an. Tandis que la plage Réghaia présente une alternance de micro-secteurs en érosion et en accrétion au niveau de la rive gauche de l'Oued Réghaia, dont les taux de recul sont inférieurs ou légèrement supérieurs à la marge d'erreur admise ($\pm 0,54\text{m/an}$) ; En allant vers l'Est, une progression importante de 18m a été marquée dont la vitesse d'évolution est de 1,67m/an.

Ceci est dû, d'une part, à l'installation des ouvrages de protection à Surcouf en 2003 suite à des scénarios de tempêtes violentes, ces ouvrages constituent une sorte d'obstacle aux transits latéraux qui ont devenu moins important par rapport aux transits cross-shore engendré par les courants de retour ; D'autre part, à la réduction des apports en sédiments de l'Oued Réghaia suite à l'accentuation de phénomène de littoralisation et la construction des aménagements au niveau du lac Réghaia. Ce qui a mis la plage dans un état déficitaire, favorisant la dégradation du cordon dunaire d'El Kadous. Ce dernier est devenu la source principale d'alimentation en sédiments pour y compenser ce déficit ((BOUAKLINE, 2009) et (OTMANI et al., 2019)).

1.4.5. PERIODE ALLANT DE 2014 A 2020

En plus de toutes les interventions humaines citées auparavant, la zone d'étude a été encore plus fragilisée à cause de la destruction de la végétation dunaire suite à une activité anarchique du pâturage et à une surfréquentation touristique durant l'été et aux activités de carrossages en dehors de la période estivale. Suite à cela ; un état d'érosion dramatique a été enregistré atteignant parfois les 20m de recul avec un taux net estimé à -13m/an (Figure 33, Figure 34 et Figure 35).

Par ailleurs, une évolution exceptionnelle de 16m de la ligne de rivage a été observée au niveau de la zone d'embouchure, dont le taux d'accrétion moyenne est de 5,63m/an. Ceci peut être expliqué par les conditions particulières qui régissent l'évolution de l'embouchure de l'Oued Réghaia.

Entre autre, en 2017, cette accrétion a été délocalisée vers la plage de Réghaia, entre les transects 31 et 105, en raison de la réorientation anthropique de l'embouchure de l'Oued Réghaia.

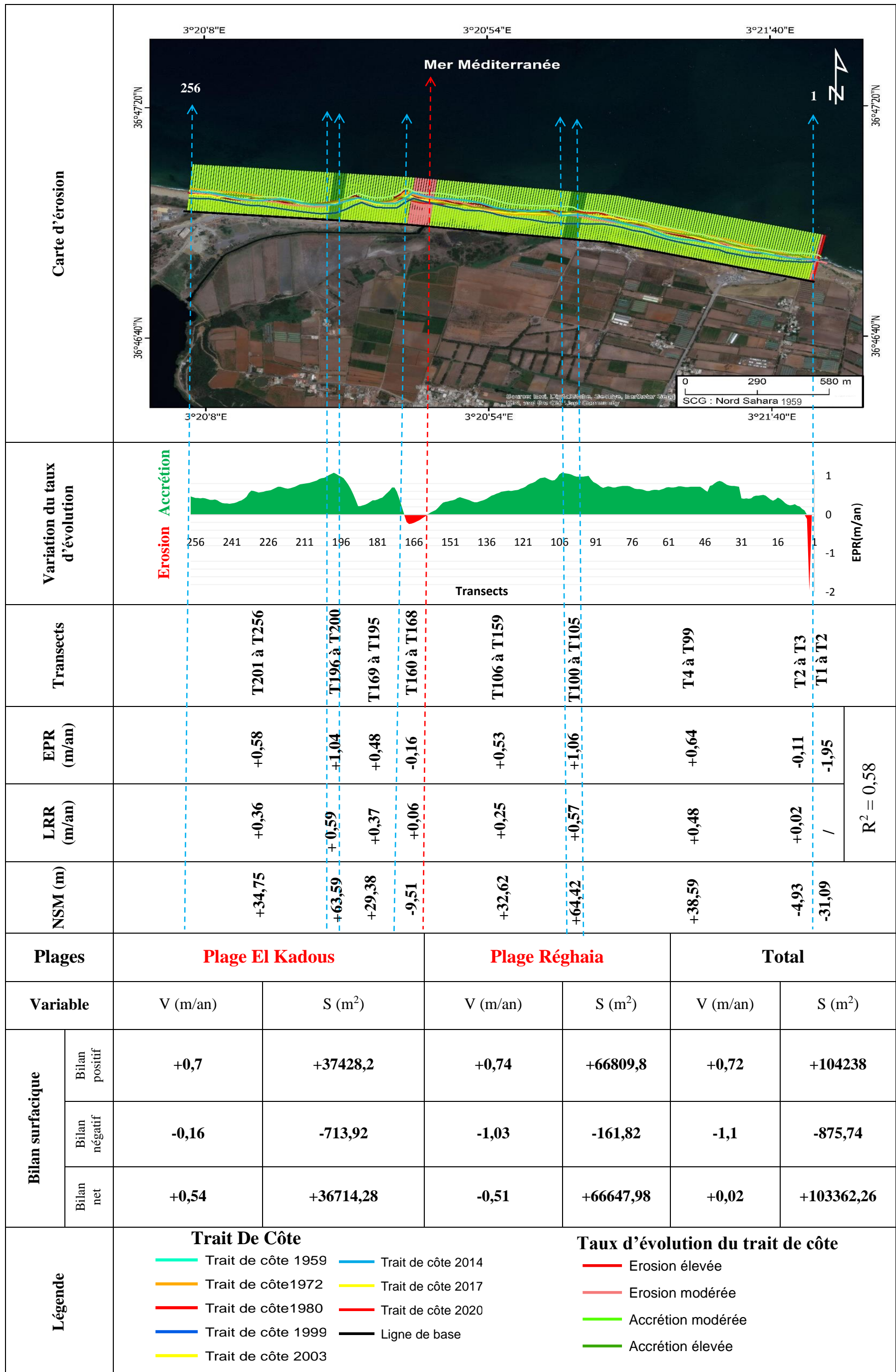


Figure 29 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1959 et 2020.

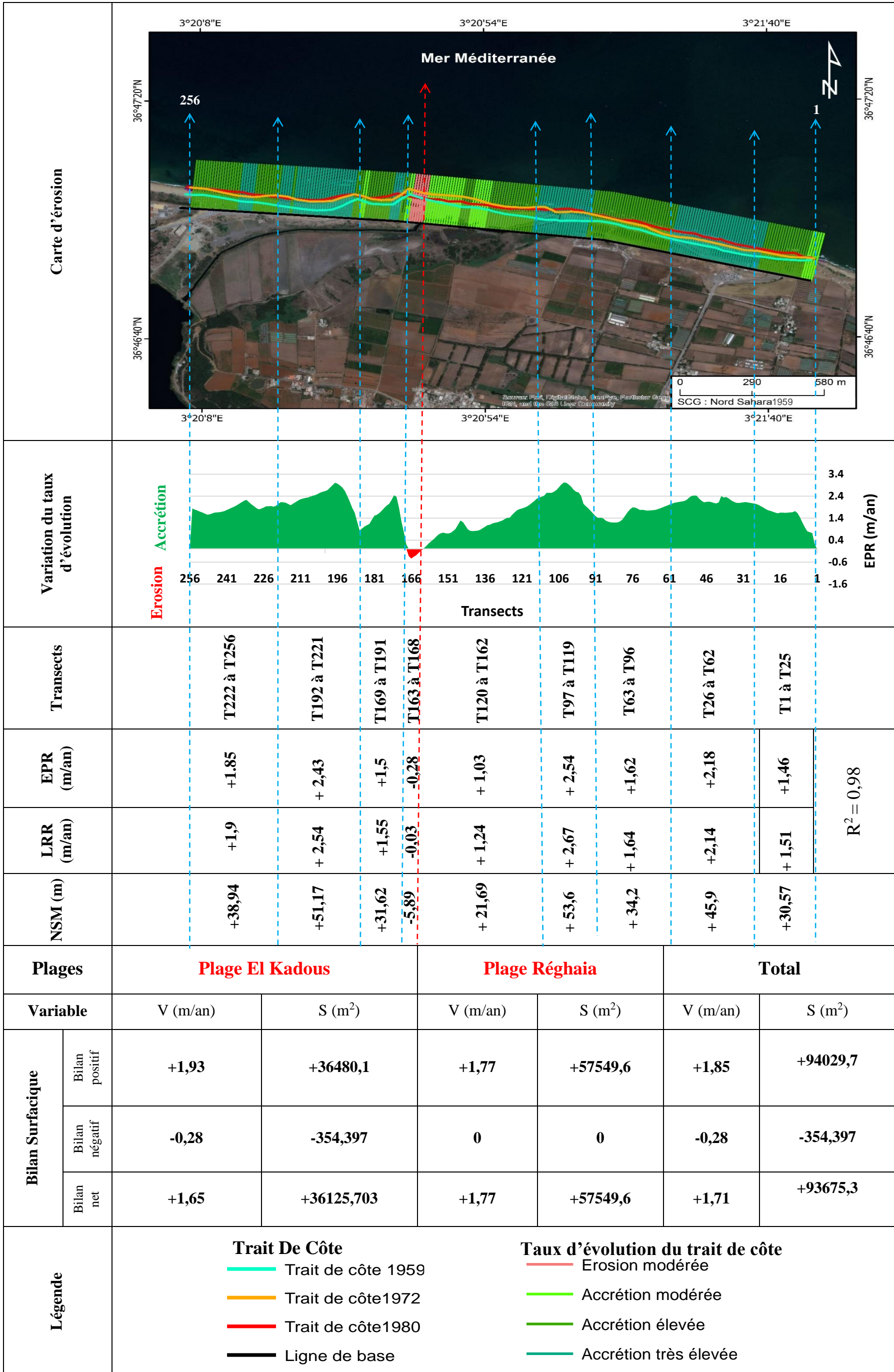


Figure 30 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1959 et 1980.

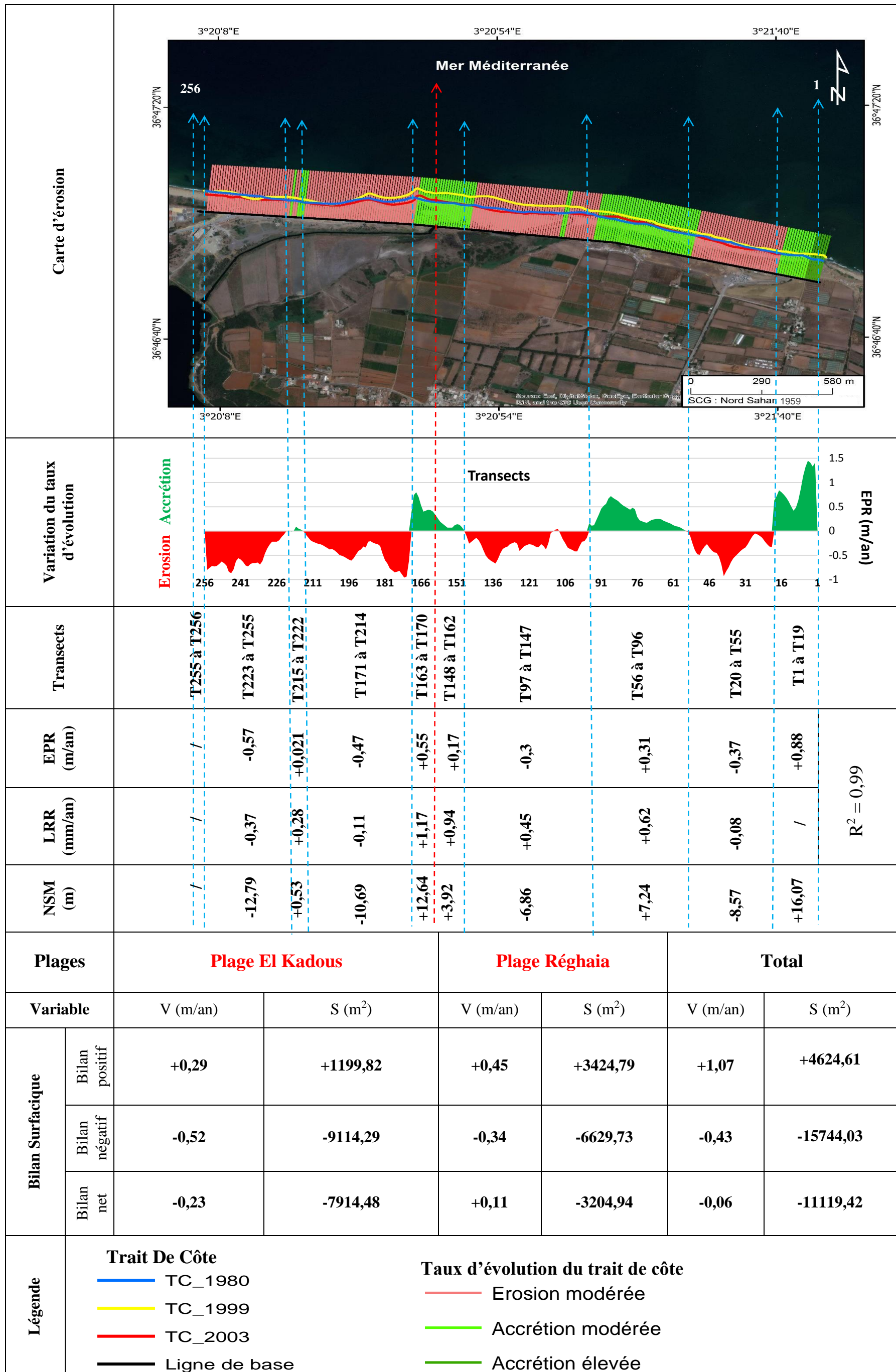


Figure 31: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 1980 et 2003.

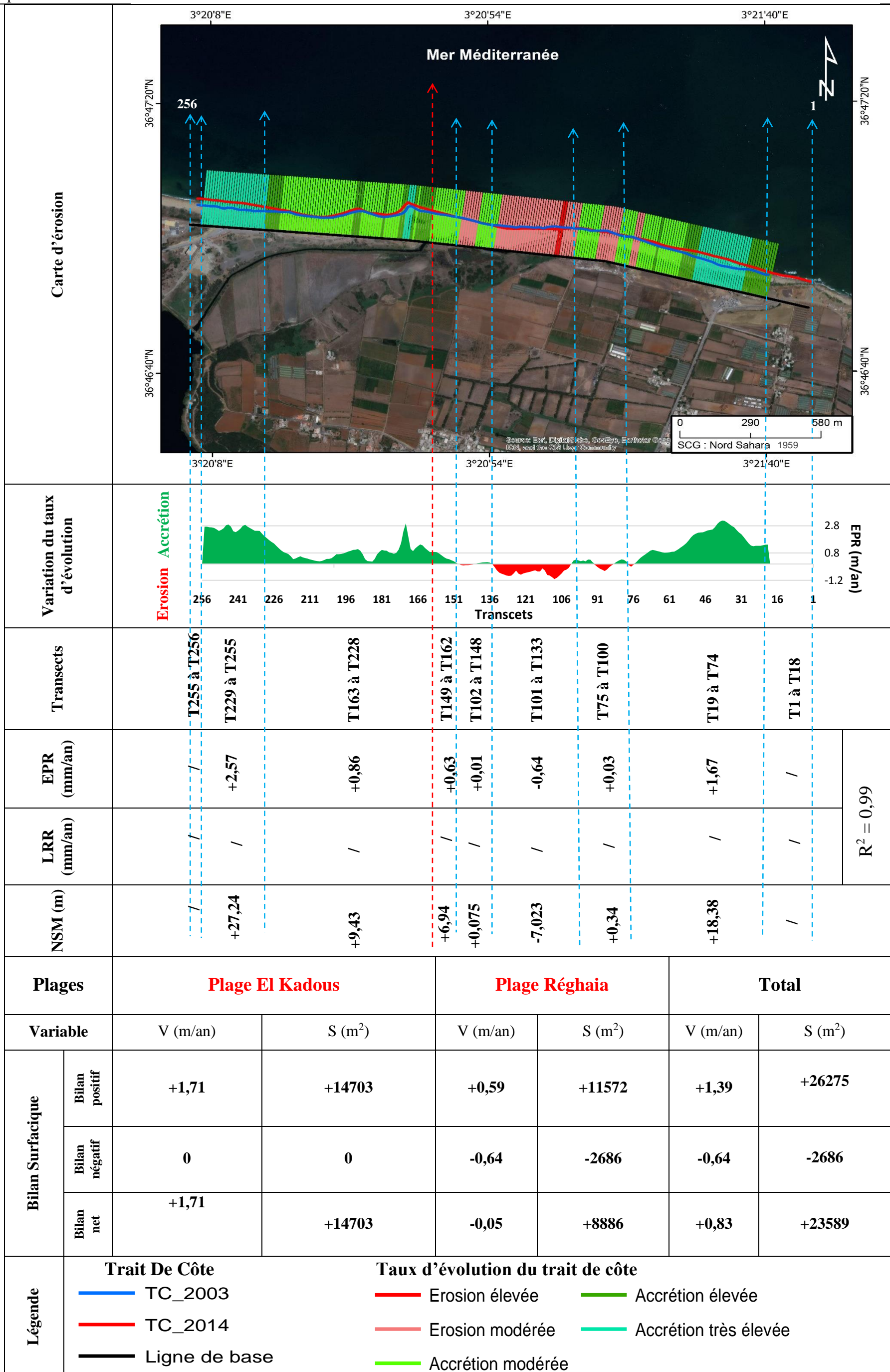


Figure 32: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2003 et 2014.

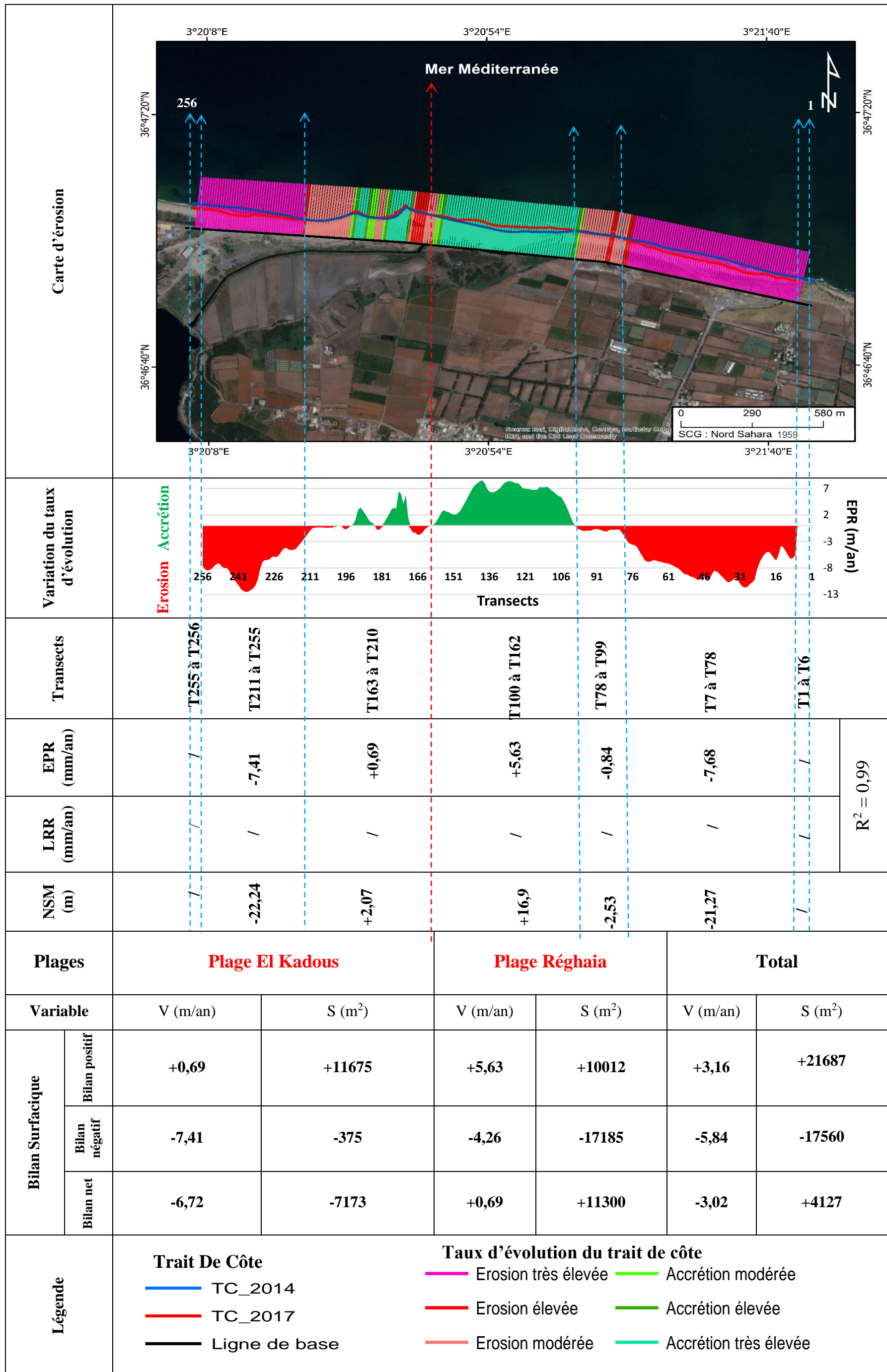


Figure 33 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2014 et 2017.

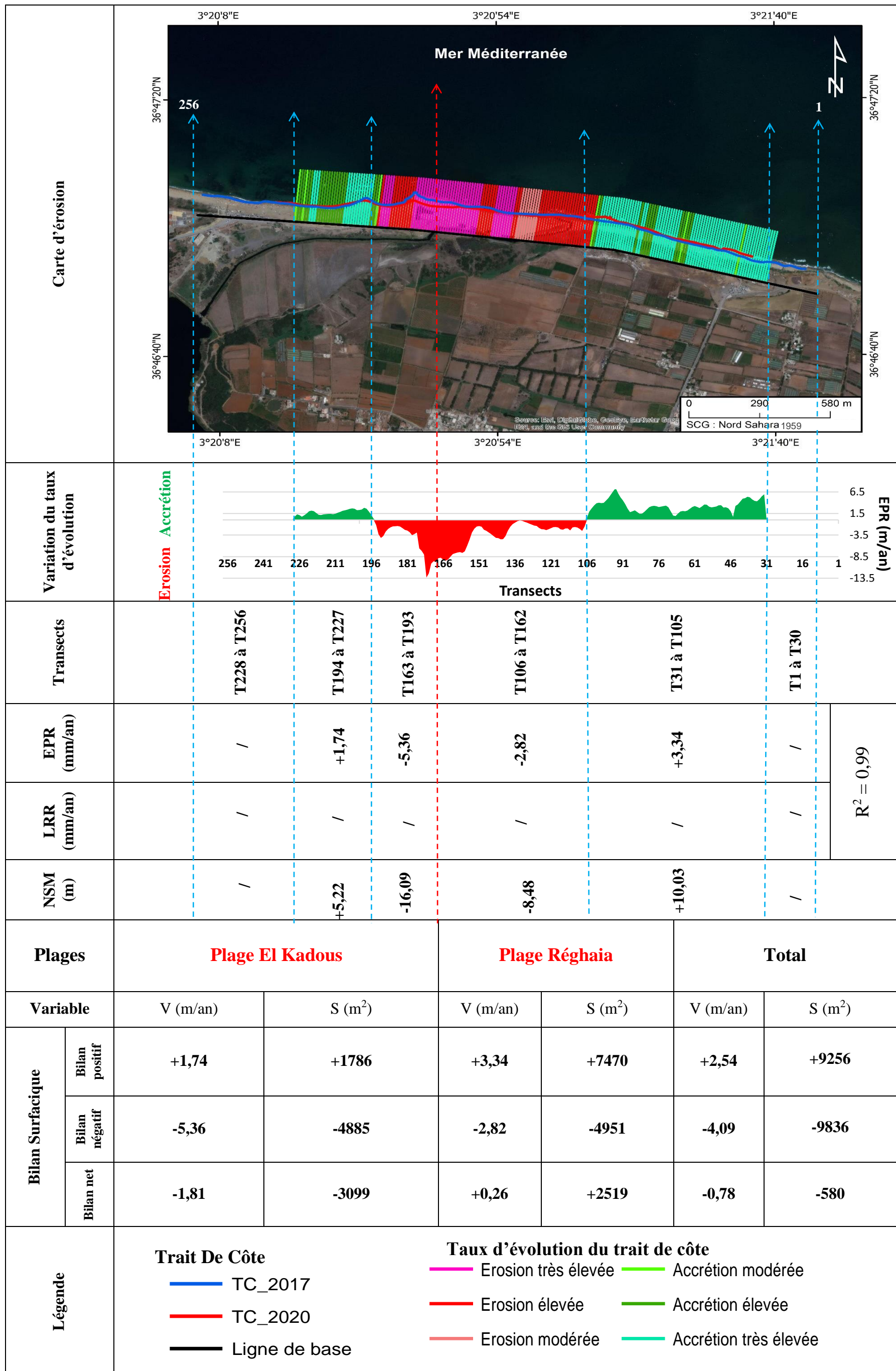


Figure 34 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2017 et 2020.

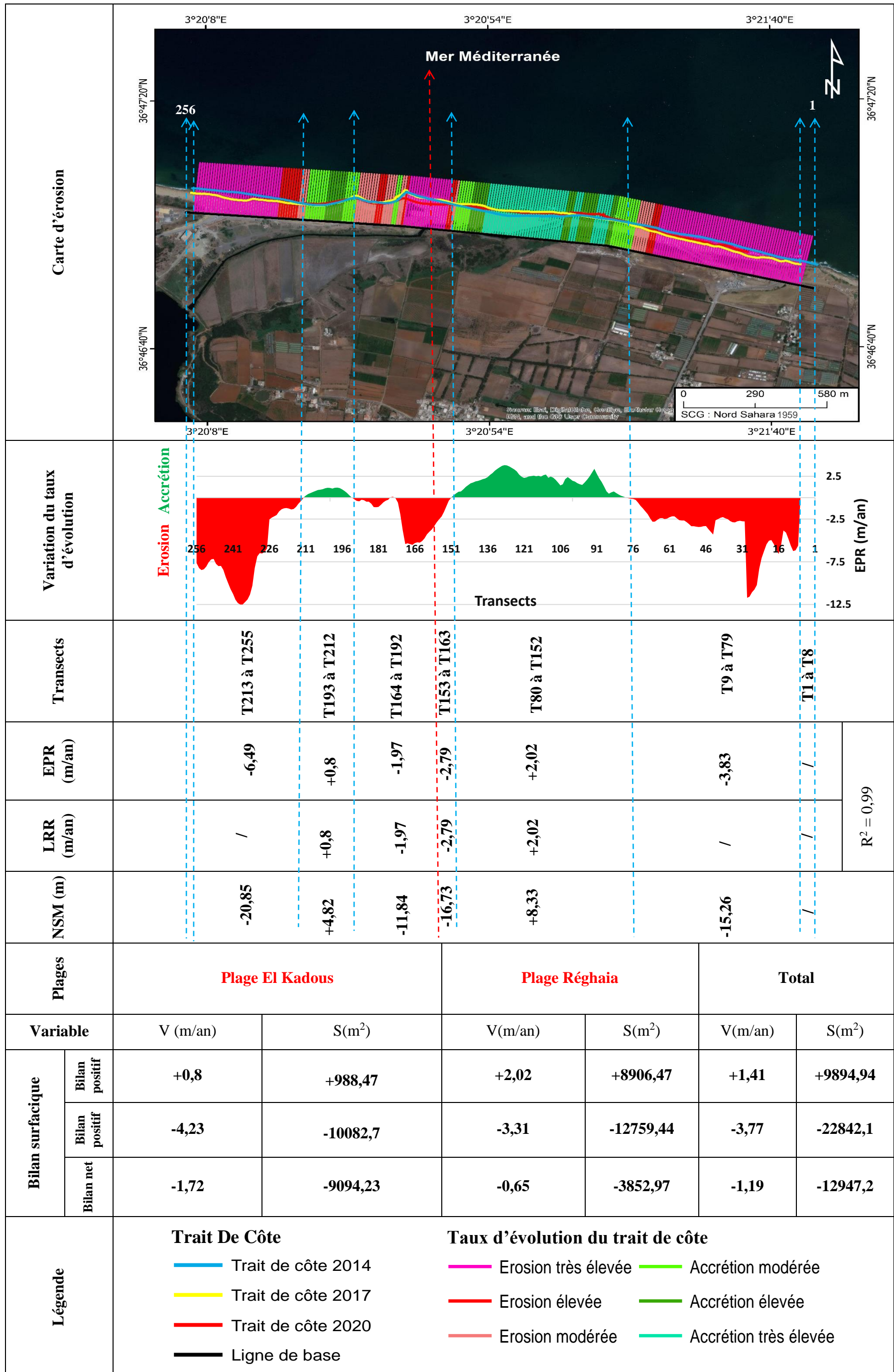


Figure 35 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière entre 2014 et 2020.

2. ETUDE BATHYMETRIQUE

Les fonds marins constituent généralement le prolongement naturel des structures terrestres, il y a souvent donc une relation étroite entre la géomorphologie du littoral et la topographie générale des fonds. La morphologie des fonds marins est soumise à l'action des facteurs hydrodynamiques, qui entraîne des modifications dans l'ensemble du système littoral sableux (NECHENACHE, 2015). Les données bathymétriques représentent une information primordiale pour la compréhension de phénomènes hydro sédimentaire près du rivage. (NOURI et YAHIA MEDDAH, 2017).

2.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Cette étude est basée sur l'exploitation des données bathymétriques pour la génération de Modèle Numérique du Terrain (MNT) à l'aide du logiciel de cartographie « ArcGis ». Cela permet de reconstruire la morphologie des fonds marins des deux levés bathymétriques réalisés en 2017 et 2020.

Une comparaison entre les deux levés bathymétriques a été menée en superposant les MNT des deux levés, dont l'objectif est d'évaluer l'état d'évolution du fond et de déterminer le différentiel d'évolution volumétrique.

2.1.1. ACQUISITION DES DONNEES BATHYMETRIQUES

Les données de la bathymétrie utilisées dans ce travail sont obtenues à partir d'une digitalisation des cartes bathymétriques de la base de données de Navionic à l'aide du logiciel ArcGis. Cette dernière offre une précision assez bonne, l'erreur altimétrique est de l'ordre centimétrique et de 10m dans le positionnement (source : **Site Navionic**) in (BOUKHEDICHE, 2017).

Les principales caractéristiques des deux bases de données utilisées dans ce travail et leurs sources sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 8).

Tableau 8 : Tableau représentatif des principales caractéristiques des deux bases de données bathymétriques (2017 et 2020).

Années d'acquisition	2017	2020
Système de coordonnées	WGS_1984_UTM_Zone_31 N	WGS_1984_UTM_Zone_31 N
Nombre de points	13680	65535
Coordonnées aux limites	W : 3° 3' 30" E N : 36° 49' 30" N E : 3° 21' 30" E S : 36° 44' 30" N	W : 3° 12' 00" E N : 36° 55' 30" N E : 3° 52' 30" E S : 36° 46' 30" N
Méthode d'acquisition	Digitalisation	Digitalisation
Zmin (m)	0.5	0
Zmax (m)	100	2000
La zone recouverte	La côte algéroise	La baie de Zemmouri
Opérateur	BOUKHEDICHE W. PFE, 2017	BENALLOU I. PFE, 2020

2.1.2. CHOIX DE LA ZONE D'INTERET

L'évolution des fonds est le résultat des échanges transversaux et longitudinaux entre les différentes unités morphologiques de la côte (NECHENACHE, 2015).

La détermination de l'unité morphologique incluant la zone d'étude est indispensable pour avoir une vue d'ensemble de l'état d'évolution actuel des fonds ainsi que de comprendre leurs tendances d'évolution futures.

L'unité morphologique appelée aussi la cellule sédimentaire est une portion du littoral ayant un fonctionnement sédimentaire relativement autonome par rapport aux secteurs voisins. Les limites des cellules sont, soit des ouvrages maritimes, soit des obstacles naturels importants (embouchures, caps,...) qui bloquent ou modifient le déplacement du sable sous l'action des houles (transit littoral) (DREAL, 2008).

La cellule sédimentaire choisie pour ce travail couvre la partie Est algéroise. Elle est délimitée à l'Est par l'embouchure de l'Oued Réghaia et à l'Ouest par les ouvrages de protection installés à Surcouf. Elle s'étale des traits de côte de 2017 et 2020 jusqu'à une profondeur de moins de 40m au large (Figure 36).

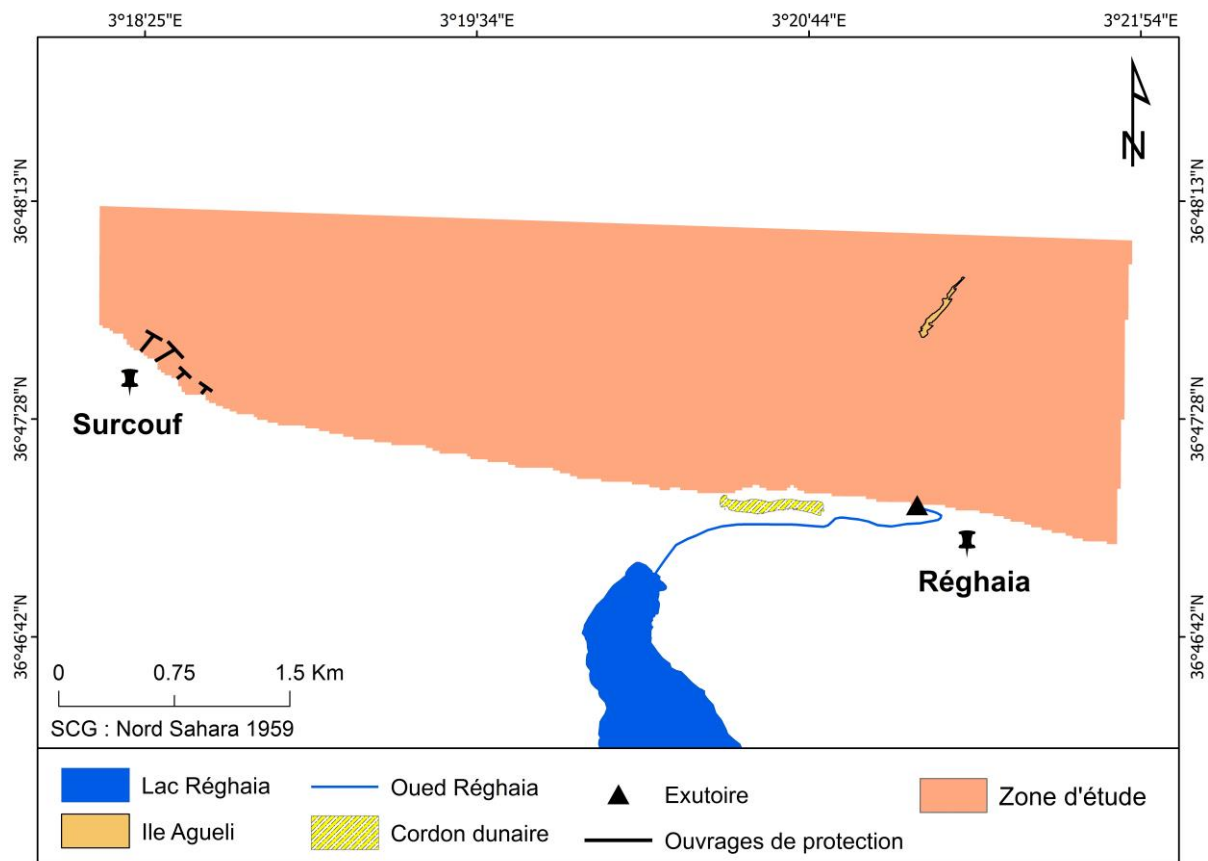


Figure 36 : Représentation de la zone d'intérêt.

2.1.3. REALISATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) appelé aussi Digital Terrain Model (DTM) est une représentation numérique et mathématique de la profondeur d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique dans un système référentiel bien défini (MOUSSA OUEDRAOGO et al., 2014).

Ce MNT fournit des informations sur la forme du relief et sur sa position cependant, il s'agit d'un modèle qui ne prend pas en considération le sursol (végétation ou bâtiment). Si le sursol est pris en compte, alors on parle de Modèle Numérique de Surface (MNS). Notant que $MNS - MNT = MNE$ qui est le Modèle Numérique d'Élévation ou bien Digital Elevation Model (DEM).

Un MNT a plusieurs façons d'être représenté, soit sous format raster soit sous format vecteur. Le format raster est une représentation matricielle des données en 2D alors que le format vecteur représente les données sous forme de lignes, de polygones ou de triangles en 2D ou en 3D (CHANEL, 2012).

La qualité d'un MNT dépend directement de la source de données à partir de laquelle il est généré, de l'intervalle et le type du maillage utilisé (maillage régulier carré (raster), maillage triangulaire

régulier, maillage triangulaire quelconque (TIN)), ainsi que du mécanisme d'interpolation (CHEREL, 2010).

Les étapes de la réalisation des MNT sont résumées dans les figures ci-dessous (Figure 37 et Figure 38). Les explications de ces dernières sont reportées plus loin.

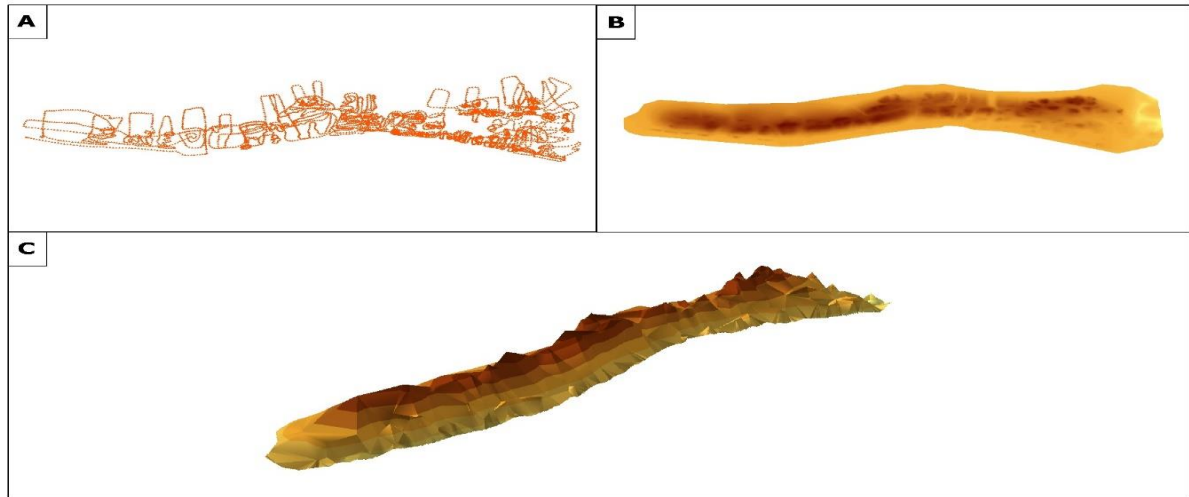


Figure 37 : A- Fichier de points ; B- MNT, fichier raster ; C- TIN, fichier vecteur.

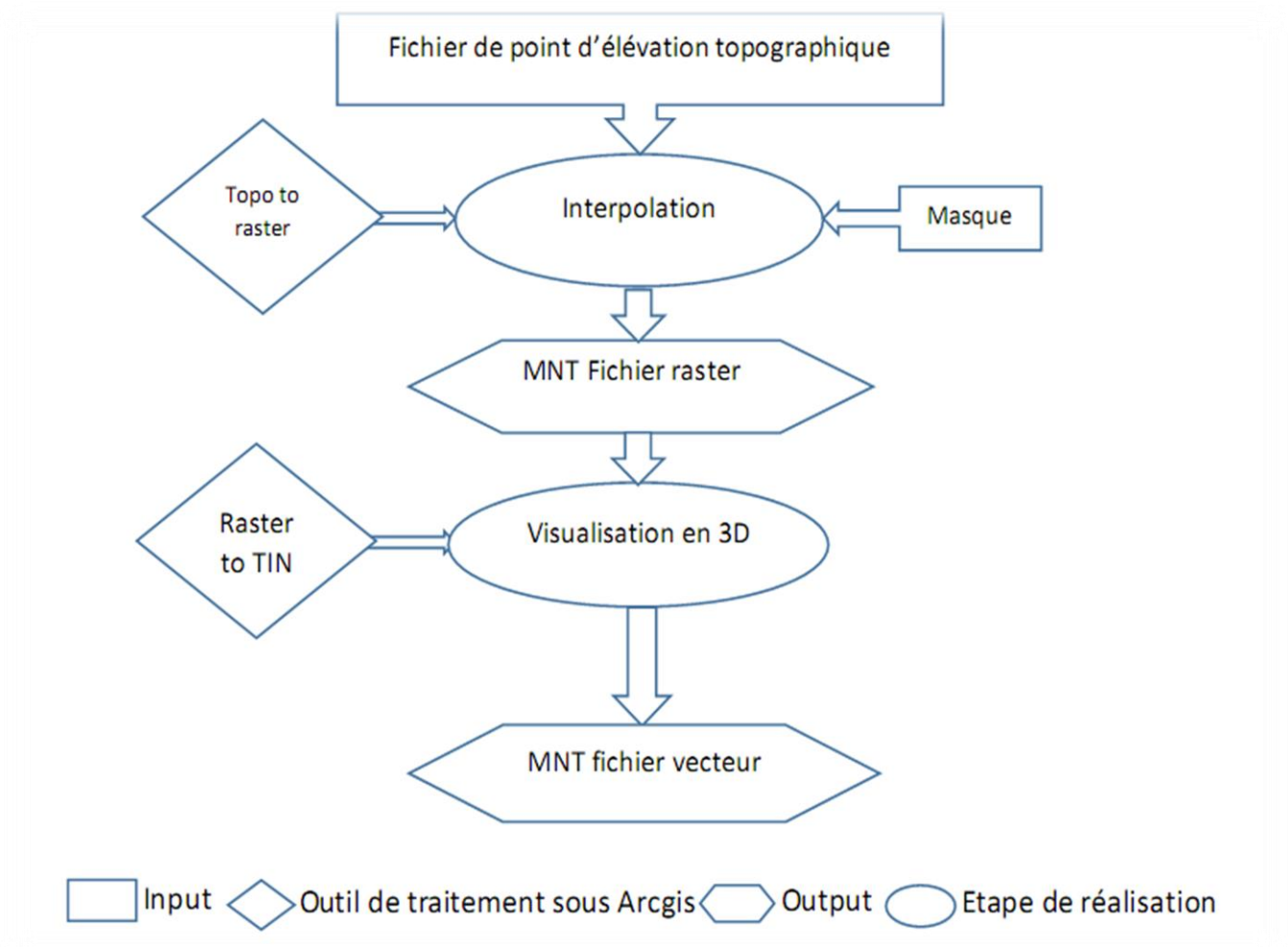


Figure 38 : Schéma explicatif des étapes de réalisation d'un MNT.

Un MNT Résiduel représentant la différence entre les deux MNT a été généré afin de définir les secteurs en érosion et en accrétion entre ces deux levés topographiques (YAHYAOUÏ et al., 2014).

La réalisation d'un MNT résiduel est effectuée sur Arcgis à l'aide de l'outil « remblais déblais », outil d'analyse 3D des données. Cet outil permet de calculer la différence de volume entre les deux MNT (fichier raster) de 2017 et 2020 et de la représenter sous forme d'une carte thématique.

Les traitements ont été réalisés sous le système de coordonnées projeté « Nord Sahara 1959 UTM Zone 31 », cependant les résultats sont représentés sous le système de coordonnées géographique « Nord Sahara 1959 ».

2.1.3.1. L'INTERPOLATION

Les données acquises sont disposées de manière irrégulière et ne permettent pas d'avoir une connaissance en tout point de la profondeur du terrain. Pour ce faire il faut définir une méthode d'interpolation qui permettra de décrire ce paramètre de manière continue. Ces méthodes d'interpolation sont très variées, avec leurs avantages et leurs inconvénients (CHANEL, 2012).

La génération d'un MNT s'effectue directement sous SIG à l'aide des outils d'analyse 3D (interpolation raster) de l'extension Arctoolbox du logiciel Arcgis. Cette opération se fait en interpolant le fichier de points de référence qui contient des informations d'élévation topographique pour avoir un fichier raster (en 2D). Ce dernier représente une surface continue disposant de l'information sur le triplet de coordonnées XYZ sur l'ensemble de la zone d'étude à un intervalle régulier.

Il existe différentes méthodes d'interpolation : l'inverse de la distance pondérée (IDW), le kriging, la méthode ANUDEM (topo vers raster), le voisin naturel, et la méthode Spline. La méthode d'interpolation la plus adaptée est choisie selon la nature des nuages de points à traiter et les outils disponibles (BOUNOUA et KACI, 2017).

La méthode d'interpolation choisie pour la suite du travail est celle d'ANUDEM (topo vers raster) qui donne une meilleure représentation de la réalité. Cette méthode utilise une technique d'interpolation spécialement conçue pour créer une surface qui représente au mieux une surface de drainage naturel et préserve à la fois les lignes de crête ainsi que les réseaux de cours d'eau (**Manuelle d'Arcgis**).

2.1.3.2. VISUALISATION 3D DE MNT

La visualisation 3D des MNT nécessite la conversion du jeu de données raster issu de l'interpolation en un fichier TIN (Triangular irregular networks) à l'aide de l'outil de géo-

traitement « Raster vers TIN », l'un des outils d'analyse 3D de l'extension ArcToolbox du logiciel Arcgis. Le module ArcScene est utilisé par la suite pour la visualisation 3D des TIN.

Le maillage triangulaire quelconque (TIN) est le meilleur mode pour la présentation de la morphologie d'une surface. Le TIN utilise une grille dont les mailles ont une taille variable et une forme triangulaire, les sommets de triangle sont les coordonnées tridimensionnelles de 3 points (HENTATI et al., 2008) et (Créer une surface TIN—ArcGIS Pro | Documentation).

2.2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après les résultats de différents traitements effectués qui sont représentés sous forme de MNT en 2D et 3D (Figure 39), cartes de pente (Figure 40 et Figure 41) et des cartes résiduelles (Figure 42 et Figure 43). On constate que :

➤ De 0 à -10m

En 2017, la région de Réghaia a été caractérisée par des isobathes à un espacement régulier qui prend une disposition parallèle à la côte sauf pour la zone en face d'exutoire de l'Oued Réghaia où une bosse a été formée, cela témoin d'un apport sédimentaire important d'origine terrigène. A l'arrivé à Surcouf, les isobathes deviennent très serrées. Ce qui correspond en allant de l'Est vers l'Ouest de la zone, à une variation importante d'une zone à pente faible vers une zone à pente forte. De point de vue géomorphologique, cela correspond à des plages dissipatives à l'Est qui favorise l'accumulation de sédiment sur le plateau continental et à des plages réfléchives à l'Ouest qui favorise le départ de sédiments vers le large.

La bathymétrie de 2020 présente une morphologie similaire à celle de 2017 mais avec un espacement plus faible entre les isobathes. A l'exception de quelques modifications qui sont observées dans la partie Est de l'exutoire de l'Oued Réghaia où la bosse a changé sa position et sa direction initiale et les isobathes entre 0 et -5m sont plus espacées et celles entre -5 et -10m sont plus serrées. De point de vue géomorphologique, cela témoin de la formation des barres sous-marines qui joue le rôle d'un ouvrage de protection naturel contre l'action hydrodynamique.

Ce changement sur le plan bathymétrique est le résultat de la délocalisation anthropique d'exutoire de l'Oued Réghaia entre 2017 et 2020. Cela a engendré une dégradation de la zone en face de l'exutoire de l'Oued Réghaia et une progression de la zone se trouvant à l'extrémité Est avec un fort changement de pente entre ces deux périodes.

➤ **De -10 à -20m**

Pour la bathymétrie de 2017, La zone de Réghaia a été caractérisé par la présence d'un obstacle naturelle « Ile Agueli » qui génère une bathymétrie spécifique où les isobathes la contournent avec un espacement non régulier qui diminue en allant vers les profondeurs de -20 m.

En s'éloignant de l'Ile Agueli, les isobathes redeviennent plus espacées puis plus serrée en se rapprochant du Surcouf. Cela correspond à des pentes faibles à moyennement forte autour de l'Ile Agueli, et à des pentes faibles à fortes en allant vers Surcouf.

La bathymétrie de 2020 présente aussi la même morphologie mais avec un espacement plus serrée ce qui correspond à des pentes plus fortes que celles observées en 2017. Cette zone est caractérisée par un bilan sédimentaire positif entre 2017 et 2020 sauf pour la zone en face de l'exutoire de Réghaia, cela est associé à une variation de pente moyenne à faible.

➤ **<-20m**

En 2017, en s'opposant à l'Ile Agueli, les isobathes sont plus ou moins serrées et devient plus espacées en s'éloignant de celle-ci. Puis redevient légèrement serrés en allant vers l'Ouest de la zone d'étude.

La bathymétrie de 2020 présente toujours les mêmes tendances d'évolution que celles de 2017 mais avec un espacement plus serré. Des anomalies ont été observées dans les extrémités Est et Ouest de la zone d'étude qui correspond à des élévations du fond atteignant -15 m entre les isobathes de -20 m et -25 m.

Cette zone est caractérisée par un bilan sédimentaire négatif, le volume perdu pendant cette période est très important. A l'exception aux extrémités de la zone à l'Est et à l'Ouest correspondantes à des zones d'élévation et autour de l'Ile Agueli où une progression a été observée.

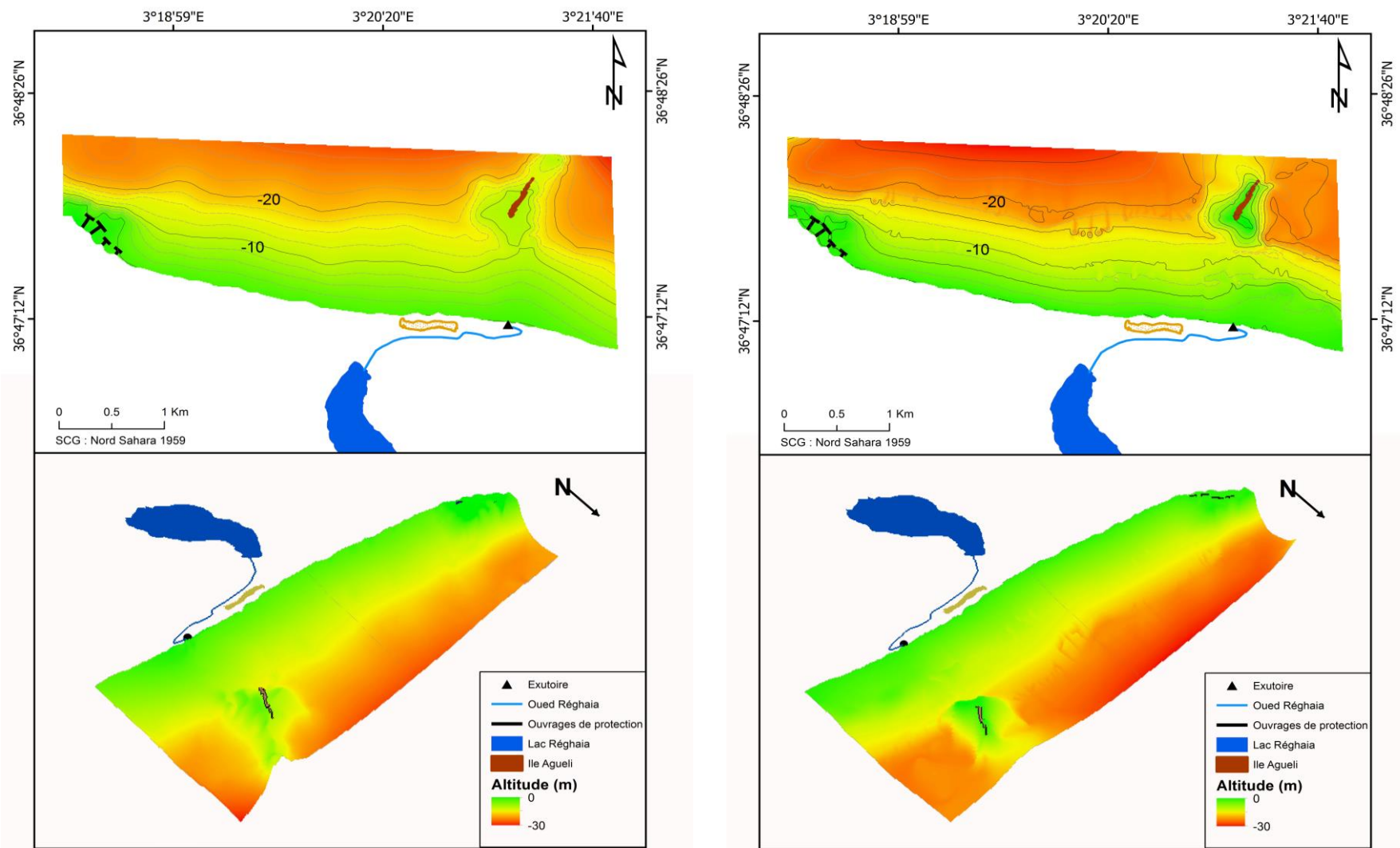


Figure 39 : Cartes bathymétriques de 2017 et 2020.

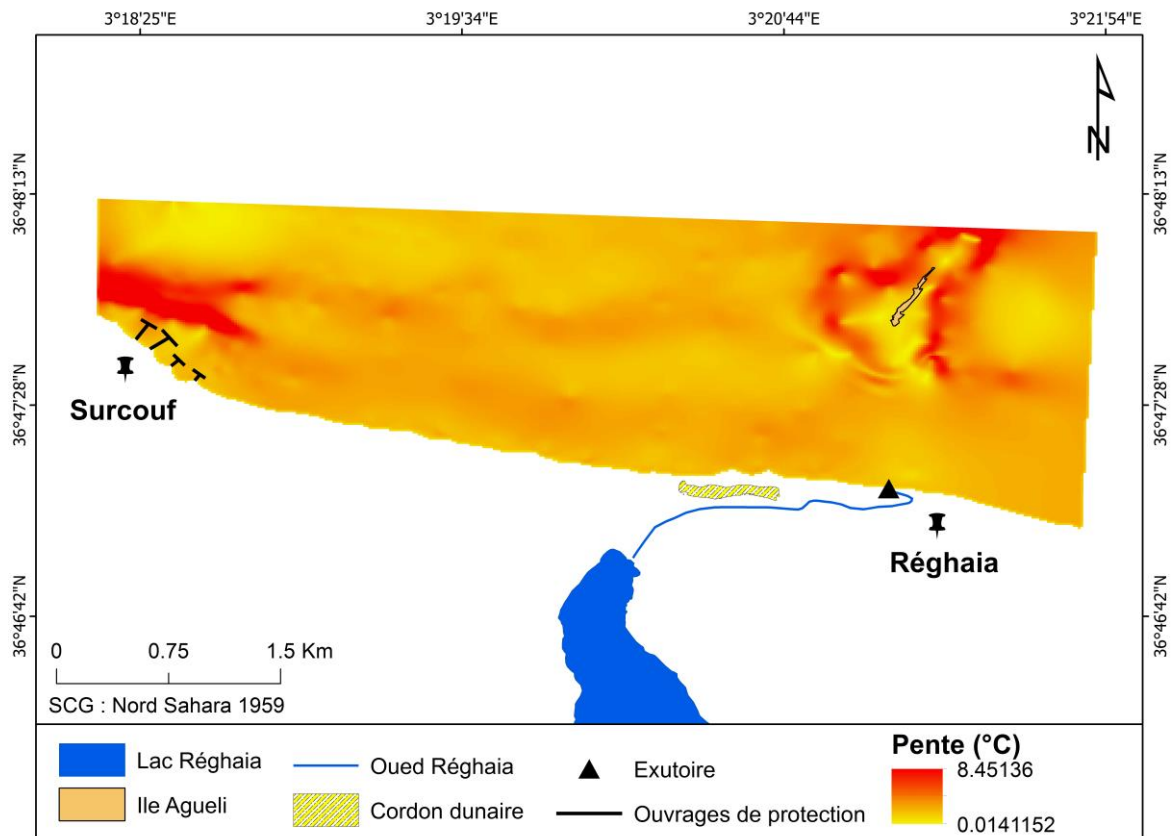


Figure 40 : Carte de pente (2017).

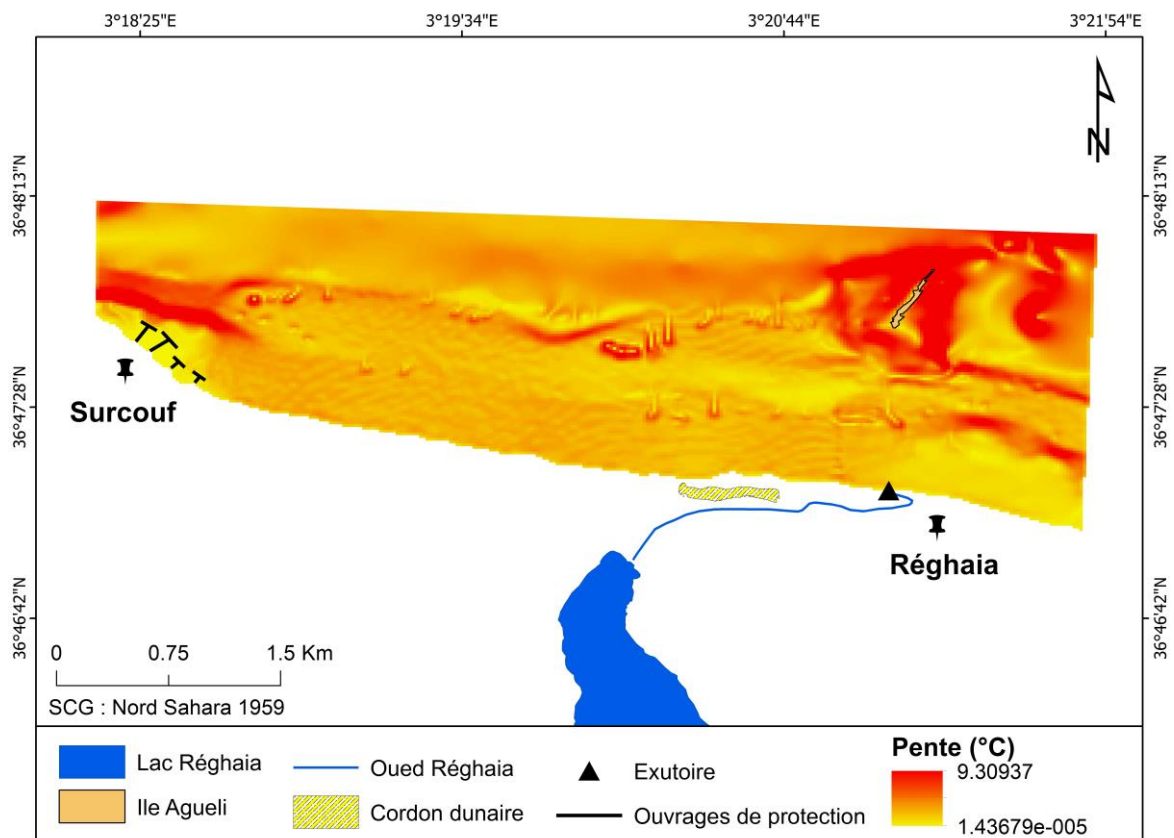


Figure 41 : Carte de pente (2020).

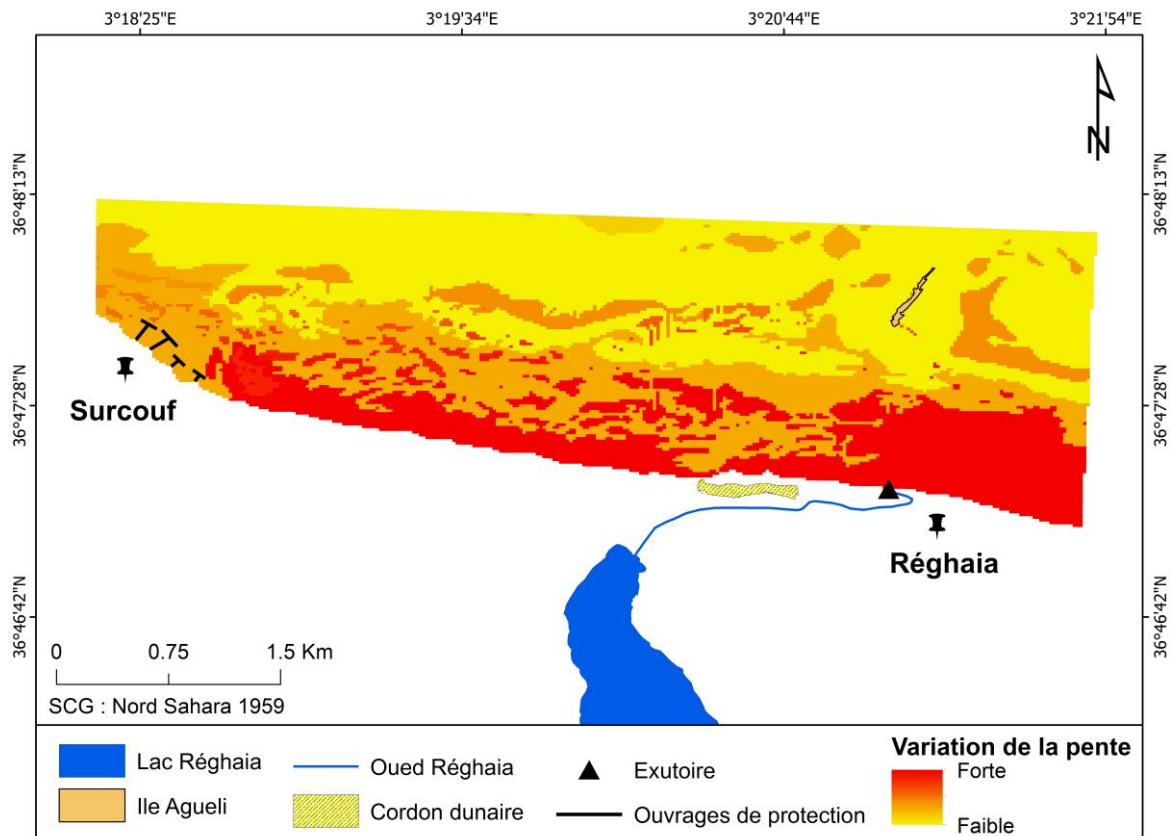


Figure 42 : Carte de la variation de la pente entre 2017 et 2020.

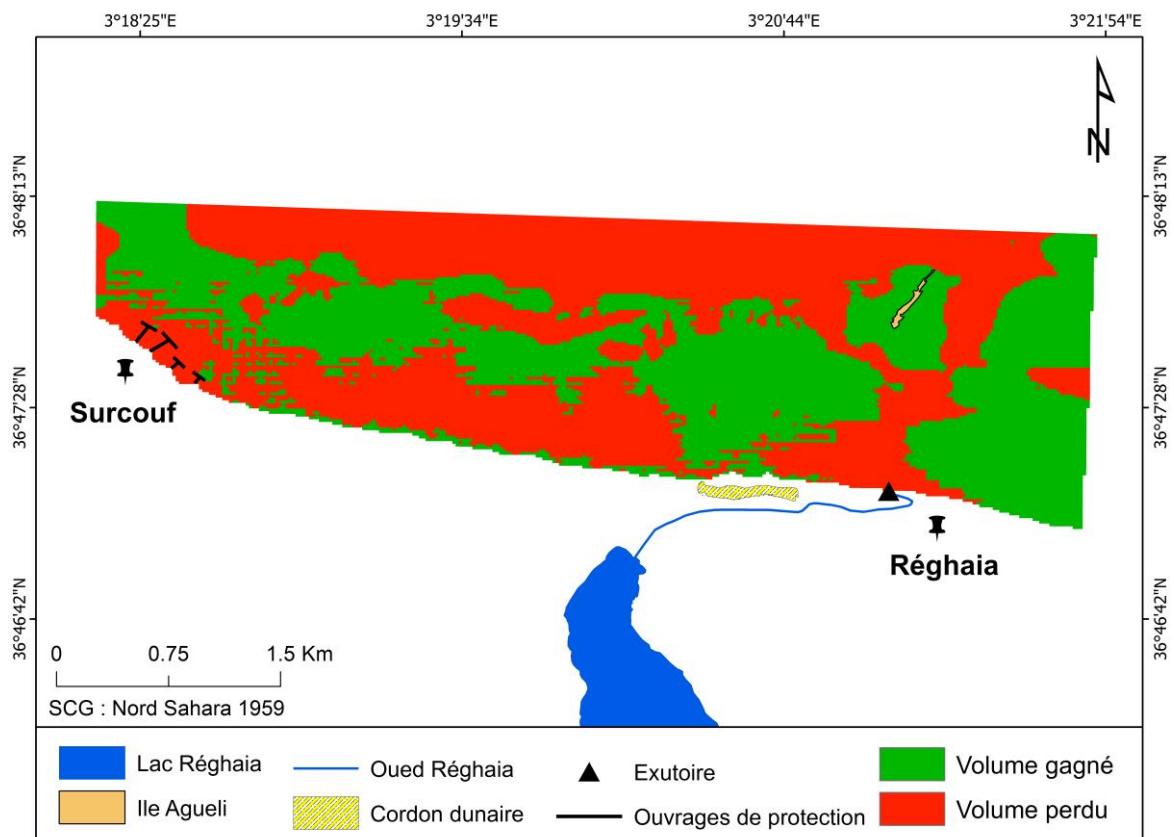


Figure 43 : Carte de différentiel bathymétrique entre 2017 et 2020.

2. ETUDE HYDRO-SEDIMENTAIRE

Les zones littorales connaissent une érosion importante suite au déséquilibre du transport littoral découlant de facteurs naturels et anthropiques. Afin de comprendre le phénomène de la stabilité des côtes (particulièrement les régions sableuses), il est primordial d'étudier les facteurs qui animent la dynamique sédimentaire le long de ces côtes, notamment les courants générés par les vents, les vagues et les marées (NICHOLAS ET CHRISTOPHE, 2006).

3.1.APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'approche méthodologique utilisée pour l'étude de comportement hydrosédimentaire de la zone d'étude s'appuie sur une modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires à l'aide de la suite logicielle « MIKE 21/3».

3.1.1. PRESENTATION DE LA SUITE LOGICIELLE MIKE 21/3

Le MIKE 21/3 est un système numérique puissant fourni par l'institut hydraulique Danois (DHI) qui est utilisé dans l'étude des domaines côtiers.

Il repose sur un couplage de trois modèles : le modèle de propagation de la houle (MIKE 21-SW), le modèle d'hydrodynamique (MIKE 21-HD) et le modèle de transport sédimentaire (MIKE 21-ST) (OUZIDAD et MERROUCHE, 2019).

3.1.2. DONNEES D'ENTREES

L'étude hydrosédimentaire nécessite dans un premier temps de recueillir un certain nombre de données disponibles sur le site d'étude, ces données sont :

- Bathymétrie ;
- Régimes de houles au large ;
- Marnage ;
- Granulométrie.

3.1.2.1.BATHYMETRIE

Les données bathymétriques représentent une information primordiale pour la compréhension des phénomènes hydro-sédimentaires près du rivage (NOURI et YAHIA MEDDAH, 2017).

En gardant toujours les mêmes limites spatiales que la zone d'intérêt utilisée pour l'étude bathymétrique, une carte bathymétrique de 2020 (Figure 45) a été créée en utilisant un maillage triangulaire contenant 10000 nœuds (Figure 44).

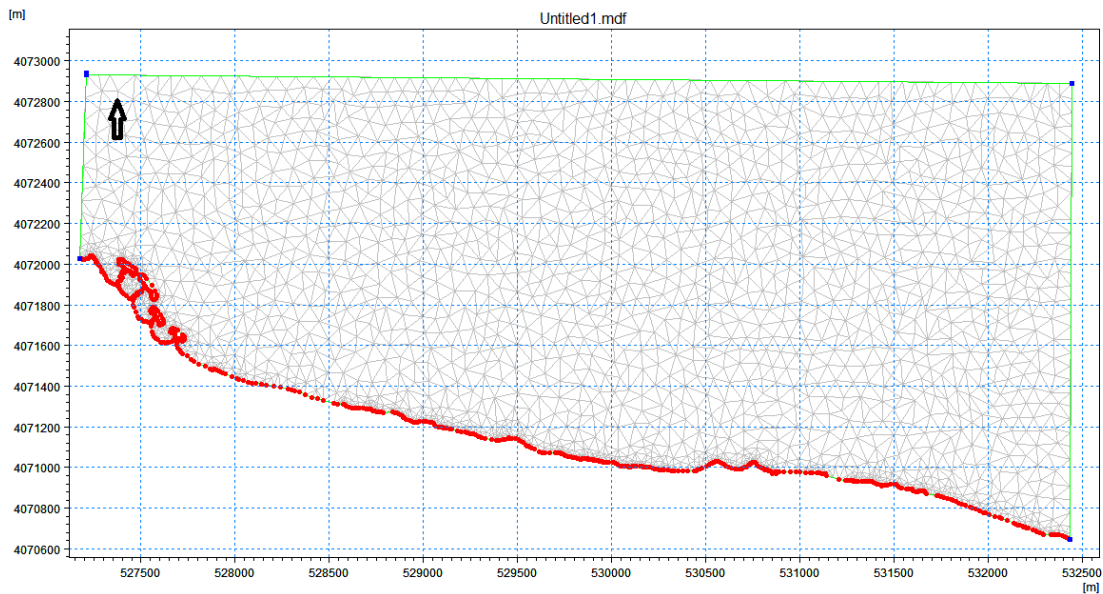


Figure 44 : La Mesh générée par le MIKE.

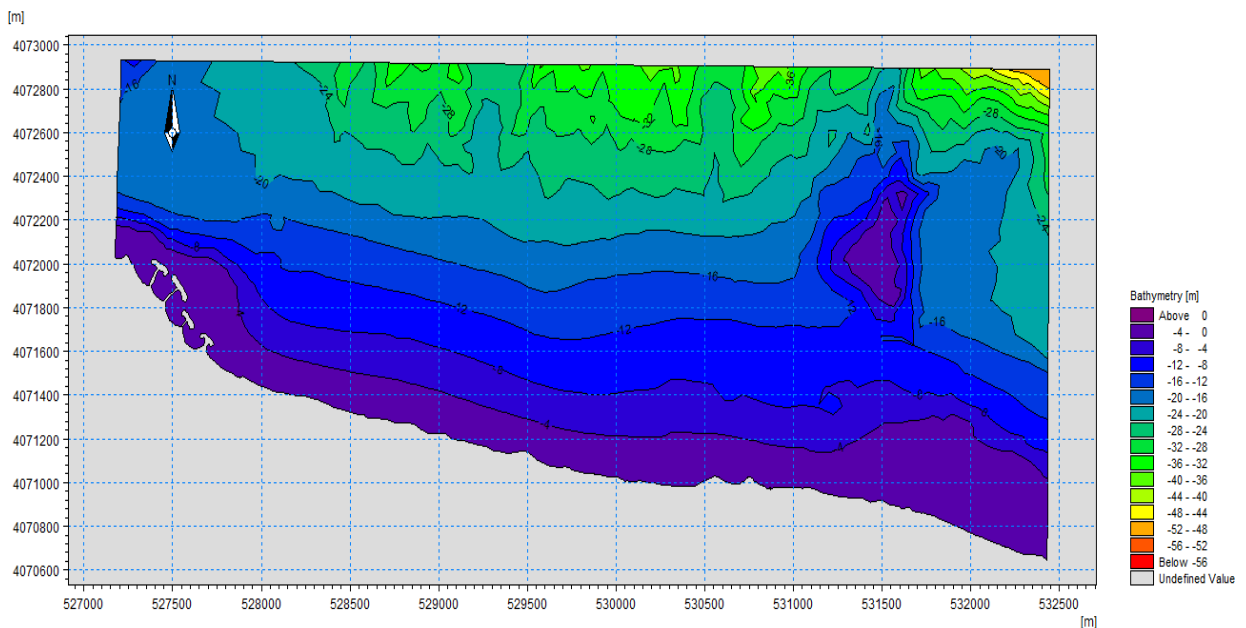


Figure 45 : La carte bathymétrique générée par le MIKE.

3.1.2.2. REGIME DES HOULES AU LARGE

A partir d'une certaine profondeur, la houle peut être altérée par le fond et par la suite subir une série de modifications de ses paramètres physiques (NOURI et YAHIA MEDDAH, 2017).

Les données de houle au large sont extraites à partir de la base de données « era5 » qui offre des mesures chaque 3h de 0h à 21h sur une période de 27 ans allant de 1992 à 2019 regroupant 81817

observations. Le point d'extraction de ces données est au large de la baie de Zemmouri, dont les coordonnées géographiques sont les suivantes : 37N de latitude et 3,5E de longitude.

Le tracé des roses des houles (Figure 46), permet d'observer une similitude des roses des houles annuelles et des deux saisons : Automne et Printemps, mais avec des fréquences d'apparition et des hauteurs significatives différentes qui varient par direction et par saison.

- L'hiver est caractérisé par des houles provenant des secteurs NNE, W et NWW représentant des fréquences d'apparitions de 5,18%, 4,63% et 3,30% respectivement.
- Le printemps et l'automne présente des régimes de houle identiques qui se caractérisent par la prédominance de trois direction NNE, NE et W avec des fréquences d'apparitions comprise entre 4 et 5%.
- Les trois saisons citées auparavant sont caractérisées par des houles peu agitées à très fortes dont les hauteurs significatives sont comprises entre 0,5 à 6m, avec la prédominance des houles fortes de 4 à 6m de hauteurs.
- L'été est caractérisé par des houles peu agitées à fortes avec des hauteurs significatives variant entre 0,5 à 4m et qui provient des secteurs NNE, NE et NEE dont les fréquences d'apparitions saisonnières sont de 4,24%, 7,37% et 6,75% respectivement.
- Annuellement, les houles de secteurs NNE, NE et W prédominent avec des fréquences d'apparition annuelles d'environ 4%. Les hauteurs significatives oscillent généralement entre 0.25 et 2.5m caractérisant les états de mer peu agités à agités.
- La classe de période allant de 6 à 9s est la plus dominante durant toute l'année, sauf pour la saison estivale où la classe de 3 à 6s prédomine (voir Annexe 6).

En prenant en considération les directions de houles les plus dominantes et la configuration de la zone d'étude, trois directions de houles ont été choisies, leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 9).

Tableau 9 : Tableau représentant les caractéristiques des houles choisies

Direction de houles	NW	NNE	NE
Hauteur significative (m)	2.31	2.06	1.44
Période de retour (s)	7.31	9,13	6.24

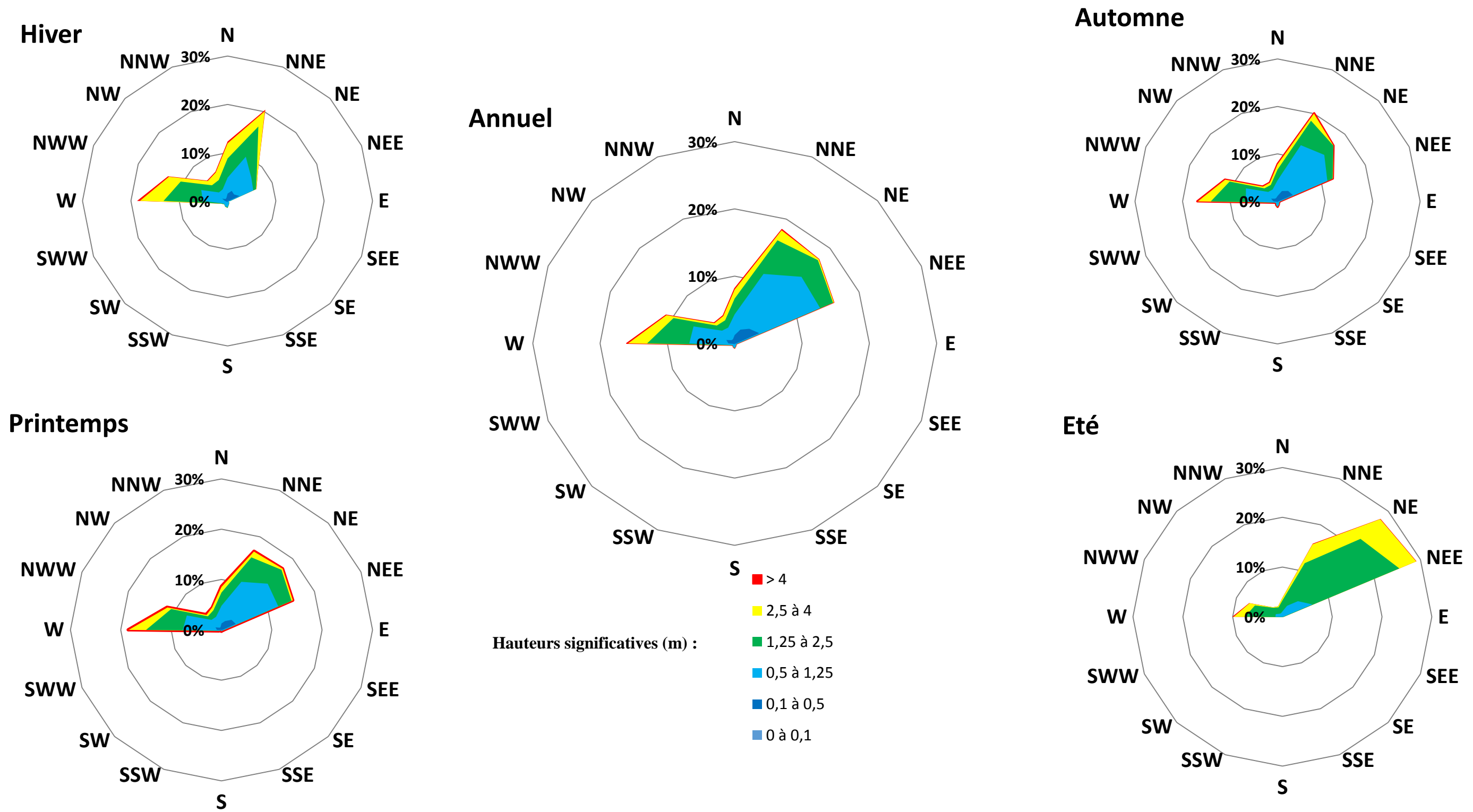


Figure 46 : Roses de houles à l'échelle saisonnière et annuelle (era5, 1992/2019).

3.1.2.3.MARNAGE ET GRANULOMETRIE

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

Les données granulométriques sont issues des analyses granulométriques faites par le LEM en 2020 dans le cadre d'un projet en cours de réalisation. Le diamètre moyen est de 0.217mm.

3.2.RESULTATS ET DISCUSSIONS

Au large, les houles ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales, mais au fur et à mesure qu'elles se propagent vers la côte l'effet du fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en se rapprochant de la cote pour atteindre des valeurs inférieures qui varient en fonction de la profondeur et de la présence d'obstacles.

La partie Est de la zone d'étude se caractérise par la présence de l'Ile Agueli qui constitue une sorte d'obstacle naturel qui provoque la diffraction des houles et déclenche leur déferlement bien avant l'arrivée à la côte et plus rapidement que la partie Ouest. La zone derrière elle semble être plus ou moins naturellement abritée contre l'action marine. D'après les résultats de l'étude hydrosédimentaire, l'Ile Agueli n'influe pas vraiment sur le régime du transport sédimentaire près du littoral. De ce fait, sa faible contribution va être négligée.

❖ Le secteur NE

Les houles de secteur NE sont les plus fréquentes pendant la saison estivale et printanière avec une hauteur significative de 1,44m et une période de 6,24s. A l'arrivée à la côte, elle enregistre une hauteur qui ne dépasse pas 0,3m/s et une obliquité variant entre 10 et 45° par rapport au rivage. Le coefficient de réfraction des houles (H_s locale par rapport à H_s au large) est de 0,2 ce qui signifie que les plans de vagues provenant de ce secteur sont peu réfractés (Figure 47).

Au niveau de Réghaia, ces houles induisent un courant parallèle à la côte dont les vitesses moyennes peuvent atteindre 0,4m/s. Ceci est accompagné par une dérive littorale de l'Est vers l'Ouest dont l'intensité est de $409,97\text{m}^3/\text{an}/\text{m}$. Les sédiments sont arrachés le long des secteurs se trouvant à l'Est et sont déposés au fur et à mesure de leur déplacement vers le cordon dunaire d'El Kadous qui se trouve à l'abri des houles de ce secteur en raison de la présence de l'Ile Agueli. A partir de cette zone, le transport sédimentaire continuera son déplacement vers l'Ouest mais avec un débit moins important qui ne dépasse pas $189,22\text{m}^3/\text{an}/\text{m}$. Cette diminution de la quantité de sédiments transportées témoigne d'un dépôt potentiel de sédiments dans ce secteur. Du point de

vue géomorphologique, cela constitue une sorte d'alimentation en sédiments qui favorise le développement du cordon dunaire d'El Kadous (Figure 48, Figure 49 et Figure 50).

❖ Le secteur NNE

Les houles provenant du secteur NNE, dont la hauteur significative et la période sont de 2,06m et de 9,13s respectivement, sont dominantes pendant la saison estivale et printanière. En approchant de la côte, ces houles perdent une partie considérable de leurs énergies, les hauteurs significatives enregistrent des valeurs comprises entre 0,30 et 0,45m avec une obliquité qui varie entre 0 et 45° par rapport au rivage. Le coefficient de réfraction des houles est de 0,17 ce qui signifie que les plans de vague provenant de ce secteur sont peu réfractés (Figure 51).

Les courants générés par ce secteur suivent le même cheminement que ceux engendrés par le secteur NE, mais avec une intensité plus forte qui peut atteindre 0,52m/s. Ces courants forts peuvent mettre en mouvement une quantité plus importante de sédiment qui peut atteindre 1229,90497m³/an/m. Cela signifie que les houles de secteur NNE sont celles qui conditionnent le plus le développement du cordon dunaire d'El Kadous (Figure 52, Figure 53 et Figure 54).

❖ Le secteur NW

Les houles provenant du secteur NW, dont la hauteur significative et la période sont de 2,31m et de 7,31s respectivement, sont très fréquentes durant la période hivernale. A l'arrivée à la côte, elles enregistrent des valeurs inférieures à 0,2m avec une obliquité variant entre 0 et 60° par rapport au rivage. Le coefficient de réfraction des houles est de 0,087 ce qui signifie que les plans de vagues provenant de ce secteur sont très peu réfractés (Figure 55). Néanmoins, La zone d'étude n'est pas abritée contre les houles de ce secteur.

Ces houles engendrent un courant long shore dirigé de l'Ouest vers l'Est et dont l'intensité diminue au fur et à mesure de sa progression, avec des vitesses qui enregistre un maximum de 2,1m/s à Surcouf et un minimum de 0.3m/s à Réghaia. Cette tendance évolutive des courants induit un transport sédimentaire de l'Ouest vers l'Est avec une diminution remarquable des vitesses du transport sédimentaire en allant vers l'Est. Cela témoin d'un dépôt potentiel de sédiments largement avant l'arrivée à Réghaia. A la proximité de Réghaia, des vortex se créent favorisant l'arrachement de sédiments de ce secteur et leur dépôt dans les secteurs adjacents se trouvant à l'Est. La quantité de sédiments arrachés est inférieure à 409,97m³/an/m (Figure 56, Figure 57 et Figure 58). Du point de vue géomorphologique, cela constitue une sorte de puis pour le développement du cordon dunaire et favorise sa dégradation.

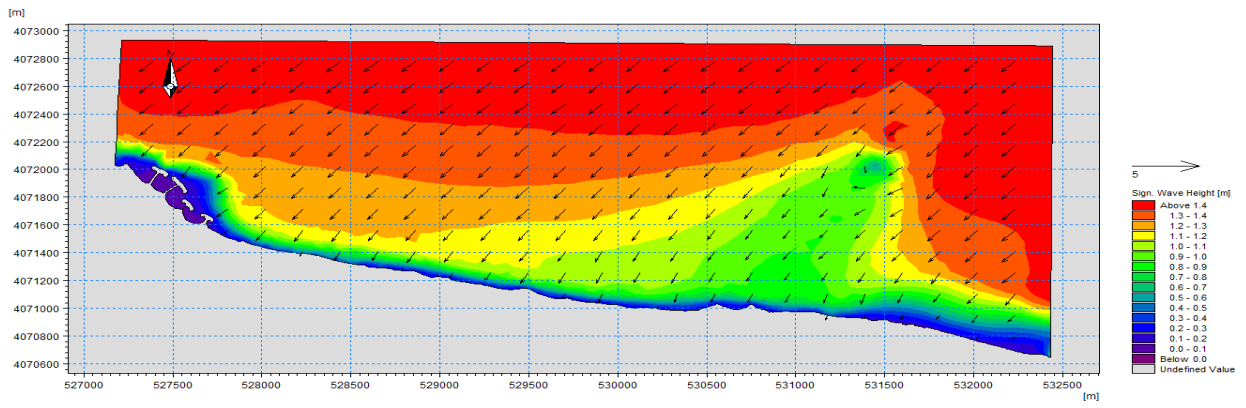


Figure 47 : Représentation de la propagation des houles de secteur NE.

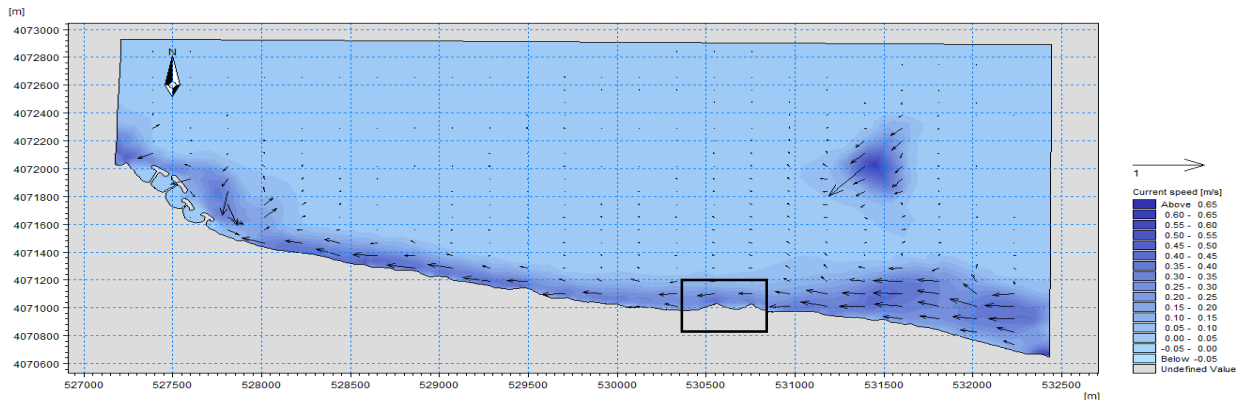


Figure 48: Représentation du champ du courants induit par les houles de secteur NE.

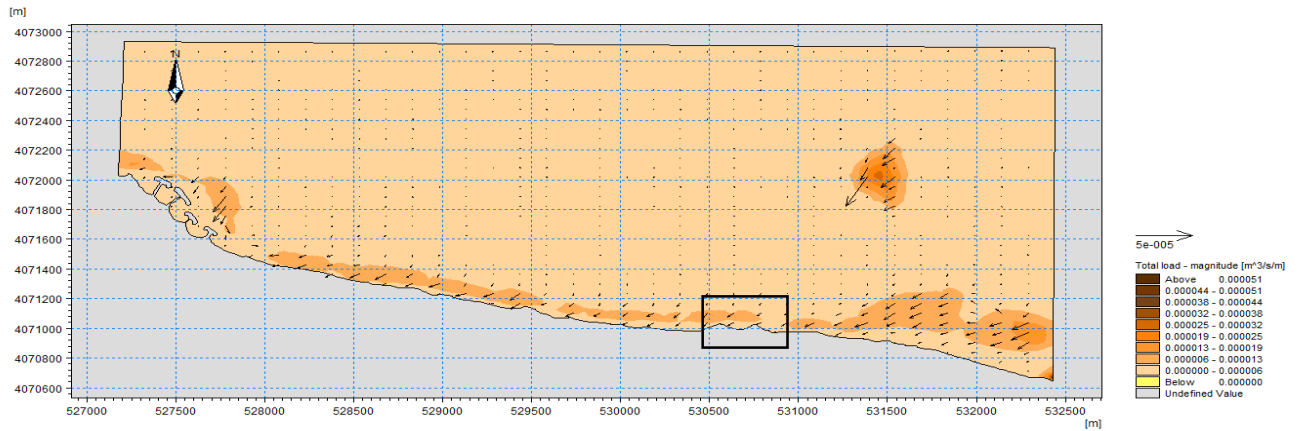


Figure 49 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NE.

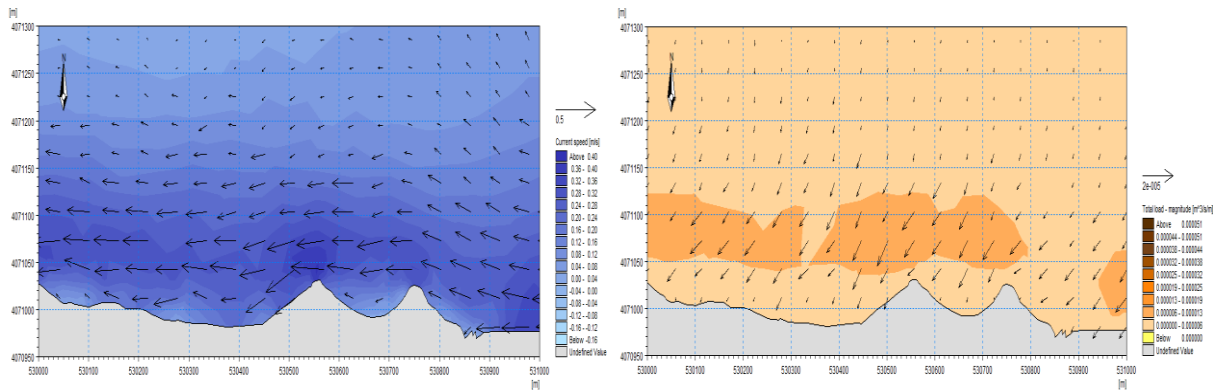


Figure 50 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).

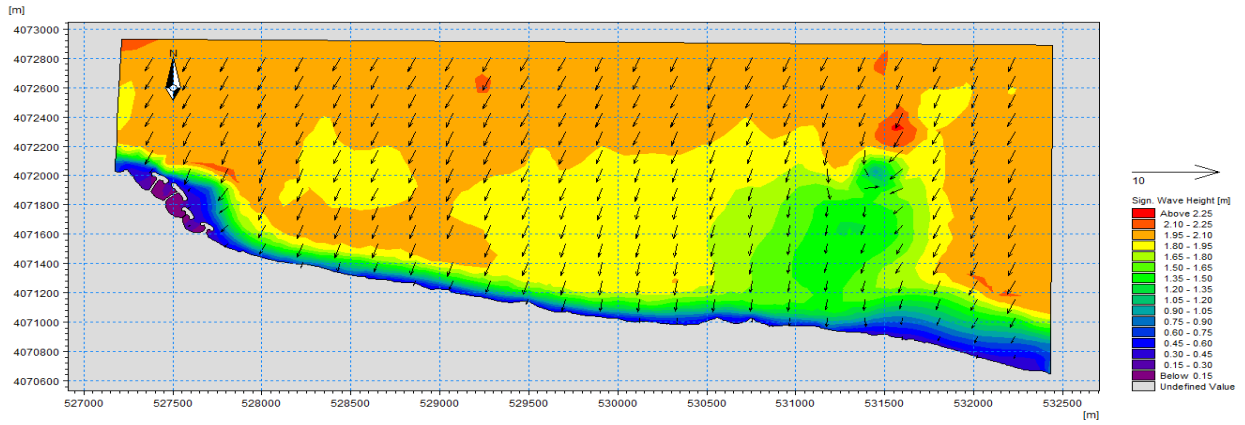


Figure 51 : Représentation de la propagation des houles de secteur NNE.

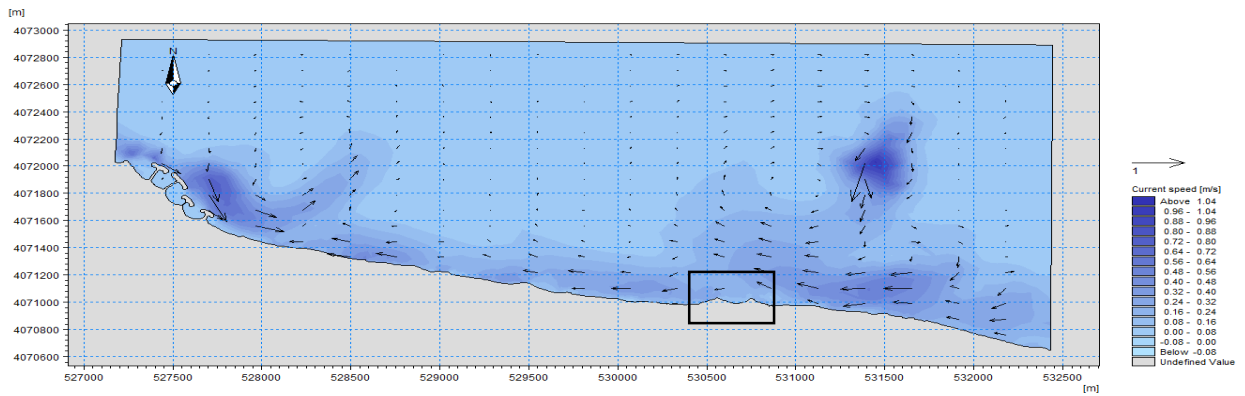


Figure 52 : Représentation du champ du courant induit par les houles de secteur NNE.

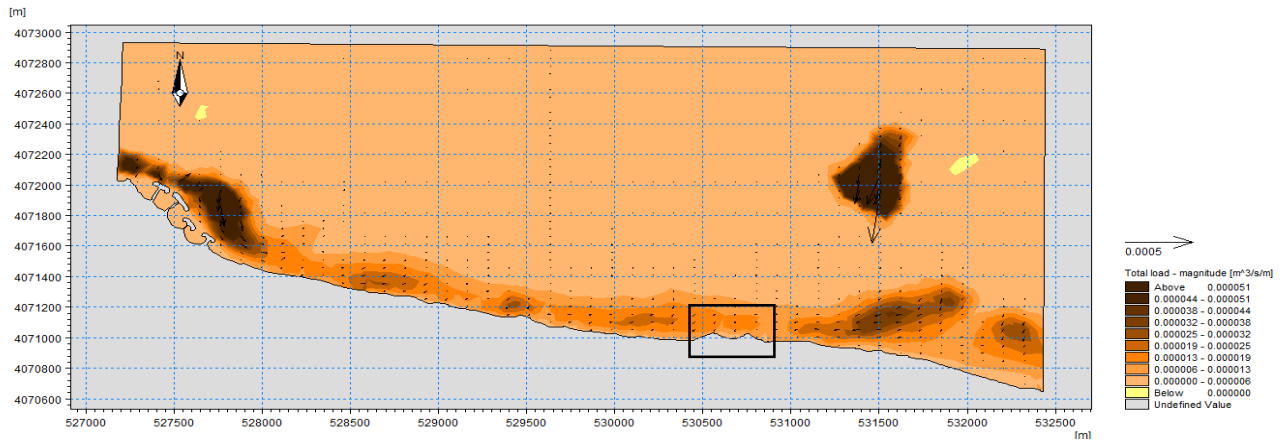


Figure 53 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NNE.

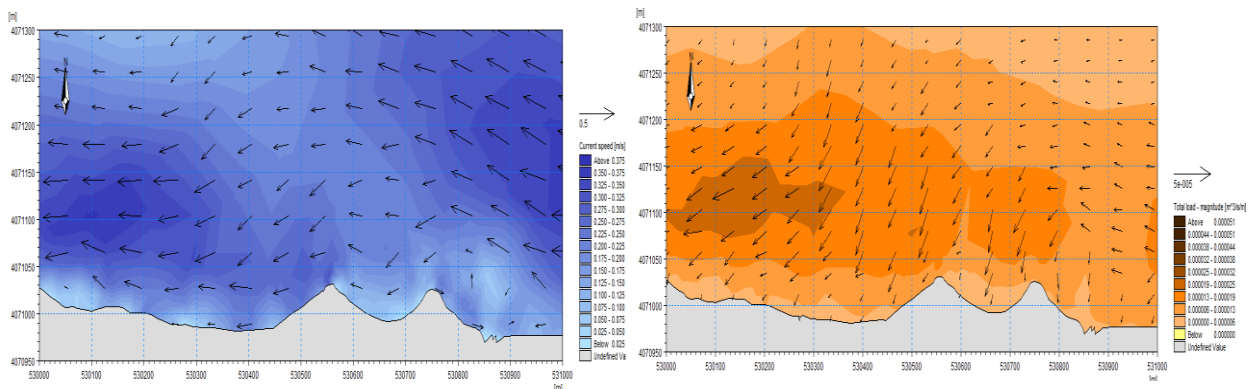


Figure 54 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).

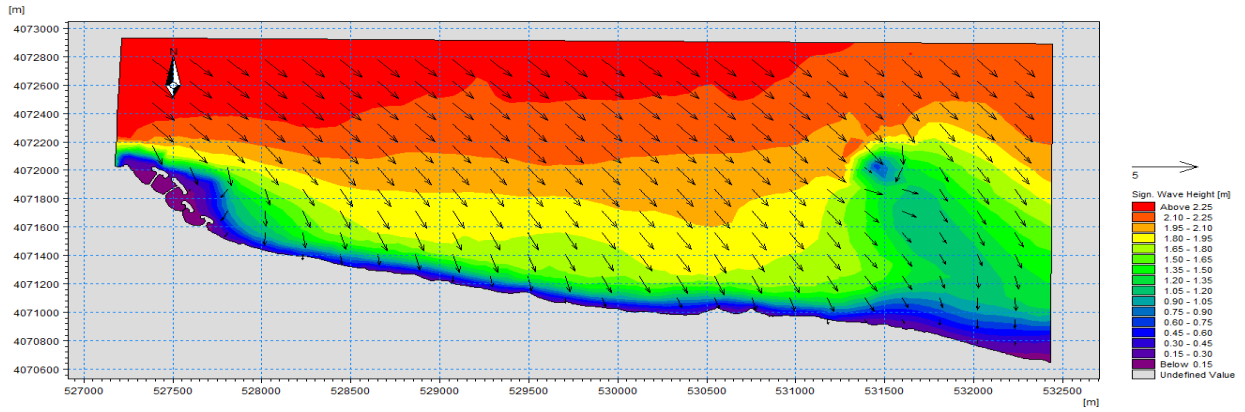


Figure 55 : Représentation de la propagation des houles de secteur NW.

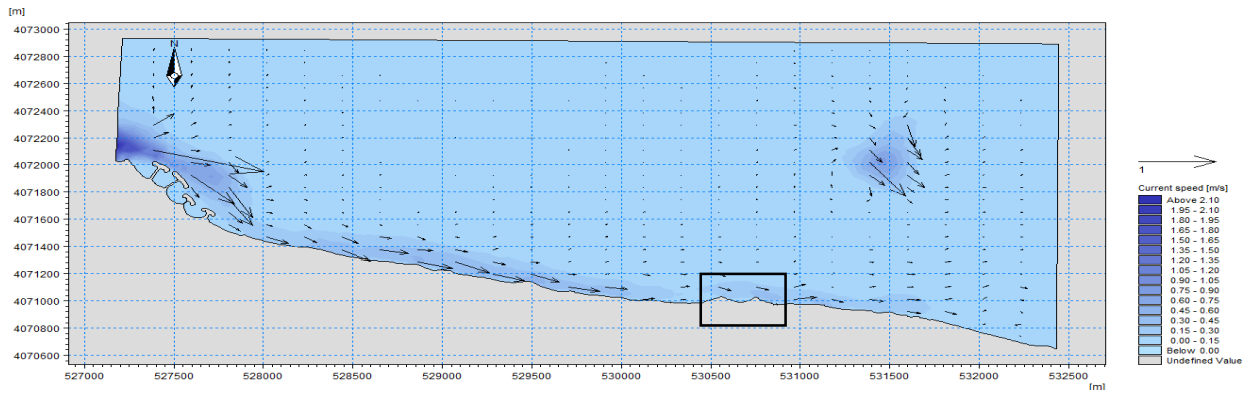


Figure 56 : Représentation du courant induit par les houles de secteur NW.

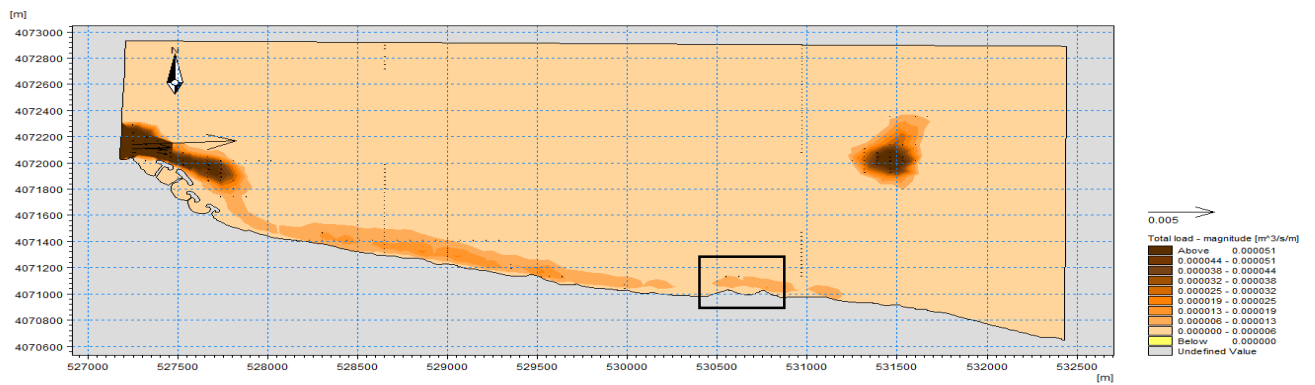


Figure 57 : Représentation du transport sédimentaire induit par les houles de secteur NW.

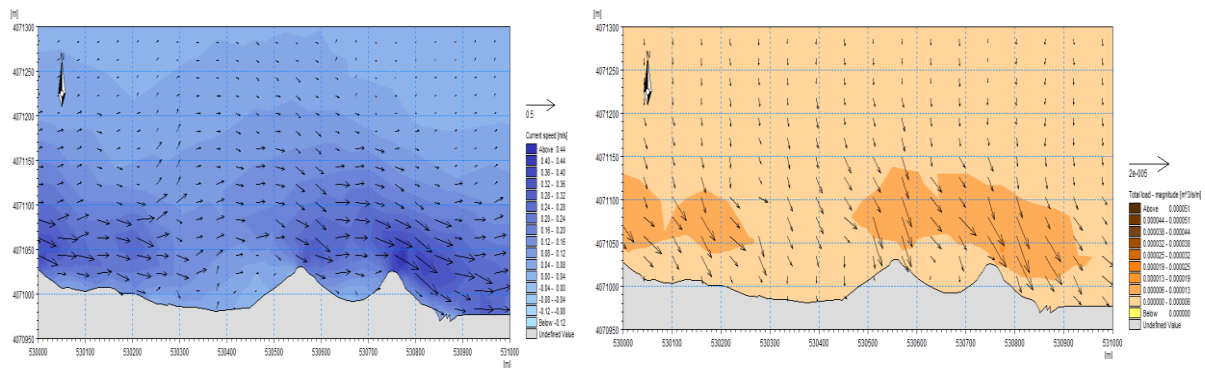


Figure 58 : Zoom de HD et ST au niveau de Réghaia (Zoom à la zone encadrée).

CONCLUSION

L'étude de l'évolution diachronique du trait de côte à long terme sur une période de 61 ans montre qu'avant 1980 la zone d'étude était en perpétuelle progression suite à un apport sédimentaire par l'Oued Réghaia et/ou par la dérive littorale. A partir de 1980, la zone d'étude a commencé à subir une érosion modérée le long de quelques segments de son rivage. Cela est dû à l'augmentation de l'agressivité des tempêtes en raison de l'accentuation des aménagements près du littoral et à l'extraction de sable le long de la côte et sur les lits d'Oueds.

Ces dernières années, la zone a subi une érosion très élevée et rapide. Ceci est dû à la fragilisation continue du cordon dunaire d'El Kadous qui constitue une barrière de protection naturelle de la zone d'étude. Cela est dû, en plus des facteurs cités auparavant, à une surfréquentation touristique et de l'activité du pâturage.

Ceci est accompagné d'un changement sur le plan bathymétrique et hydrosédimentaire. En considérant la situation comparative 2017/2020, le rivage en face du cordon dunaire d'El Kadous a subi une alternance de secteurs en accrétion et en érosion qui est inversement proportionnelle à l'évolution sur le plan bathymétrique. Cette tendance évolutive est aussi gouvernée par les conditions hydrosédimentaires de la zone d'étude qui constitue soit une source de sédiments (zone de dépôt) soit un puits de sédiments (zone d'arrachement).

Ce changement sur le plan bathymétrique et hydrosédimentaire a engendré un déséquilibre de ce système naturel ; dont la première conséquence attendue est une réduction considérable des échanges sédimentaires entre la plage sous-marine et le cordon dunaire d'El Kadous, ce qui aggrave en plus le recul/avance du trait de côte et favorise la dégradation du cordon dunaire d'El Kadous.

**CHAPITRE IV: ETUDE DE
L'EVOLUTION SURFACIQUE
ET VOLUMETRIQUE**

INTRODUCTION

Les dunes côtières posent un problème particulier pour les scientifiques en raison de la nature extrêmement dynamique de la plupart des systèmes plage-dune (CHAIBI et al., 2014).

Selon KERMANI, 2016, la forme des dunes côtières peut changer avec les conditions dynamiques (houles et courants), climatiques (vents, températures et précipitations), la répartition du couvert végétal sur la frange littorale et la nature des sédiments qui caractérisent le littoral.

L'étude de la dynamique du cordon dunaire d'El Kadous consiste à analyser et quantifier son évolution spatio-temporelle en réalisant deux études complémentaires :

- Etude de l'évolution surfacique qui permet d'étudier les tendances d'évolution planimétrique du cordon dunaire.
- Etude de l'évolution volumétrique qui permet d'étudier les tendances d'évolution altimétriques du cordon dunaire.

Ces études sont basées sur une approche numérique et topographique qui se traduit par une reconstitution de la morphologie des dunes bordières ainsi que par l'étude de leur évolution via la génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT).

La réalisation de cette étude nécessite la succession de quatre étapes principales qui sont résumées dans l'organigramme ci-dessous (Figure 59).

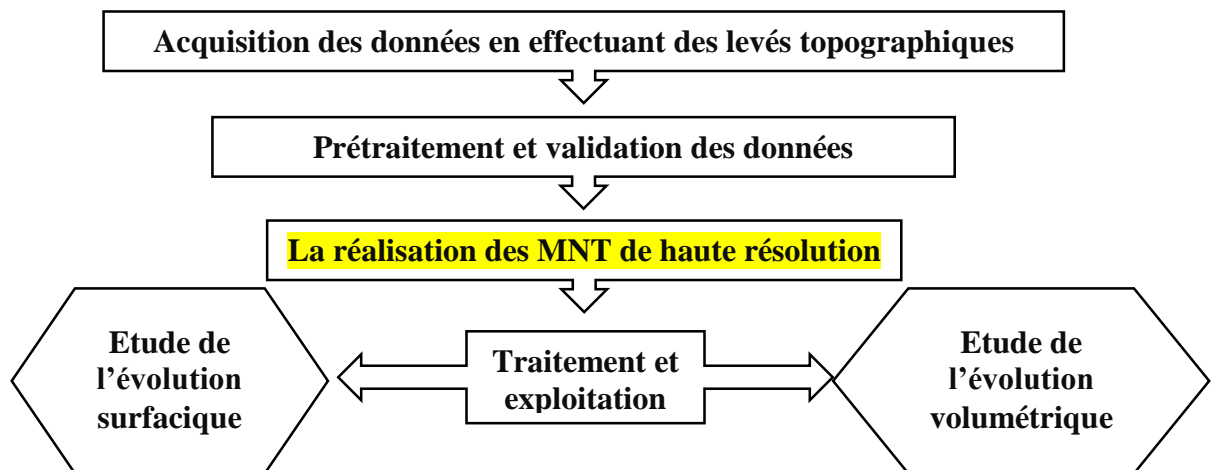


Figure 59 : Organigramme représentatif des étapes de réalisation de cette étude.

1. ACQUISITION DES DONNEES TOPOGRPHIQUES

Les données topographiques utilisées dans le cadre de ce travail sont issus de plusieurs compagnies de mesures au DGPS. Ce suivi sur plusieurs années au DGPS est indispensable pour la mise à jour de l'information géographique afin de déterminer la tendance d'évolution du cordon dunaire d'El Kadous à l'érosion, à l'accumulation ou bien à la stabilité (MALLET et MICHOT, 2012).

La localisation par le système GPS permet de positionner un objet dans l'espace, Cette position est traduite en termes de latitude (X), longitude (Y) et altitude (Z), le calcul de ces coordonnées X, Y, Z est toujours sujette à des erreurs dues aux infrastructures terrestres, effet de l'atmosphère, décalage d'horloge Etc.

Ce système de positionnement offre une précision métrique ou décimétrique, Ce qui n'est pas suffisant aux géomètres dont la plupart des travaux nécessitent une précision centimétrique. De ce fait, le système GPS est exploité en mode différentiel (ou relatif), en anglais DGPS (Differential Global Positioning System) (HUBERT et BERTRAND, 2004).

La technique DGPS est une méthode destinée à améliorer la performance de positionnement ou de synchronisation du GPS en utilisant une ou plusieurs stations de référence à des emplacements connus, chacune équipée d'au moins un récepteur GPS (BOUKHEDICHE, 2017).

1.1. LES PRINCIPALES COMPOSANTES D'UN DGPS

Le système complet d'un DGPS est constitué de (Figure 60):

- ✓ Un récepteur fixe « la base » ;
- ✓ Un récepteur mobile « Rover » comprenant le contrôleur ou carnet de terrain. Et la possibilité d'avoir aussi un répéteur radio qui permet de relayer le signal radio de la station de base. Il est utilisé lorsque la distance entre la base et le mobile est supérieur à la portée radio de la base, soit environ 10km ;
- ✓ Un système radio reliant les deux récepteurs via Bluetooth.

Chaque levé génère un fichier de données dans la mémoire du GPS et/ou du carnet de terrain. Ces fichiers sont sauvegardés après les mesures(MALLET et MICHOT, 2012).

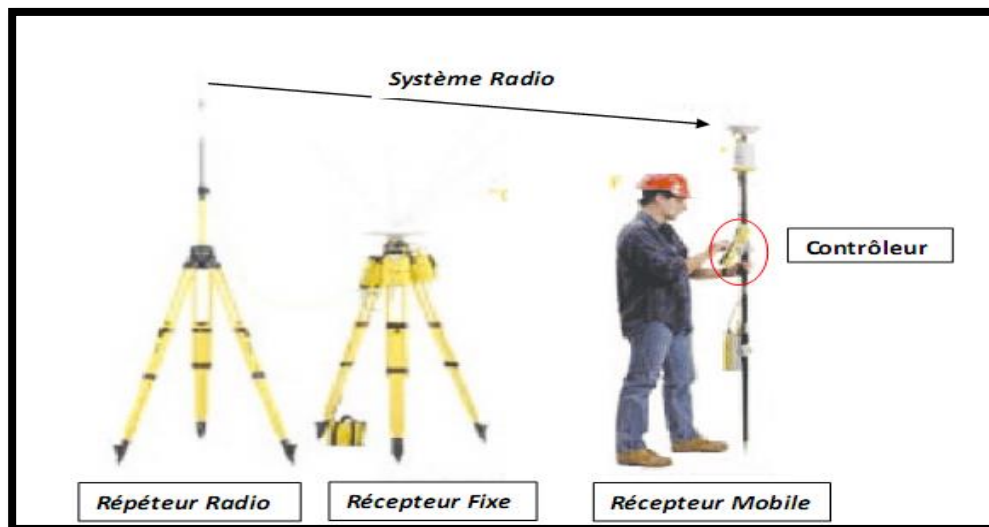


Figure 60: Les principales éléments constituant un DGPS.

1.2. PROPRIETE DE DGPS

Le DGPS permet de lever le relief de la plage (MALLET et MICHOT, 2012) et d'étudier les différentes coupe de terrain le long ou en travers de la plage avec une résolution de l'ordre du centimètre en plan (x, y) et en altitude z (Tableau 10).

Tableau 10: Tableau représentatif des différents objectifs d'un levé topographique à partir d'un DGPS. (HUBERT et BERTRAND, 2004).

Objectifs	Dimension	Type de représentation	Paramètre a représenté
Coupe le long de la plage	2D	Ligne	Le suivi de l'évolution du trait de côte
Coupe en traverse de la plage	2D	Transect	Le suivi de l'évolution de la morphologie de la plage
Restitution de la topographie littorale	3D	MNT	L'étude du changement du relief de la plage

1.3. MODE DE LEVE TOPOGRAPHIQUE A PARTIR DE DGPS

Il existe deux modes de levé topographique à partir du DGPS, dits des systèmes d'augmentation de performance qui applique des corrections différentielles afin d'atteindre les objectifs de précision centimétrique.

En prenant en compte le critère d'existence ou d'absence d'une liaison radio, un levé topographique peut s'effectuer en temps réel (RTK) ou par post-traitement (PPK) (voir Annexe 7). Dans ce travail, les levés topographiques ont été réalisés en utilisant un DGPS en mode RTK « base fixe avec repère ».

1.4. PRINCIPES DU CALCUL DE DGPS EN MODE RTK « BASE FIXE AVEC REPERE »

Le DGPS consiste à utiliser un récepteur GPS, appelé « base » positionné sur une station dont les coordonnées sont connues. Cette base est couplée à un ou plusieurs GPS mobiles distants (Figure 61) (MALLET et MICHOT, 2012).

On considère en effet que la distance entre les deux récepteurs est négligeable par rapport à la distance qui les sépare des satellites. On peut donc dire que les signaux qui arrivent sur les deux appareils ont traversé les mêmes couches d'atmosphère (BENBRAHAM et AGABI, 2018), donc les deux GPS, base et mobile, réceptionnent simultanément les mêmes signaux issus des satellites (BENGOUFA, 2016).

Les deux GPS, fixe et mobile, calculent indépendamment l'un de l'autre leur position à partir des mêmes satellites. La base fixe compare ensuite sa position calculée avec celle réelle et précise paramétrée au préalable par l'opérateur. Une correction en coordonnées X, Y et Z est alors déduite et est transmise instantanément par radio à la station mobile qui corrige sa position avant d'enregistrer chaque point acquis dans l'ordinateur de bord (ZEMMOUR, 2019).

Le positionnement de la base étant connu avec précision (infra-centimétrique), celle-ci peut déterminer les corrections à appliquer par comparaison entre sa position calculées à partir des signaux satellitaires et les coordonnées absolues afin de les transmettre aux GPS mobiles. Les corrections sont transmises par le récepteur de la base vers le ou les GPS mobiles distants par l'intermédiaire d'un système radio (MALLET et MICHOT, 2012).

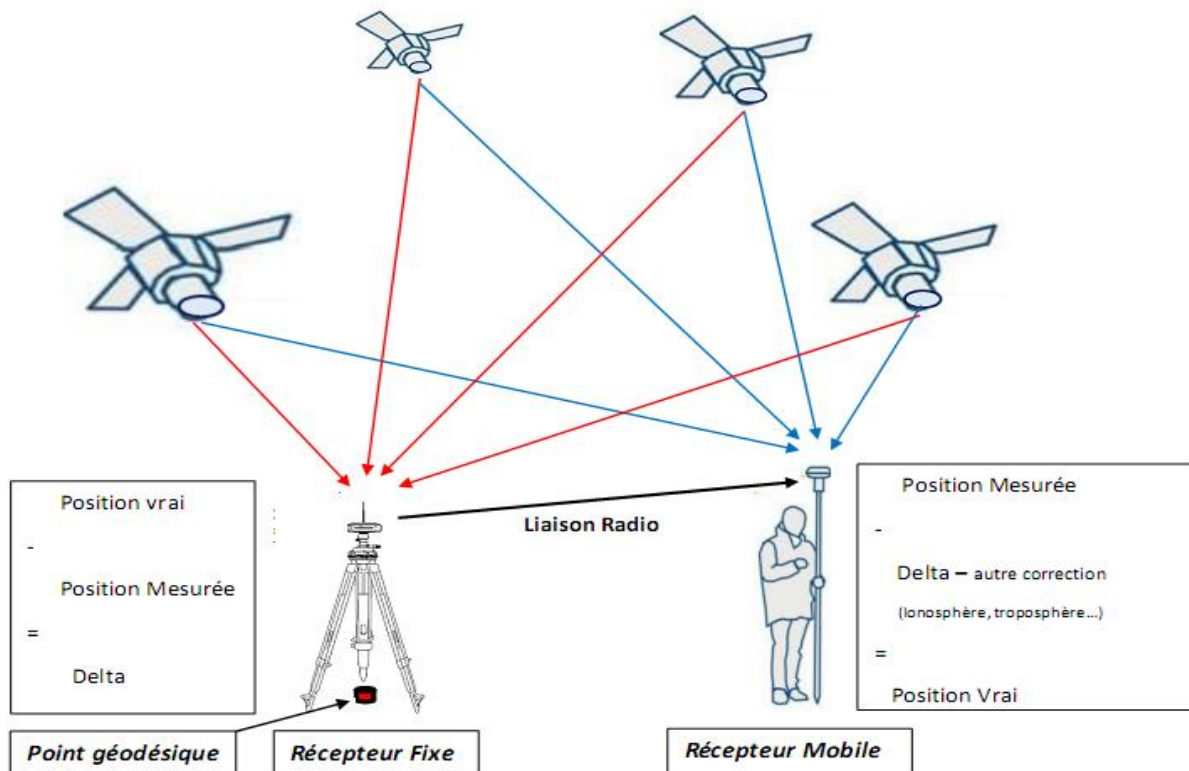


Figure 61 : Principe de fonctionnement d'un DGPS.

2. INVENTAIRE SUR LES TROIS COMPAGNES DE MESURES

Les données topographiques utilisées dans le cadre de ce travail sont le résultat de trois campagnes de mesures effectuées en 2014, 2017 et 2020 à l'aide de DGPS. Afin de mieux connaître les caractéristiques principales de chaque levé topographique réalisé, une étude descriptive et comparative a été menée, les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 11).

Tableau 11 : Tableau comparatif des principales caractéristiques des levés topographiques réalisés.

Années d'acquisition	2014	2017	2020
Système de coordonnées	WGS 1984 UTM Zone 31N	WGS 1984 UTM Zone 31N	WGS 1984 UTM Zone 31N
Nombre de points	10068	5509	468
Coordonnées aux limites	W : 3°20'18" E N : 36°47'06" N E : 3°20'46" E S : 36°46'56" N	W : 3°19'58"E N : 36°47'12"N E : 3°21'02"E S : 36°46'51"N	W : 3°20'18"E N : 36°47'01"N E : 3°21'39" S : 36°47'10"N
Opérateur	OTMANI H.	OTMANI H.	LEM
Z min (m)	-0,032	0,77	-0.03
Z max (m)	7,43	7,69	7.21
Z moyen (m)	4,31	4,56	4,41
Espacement moyen entre les points (m)	0,9923	1,1923	1.8236

3. PRETRAITEMENT ET VALIDATION DES DONNEES

Après la réalisation du levé topographique sur le terrain, les données sont introduites dans un ordinateur sous forme de fichier texte (format TXT). Ce fichier est intégré à un système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel ArcGis (MALLET et MICHOT, 2012).

Des traitements préliminaires ont d'abord été effectués pour contrôler la qualité des données topographiques, et ce, afin de valider leurs degrés de précision et d'éliminer les valeurs aberrantes avant de les utiliser par la suite.

3.1. DETECTION DES ANOMALIES DE MESURE D'ALTITUDE

Une étude statistique des altitudes mesurés durant les trois levés topographiques a été menée afin de détecter les valeurs aberrantes et de les éliminer.

Les trois figures 62, 63 et 64 montrent qu'il n'y a pas de valeurs aberrantes qui sortent de la normal, sauf pour les levés topographiques de 2014 et 2020 qui enregistrent quelques valeurs négative d'altitude. Cela est expliqué par des mesures effectuées dans la partie sous-marine durant ces deux années (Figure 65).

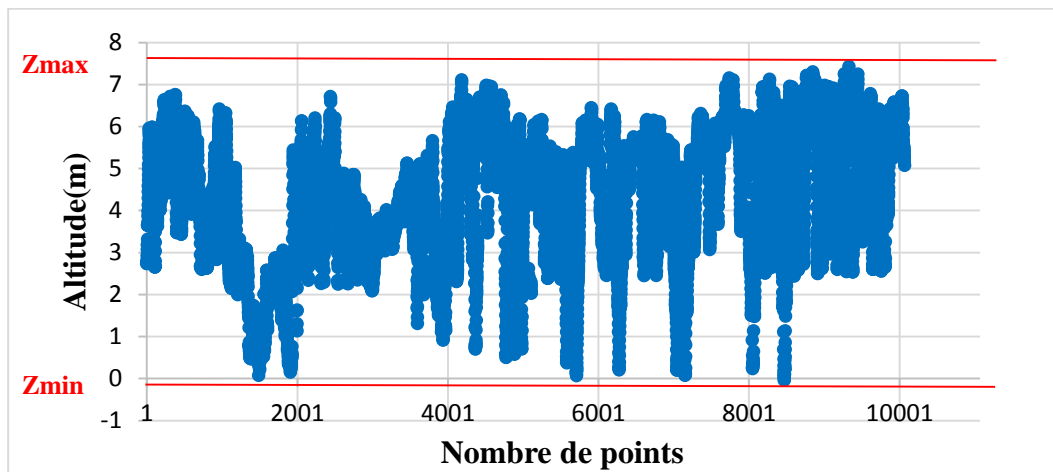


Figure 62 : Nuage de points du levé topographique 2014.

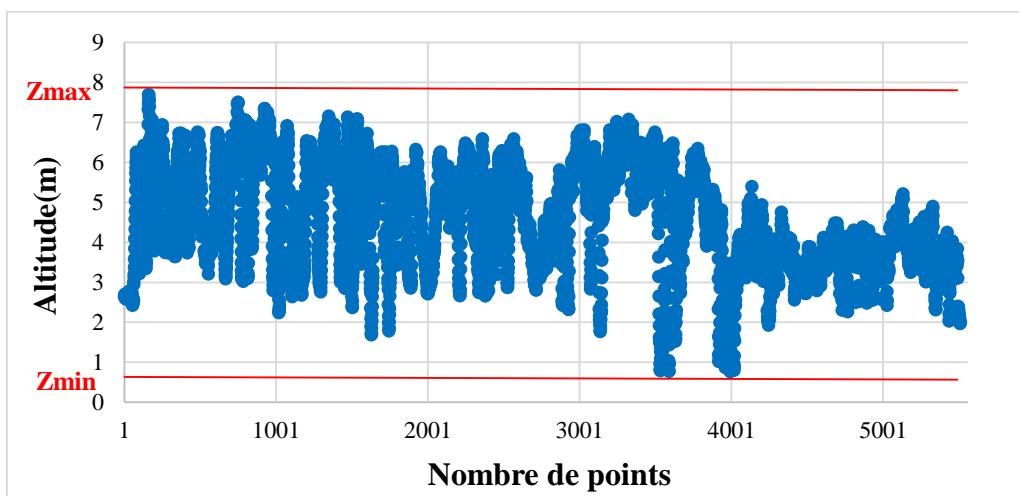


Figure 63 : Nuage de points du levé topographique 2017.

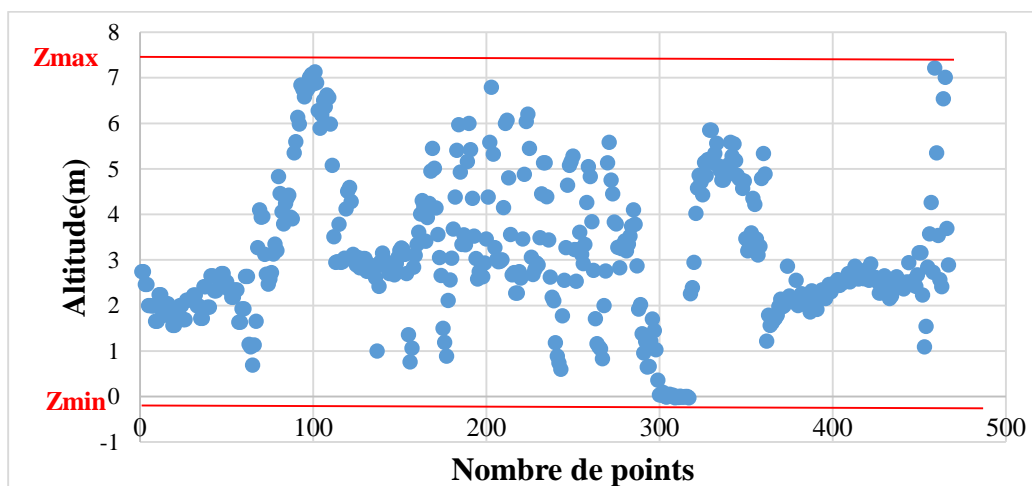


Figure 64 : Nuage de points du levé topographique 2020.



Figure 65 : Mesures topographiques effectuées dans la partie sous-marine (El Kadous, 2014).

3.2. DENSITE DE L'ENSEMBLE DE POINTS TOPOGRAPHIQUES

Une étude de la densité des points a été menée afin de mieux visualiser la répartition des points de mesure des trois levés topographiques réalisés en 2014, 2017 et 2020.

Cette étude a été effectuée à l'aide de l'outil « densité des points » : outil d'analyse Spatiale des données appartenant à l'extension Arctoolbox du logiciel ArcGis. Cet outil calcule le nombre de points par unité de surface (1m^2).

Cette étude vise à obtenir des cartes thématiques de la distribution visuelle des données topographiques. En considérant que plus la densité de points est élevée, plus la résolution spatiale est meilleure ; La mise en forme retenue s'est orientée vers une classification en couleurs selon la répartition de la densité des points, traduite en termes de résolution spatiale.

Les figures ci-dessous (Figure 66, Figure 67 et Figure 68) montrent que la résolution spatiale n'est pas homogène sur toute la zone recouverte par les trois levés topographiques. Le levé topographique en 2014 présente une forte résolution tout au long des différents segments du cordon dunaire, cependant plus concentrée dans sa partie centrale. Alors qu'en 2017, le levé topographique s'est concentré dans la partie Est, tandis que la partie centrale et Ouest ne présente qu'une résolution moyenne.

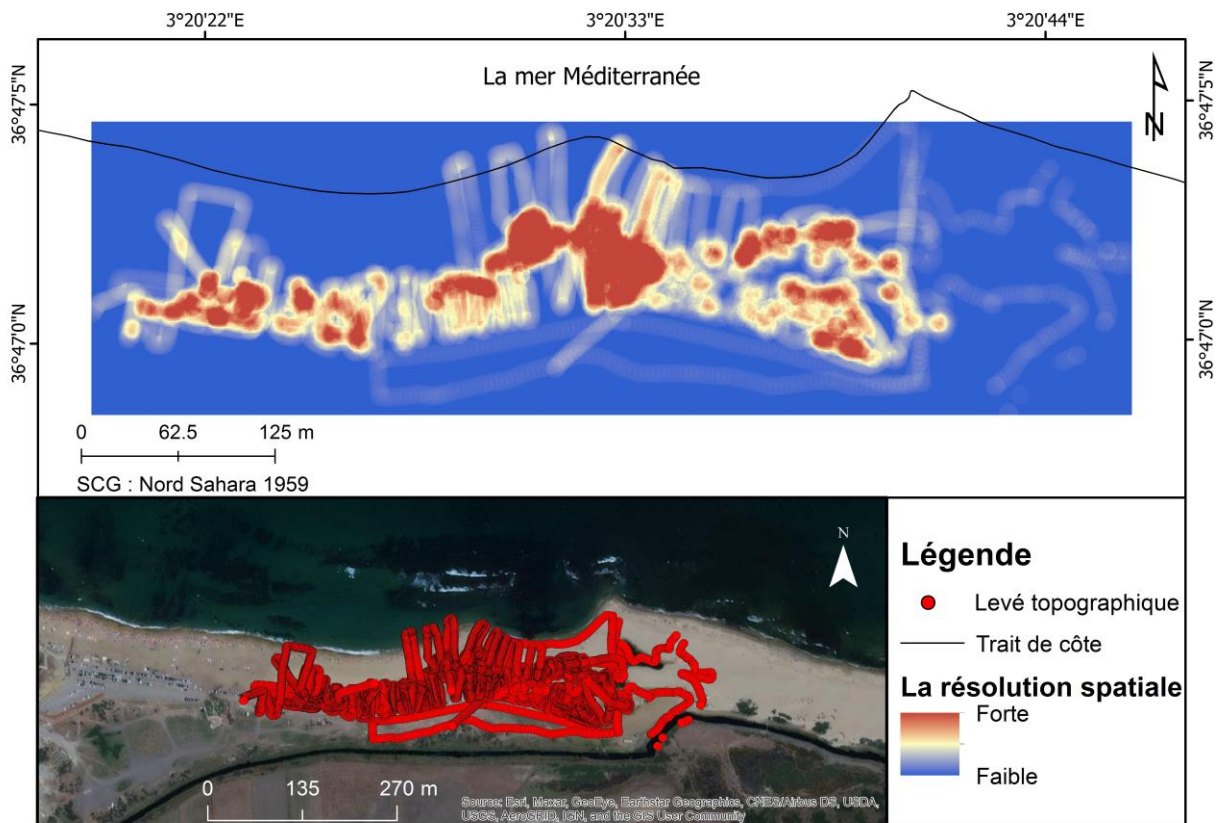


Figure 66: La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2014.

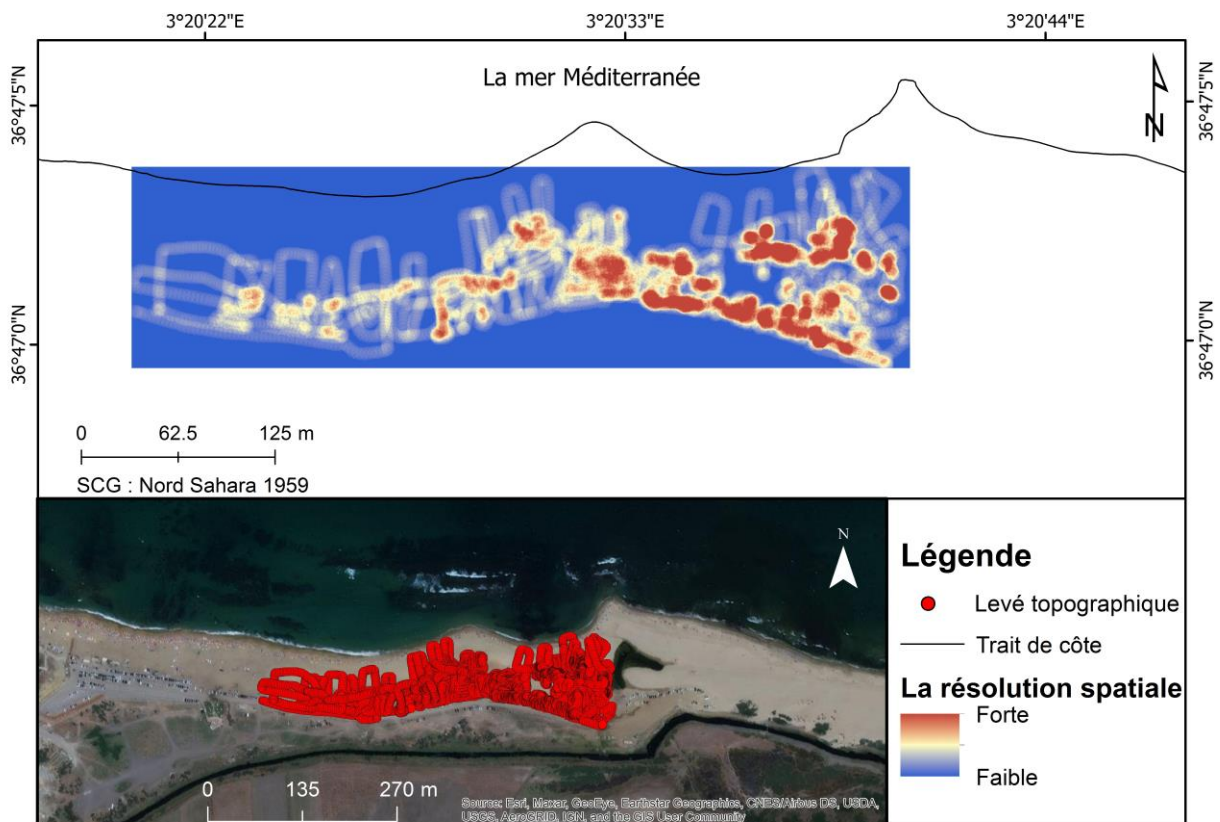


Figure 67 : La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2017.

Représentant des mesures plus ou moins régulières au travers de la plage et sur le cordon dunaire, le levé topographique 2020 est caractérisé par un nuage de points moins dense qui correspond à une résolution moyenne à faible.

La densité des points topographiques ainsi que l'espace balayé pour les trois levés topographiques ne sont pas les mêmes. Cela dépend des conditions de réalisation des levés topographiques tel que : le relief, l'opérateur et l'existence d'obstacles.

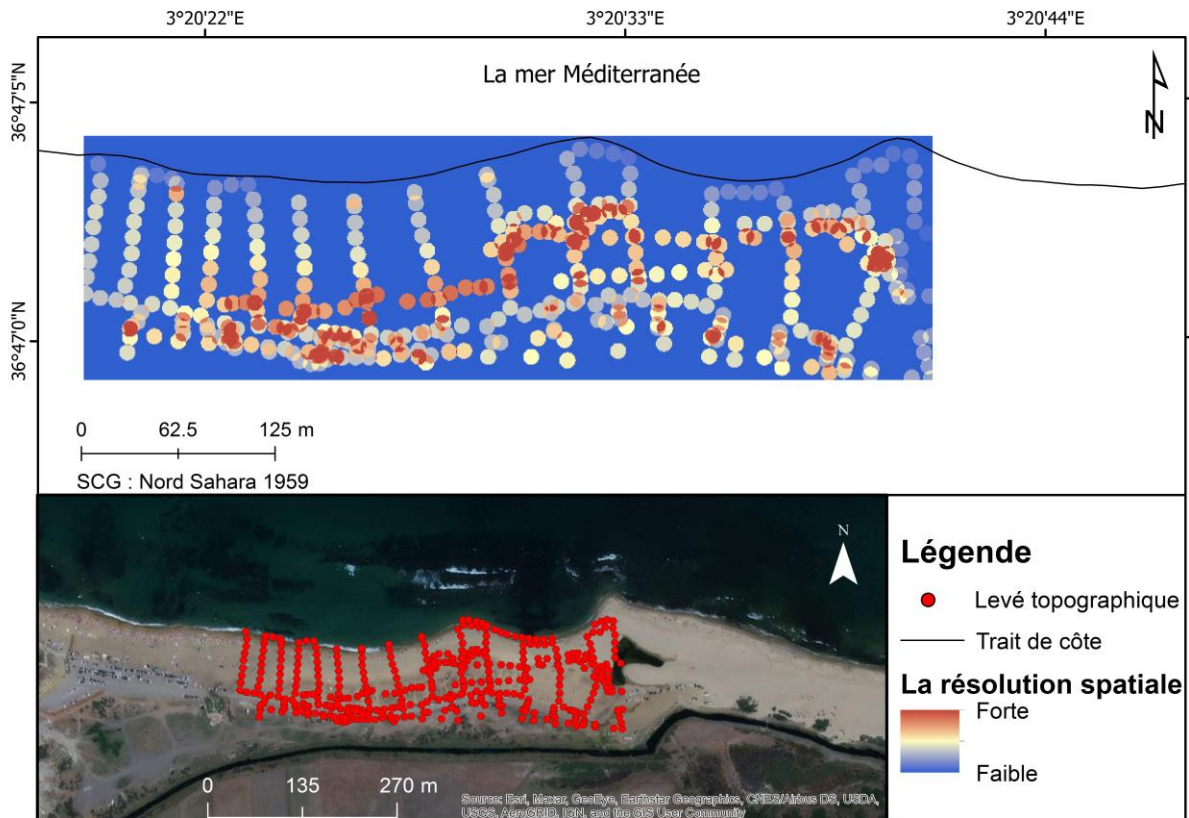


Figure 68: La distribution spatiale des données du levé topographique réalisé en 2020.

3.3. CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE

Le choix d'une surface de comparaison commune entre les trois levés topographiques s'avère d'une grande importance pour permettre la visualisation et la quantification de la variation spatio-temporelle du cordon dunaire d'El Kadous sur la même superficie.

Dans ce contexte, la délimitation de cette surface s'est portée sur un polygone commun d'une superficie de 69465,25m² qui s'étend sur un linéaire côtier de 550m. Ce choix a été effectué en prenant en considération les zones de concentration des points des trois levés topographiques ainsi que les traits de côtes de 2014, 2017 et 2020 (Figure 69).

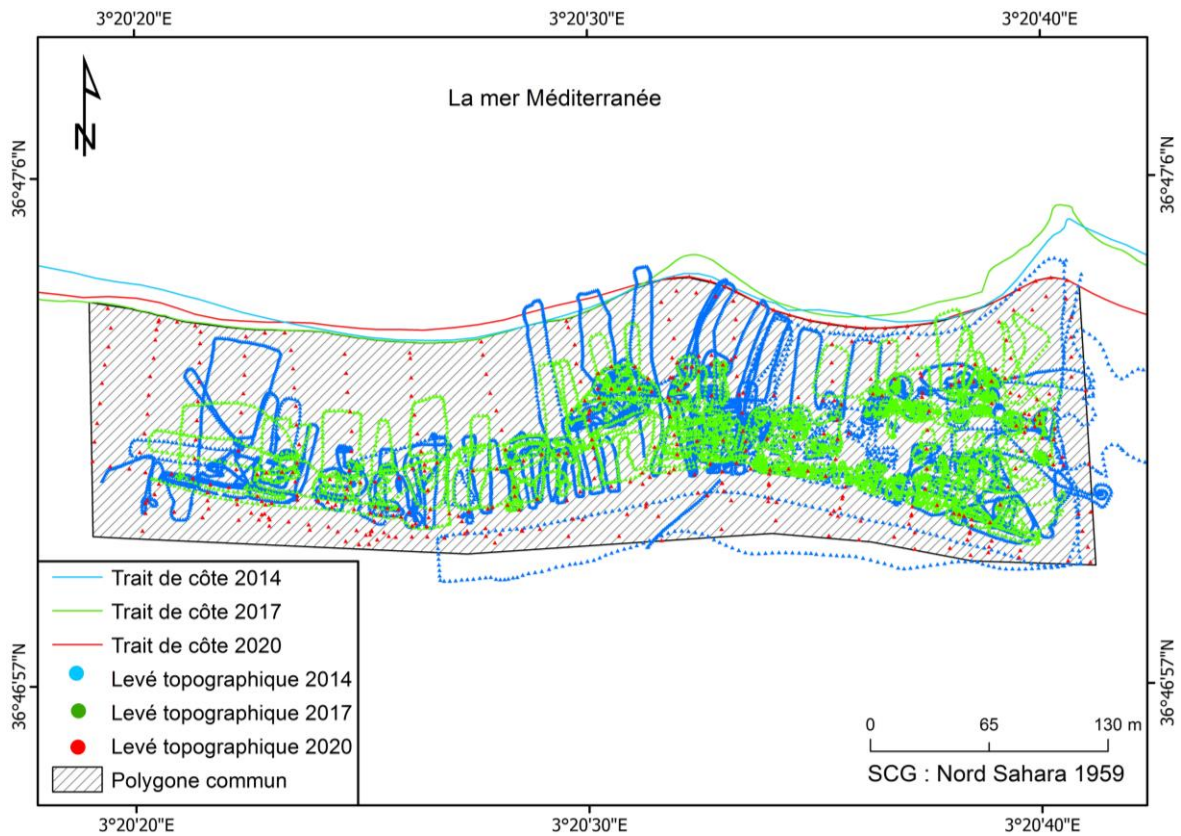


Figure 69 : La délimitation du polygone commun.

4. LA REALISATION DES MNT DE HAUTE RESOLUTION

En suivant la même méthodologie utilisée dans la partie « étude bathymétrique », des MNT pour chaque campagne de mesure topographique ont été générés et présentés sous forme de cartes thématiques en 2D et 3D (Figure 70, Figure 71 et Figure 72).

La comparaison visuelle entre les dégradés de couleur des trois MNT montre qu'il y a une variation d'altitude qui peut être positive ou négative. Cela témoigne d'une régression ou d'une progression le long du cordon dunaire d'El Kadous, leur quantification sera l'objectif de l'étape suivante.

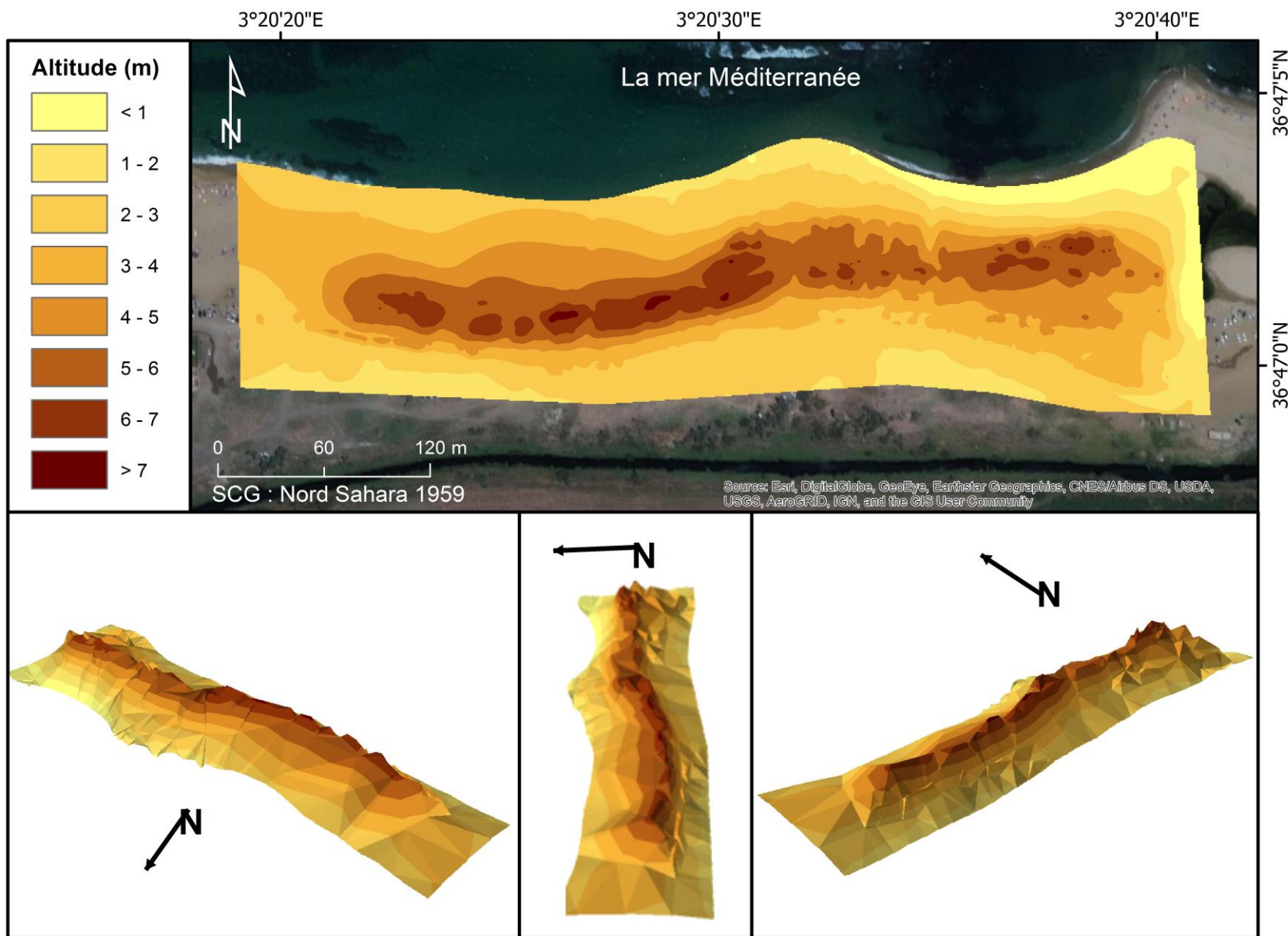


Figure 70:Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2014.

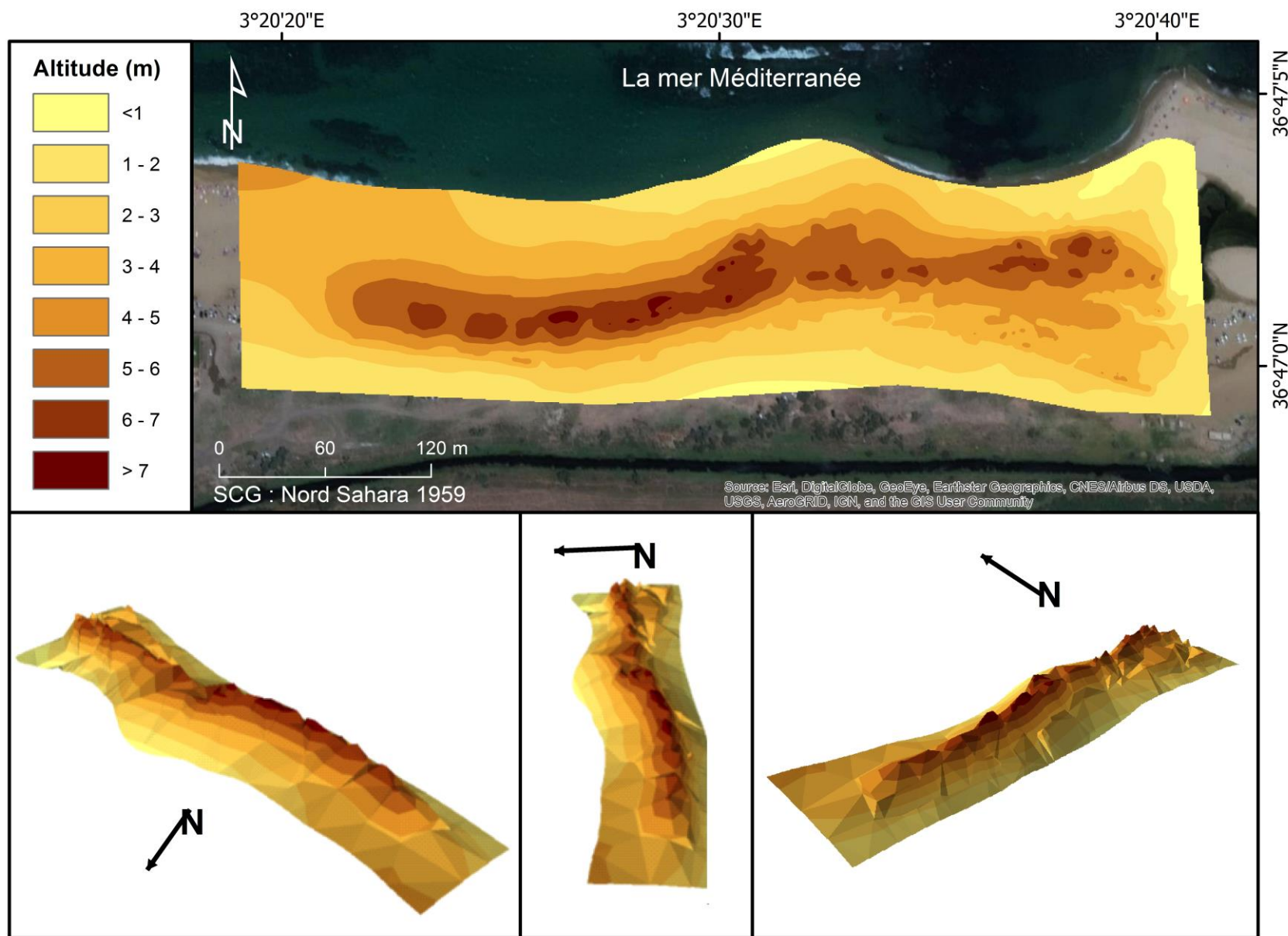


Figure 71 : Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2017.

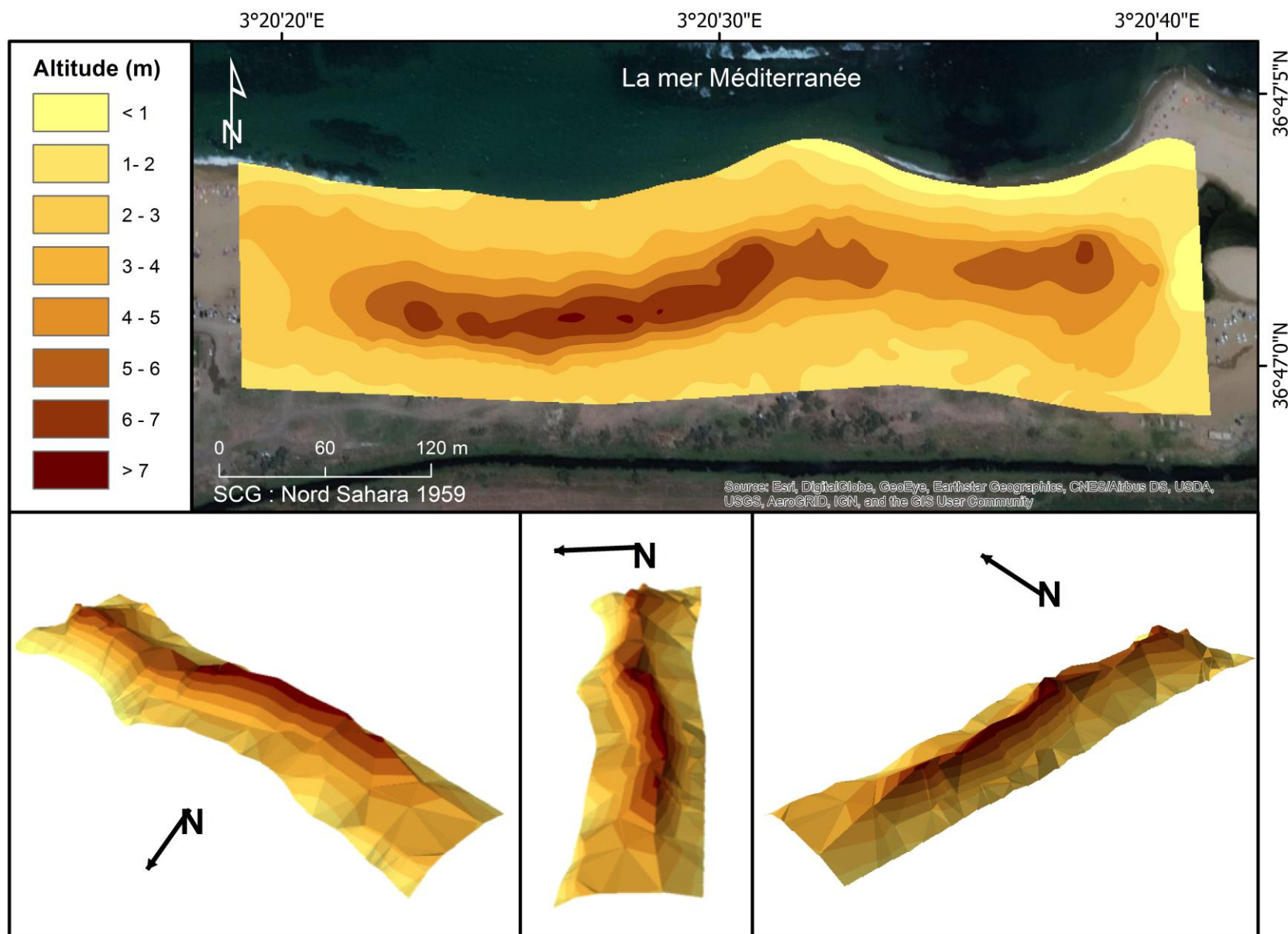


Figure 72 : Modèle numérique de terrain (MNT) du cordon dunaire 2020.

5. TRAITEMENT ET EXPLOITATION DES MNT

Les trois MNT générés à partir des trois levés topographiques sont utilisées par la suite pour l'étude de l'évolution surfacique et volumétrique du cordon dunaire d'El Kadous.

5.1. ETUDE DE L'EVOLUTION SURFACIQUE

Le suivi surfacique permet d'étudier les tendances d'évolution planimétrique du cordon dunaire d'El Kadous en analysant et en cartographiant la variabilité annuelle de la surface occupée par cette unité morphologique. Dans ce contexte, l'étude surfacique consiste à la comparaison entre les courbes de niveau de même altitude pour différentes périodes (2014, 2017 et 2020).

La première étape consiste à la génération des courbes de niveaux à partir de fichiers rasters des trois MNT (2014, 2017 et 2020). Cela est effectué à l'aide de l'outil contour, outil d'analyse spatiale de l'extension Arctoolbox.

Par la suite, les courbes de niveau correspondant aux altitudes de 3, 4, 5, 6 et 7m ont été digitalisées avec ArcGis pour les trois périodes étudiées (Figure 73, Figure 74 et Figure 75).

Enfin, une comparaison entre les surfaces délimitées par les courbes de niveau présentant les mêmes valeurs d'altitudes pour les trois levés topographiques a été réalisée (Figure 76). Les résultats sont traduits en pourcentage qui représente le rapport entre la surface de l'année récente par rapport à l'année ancienne pour chaque période (Tableau 12).

Tableau 12 : Tableau représentatif des surfaces de chaque polygone délimitant les courbes de niveau pour les trois levés topographiques.

Courbe de niveau (m)			3	4	5	6	7
Surfaces_2014 (m ²)			38033,9	2277049,1	12554,1	3678,87	155,03
Surfaces_2017 (m ²)			36985,06	20744,24	11711,36	3688,8	213,24
Surfaces_2020 (m ²)			32760,4	19681,3	10392,54	3563,56	104,87
Différence de surfaces	2014_2017	m ²	-1048,84	-1304,86	-842,74	+9,93	58,22
		%	-2,76	-5,92	-6,71	+0,27	+37,55
	2017_2020	m ²	-4224,66	-1062,94	-1318,82	-125,24	-108,37
		%	-11,42	-5,12	-11,26	-3,4	-50,82
	2014_2020	m ²	-5273,5	-2367,8	-2161,56	-115,31	-50,16
		%	-13,87	-10,74	-17,22	-3,13	-32,36

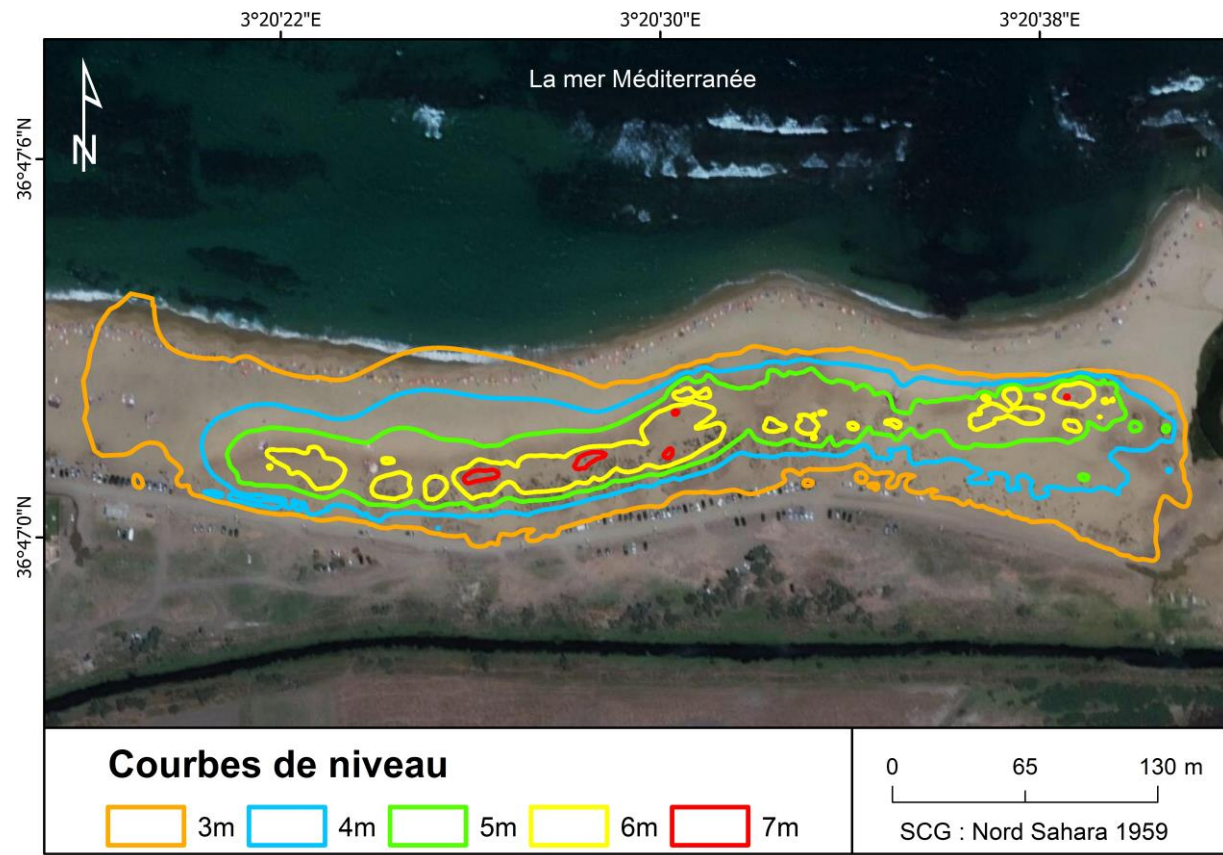


Figure 73 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2014.

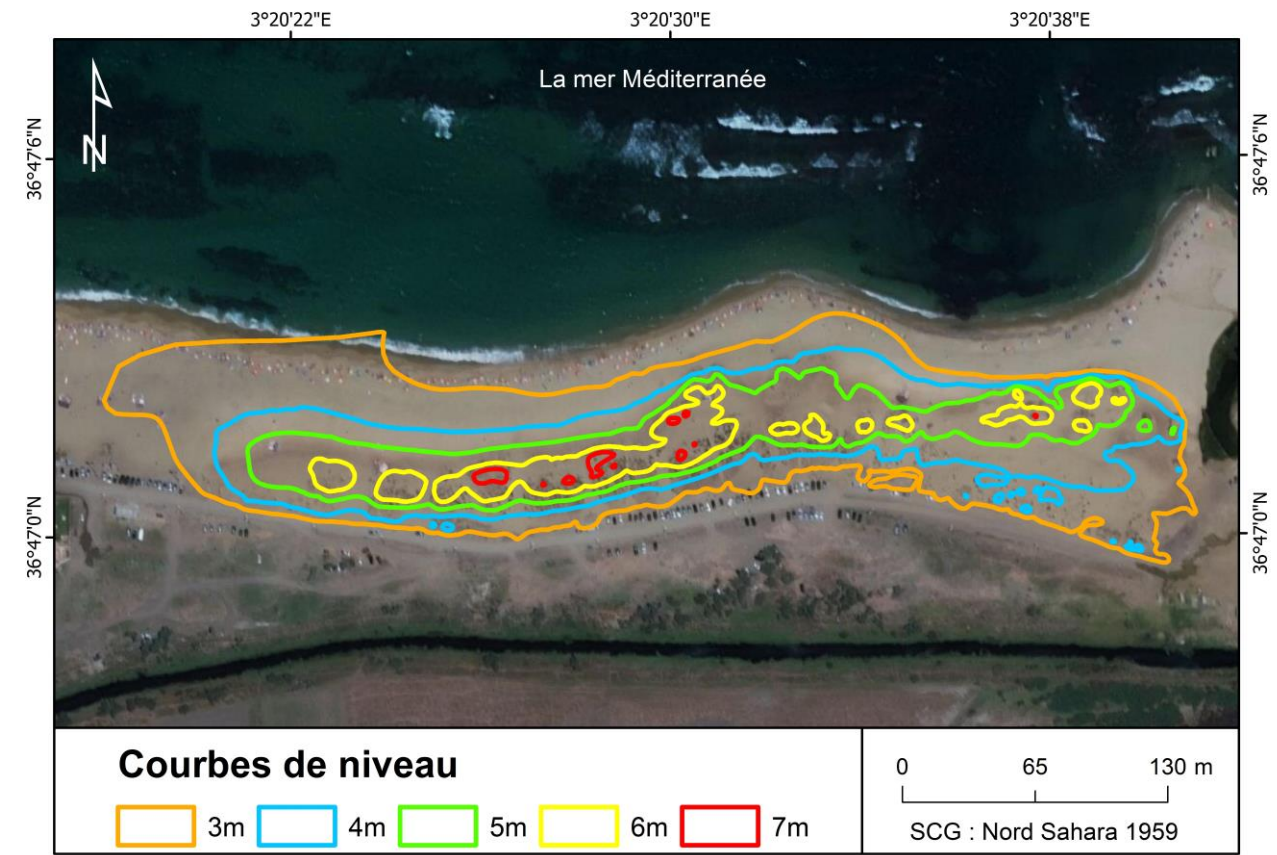


Figure 74 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2017.

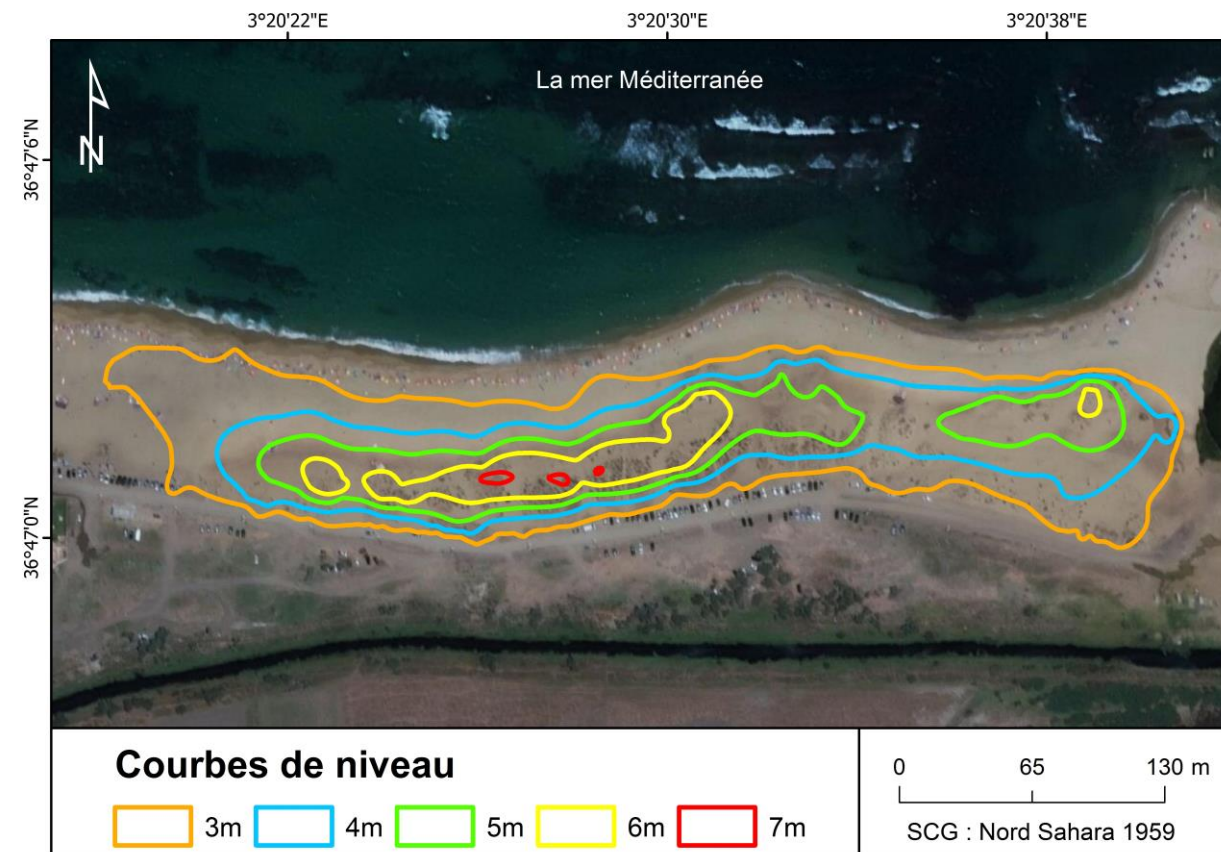


Figure 75 : Les courbes de niveau du levé topographique réalisé en 2020.

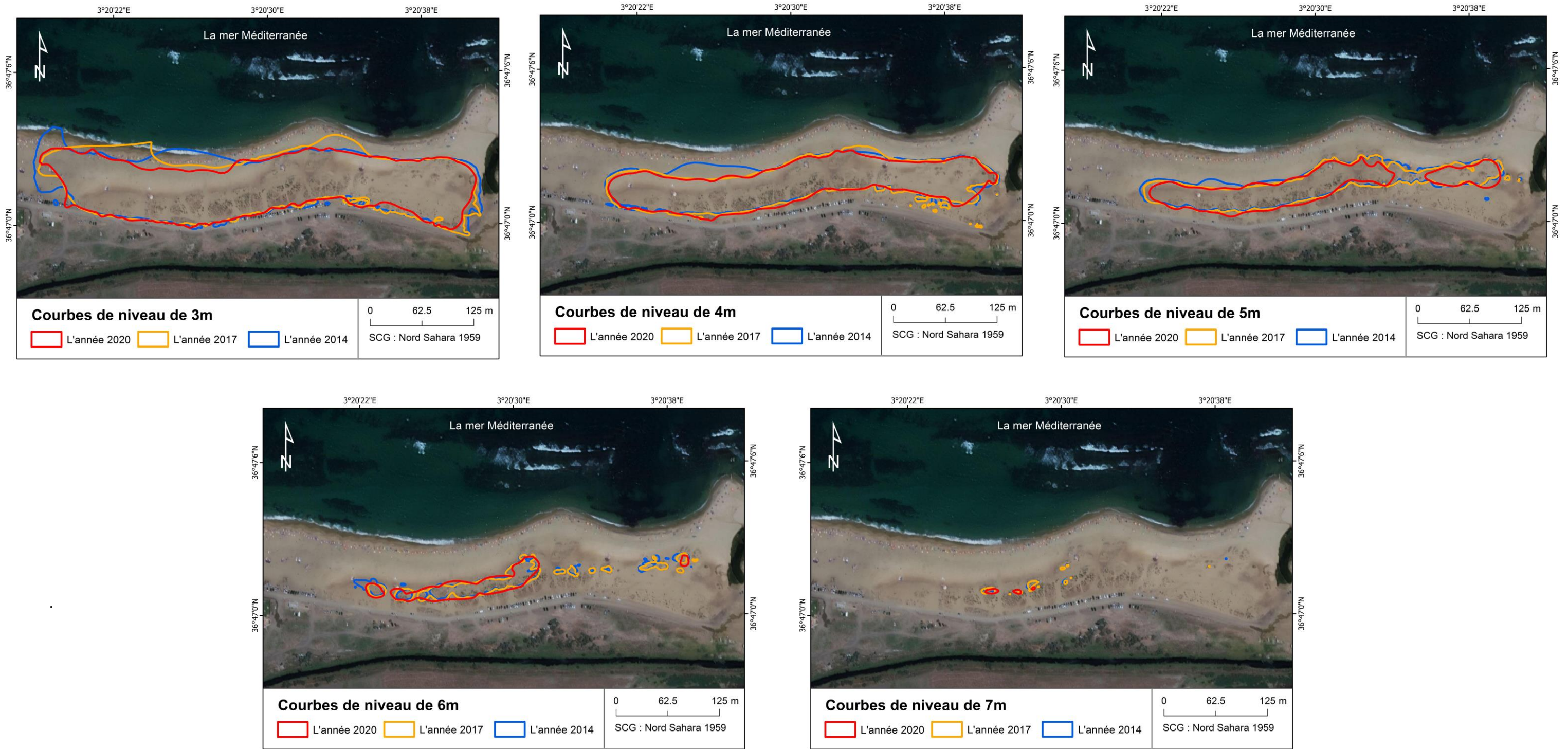


Figure 76 : Cartes comparatives des courbes de niveau de 3m, 4m, 5m, 6m et de 7m.

5.2. ETUDE DE L'EVOLUTION VOLUMETRIQUE

Le suivi volumétrique permet d'étudier les tendances d'évolution altimétriques du cordon dunaire d'El Kadous à travers la cartographie. Ceci permet de mesurer les volumes de sables mobilisés et de connaître le sens des transits sédimentaires sur les différents segments dunaire (YAHYAOUÏ et al., 2014).

Afin de valoriser les résultats obtenus à partir du traitement des données de différentes campagnes de mesure réalisées en 2014, 2017 et 2020, des cartes résiduelles des MNT ont été créées. Ceci ayant pour but de mettre en évidence la tendance d'évolution spatiotemporelle ainsi que les bilans sédimentaires annuels du cordon dunaire d'El Kadous vis-à-vis de la variation des conditions du milieu (Figure 77, Figure 78 et Figure 79).

La quantification de cette différence est estimée à l'aide de l'outil « volume de surface », outil d'analyse 3D des données de l'extension Arctoolbox. Cela permet de calculer le volume de chaque MNT (2014, 2017 et 2020). Les résultats sont traduits en pourcentages qui représentent le rapport entre le volume de sable de l'année récente par rapport à l'année ancienne pour chaque période étudiée (Tableau 13).

Tableau 13 : Tableau comparatif des volumes de sable pour chaque levé topographique.

Levé topographique	Volume de sable	
	m ³	%
2014	231873,58	/
2017	217387,69	/
2020	223898,24	/
2017/2014	-14485,895	-6,25
2017/2020	6510,551	2,9
2020/2014	-7975,344	-3,44

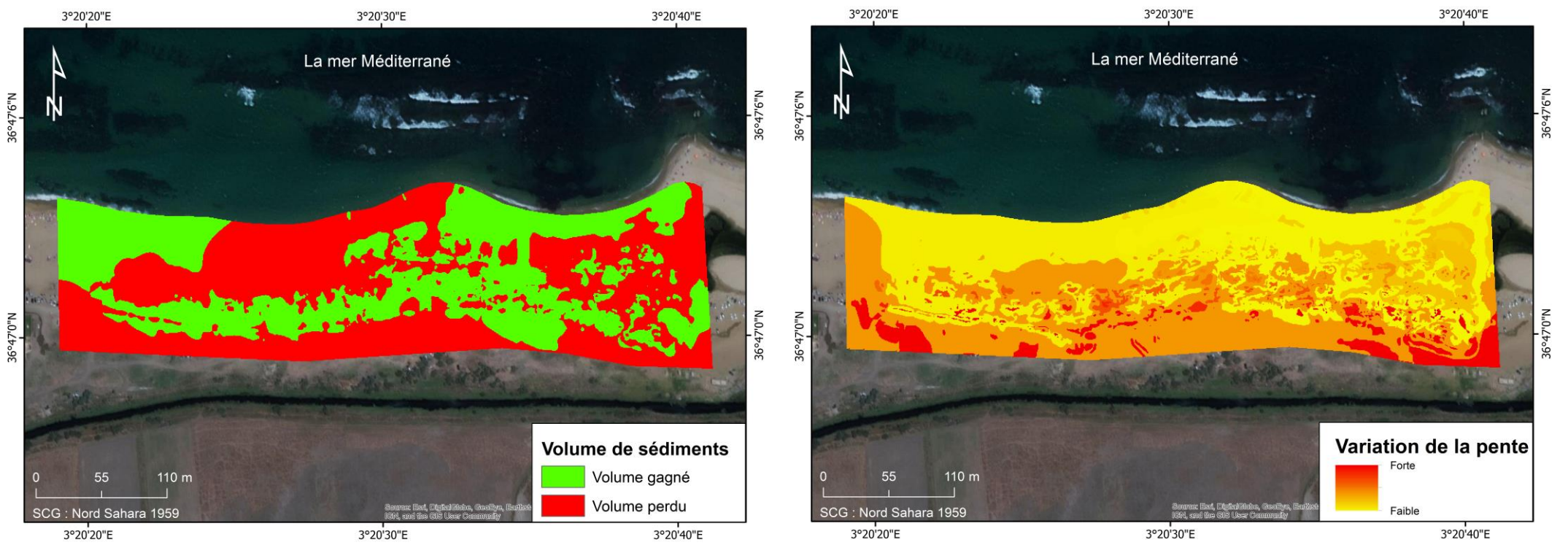


Figure 77 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2014 et 2017.

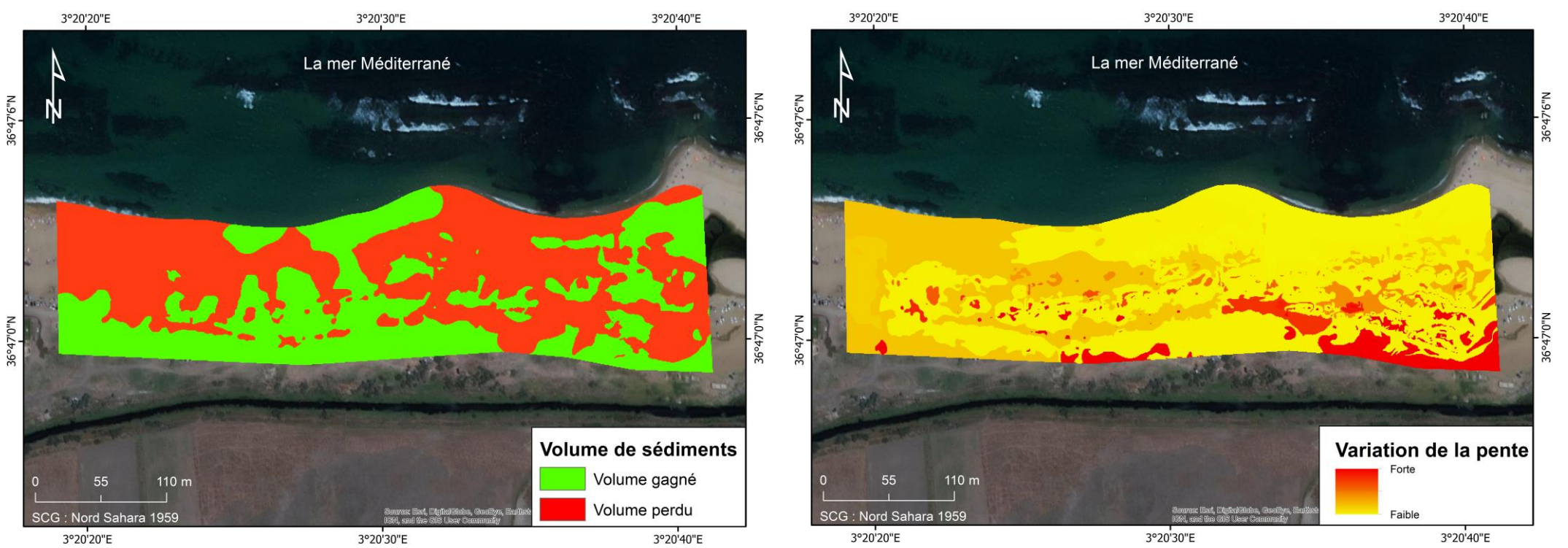


Figure 78 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2017 et 2020.

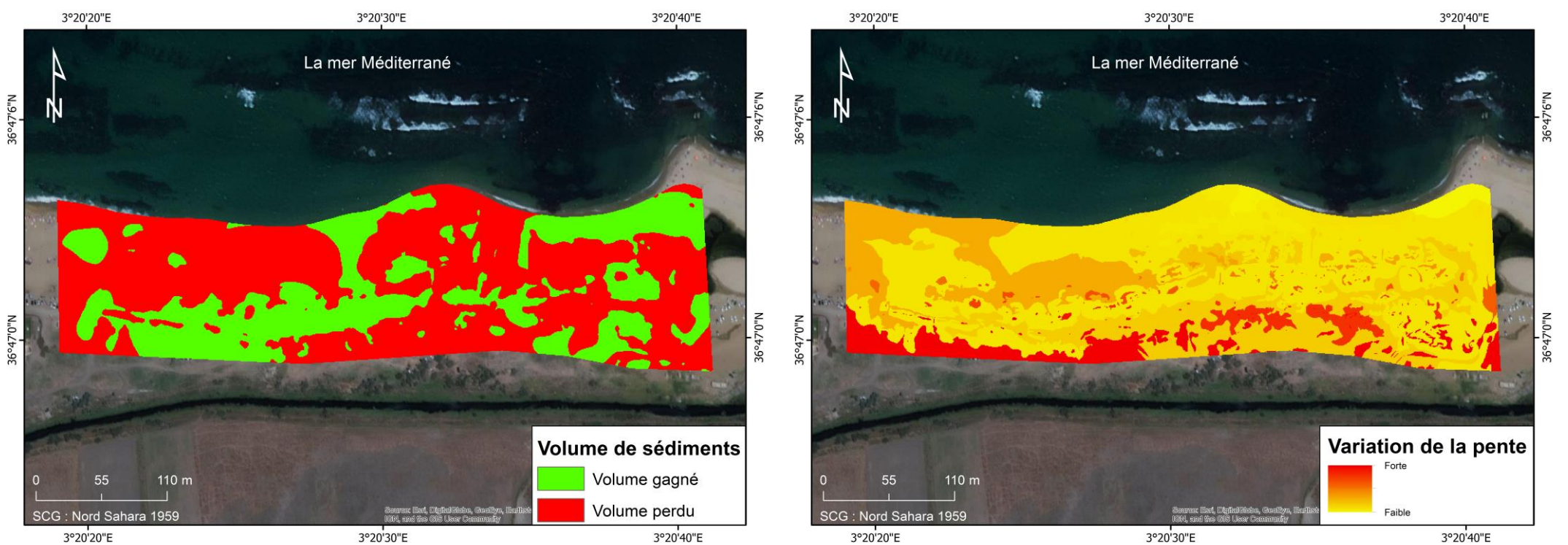


Figure 79 : Cartes de MNT résiduel et de la variation de la pente entre 2014 et 2020.

5.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

La comparaison entre les trois cartes montre une succession logique d'altitude qui augmente en allant vers le sommet du cordon dunaire d'El Kadous. Cependant, la comparaison entre les différentes courbes de niveaux et les MNT résiduels pour les différentes périodes étudiées témoigne d'une variabilité planimétrique et volumétrique plus ou moins importante.

La partie côté terre, qui n'est pas exposée à l'action des houles, représente le domaine le plus stable sur le plan planimétrique et se caractérise, sur le plan volumétrique, par une dégradation faible entre 2014 et 2017 puis par une accrétion faible qui peut être forte en allant vers l'Est entre 2017 et 2020. Cela est associé à une variation de pente de plus en plus importante. En réalité, cette accrétion est le résultat d'un transport sédimentaire dunaire par le vent durant la période hivernale, et ceci bloque parfois la route entre le cordon et le maquis. De ce fait, les autorités de la commune de Heraoua le remettent via pelleteuse du côté arrière dune (Figure 80).



Figure 80: La route Ain Taya - El Kadous.

En considérant les situations comparatives 2014 et 2017, la partie côté mer s'étalant du trait de côte jusqu'à moins de 6 m d'altitude se caractérise par une alternance de secteurs en accrétion et en érosion le long du système dunaire ; elle est dotée par une variation planimétrique de 2 à 6% et une variation volumétrique faible à moyenne qui est distribuée d'une manière déséquilibrée. Cependant, la zone dont l'altitude est supérieure à 6m se caractérise par une accrétion faible à forte sur le plan planimétrique et volumétrique qui est associée à une variation de pente faible à moyenne le long du cordon dunaire. Cela est justifier pas les mesures prises en 2015 dans le cadre de la stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières en Algérie pour la restauration de ce dernier.

Tandis qu'entre 2017 et 2020, cette dégradation s'est introduite à travers le cordon dunaire à l'exception de quelques segments où une accrétion a été observée. Durant cette période les pentes sont devenues plus fortes au niveau de sommet du cordon dunaire.

En considérant la situation comparative globale 2014/2020, la zone d'étude a perdue à la fois un volume de 7975,344 m³ et une surface de 5273,5m², soit un pourcentage de 3,44% et de 13,87% respectivement par rapport à son état initial.

Cela témoigne de la grande fragilité du cordon dunaire d'El Kadous en face des aléas naturels (tempêtes météo-marines) qui sont accentué par la pression humaine, notamment la surféquentation et l'urbanisation du littoral.

6. CORRELATION ENTRE L'EVOLUTION DU CORDON DUNAIRE ET LES FACTEURS DU MILIEU AMBIANT

Cette partie vise à mieux mettre en évidence les relations de dépendances entre l'évolution du cordon dunaire d'El Kadous et les autres facteurs de milieu ambiant. Selon la disponibilité des données sur plusieurs années, les facteurs sélectionnés sont : évolution du trait de côte (vitesse et la surface gagné/perdu à la mer) ainsi que l'évolution surfacique et volumétrique du cordon dunaire.

Ces différentes relations restent toujours délicates à cerner, une évaluation statistique de leurs dépendances a été déterminée en utilisant le logiciel statistique « R ». Ceci a permis de représenter les résultats sous formes d'un corrélogramme (une table contenant les coefficients de corrélation entre chaque deux variables) (voir Annexe 8).

La figure 81 montre que plus les vitesses de recul du trait de côte augmentent, plus la surface gagnée/perdue du cordon dunaire diminue ($R=-0,92$) et son volume gagné/perdu augmente ($R=0,84$). Aussi, il existe une forte relation linéaire positive de $+0,86$ entre la surface gagnée/perdue du cordon dunaire et la surface gagnée/ perdue à la mer.

Ceci signifie que plus la vitesse de recul du trait de côte diminue, plus la surface de la dune augmente et plus la surface gagnée à la mer augmente avec une diminution du volume de la dune (même quantité de sédiments occupant un espace plus grand). Du point de vue géomorphologique, cela signifie que la quantité de sédiments se trouvant au niveau du cordon dunaire alimente les plages adjacentes dont leurs surfaces augmentent en proportionnalité avec l'avancé du trait de côte.

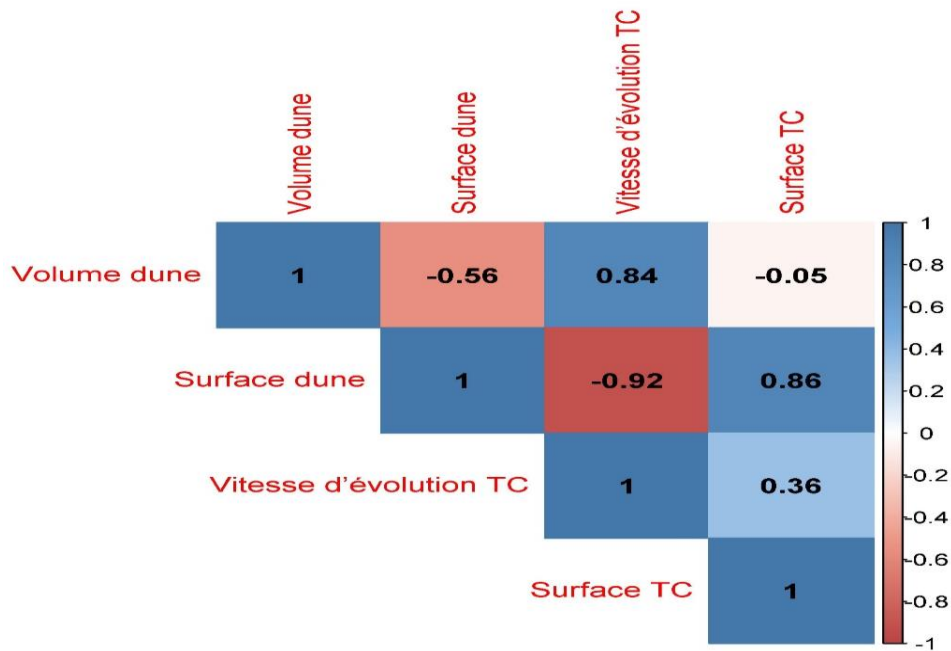


Figure 81 : Corrélogramme entre l'évolution du cordon dunaire et celle du trait de côte.

CONCLUSION

L'étude diachronique de l'évolution du cordon dunaire d'El Kadous sur une période de 6 ans, allant de 2014 à 2020 en utilisant des données de haute résolution issue de DGPS, montre qu'il est en voie de dégradation continue sur le plan volumétrique et surfacique. Cette dégradation continue est fortement dépendante de l'évolution du rivage adjacent.

La partie arrière dune subit moins de dégradation, sur le plan volumétrique et surfacique, que la partie avant dune en raison de son exposition frontale face aux actions hydrodynamiques. Comme cela a été déjà mentionné plus haut, le cordon dunaire d'El Kadous est de plus en plus fragilisé à cause de la superposition de plusieurs actions humaines, notamment le tourisme anarchique et l'urbanisation du littoral, le pâturage incontrôlé, l'extraction du sable et la surfréquentation qui commande son évolution et menacent l'intégrité de son fonctionnement.

CONCLUSION GENARALE

L'objectif de ce travail a été de fournir une information fiable et facilement accessible sur la dynamique et la cinématique annuelle du cordon dunaire d'El Kadous en prenant en considération toutes les composantes internes et externes pouvant intervenir ou influencer de façon directe ou indirecte sur ce système côtier.

D'après les résultats de cette étude, le cordon dunaire d'El Kadous est en voie de dégradation continue sur le plan volumétrique et surfacique. Cette dégradation est distribuée d'une manière déséquilibrée tout au long des différents segments de ce dernier, néanmoins, elle est plus axée sur la partie frontale à la mer. En considérant la situation comparative globale 2014/2020, cette dégradation est de 3,44% sur le plan volumétrique, soit un volume perdu de 7975,34m³, et de 13,87% sur le plan surfacique (pour la courbe de niveau de 3m) soit une surface perdue de 5273,5m². Cela s'accompagne d'un recul moyen du trait de la côte de -1,19m/an. Cependant, ces tendances à la dégradation devront être comparées au flux net de la cellule sédimentaire incluant la zone d'étude.

Le cordon dunaire d'El Kadous représente un patrimoine naturel précieux qui devrait être préservé. Sa disparition ou modification entraînerait une perte de la plupart des biens et services socioéconomiques et culturels qui dépendent de ce dernier. A cet effet, des mesures d'adaptation devront être prises.

A la lumière des résultats de cette étude, on propose les mesures d'adaptation suivantes :

- **Stratégie d'adaptation à court et à moyen terme**

En raison de la surfréquentation de la zone d'étude et de l'absence de la prise de conscience des visiteurs, le rechargement artificiel périodique représente la solution la plus recommandée pour la restauration du cordon dunaire d'El Kadous. Afin de fixer ces sédiments, des dispositifs complémentaires devront être appliqués :

- ❖ **La plantation de végétaux**

Réalisation des semis ou plantations d'espèces adaptées au site d'étude (**Scilla sp, Pancratium maritimum, Lotus creticus, Ammophila arenaria et Chamaerops humili**). Ceci joue le rôle d'un obstacle aux sédiments mobilisés par le vent et favorise le développement dunaire.

- ❖ **Canalisation de la fréquentation en milieu dunaire**

La mise en place de chemins d'accès bien encadrés du public à la plage avec une signalétique de guidage pour limiter le piétinement de la végétation dunaire (clôtures à fils, grillagées, ganivelles, Etc.).

- **Stratégie d'adaptation à long terme**

L'élaboration d'un plan GIZC représente un outil incontournable pour le développement durable des littoraux. Sa mise en œuvre nécessite au préalable la détermination des orientations de la stratégie nationale de GIZC conformément aux exigences du protocole GIZC de Madrid.

La mise en œuvre des stratégies d'adaptation dans le cadre d'un plan de GIZC, nécessite tout d'abord une bonne connaissance de l'interdépendance entre les différents facteurs du milieu ambiant. Ces stratégies d'adaptation devraient être basées sur des évaluations progressives et un suivi régulier qui permet de réaliser une base de données de la zone d'étude. De ce fait, on recommande :

- La mise en œuvre d'un système de surveillance et de suivi de la zone d'étude, en particulier le suivi de la variation diachronique du débit solide et liquide de l'Oued Réghaia. Cela représente une information primordiale pour la quantification du volume de sédiments d'origine terrigène qui est apporté à la mer, ceci afin d'estimer la quantité de sédiments dédiés à l'alimentation du cordon dunaire en considérant ainsi le régime du transport sédimentaire au niveau de la plage sous-marine.
- La sensibilisation des visiteurs de la zone sur l'importance de ces écosystèmes et le renforcement du pouvoir de prise en charge des responsables pour leur permettre de mettre en vigueur la loi littorale et l'attachement des pénalités en cas d'intrusion. En particulier, les lois interdisant l'activité de carrossage, le pâturage anarchique et même le piétinement de la végétation dunaire.

Perspectives :

- Utilisation des données climatiques et hydrodynamiques de « ONM » qui fournissent des mesures in situ plus précises que celles utilisées dans ce travail.
- Acquisition d'une image satellitaire de très haute résolution de la zone d'étude, cela permettra de réaliser un plan d'aménagement détaillé qui représente une aide à la prise de décision.
- Réalisation de levés topo-bathymétriques à maillage serré sur plusieurs années couvrant une large zone afin d'étudier la variation sur le plan bathymétrique et de quantifier ainsi la variation des budgets sédimentaire. Cela peut fournir une information cruciale pour comprendre les tendances évolutives du cordon dunaire d'El Kadous.
- Mise en place d'un système de piégeage de sédiment afin de déterminer la quantité de sédiments mobilisés pour faire des vérités terrains.
- L'encouragement du partage de l'information scientifique et la mise en place d'une base de données commune à accès public.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- ABBAS, K., OUNOUH, K., (2009).** Contribution à la cartographie de la réserve naturelle du lac de Réghaïa (Alger) par l'application d'un SIG : carte d'occupation des sols et carte potentielle des aménagements. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Sciences Agronomiques. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI, 139p.
- ADEM, A.A., (2014).** Evaluation et gestion de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau des zones côtières et des écosystèmes dépendants : Cas de la zone côtière de Béjaïa. Mémoire de magister en science de la terre. Alger : USTHB, 111p.
- ANCC, (2019).** Rapport sur l'évaluation de la vulnérabilité de la côte de Beni Belaid face à l'élévation du niveau de la mer. Document non publié. Alger : ANCC.
- ANDREWS, BrianD., GARES, P.A., COLBY, J.D., (2002).** Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology* 48, 289–308. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00186-](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00186-)
- AYADI, K., (2016).** Les Variations historiques de la ligne du rivage, érosion côtière dans la baie de Béjaïa "modélisation des transports sédimentaires en mer et impacts des ouvrages de protection sur la côte ". Thèse doctorat en science de la terre, géographie et aménagement du territoire. Alger : USTHB, 320 p.
- BACCUS, J.T., HORTON, J.K., (1980).** Pedestrian impacts: Padre Island, in: Barrier i..~ Land for/In/and Workshop, BS Mayo and LB Smith Jr. (Cds.). pp. 89–102.
- BELHAI-BENAZZOUC, A., DJELAL, N., (2010).** Le foncier vecteur de l'étalement urbain Algérois. Presented at the In Symposium: Identity and territorial competitiveness, du 20 au 22 Septembre 2010 ASRDLF-AISRE.
- BENABDI, M., (2015).** Plan de gestion de la future réserve naturelle de Réghaïa en Algérie. Document publié. Tunis : CAR/ASP - PNUE/PAM.
- BENBRAHAM, - Mohamed, AGABI, - Zakaria, (2018).** Diagnostic et étude de l'évolution des falaises de la région algéroise. Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement du littoral. ENSSMAL, Alger : 105 p.
- BENGOUFA, S., (2016).** Etude et évaluation de l'état de la vulnérabilité du système côtier de la zone Est-algéroise. Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement de littoral. Alger : ENSSMAL, 94 p.
- BENKADI, O., LEZOUL, S., (2017).** Etude de l'efficacité de la station d'épuration de Réghaïa et l'impact de la pollution sur le lac de Réghaïa. Mémoire de Master en Génie des procédés, Option : Traitement des eaux. Boumerdes : M'HAMED BOUGARA, 128 p.
- BOAK, E.H., TURNER, I.L., (2005).** Shoreline Definition and Detection: A Review. *J. Coast. Res.* 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- BOUAKLINE, S., (2009).** Variations historiques de la ligne de rivage et érosion côtière le long de la côte Est Algéroise entre Cap Matifou et l'embouchure de l'oued Reghaïa. Mémoire de magister en science de la terre, spécialité Géomorphologie. USTHB, Alger : 198 p.
- BOUHAMADOUCHE, M., (1993).** Sédimentologie du plateau continentale Est Algérois (Boumerdes-Boudouaou El Bahri) « Morphologie, Minéralogie, Mécanismes Hydrosédimentaires, érosion et protection du littoral ». Thèse doctorat en Sciences de la Terre, spécialité : Géologie marine. Alger : USTHB, 180 p.
- BOUKHEDICHE, W., (2017).** Etude de faisabilité de rechargement artificiel des plages de la côte Ouest-algéroise. Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 92 p.
- BOUNOUA, KACI, (2017).** Etude des écosystèmes dunaires algérois : étude comparative entre les deux ensembles dunaires du Mazafran et d'El Kadous. Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement de littoral. Alger : ENSSMAL, 136 p.

Références bibliographiques

- CHAIBI, M., MAANAN, M., SABATIER, F., CHARIF, A., OUGOUGDAL, M.A., MALEK, H.A., (2014).** Modélisation du transport éolien dans le système plage-dune de la baie d'El Haouzia (côte atlantique marocaine). *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 101–119. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3872>.
- CHANEL, C., (2012).** Analyse de données LiDAR aéroportées et apport des méthodes topographiques pour les expérimentations géophysiques de tomographie dans le cadre du projet TOMUVOL sur le site expérimental du dôme volcanique du Puy de Dôme. Mémoire d'ingénieur. École Supérieure des Géomètres et Topographes. Boulevard Pythagore : 68 p.
- CHEREL, J.-P., (2010).** Création d'un Modèle Numérique de Terrain raster à partir de courbes de niveau (vecteur) Visualisation en 2D [en ligne]. [Consulté le 04/04/2020]. Disponible sur le web : http://www.univmontp3.fr/ateliermercator/wpcontent/uploads/2010/03/MNT_PEELEE_230310.pdf
- Manuel d'ArcGis.** Créer une surface TIN—ArcGIS Pro | Documentation [en ligne]. [Consulté le 15/10/2020]. Disponible sur le web : « URL <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/data/tin/create-a-tinsurface.htm> (accessed 10.15.20) ».
- DEBOUDT, P., (1997).** Etude de géomorphologie historique des littoraux dunaires du Pas-de-Calais et du nord-est de la Manche.
- DREAL, 2008.** Les cellules sédimentaires [en ligne]. [Consulté le 02/10/2020]. Disponible sur le web : <http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/les-cellules-sedimentaires-a537.html>
- Ecole Littoral St. Brévin, (2018).** La dune et son écosystème. [en ligne]. [Consulté le 24/06/202]. Disponible sur le web : <https://passerelle2.ac-nantes.fr/ecoledulittoral/2018/07/03/la-dune-et-son-ecosysteme/> (accessed 10.2.20) .
- era5.** Données climatiques. Disponible sur le web : <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- FAYE, I., GIRAUDET, E., GOURMELON, F., HENAFF, A., (2012).** Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte. *M@ppemonde*, Maison de la géographie, 2012, 104 (2011.4), « <http://mappemonde.mgm.fr/num32/articles/art11404.html>. (hal-00671879) »
- FOUZOL, (2014).** El Kadous (La plage) [en ligne]. [Consulté le 12/11/2020]. Disponible sur le web : <http://pluriel.over-blog.com/2014/09/el-kadous-la-plage.html> (accessed 10.14.20).
- GARES, P.A., (1983).** Beach/dune changes on natural and developed coasts, in: *Coastal Zone'83*. ASCE, pp. 1178–1194.
- Geocaching, (2020).** La dune Dewulf. [en ligne]. [Consulté le 10/06/2020]. Disponible sur le web : <http://www.geocaching.com/> (accessed 10.1.20).
- GRUNET, N., CHEVALIER, C., (2006).** Etude hydrosédimentaire des plages de Morgat, in: *IXèmes Journées*, Brest. Presented at the Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Editions Paralia, pp. 221–230. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2006.023-G>.
- HANIFI, N., KADIK, L., GUITTONNEAU, G.-G., (2007).** Analyse de la végétation des dunes littorales de Zemmouri (Boumerdès, Algérie). *Acta Bot. Gallica* 154, 235–249. <https://doi.org/10.1080/12538078.2007.10516054>.
- HENAFF, A., LAGEAT, Y., Hallégouët ALLEGOUET, B., JABBAR, M., DELLIOU, N., DIARD, M., (2015).** Évolutions des accumulations littorales et relations avec les dynamiques d'avant-plage dans l'archipel des Glénan (Sud-Finistère, France). *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 21, 359–384. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11195>
- HENTATI, I., Zaïri, M., Ben Dhia, H., (2008).** HydroTools : Outil pour la modélisation et l'extraction d'un réseau hydrologique.
- HESP, P., (2002).** Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48, 245–268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8)
- HUBERT, D., BERTRAND, M., (2004).** Topographie 1 : Principes et applications. Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit. Lausanne : Institut du développement territorial GÉOMATIQUE - TOPOMÉTRIE, 129 p.

Références bibliographiques

- KACEMI, M., (2009).** Protection du littoral en Algérie entre gestion et législation. Le cas du pôle industriel d'Arzew (Oran, Algérie). Droit Société n°73, 687. <https://doi.org/10.3917/drs.073.0687>
- KERMANI, S., (2016).** Les dunes littorales de la baie de Jijel "origine, mise en place et impacts des activités humaines". Thèse doctorat en science de la terre, géographie et aménagement du territoire. Alger : USTHB, 278 p.
- KHALFANI, D., (2014).** Etude hydrosédimentaire à l'avant côte de cap de Djinet, wilaya de Boumerdes. Mémoire de magister en sciences de la mer. Alger : ENNSMAL, 217 p.
- LARID, M., (2008).** La zone côtière humide de Réghaia dans le littoral Est Algérois (Algérie) : Contribution méthodologique à son plan de gestion. Cybergeo Eur. J. Geogr. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.18852>
- LEDUC, P., (2013).** Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses. Thèse doctorat en science de la Terre. Grenoble, Irstea Grenoble : 258 p.
- LEY DE LA VEGA DE SEOANE, C., FAVENNEC, J., GALLEGRO, J., BAUTISTA, F., VIDAL, C.P., (2012).** Conservation des dunes côtières: restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale. Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN, Málaga.
- MALLET, C., MICHOT, C., (2012).** Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. BRGM/RP-60616-FR : p.
- MESSAOUD, N., (1987).** Hydrogéologie et pollution des eaux : exemple du bassin versant du Mazafran, Mitidja. Mémoire de magister en Géologie appliquée. Grenoble : Université Scientifique et Médicale, 137 p.
- MICHEL, F., (2010).** La dune : formation et mouvements [en ligne]. [Consulté 30/09/2020]. Disponible sur le web : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-paysages-roches-epiderme-notre-planete-972/page/8/>
- MOUSSA OUEDRAOGO, M., DEGRE, A., DEBOUCHE, C., (2014).** Synthèse bibliographique : le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation. BASE : 15 p.
- Navionics. Données bathymétriques.** Disponible sur le web : https://navionics.secure.force.com/kb/articles/fr/Knowledge_Article/Comment-enregistrer-et-mettre-%C3%A0-jour-une-carte/?l=fr&fs=Search&pn=1
- NECHENACHE, F., (2015).** Etude géomorpho-sédimentaire de la zone côtière du parc national de TAZA (wilaya de Jijel). Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement de littoral. Alger : ENSSMAL, 138 p.
- NORDSTROM, K.F., MCCLUSKEY, J.M., (1985).** The effects of houses and sand fences on the eolian sediment budget at Fire Island, New York. J. Coast. Res. 39–46.
- NOURI, M., YAHIA MEDDAH, R., (2017).** Combinaison des modèles numériques et des images satellites pour la détermination des courants côtiers. Mémoire d'Ingénieur en science de la mer, spécialité Aménagement du littoral. ENSSMAL, Alger : 108 p.
- ONF, (2019).** Le génie écologique au service de la gestion des dunes [en ligne]. [Consulté le 11/10/2020]. Disponible sur le web : <https://www.onf.fr/+58d::le-genie-ecologique-au-service-de-la-gestion-des-dunes.html> (accessed 10.2.20).
- OTMANI, H., BELKESSA, R., RABEHI, W., GUERFI, M., BOUKHEDICHE, W., (2019).** Dégradation des dunes côtières algéroises entre pression de l'urbanisation et conséquences sur l'évolution de la ligne de rivage. Géo-Eco-Mar. 25, 131–145. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3609777>.
- OTMANI, H. (2014).** Impact des infrastructures maritimes sur le littoral : cas de cap Djinet. Mémoire de magister en Aménagement du Littoral. Alger : ENSSMAL : 155p.
- OUESLATI, A., (2017).** Guide de gestion des dunes et des plages associées, sous la direction de Loïc Gouguet. Quae, 2018, collection « Guide pratique », 14 x 24,5, 224 p. ISBN : 978-2-7592-2481-4. Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement 348–350.

Références bibliographiques

- OULED SAID, S., (2013).** Impact des paramètres Physico-chimiques sur la dynamique des Zooplanctons d'un lac d'eau douce (Lac de Réghaia). Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie.
- OUZIDAD, MERROUCHE, (2019).** Etude de l'érosion côtière à partir des images satellitaire (cas de littorale de Zemmouri). Mémoire de master. Alger : USTHB, 127 p.
- PASKOFF, R., (1992).** Les dunes littorales. Annales de Géographie.
- PASKOFF, R., (1998).** La crise des plages: pénurie de sédiments, Mappemonde. ed.
- PETIT-BERGHEM, Y., (2012).** Forêt et conservation des dunes littorales : le cas exemplaire de la Réserve biologique domaniale de la Côte d'Opale (Pas-de-Calais). EchoGéo. <https://doi.org/10.4000/echogeo.12766>.
- PINOT, J.-P., (1998).** La gestion du littoral. Institut océanographique.
- PLANTON, P. (2012).** Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes méditerranéenne : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.
- POSIDuNE., (2007).** Interactions de Posidonia oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles : Manuel pour la caractérisation et l'aménagement des dunes côtières.6-21p
- PYE, K., (1990).** Physical and human influences on coastal dune development between Ribble and Mersey estuaries, orthwest England, In NORDSTROM, K.F. et al (ed): Coastal dune. Forms and process. John Wiley&Sons. ed. London.
- Ramsar sites information service, 2003. Algérie Réserve Naturelle du Lac de Réghaïa. Document publié. Disponible sur le web : <https://rsis.ramsar.org/ris/1304>
- ROBIN, M., (2002).** La télédétection: des satellites aux SIG.
- SAYOUD, M.S., (2017).** Contribution à l'évaluation de la qualité des eaux du lac Réghaia par Indice Diatomique Générique –IDG. Mémoire de Master II en Génie des Procédés. Boumerdes : Université M'Hamed BOUGARA, 55 p.
- SIGétudes, (2020).** Levé GPS. [en ligne]. [Consulté le 03/04/2020]. Disponible sur le web : <https://www.sigetudes.fr/guides-metier/leve-avec-gps/> (accessed 3.7.20).
- STEWART, PH., (1968).** Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique quelques réflexions. Bull. Soc. hùt. Ilat, Afr.
- THIBAUT, M., BOUAZOUNI, O., KADDOUR, B.H., MOALI, A., (2006).** Plan de Gestion de la Réserve Naturelle du Lac Réghaïa (Algérie).
- VALLEJO, I., OJEDA, J., MALVAREZ, G., (2006).** Characterization and classification of the beach-dune system of the Doñana National Park, Southern Spain. , in: SI 48. Journal of Coastal Research, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, pp. 112–117.
- YAHYAOU, Z., RBAI, N., SAADI, A., (2014).** Etude descriptive de l'évolution saisonnière des dunes bordières de la plage de Korba (façade orientale, Cap Bon) par la méthode des Modèles Numériques de Terrain Résiduel, Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô, Vol. 41, 2014 : 16 p.
- ZEMMOUR, A., (2019).** Étude de l'évolution des littoraux dunaires de la Côte d'Opale à différentes échelles de temps : analyse de leur capacité de régénération post-tempête. Thèse doctorat en science de la matière et du rayonnement et de l'environnement. France : Université du Littoral Côte d'Opale, 283 p.

ANNEXES

Annexe 1 : DONNEES DES PRECIPITATIONS ET DES TEMPERATURES

Tableau 1 : Tableau représentatif des variations de Températures et de Précipitations annuelles durant la période allant de 2009 à 2019 (rp5.ru, 2009/2019).

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Moyenne
Variable												
P (mm)	554	558,79	674,25	353,19	648,24	263,82	323,86	301,56	288,33	1169,7	879,8	546,87
T (°C)	17,83	17,93	18,23	17,88	17,53	18,64	18,21	18,43	18,25	17,92	18,19	18,09

Tableau 2 : Tableau représentatif de la variation des Températures et des Précipitations mensuelles (rp5.ru, 2009/2019).

Année	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Variable												
P (mm)	64,22	58,04	61,53	69,98	34,13	9,88	1,19	0,92	51,09	52,21	95,11	48,56
T (°C)	11	11,2	13,4	15,8	18,7	22,9	26,2	26,2	23,8	20,3	15,3	12

Annexe 2 : DONNEES DE VENTS SUR LA COTE

ÉCHELLE DE BEAUFORT				
Force	Terme	Km/h	Kts	Descriptions
0	Calme	< 1	< 1	La fumée monte verticalement
1	Très légère brise	1 à 5	1 à 3	La fumée indique la direction du vent – les girouettes ne s’orientent pas
2	Légère brise	6 à 11	4 à 6	On sent le vent sur le visage – les feuilles bougent
3	Petite brise	12 à 19	7 à 10	Les drapeaux flottent bien – les feuilles sont sans cesse en mouvement
4	Jolie brise	20 à 28	11 à 15	Les poussières s’envolent – les petites branches plient
5	Bonne brise	29 à 38	16 à 20	Les petits arbres balancent – les sommets de tous les arbres sont agités
6	Vent frais	39 à 49	21 à 26	On entend siffler le vent
7	Grand frais	50 à 61	27 à 33	Tous les arbres s’agitent
8	Coup de vent	62 à 74	34 à 40	Quelques branches cassent
9	Fort coup de vent	75 à 88	41 à 47	Le vent peut endommager les bâtiments
10	Tempête	89 à 102	48 à 55	Visibilité Réduite – gros dégâts
11	Violente tempête	103 à 117	56 à 63	Conditions exceptionnelles – visibilité réduite – gros dégâts
12	Ouragan	> 118	> 64	Dommage maximum

Figure 1 : Echelle de Beaufort.

Annexes

Tableau 3: Tableau des fréquences d'apparition des classes de vents selon les directions dominantes des vents sur la côte (rp5.ru, 2009/2019).

Saison	Hiver		Printemps		Eté		automne		Annuel	
Direction										
Vitesses (m/s)	N	SW	N	NE	N	NE	N	SW	N	SW
< 1km/h	11.01	0.1	12.04	0	9.29	0.01	11.64	0.12	10.99	0.1
1 à 5km/h	1.09	2.08	0.25	0.48	0.29	0.46	0.24	1.8	0.47	1.61
6 à 11km/h	1.31	8.66	2.09	3.31	3.39	5.34	1.94	5.82	2.18	5.52
12 à 19km/h	0.78	2.69	3.12	3.52	5.01	5.62	2.67	1.14	2.89	1.34
20 à 28km/h	0.31	0.71	0.73	1.88	0.99	3.6	0.44	0.25	0.62	0.31
29 à 39km/h	0.17	0.17	0.07	1.67	0.03	2.72	0.05	0.05	0.08	0.07
39 à 49km/h	0.03	0.01	0	0.35	0.04	0.5	0	0	0.02	0
50 à 61km/h	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0
62 à 74km/h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75 à 88km/h	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0

Annexe 3 : LES BANDES LITTORALES DEFINIES PAR LA LOI 02 :02

Tableau 4 : Les bandes littorales définies par la loi 02 :02

Les bandes littorales	Description
La bande 1	<p>est la bande inconstructible des 100 m instaurée par la loi 90- 29, dont la largeur peut atteindre 300 m à partir du rivage pour des motifs liés au caractère sensible du milieu côtier.</p> <p>Cette bande inclut le rivage naturel dans lesquels sont interdits la circulation et le stationnement des véhicules (sauf les véhicules de service, de sécurité, de secours, d'entretien ou de nettoyage des plages). Les conditions et les modalités d'extension de cette zone et d'autorisation des activités permises sont fixées par voie réglementaire.</p>
La bande 2	<p>d'une largeur de 800 m, où sont interdites les voies carrossables nouvelles parallèles au rivage. Toutefois, en raison de contraintes topographiques de configuration des lieux ou de besoins des activités exigeant la proximité immédiate de la mer, il peut être fait exception à cette disposition.</p>
La bande 3	<p>dont la largeur est de 3 km, y sont interdites : toute extension longitudinale du périmètre urbanisé, c'est-à-dire toute extension parallèle au rivage ; l'extension de deux agglomérations adjacentes situées sur le littoral à moins que la distance les séparant soit de 5 km au moins ; les voies de transit nouvelles parallèles au rivage. Les constructions et les occupations du sol directement liées aux fonctions des activités économiques autorisées par les instruments d'urbanisme dans cette bande des 3 km sont réglementées.</p>

Annexe 4 : METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRAIT DE COTE

Tableau 5 : Principale indicateurs du trait de côte recommandé et classer par type et par période

Milieu	Indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés	Classe/type
Tous types de plages et dunes (côte sableuse, galets, plage corallienne...)	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	résurgence d'eau sur la plage	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	limite de jet-de-rive	hydrodynamique (instantané ou non)
	ligne d'eau instantanée	hydrodynamique (instantané)
	première barre d'avant-côte	géomorphologique
	berme	géomorphologique
	talus de collision (côte microtidale)	géomorphologique
	pied de dune	géomorphologique
	crête de dune	géomorphologique
	abrupt	géomorphologique
	limite de végétation pionnière	botanique
limite côté mer de végétation pérenne dunaire	botanique	
Côte à falaise rocheuse	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	encoche basale	géomorphologique
	pied de falaise	géomorphologique
	sommet de falaise	géomorphologique
	rupture de pente topographique	géomorphologique
	limite supérieure du cône d'éboulis	géomorphologique
	limite inférieure de végétation terrestre	botanique
partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries	botanique	
limite supérieure du lichen marin noir	botanique	
Marais maritime	laisse de mer	hydrodynamique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	limite supérieure du schorre	géomorphologique et botanique
Marais à mangrove	limite supérieure de la slikke	géomorphologique et botanique
	limite de front de mangrove	géomorphologique et botanique
Côte artificialisée (ouvrages en l'absence de plages)	limite d'arrière-mangrove	géomorphologique et botanique
	limite côté mer de l'aménagement	géomorphologique
	limite côté terre de l'aménagement	géomorphologique
	sommet des ouvrages	géomorphologique

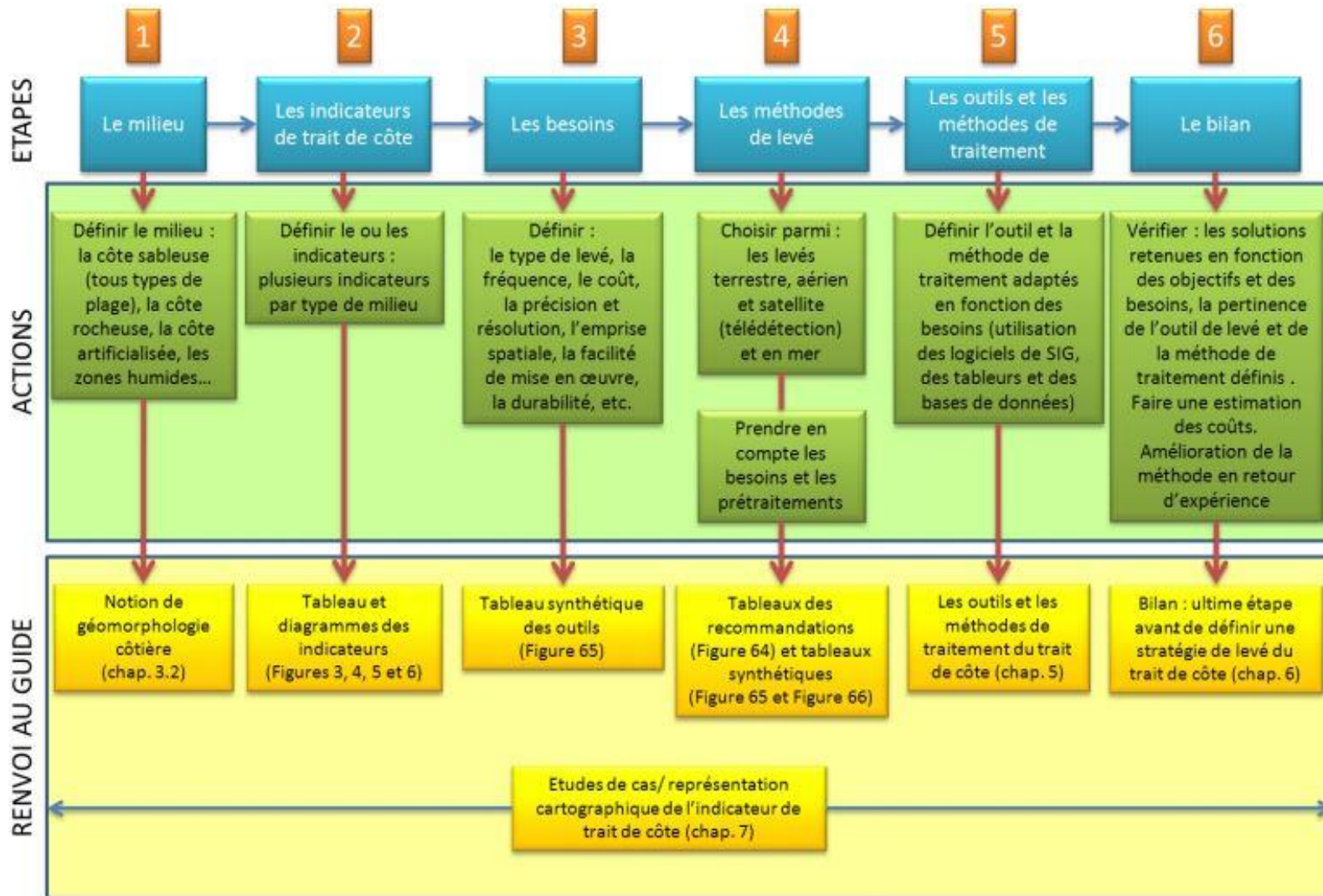


Figure 2 : Organigramme permettant de définir une méthode de suivi du trait de côte.

Annexe 5 : LES PARAMETRES CALCULES PAR L'EXTENSION DSAS

Tableau 6 : Les paramètres calculés par l'extension DSAS.

Paramètre calculé	Description
EPR End Point Rate	Est le rapport de la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent par rapport au temps (nombre d'années) écoulé entre les deux dates.
LRR Linear Regression	Ce paramètre traduit le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect. Le LRR est intéressant si l'on analyse la cinématique littorale pour plus de deux dates, car la méthode de calcul tient compte de la tendance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée
NSM Net Shoreline Mouvement	Le mouvement du littoral net indique une distance et non un taux. Le NSM est associé aux dates de seulement deux rivages (ANCC., 2019).

**Annexe 6 : FREQUENCES D'APPARAISON DES HAUTEURS
SIGNIFICATIVES DES HOULES AU LARGE EN FONCTION DE LA SAISON ET
DES ETATS DE MER**

Tableau 7 : Fréquence d'apparition des hauteurs significatives des houles au large en fonction de la saison et des états de mer.

	Etats de mer	Calme à Ridée	Belle	Peu agitée	Agitée	Forte	Très forte	Grosse
Saison	Classes de Hs (m)	0 à 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 1,25	1,25 à 2,5	2,5 à 4	4 à 6	6 à 9
	Direction							
Hiver	NNE	0,1	2,25	7,89	7,98	2,38	21,28	0
	W	0,01	0,55	4,56	9,53	3,47	19,36	0
	NWW	0,02	1,16	4,7	5,41	1,82	13,56	0
	Moyenne	0,04	1,32	5,72	7,64	2,56	18,07	0
Printemps	NNE	0,04	1,96	8,74	5,79	0,88	17,6	0
	NE	0,12	2,8	10,81	4,29	0,17	18,18	0
	W	0,02	0,88	6,77	8,39	2,38	18,64	0
	Moyenne	0,06	1,88	8,77	6,16	1,14	18,14	0
Eté	NNE	0,06	2,66	9,77	4,31	16,86	0	0
	NE	0,05	4,9	18,59	5,68	29,3	0	0
	NEE	0,12	6,21	17,25	3,18	26,81	0	0
	Moyenne	0,08	4,59	15,2	4,39	24,32	0	0
Automne	NNE	0,08	2,57	10,77	5,98	1,18	20,8	0
	NE	0,07	3,27	11	2,69	0	17,04	0
	W	0,02	0,9	5,84	8,2	1,84	17,01	0
	Moyenne	0,06	2,25	9,20	5,62	1,01	18,28	0
Annuel	NNE	0,06	2,31	9,31	6,06	1,11	0,14	0
	NE	0,08	3,1	11,44	3,66	0,11	0	0
	W	0,01	0,93	5,81	7,12	1,96	0,21	0
	Moyenne	0,05	2,11	8,85	5,61	1,06	0,12	0

Annexe 7:DGPS

❖ **TYPE DE LEVE DGPS**

✓ **LEVE PPK (POST PROCESSING KINEMATIC)**

Dans ce type de levé, la station de base enregistre les données brutes GPS sur la carte mémoire du récepteur alors que le mobile enregistre les données brutes également sur le carnet électronique du terrain. La mesure (cinématique) est faite en temps différé, c'est à-dire, qu'elle nécessite un post-traitement pour atteindre une précision centimétrique. Aussi, pour ce type de levé, il est nécessaire d'utiliser les stations du Réseau Géodésique Permanent (RGP).

✓ **LEVE RTK (REAL TIME KINEMATIC)**

Pour ce modèle de levé, la position de la base mobile est calculées grâce aux corrections transmises par la base (par radio) en temps réel (instantané), qui sont par la suite enregistré dans le carnet de terrain électronique. La mesure (dite cinématique) se fait selon une précision centimétrique. En prenant en compte le critère existence ou absence d'un point d'appui géodésique, le levé RTK peut s'effectuer par deux méthodes : base fixe ou base libre avec repère ou base libre sans repère.

En RTK, il existe deux méthodes d'acquisition de points :

Topo continue (Auto topo) : utilisée lors de l'acquisition de points en continu, pour le levé du trait de côte, du pied de falaise ou du sommet de falaise. Une acquisition régulière en fonction du temps ou en fonction de la distance peut se faire.

Point topo : utilisée lors de l'acquisition de points le long d'un transects ou de points remarquables et pour la réalisation d'un MNT.

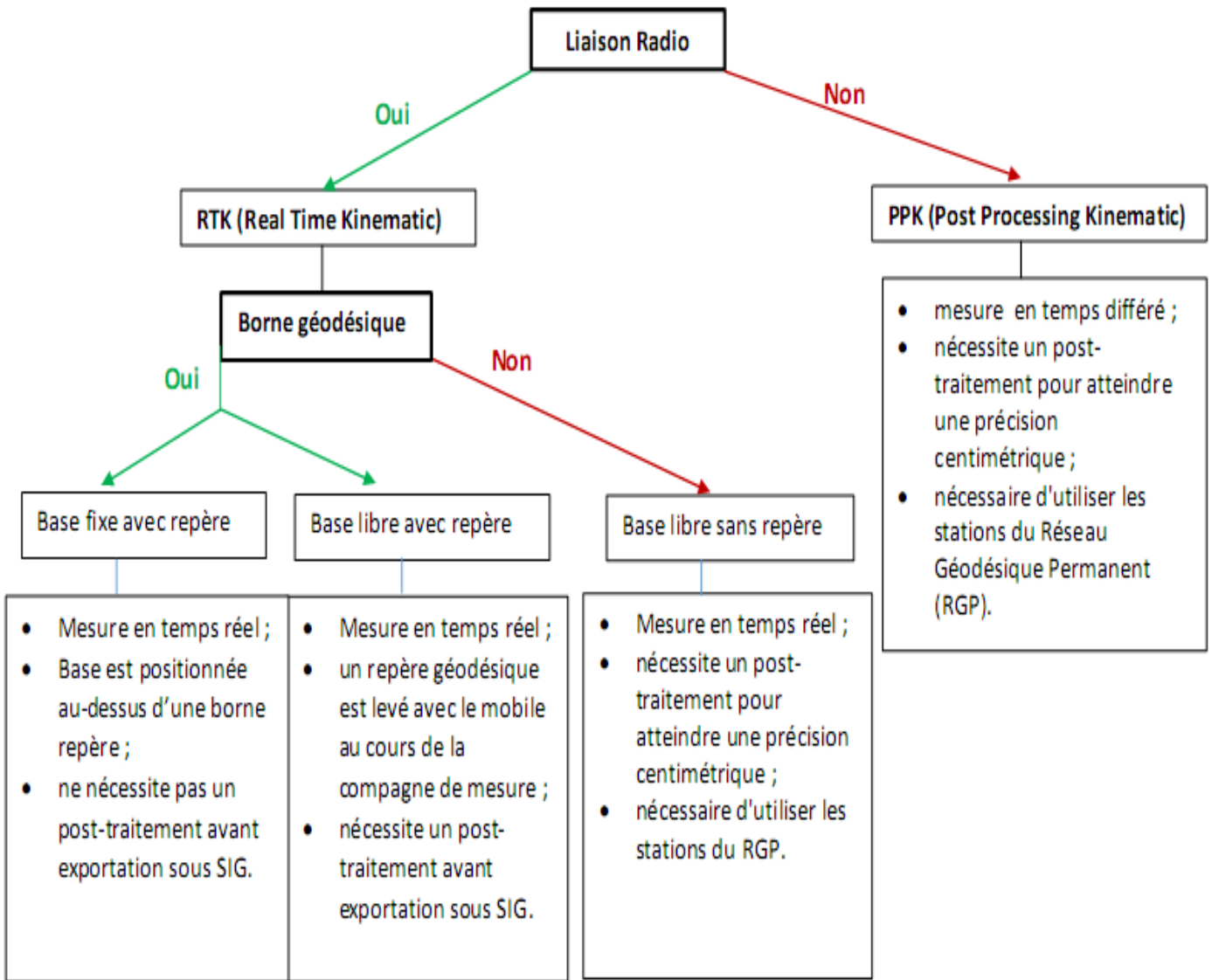


Figure 5 : Schéma simplifié des deux types de levés topographiques à partir d'un DGPS.

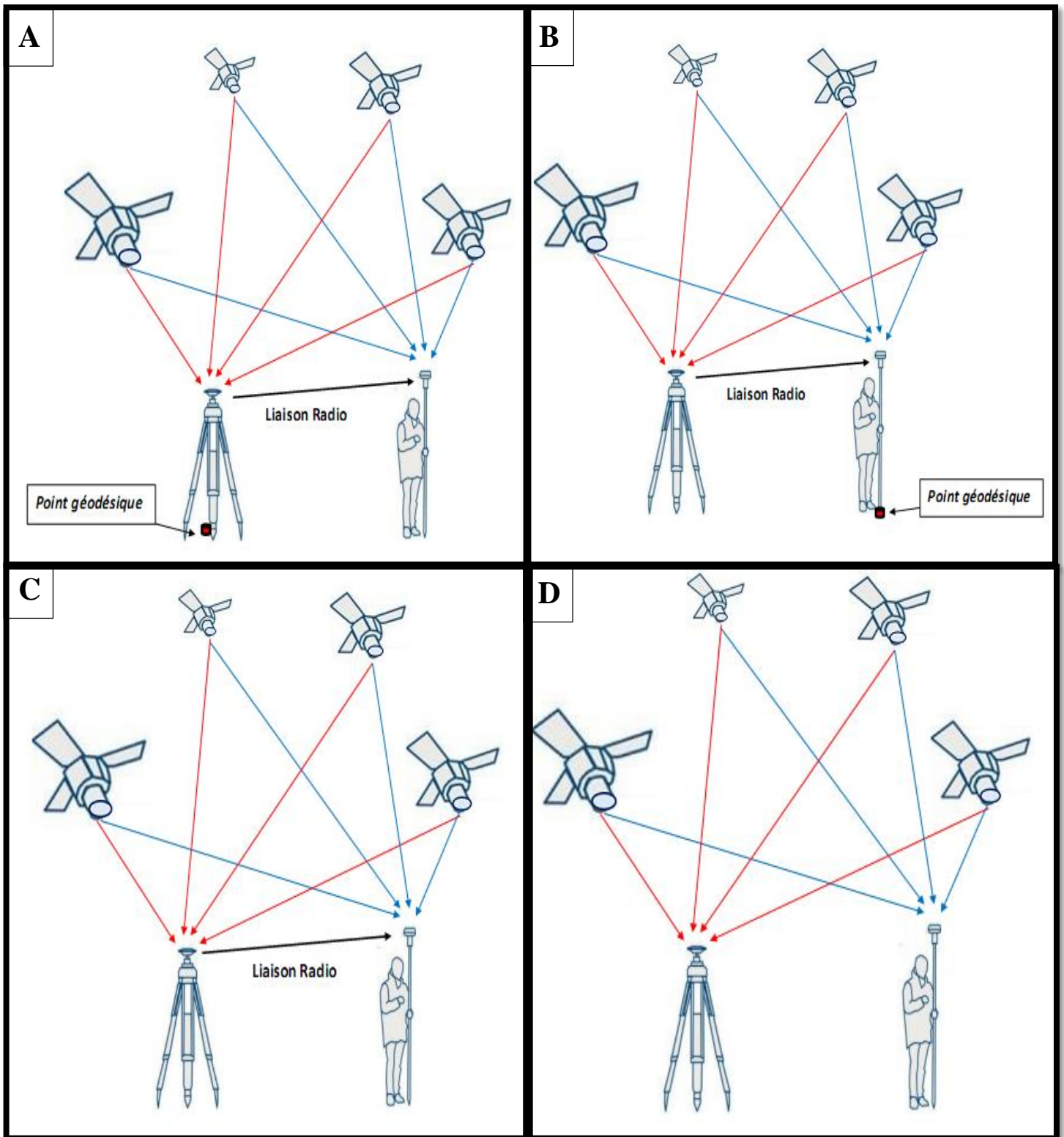


Figure 4 : A- levé RTK base fixe avec repère, B- levé RTK base libre avec repère, C- levé RTK base libre sans repère, D- levé PPK.

❖ LES ERREURS ENTACHEES A UN LEVE DGPS

Le signal fait face à un ensemble d'obstacle avant qu'il atteigne le récepteur, il peut être intercepté, réfracté, intensifié, affaiblit Etc. Ces modifications génèrent une altération du signal « bruit » et augmente les erreurs entachées aux calculs des coordonnées (X, Y, Z) ou (latitude, longitude, altitude), Il en résulte une altération de la précision de la mesure.

Il existe deux types d'erreurs, celle liée à la précision du système GPS lui-même, et celle liée au manipulateur.

✓ ERREURS LIEES A LA PRECISION DU DGPS

Le système GPS est affecté par plusieurs sources d'erreurs, ces dernières sont liées principalement aux :

- Décalage de l'horloge du satellite ;
- Matériel GNSS (Global Navigation Satellite System) : chaque appareil justifie d'une précision d'utilisation (centimétrique, décimétrique) ;
- Conditions météorologiques et de l'état des couches composantes l'atmosphère : ralentissement du signal qui traverse l'ionosphère et la troposphère ;
- L'environnement physique au moment du levé (bâtiment, arbre, relief, Etc.) générant une altération du signal : 'bruit' lié au rebond sur les bâtiments (trajets multiples, réverbération du signal), affaiblissant ainsi le signal ;
- Interférences électromagnétiques ;
- La répartition et le nombre de satellites en vue ;
- Correction RTK : capacité des serveurs sollicités à répondre rapidement, elle dépend du réseau GSM (Global System for Mobile Communications) (Levé GPS, 2020).

Le DGPS élimine seulement la première erreur, mais il augmente également la corrélation des autres sources (MESSAOUD, 1987).

✓ ERREURS LIEES AU MANIPULATEURS

Les erreurs du manipulateur sont issues de la mise en œuvre lors de l'utilisation de l'appareillage GNSS, avant et pendant la prise de la mesure.

Ces erreurs sont issues surtout de l'inclinaison de la station mobile lors des prises des levés et la précision du tracé du trait de côte. Le tableau 8 résume les valeurs estimées pour ces erreurs (BOUKHEDICHE, 2017).

Tableau 8 : Les valeurs estimées pour les erreurs dues au manipulateur.

Sources d'erreur	Erreurs estimées
Système GPS	+/- 3 cm
Inclinaison de la station mobile	+/- 2 cm
Tracé du trait de côte	+/- 25 cm
Erreur Totale	+/- 30 cm

❖ ETAPES DE REALISATION D'UN LEVE TOPOGRAPHIQUE A PARTIR D'UN DGPS

Il est conseillé avant chaque mission d'obtenir les informations suivantes :

- ✓ Les points d'appui géodésique existants dans la zone d'étude ;
- ✓ Déterminer les obstacles possible à la réception du signal (couvert végétal, falaise, construction Etc.) ;
- ✓ Déterminer l'emprise de levé, la durée de la mission, la précision et la densité des points ainsi que les indicateurs à cartographier.

❖ POINTS D'APPUI GEODISIQUES

Afin de réaliser des levés topographiques au DGPS, une détermination de la localisation des bornes géodésiques dans la zone d'étude est tout d'abord nécessaire. Ces bornes peuvent être matérialisées par des poteaux en béton, en bois, ou des repères métallique (clous de géomètre) sur différentes milieux (plage, dune, falaise, Etc.) sauf pour les milieux vaseux où il est difficile voire impossible de les réaliser.

Les repères de terrain ou jalon sont complémentaires de tous les autres types (GPS, DGPS, station totale Etc.). Ils servent de points de références invariants lors d'un levé cartographique, à ce titre ils sont fortement préconiser quel que soit le mode de levé choisis (MALLET et MICHOT, 2012). En Alger, ce réseau est instauré par l'Agence de Protection et de Promotion de Littoral (APPL), et dont la principale mission est la surveillance du trait de côte algérois. Ce réseau comprend 18 points géodésiques opérationnels au niveau desquels les stations de base peuvent être installées (Figure 5).

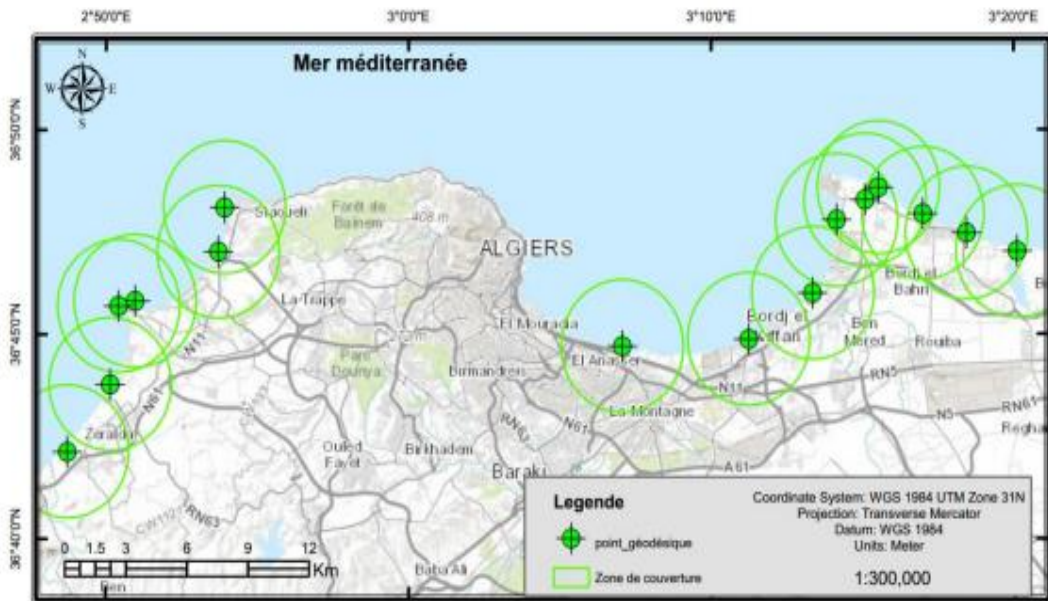


Figure 5: Réseau de points géodésiques mis en place par l'APPL.

❖ **PLAN DE MISSION**

✓ **Première phase (préparation du matériel)**

- S'assurer tout d'abord de la charge des batteries ;
- Repérer ensuite le point géodésique le plus proche de la partie d'étude concernée ;
- Installer le trépied sur le point géodésique et puis fixer l'embase universelle au trépied et sur laquelle placer son adaptateur ;
- Placer l'adaptateur de l'embase sur l'embase universel ;
- Nivelier soigneusement le trépied à l'aide du niveau à bulle à travers les vis calantes;
- Fixer l'entretoise horizontale et placer le récepteur HyperPro, puis l'antenne radio (Figure 6).

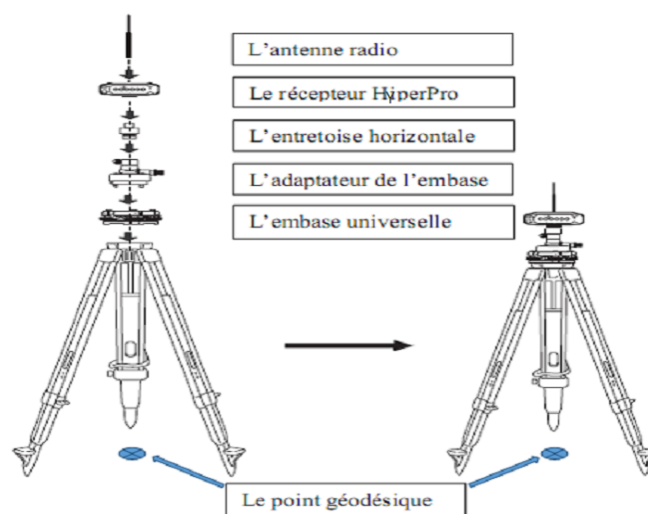


Figure 6 : Schéma explicatif des étapes de la mise en place de la base.

✓ Deuxième phase (création du projet)

- La création du projet se résume par les étapes suivantes :
- Allumer le récepteur HyperPro de la station de base ainsi que le micro-ordinateur;
- Ouvrir un nouveau projet ;
- Nommer le projet selon la norme de l'équipe de terrain ;
- Connecter le Bluetooth entre la station de base et le micro-ordinateur ;
- Configurer le GPS :
- Entrer les coordonnées du point géodésique ;
- Entrer la hauteur inclinée (mesurer entre le clou topographique et le récepteur de la station de base) ;
- Démarrer base ;
- Allumer le récepteur HyperPro de la station mobile ;
- Connecter le Bluetooth entre la station mobile et le micro-ordinateur ;
- Aller à l'icône lever pour choisir la méthode d'acquisition de données.

✓ Troisième phase

- Choisir la méthode d'acquisition des points (Topo continu, point topo) ;
- Démarrer la prise des points ;
- Parcourir tout le long de la zone d'étude en gardant la position de la station mobile à la verticale.
- Stopper la prise de points ;
- Enregistrer le projet ;
- Exporter le fichier des points (BENBRAHAM et AGABI, 2018).

Annexe 8: LES PARAMETRES DE CORRELATION

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des paramètres utilisés dans la corrélation.

Période	Plage	Volume gagné/perdu du cordon dunaire (m³)	Surface gagnée/perdue du cordon dunaire (courbe de niveau de 3m) (m²)	Vitesse d'évolution du TC (m/an)	Surface gagnée/perdue à la mer (m²)
2014/2017	Réghaia	/	/	+0.69	+11300
	El Kadous	/	/	-6.72	-7173
	Total	-14485.895	-1048.84	-3.02	4127
2017/2020	Réghaia	/	/	+0.26	2519
	El Kadous	/	/	-1.81	-3099
	Total	+6510.551	-4224.66	-0.78	-580
2014/2020	Réghaia	/	/	-1.72	-3852.97
	El Kadous	/	/	-0.65	-9094.23
	Total	-7975.344	-5273.50	-1.19	-12947.2

Résumé

Ces dernières années, le cordon dunaire d'El Kadous se situant à l'Est de la baie d'Alger a connu une érosion continue due à une alternance de forçages d'origines naturelles et anthropiques. De ce fait, une étude diachronique de son évolution surfacique et volumétrique a été menée afin de comprendre ces tendances évolutives et de déterminer un protocole pour leur gestion et protection en prenant en considération toutes les composantes internes et externes pouvant intervenir ou influencer de façon directe ou indirecte sur ce système côtier.

Cette étude a été réalisée sur une période de 6 ans allant de 2014 à 2020 en se basant sur une approche numérique et topographique qui consiste à la génération des Modèles Numériques de Terrain à partir des levés topographiques de haute résolution issue de DGPS. Les principales résultats de cette étude montre que la zone est entraine de subir une dégradation continue sur le plan bathymétrique et surfacique. Cette dégradation est de 3,44% sur le plan volumétrique, soit un de volume perdu de 7975,34m³, et de 13,87% sur le plan surfacique (pour la courbe de niveau de 3m) soit une surface perdue de 5273,5m².

Mots clés : Cordon dunaire, DGPS, Modèles Numériques de Terrain, Etude diachronique.

Abstract

In recent years, El Kadous dune located in the east of Algiers's bay has experienced continuous erosion due to an alternation of natural and anthropogenic forcings. Therefore, a diachronic study of its surface and volumetric evolution was carried out in order to understand there evolutionary trends and to determine a protocol for their management and protection by taking into consideration all the internal and external components that may intervene or influence in a direct or indirect way on this coastal system.

This study was carried out over a period of 6 years from 2014 to 2020 based on a numerical and topographic approach which consists in the generation of Digital Terrain Models from high resolution topographic surveys from DGPS. This study cannot be taken into consideration if we do not put this structural entity in its regional context (climatic, geomorphological, hydrological and anthropogenic) by thus considering the various interactions at the bathymetric and hydrosedimentary level which also influence the evolution of the coastline. The main results of this study show that the area is undergoing continuous degradation on the bathymetric and surface plan. This degradation is 3.44% of the volume level, a volume lost 7975,34m³, and 13.87% in the surface plane (3m for the level curve) is a lost surface 5273,5m².

Keywords: Cordon dune, DGPS, Digital terrain models, Diachronic study.

ملخص

في السنوات الأخيرة، شهدت سلسلة الكثبان الرملية في القادوس الواقعة شرقي خليج الجزائر العاصمة تآكلًا مستمرًا بسبب تعاقب التأثيرات الطبيعية والبشرية. لذلك، تم إجراء دراسة متزامنة لتطورها السطحي والحجمي من أجل فهم هذه الاتجاهات التطورية وتحديد بروتوكول لإدارتها وحمايتها من خلال مراعاة جميع المكونات الداخلية والخارجية التي قد تتدخل أو تؤثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة على هذا النظام الساحلي. أجريت هذه الدراسة على مدى 6 سنوات من 2014 إلى 2020 بناءً على نهج رقمي وطوبوغرافي يتمثل في توليد نماذج التضاريس الرقمية من خلال المسوحات الطبوغرافية عالية الدقة من DGPS.

لا يمكن أخذ هذه الدراسة في الاعتبار إذا لم نضع هذا الكيان الهيكلي في سياقه الإقليمي (مناخي، جيومورفولوجي، هيدرولوجي وبشري) من خلال النظر في العلاقات المختلفة على مستوى قياس الأعماق ونقل الرواسب والتي تؤثر أيضًا على تطور الساحل. تظهر النتائج الرئيسية لهذه الدراسة أن المنطقة تخضع لتدهور مستمر على المستوى السطحي والحجمي. هذا التدهور هو 3.44% على المستوى الحجمي، أي حجم مفقود 7975.34 م³، و 13.87% على مستوى السطح (لمنحنى المستوى 3 م)، أي مساحة السطح المفقودة 5273.5 م².

الكلمات المفتاحية: كثبان الرملية، DGPS، نماذج التضاريس الرقمية، الدراسة المتزامنة.