

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Sciences de la mer

Sujet de thèse :

**ETUDE ET EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES
SYSTEMES COTIERS DANS LA REGION ALGEROISE**

Présentée par :

OTMANI HOUSSEYN

Soutenue le 08/07/2020 Devant le jury composé de :

F. HOUMA-BACHARI	Professeur, ENSSMAL	Présidente
M.K. MIHOUBI	Professeur, ENSH	Examineur
Y. HEMDANE	Professeur, USTHB	Examineur
M. BOUHAMADOUCHE	Professeur, USTHB	Examineur
K. MEZOUAR	MCA, ENSSMAL	Examineur
R. BELKESSA	Professeur, ENSSMAL	Directeur de thèse

Remerciement

Je remercie dieu pour m'avoir mis sur le chemin du savoir, pour m'avoir donné la santé, la patience et le courage pour mener à terme cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à toute personne, de mon équipe de recherche, de mon laboratoire EcoSysMarl, ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Mes plus vifs remerciements s'adressent à :

Mme. Houma Bachari F. Professeur à l'ENSSMAL, qui me fait l'honneur de présider le jury, pour sa disponibilité, son soutien inconditionnel mais surtout pour sa qualité humaine exceptionnelle, qu'elle trouve dans ces lignes le témoignage de ma respectueuse reconnaissance.

Je tiens à remercier l'ensemble des examinateurs pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et à l'examen de ce manuscrit, qu'ils trouvent également dans ces lignes le témoignage de mon profond respect.

A mon directeur de thèse, Mr. Belkessa R., à qui j'adresse des remerciements particuliers, pour l'intérêt incessant qu'il a porté au suivi de ce travail, et pour l'empressement qu'il a manifesté à le voir aboutir, en dépit de son état de santé, et malgré toutes ses occupations. Je le remercie aussi pour avoir été exigeant, tout en m'accordant une grande autonomie.

A mon ancienne équipe de l'agence de protection et de promotion du littoral (APPL), particulièrement à l'équipe du réseau surveillance du trait de côte, qui n'a ménagé aucuns efforts personnel et professionnel, en apport logistique et assistance sur terrain, je vous remercie aussi pour les moments de délire gravés dans mon esprit.

Je ne vous oublie pas chers amis, à vous tous qui m'avaient soutenu, je tiens à vous remercier aussi pour votre présence, vos conseils et encouragements, sans vous je n'aurais sûrement pas eu ces quelques mois de retard...

J'en profite pour remercier toute personne m'ayant appris une lettre, un mot ou une leçon de vie, mes enseignants qui m'ont initié à l'aménagement du littoral, les vivants tous comme ceux qui nous ont quitté, une pensée profonde au feu Larid Mohamed. Puissent-t-ils tous trouver en ces mots la marque de mon profond respect ainsi que de mes remerciements les plus sincères.

Sommaire

Remerciement

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale.....2

1 Chapitre I : Généralités

Partie 1: Synthèse bibliographique

1.1	Présentation du géo-système littoral.....	7
1.1.1	Le budget sédimentaire.....	8
1.1.2	Morpho-dynamique côtière à échelle spatio-temporelle	10
1.1.3	Zoning hydrodynamique de la zone côtière	11
1.2	Facteurs intervenants dans la dynamique sédimentaire.....	12
1.2.1	Le phénomène d'érosion côtière	12
1.3	Variété des systèmes côtiers :.....	14
1.3.1	Les dunes littorales.....	14
1.3.2	Les plages.....	17
1.3.3	Les falaises	20

Partie 2 : Cadre général et présentation de la zone d'étude

1.4	Caractérisation de la zone d'étude.....	26
1.4.1	Situation et choix de la zone.....	26
1.4.2	Cadre géologique et sismique.....	27
1.4.3	Cadre géomorphologique	27
1.4.4	Cadre géologique.....	31
1.4.5	Cadre sismique	34
1.4.6	Cadre géotechnique	35
1.5	Conclusion du chapitre.....	38

2 Chapitre II : Diagnostic de la zone et évaluation des facteurs à impact sur le fonctionnement hydro-sédimentaire

2.1	Etude climatique et hydrographique.....	40
2.1.1	Cadre climatologique	40
2.1.2	Cadre hydrographique	47
2.2	Etude bathymétrique.....	52
2.2.1	Introduction	52
2.2.2	Procédés d'investigation et d'acquisition des données.....	53
2.2.3	Etude des pentes	56
2.2.4	Etude des profils bathymétriques	58
2.2.5	Etude comparative entre les principales sources de données	60

2.2.6	Conclusion.....	65
2.3	Etude hydrodynamique.....	65
2.3.1	Cadre océanographique	65
2.3.2	La marée et les variations du niveau d'eau marine	66
2.3.3	Les courants.....	66
2.3.4	La houle.....	68
2.4	Simulation hydro-sédimentaire	72
2.4.1	Choix du modèle	73
2.4.2	Description du modèle de simulation Mike21 et configuration des modules	75
2.4.3	Etapas de réglages du model pour la simulation avec le Mike21	77
2.4.4	Résultats et discussion de la simulation	78
2.5	Conclusion du chapitre.....	82
3	Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion marine	
3.1	Introduction	84
3.2	Approche méthodologique	85
3.2.1	L'analyse du type de milieu	86
3.2.2	Difficulté de représentation	86
3.2.3	Indicateurs et choix de ligne de référence	87
3.3	Méthodes de détection des variations de la position de la ligne de rivage.....	90
3.3.1	Approche indirecte	90
3.3.2	Approche directe	92
3.4	Mise à jour du réseau de points géodésiques.....	94
3.4.1	Critères d'installation des points	95
3.5	Principe de fonctionnement des levés DGPS	101
3.5.1	Performance du DGPS	102
3.5.2	Estimation des erreurs	103
3.6	Application de la méthode sur terrain	104
3.6.1	Plan de mission.....	104
3.6.2	Types de données utilisées pour l'analyse des variations de la ligne de rivage	109
3.7	Traitement des données et visualisation des résultats	110
3.7.1	Traitement des données	110
3.7.2	Visualisation des résultats et normalisation de la cartographie.....	112
3.8	Etude des profils aériens et sous marins.....	113
3.8.1	Les profils d'équilibre.....	113
3.8.2	Protocole de levé	113
3.8.3	Données topographiques	116
3.8.4	Exploitation et intérêt	116
3.9	Résultats et discussions	116

3.9.1	Résultats pour la région Ouest (région 01).....	117
3.9.2	Résultats pour la région centre (région 02)	125
3.9.3	Résultats pour la région est (région 03).....	133
3.10	Conclusion.....	146
4	Chapitre IV : Cas d'études et application	
4.1	Introduction	148
4.2	Cas d'étude N°01 : Faisabilité physique du rechargement artificiel de la plage El Riadh	
4.2.1	Introduction	150
4.2.2	Etude de faisabilité technique de rechargement en sédiment de la plage El Riadh.....	170
4.3	Cas d'étude N°02 : Dégradation des dunes côtières algéroises entre pression de l'urbanisation et conséquences sur l'évolution de la ligne de rivage	
4.3.1	Introduction	194
4.3.2	Contexte général et choix de la zone d'étude :	194
4.3.3	Evolution des espaces dunaires	196
4.3.4	Évolution de la ligne de rivage.....	203
4.3.5	Corrélation entre les différentes variables étudiées	207
4.3.6	Conclusion.....	210
4.4	Cas d'étude N°03 :Erosion des falaises marines de Zerzouria (Ex suffran) à Ain Taya	
4.4.1	Introduction	213
4.4.2	Localisation de la zone d'intérêt.....	213
4.4.3	Géologie de détails	214
4.4.4	Mise en contexte et sélection de la zone d'intérêt.....	215
4.4.5	Diagnostic.....	216
4.4.6	Méthodologie.....	217
4.4.7	Résultats et discussion.....	221
4.4.8	Conclusion.....	226
4.5	Cas d'étude N°04 : Evaluation de la vulnérabilité côtière de la région Est d'Alger	
4.5.1	Introduction	228
4.5.2	Définitions du concept de la vulnérabilité.....	228
4.5.3	Méthode d'évaluation de la vulnérabilité côtière	230
4.5.4	Présentation de la zone d'intérêt.....	232
4.5.5	Approche méthodologique	232
4.5.6	Conclusions	252
	<i>Conclusion générale</i>	254
	<i>Références bibliographiques</i>	258
	<i>Annexes</i>	

Table des acronymes

AFG : Association Française de Gestion

AMIS: Algerian coast Management through Integration and Sustainability

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

APPL: Agence de promotion et de protection du littoral

BRGM: Bureau de Recherche Géologique et Minière (France)

CIFOR: Centre de recherche forestière internationale

CNL: Commissariat National du Littoral

CRP: Centre Régional de Phytosociologie

CTS: Centre des travaux sur terrain

CVI: Indice de Vulnérabilité Côtière

DGPS: Differential Global Positioning System

DHI: Institut Hydraulique Danois

DSAS: Digital Shoreline Analysis System

EPR: End Point Rate

E: Est

ETC/ACM: European Topic Centre on Air and Climate Change

GIEC: Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

GIZC: Gestion Intégrée des Zones Côtières

GPS: Global Positioning System

HMI: Hydro Marine Ingénierie

HD: (Hydrodynamic model) module d'hydrodynamisme

Hs: Hauteur significatives

Hs₀: Hauteur significatives au large

IGN: Institut Géographique National (France)

IUCN: International Union for Conservation of Nature

Km: Kilomètre

KW/m: Kilo Watt par mètre

LCHF: Laboratoire Centrale d'hydraulique de France

LEM: Laboratoire des Etudes Maritimes

LRR: Linear Regression Rate-of-change

m: Mètre

m/an: Mètre par an

m/s: Mètre par seconde

ME: Ministère de l'Environnement

MICLAT: Ministère de l'intérieur des collectivités locales et de l'aménagement du territoire

MEEDDM: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer

MNT: Model Numérique du Terrain

N: Nord

NE: Nord-Est
NO: Nord-Ouest
ONF: Office National des Forêt.
ONM: office national de la météorologie
ONS: Office National des Statistiques
PAC: Programme d'Aménagement de Réghaia.
PCR: Plan Côtier de Réghaia.
PDAU: Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.
PPK: Post Processing Kinematic
Q3D: Quasi-tridimensionnelle
RGPH: Recensement Général de la Population et de l'Habitat.
RTK: Real Time Kinematic
s: Seconde
SDAAM: Schéma Directeurs d'aménagement des Aires Métropolitaines.
SHFN: Service Hydrographique des Forces Navales. (France)
SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (France)
SIG: système d'information géographique
SN: Stratégie nationale
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
SSMO: Summary of Synoptic Meteorological Observations
ST: (Sand Transport model) module du transport sédimentaire
SW: (Spectral Waves model) module des ondes spectrales
Tp: Période pique
USGS: (United States Geological Survey) Institut d'études géologiques des États-Unis
WGS 84: World Geodetic System 1984 (système géodésique mondial révision de 1984)

Liste des figures :

Figure I-1: Les pilotes clés (physiques et humains) gouvernant les changements dans les systèmes côtiers.	7
Figure I-2 Etablissement du budget sédimentaire (Bain et Costa, 2016).....	9
Figure I-3 Relation spatio-temporelle des systèmes morpho-dynamiques côtiers (Giuliano, 2015).....	11
Figure I-4 Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes (Giuliano, 2015).	12
Figure I-5 : Synthèse des paramètres influençant l'évolution morphologique des côtes (Grasso, 2009).	13
Figure I-6: Illustration de la configuration générale du littoral rocheux et sableux (Giuliano, 2015).	14
Figure I-7: Processus de formation d'un cordon dunaire.....	15
Figure I-8: Organisation spatiale du système dunaire (ONF, in Bounoua et al 2017).	16
Figure I-9 Nomenclature des segments d'une terrasse de plage (Belkherroubi and Belguerguid, 2017).	18
Figure I-10: Configuration type d'une plage.	18
Figure I-11: Les différents types de plages a : Plage rectiligne (El Kadousse, Heraoua 2014); b : Plage de fond de baie (AouinetHesni, Bouloghine 2015) ; c: Plage en flèche (Réghaia plage, Réghaia 2015); d: Plage en tombolo (Surcouf, Ain Taya 2017); e et e' : Plage artificielle (El Djamila, Ain Benien 2015).	19
Figure I-12: Configuration générale d'une falaise (vue en coupe) ; a : Illustration d'une falaise vive ; b : Illustration d'une falaise morte	21
Figure I-13 Falaise d'El Marsa 2018 (ex. Jean-Bar) et b : Falaise de hammamat 2018 (ex. Bainem).	22
Figure I-14: Schéma représentative du cycle d'évolution des falaises. (Maquaire, 2011).....	23
Figure I-15: Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises soumises aux forçages subaériens et marins.	24
Figure I-16: Localisation géographique de la zone d'étude.	26
Figure I-17: Distribution simplifiée des différents types géomorphologiques de la côte de la wilaya d'Alger.	28
Figure I-18: Systèmes dunaires à Alger ; a: Dunes de Kadousse, b: Dunes de Zéralda.....	28
Figure I-19: Traces de systèmes dunaires à Alger ; a: plage el Bahdja ; b: Dunes de Réghaïa.....	29
Figure I-20: Sidi Fredj avant/après ; a/a' : Plage EST (1959-2019) ; b/b' : Plage El Riadh (1959-2019).	29
Figure I-21: Effondrement des falaises à Ain Taya ; a et b: Facteur lithologique ; c: Facteur marin.	30
Figure I-22: Carte géologique de la zone d'étude (Glangeaud, 1963), (Source : INCT).	31
Figure I-23: Carte géologique simplifiée de la plaine de la Mitidja (PNE, 2010).	32
Figure I-24: Stratigraphie des couches géologiques des régions Est et Ouest (Betrrouni, 1983. in Bouhamadouche, 2012)	33
Figure I-25: Secteurs les plus affectés par les séismes dans la région algéroise (Matev, 2013).	35
Figure I-26: Carte indicative de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la wilaya d'Alger (Matev, 2013).	36
Figure I-27: Projection en 3D des zones à risque (Matev, 2013).....	36
Figure I-28: Risque côtier: a et b: Effondrement des falaises (Bab El Oued 2016) ; c: Effondrement du talus de la plage de Palm Beach (2009); d:Coulée de boue (Bab El Oued 2001) ; e: Glissement de terrain (Réghaia 2014).	37
Figure I-29: Risque côtier ; a: Effondrement des falaises (Ain Taya 2015) ; b: Effondrement de dunes consolidées (El Bahdja 2016) ; c: Glissement de terrain (Hammamet 2005-2014); d: Risque d'effondrement de falaises (Rais Hamidou 2016).	38
Figure II-1 : Variations de moyennes mensuelles des précipitations dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).	41
Figure II-2: Variations des moyennes annuelles des précipitations dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).	42
Figure II-3: Températures moyennes en °C, (Données windguru, 2005-2017).....	42
Figure II-4: Répartition annuelle des vents en %, Station port d'Alger (2008-2017).	44
Figure II-5: Abondance mensuelle des secteurs d'apparition des vents dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).	45

Figure II-6: Roses récapitulatives saisonnières des fréquences d'apparition du vent au large en fonction de leurs vitesses. Région algéroise (Données windguru, 2005-2017).	45
Figure II-7: Roses des vents saisonniers : station Algiers (Données windguru, 2005-2017).	46
Figure II-8: Diagramme ombrothermique de Gausse dans la région algéroise (2005-2017).	46
Figure II-9: Bassins versants et réseau hydrographique de la côte Algéroise (USGS, 2016).	47
Figure II-10: Cours d'eau au niveau de la zone d'étude ; a: oued Mazafran, b: oued Beni Messous, c: oued El Harrach, d: oued El Hamiz, e: oued Reghaia.	50
Figure II-11: Réseau hydrographique de la zone Algéroise (Boukhediche, 2017).	51
Figure II-12: Impact anthropique et artificialisation des cours d'eau. a et b : valve de séparation entre l'oued et le lac Reghaia; c et d : déviation de l'embouchure de l'oued Reghaia 2009-2018.	52
Figure II-13: Acquisition des cartes marines des profondeurs (A) & Extraxion sous ArcGis (B).	53
Figure II-14: Morphologie côtière et sous-marine du littoral de la zone Algéroise.	54
Figure II-15: Modèle numérique de terrain de la zone Algéroise.	55
Figure II-16: a et b : Cartes des pentes sous-marines de l'avant côte de la zone d'étude en (%).	57
Figure II-17: Aspect des pentes de l'avant côte de la zone algéroise.	58
Figure II-18 : Carte de répartition des profils bathymétriques dans la zone algéroise.	58
Figure II-19: Profil bathymétrique n°1.	59
Figure II-20: Profil bathymétrique n°3.	59
Figure II-21: Profil bathymétrique n°6.	59
Figure II-22: Profil bathymétrique n°6.	59
Figure II-23: Profil bathymétrique n°8.	59
Figure II-24: Profil bathymétrique n°10.	60
Figure II-25: Captures d'écran de l'étape d'extraction de la bathymétrie ; A : Du SHFN - B : De Navionic, dans l'espace de travail ArcMap.	61
Figure II-26: Modèle de l'extension Interpolation_TIN de traitement des fichiers bruts de la bathymétrie.	62
Figure II-27: Comparaison entre la bathymétrie de SHFN et de Navionic (A)- Bathymétrie Navionic-(B)- Bathymétrie SHFN -(C)- Différentiel bathymétrique.	64
Figure II-28: Variation des pentes de l'avant côte entre la période 1867-1921 et 2005/2012 dans la zone d'étude.	65
Figure II-29: Correspondance entre les systèmes altimétriques NGA et ZH à Alger.	65
Figure II-30 : Rose des houles annuelle;	68
Figure II-31: Fréquences des hauteurs de la houle pour la station Alger Port données Wiziku 2012 -2016.	69
Figure II-32: Carte de propagation et de transformation de la houle du large à la côte algéroise(AMIS, 2004).	70
Figure II-33 : Roses des houles aux différents points d'extraction au large à la côte algéroise (AMIS, 2004).	71
Figure II-34: Orientation locale du trait de côte de la zone algéroise.	74
Figure II-35: Les vagues sélectionnées comme entrée pour le modèle hydrodynamique dans la région algéroise.	74
Figure II-36. Maillage au niveau de la zone Algéroise.	77
Figure II-37. Réglage du modèle couplé « Coupled Model ».	78
Figure II-38: Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise vagues du secteur NE. Hs= 2.56 m. T= 8s	79
Figure II-39: Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise vagues du secteur NO. Hs= 2.64 m. T= 8s.	79
Figure II-40: Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise, Vagues du secteur O. Hs= 2.67 m. T= 8s.	80
Figure II-41: Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise, vagues du secteur N. Hs= 2.67 m. T= 8s.	80
Figure III-1: Organigramme de la méthode de suivi du trait de côte.	85
Figure III-2: Représentation des différents indicateurs du trait de côte (Elizabeth et al., 2005).	86

Figure III-3: Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage (Boak et Turner, 2005).....	87
Figure III-4:a, b et c : Extrémité du jet de rive dans la zone d'étude (Sidi Fredj Est, Octobre 2018).....	89
Figure III-5: La ligne de rivage instantanée choisie pour définir le tracé du trait de côte.....	89
Figure III-6: Etape de géoréférencement des photos aériennes et digitalisation du trait de côte.....	92
Figure III-7: Système complet du DGPS levé RTK base temporaire avec repaire, a: station de base, b : Station mobile, c, d, e : réglage de signal calibrage station base- station mobile.....	93
Figure III-8: Réseau des points géodésiques de la côte algéroise mis en place par l'APPL.....	93
Figure III-9: Procédé de l'installation d'un point géodésique; a: plantation du clou, b: clou en place, c: relevé de la série des coordonnées sur le clou.....	94
Figure III-10: Procédé d'installation d'un point géodésique; a et b: Mise en place de la station « repère », c: Relevé de la série des coordonnées, d: Installation de la station fixe point géodésique.....	95
Figure III-11: a: Extraction du relevé brut, b: traitement des données et calcul des coordonnées du point géodésique.....	96
Figure III-12:a : Perte de signal du à un obstacle naturel et b: Perte de signal du à un obstacle artificiel, c: Terrain dégagé mais escarpé, d: Terrain à risque de mouvement.....	97
Figure III-13: a: Contrôle sur terrain des points en place ; b, c, d, e, f, g, h, et i : perte d'un point géodésique en raison de travaux d'aménagement (2016).....	97
Figure III-14: a et b: Contrôle de terrain, c, d et e : Marquage et signalisation des points géodésiques.....	98
Figure III-15: Réseau des points géodésiques de la côte algéroise mis à jour.....	100
Figure III-16: Principe de levé DGPS en mode RTK « Real Time Kinematic » (Boukhliche,2017).....	101
Figure III-17: Schéma illustratif du principe de fonctionnement du DGPS (Agabi et al., 2018).....	102
Figure III-18: Fiche synthétique des caractéristiques du DGPS (Agabi et al.,2018).....	103
Figure III-19: Schéma explicatif des étapes de la mise en place de la station de base.....	105
Figure III-20: Fiche technique du point géodésique d'El Marsa (APPL, 2016).....	106
Figure III-21: Acquisition des données lors des investigations de terrain (2018).£.....	108
Figure III-22: Schéma explicatif du principe des levés de la station mobile.....	108
Figure III-23: Les différentes paramètres et interfaces de DSAS.....	111
Figure III-24: Légende pour le trait de côte représenté à plusieurs dates (Giraudet, 2010).....	112
Figure III-25: a et c: Elaboration de profil aérien, b et d: Elaboration de profil sous marin.....	114
Figure III-26: a, c, b, c, d, e et f : Elaboration des model numérique de terrain.....	115
Figure III-27 : a b et c : Points de contrôle.....	115
Figure III-28: A-Répartition des transects le long de la zone d'étude. B- les transects limites des plages.....	118
Figure III-29: Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés (LRR et WLR) pour la région Ouest.....	119
Figure III-30: La correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR.....	119
Figure III-31: Evolution du trait de côte le long de la zone d'étude entre 1959 et 2017.....	120
Figure III-32 : Synthèse statistiques de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière.....	121
Figure III-33:a: arrachement des sédiments (embouchure de l'Oued Mazagran). b: traces dunaires et exposition de la zone aux attaques frontales de la mer (Zéralda). c: Chantier et ouvrages de protection (Plage Est - Sidi Fredj). d: Recul du trait de côte (plage El Riad - Sidi Fredj).....	124
Figure III-34: Distribution des transects le long de la région centre de la zone d'étude.....	125
Figure III-35 : correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR région centre.....	125
Figure III-36 : Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés (LRR et WLR).....	126
Figure III-37: Evolution du trait de côte le long de la zone d'étude entre 1959 et 2015.....	126
Figure III-38: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1959-2015.....	127
Figure III-39: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1959-1980.....	128

Figure III-40: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1980-2003 .	129
Figure III-41 Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1999-2015. .	130
Figure III-42: Répartition des transects le long du littoral Ouest de la région Est.	134
Figure III-43: Correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR.	135
Figure III-44: Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés LRR et WLR.	136
Figure III-45 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période 1959-2017 sur le littoral de la région Est.	137
Figure III-46: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-1980 sur le littoral de la région Est.	139
Figure III-47: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1980-2003 sur le littoral de la région Est.	140
Figure III-48: Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 2003-2017 sur le littoral de la région Est.	141
Figure III-49: Evolution Surfàcique du cordon dunaire d'El Kadouss entre 2006 et 2012.	145
Figure III-50: Galerie de photos de la région Ouest de Zone d'étude.	146
Figure IV-1: La tempête de 05 Février 2017 au niveau de Sidi Fredj.	152
Figure IV-2: Macro du traitement automatique des tableaux des résultats du SWAN.	155
Figure IV-3: Interface graphique de l'extension SWAN View du visualisation des résultats de SWAN.	155
Figure IV-4: L'extension SWAN View du visualisation des résultats de SWAN.	156
Figure IV-5: Mode opératoire d'exploitation de Modèle SWAN.	157
Figure IV-6: Réfraction de la houle pour une direction N 21° et une période de 5.23 s.	159
Figure IV-7: Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 21° et une période de 5.23 s.	159
Figure IV-8: Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 270° et une période de 5.78 s.	159
Figure IV-9: Réfraction de la houle pour une direction N 270° et une période de 5.78s.	159
Figure IV-10: Réfraction de la houle pour une direction N 345° et une période de 5.23 s.	160
Figure IV-11: Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 345° et une période de 5.23s.	160
Figure IV-12 : Modèle régional des hauteurs significatives au niveau de toute la côte algéroise de la tempête du 05/02/2017.	161
Figure IV-13: Réfraction de la houle de la tempête 05/02/2017.	162
Figure IV-14: Dissipation d'énergie de la houle de la tempête 05/02/2017.	163
Figure IV-15: Setup de la houle de la tempête 05/02/2017 au niveau de la plage El Riadh.	163
Figure IV-16: a et b: Traces de déstabilisation et d'effondrement des ouvrages de protection de la plages El Riadh (2017).	164
Figure IV-17: Présentation du model du maillage effectué pour toute la simulation.	166
Figure IV-18: Simulation des courants générés par les houles de secteur N 283°.	167
Figure IV-19: Simulation des courants générés par les houles de secteur N 345°.	168
Figure IV-20: Transport sédimentaire pour la direction N 283°.	169
Figure IV-21: Transport sédimentaire pour la direction N 345°.	170
Figure IV-22: Localisation des points de prélèvement dans la partie marine.	173
Figure IV-23: Localisation des points de prélèvement dans la partie aérienne.	173
Figure IV-24: Répartition de diamètre moyen (Mz) dans la région de Sidi Fredj.	174
Figure IV-25: Répartition des médianes (Q50) dans la région de Sidi Fredj.	175
Figure IV-26: Pourcentage des modes au niveau de la plage sous-marine du secteur de Sidi Fredj et la plage aérienne d'El Riadh.	175

Figure IV-27: Relation entre l'indice de classement et le diamètre moyen.....	176
Figure IV-28: Relation entre l'indice d'asymétrie (Ski) et le diamètre moyen.....	176
Figure IV-29: Délimitation du secteur de rechargement.....	177
Figure IV-30: Projection graphique des profils topo-bathymétriques de la compagne 2017.....	180
Figure IV-31: Vue d'ensemble du modèle numérique des terrains de la plage El Riadh.....	180
Figure IV-32: Rejet des eaux usées de l'htôtel El Riadh.....	181
Figure IV-33: Caractéristiques des profils des plages examinés par Dean (Dean et al., 2004).....	182
Figure IV-34: Profil d'équilibre de la plage El Riadh avec un $m = 2/3$	183
Figure IV-35: Superposition du profil d'équilibre dont $m = 2/3$ et les profils topo-bathymétriques mesurés.....	184
Figure IV-36: Profil d'équilibre de la plage El Riadh avec un $m = 0.75$	184
Figure IV-37: Superposition du profil d'équilibre dont $m = 0.75$ et les profils topo-bathymétriques mesurés.....	184
Figure IV-38: Comparaison entre les deux profils d'équilibre proposés pour la plage El Riadh.....	185
Figure IV-39: Profil érodé et théorique actuel et profil théorique de rechargement.....	185
Figure IV-40: Superposition des profils d'équilibre et les profils topo-bathymétriques (2, 3 et 4) de la compagne 2017.....	186
Figure IV-41: Type des données de projection des MNT objectif de rechargement.....	187
Figure IV-42: Superposition des deux MNT 1 et 2 théoriques de rechargement.....	187
Figure IV-43: Modèle numérique de terrain actuel (A) et théorique de rechargement (B).....	189
Figure IV-44: Capture d'écran de l'interface graphique de l'outil Surface volume de ArcMap.....	190
Figure IV-45: Limite des eaux les plus extrêmes au niveau de la plage El Riadh.....	192
Figure IV-46: Localisation de la zone d'étude (Partie Est de la baie d'Alger).....	196
Figure IV-47: Sol dunaire dans la carte géologique de la baie d'Alger (IGN-INC, 1948-1962).....	198
Figure IV-48: Localisation des dunes (1960) sur la partie Est de la baie d'Alger.....	198
Figure IV-49: Localisation des dunes (1960) sur la partie Est de la baie d'Alger.....	199
Figure IV-50: Évolution dans le temps de l'urbanisation sur les espaces dunaires dans l'Est de la baie d'Alger.....	201
Figure IV-51: Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.....	205
Figure IV-52: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1980-2003.....	206
Figure IV-53: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1959-1980.....	207
Figure IV-54: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1980-2003.....	208
Figure IV-55: Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie est de la baie d'Alger durant la période 2003-2015.....	208
Figure IV-56: Synthèse de la dynamique du trait de côte et de la disparition des massifs dunaires dans la partie Est de la baie d'Alger.....	209
Figure IV-57: Galerie de photos. (a) Rejet des matériaux sédimentaires dans l'Oued El Harrach, (b) Urbanisation des rives de l'Oued El Hamiz (Photo de Yann A.B) (c) travaux de rechargement plage Sirène 2016 (Photo de Djerrai N.E) (d1) La plage Sirène 1958 (d2) La plage Sirène 2019 (Recul du trait de côte) (d3) La plage Sirène 2019 (ouvrage de protection et travaux d'aménagement) (e1) La plage Verte Rive 1958 (e2) La plage Verte Rive 2016 installation des ouvrages de protection (Photo de Djerrai N.E) (e3) La plage Verte Rive 2019 (Stabilisation de la ligne de rivage).....	212
Figure IV-58: Localisation géographique des grands ensembles de falaises dans la zone d'étude.....	214
Figure IV-59: a : falaises vives, urbanisées, b:difficulté d'investigation sur terrain, c et d :plate forme d'abrasion de la falaise de Zerouria (2018).....	216
Figure IV-60: Identification des zones à forte exposition à l'énergie hydrodynamique.....	217
Figure IV-61: Présentation des falaises de la zone d'intérêt (janvier 2018).....	218

Figure IV-62: a et b : Encoches basales sur la paroi des falaises de Zerzouria (2018).	218
Figure IV-63:a et b: Traces d'effondrement des parois de la falaise de Zerouria (2018),	219
Figure IV-64: Acquisition des données lors des investigations de terrain (2018).	220
Figure IV-65: Visualisation des transects générés dans la zone d'intérêt	220
Figure IV-66: Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-2018 sur les falaises de Zerzouria.	222
Figure IV-67: Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-1980 sur les falaises de Zerzouria.	223
Figure IV-68:Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1980-2003 sur les falaises de Zerzouria.	224
Figure IV-69:Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 2003-2017 sur les falaises de Zerzouria.	225
Figure IV-70: Composantes de la vulnérabilité suivant les définitions du GIEC. Les signes sous les flèches signifient qu'une forte exposition, une forte sensibilité et une faible capacité adaptative induisent une forte vulnérabilité (McCarthy et al., 2001 in CIFOR,	230
Figure IV-71: Présentation schématique de la méthode de IVC élaborée par (McLaughlin et Cooper 2001).	233
Figure IV-72: Carte topographique de la zone d'étude (USGS, 2016).	236
Figure IV-73: Présentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable géomorphologie.	237
Figure IV-74: Taux nets de variation du trait de côte de la zone d'étude.	237
Figure IV-75: Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable trait de côte.	238
Figure IV-76: Dénivellation des pentes (%) dans la zone d'étude.	239
Figure IV-77: Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable pente.	239
Figure IV-78: Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2011, (Planton et al., 2012).	240
Figure IV-79: Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable élévation du niveau de la mer.	240
Figure IV-80: Hauteurs significatives des houles de provenance N45°	241
Figure IV-81: Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable marnage.	242
Figure IV-82: Degré de vulnérabilité en terme de pourcentage du linéaire côtier.	243
Figure IV-83: Carte de synthèse représentant le IVC de la zone Est algéroise.	244
Figure IV-84: Densités de population des communes de l'aire métropolitaine d'Alger (SDAAM Alger, 2008).	246
Figure IV-85: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, agglomération.	247
Figure IV-86: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, chemin de fer.	247
Figure IV-87: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, réseau routier.	248
Figure IV-88: Occupation du sol à partir d'un traitement d'une image satellitaire.	248
Figure IV-89: Cadastre et le type d'occupation des sols de la zone d'étude.	249
Figure IV-90: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, occupation du sol.	249
Figure IV-91: Illustration de l'héritage culturel au niveau de la zone.	250
Figure IV-92: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, patrimoine culturel.	250
Figure IV-93: Degré de la vulnérabilité liée à la variable, statut de protection.	251
Figure IV-94: Niveau de vulnérabilité en terme de pourcentage du linéaire côtier.	252
Figure IV-95: Synthèse représentant le IVC socio-économique de la zone Est-algéroise.	252

Liste des tableaux:

Tableau I-1 : Résumé des facteurs naturels et les activités humaines qui modifient la ligne de côte	13
Tableau I-2. Quelques séismes enregistrés sur le sahel algérien (Matev, 2013).	34
Tableau II-1: inventaire des cours d'eau dans la zone d'Alger (ENSH, 2019).	50
Tableau II-2: Caractéristiques des amplitudes Hs des houles de large en fonction de la période de retour dans la zone algéroise.	69
Tableau II-3: Synthèse des observations sur les roses de houles dans la région algéroise.....	72
Tableau II-4: Données retenues de la houle au large de la région algéroise.	75
Tableau II-5: Estimation de la puissance des vagues dans la zone de déferlement de la région algéroise.	81
Tableau III-1: Années et échelles des photos aériennes (AMIS, 2004).	91
Tableau III-2: Mise à jour et inventaire des points géodésiques dans le cadre du réseau de surveillance du trait de côte.	99
Tableau III-3: Erreurs estimées du DGPS	104
Tableau III-4: Présentation des données exploitées et leurs sources.	109
Tableau III-5: Surfaces gagnées et perdues le long dans la région Ouest d'Alger.	122
Tableau III-6 : Surfaces gagnées et perdues le long de la région centre d'Alger pour l'ensemble des périodes chronologiques étudiées.....	130
Tableau III-7: Surfaces gagnées et perdues dans la région centre d'Alger.....	131
Tableau III-8: Pourcentage de l'évolution linéaire côtière le long de l'est d'Alger.....	136
Tableau III-9: Surfaces gagnées et perdues le long de l'Est d'Alger. (NSBS= Bilan).	142
Tableau IV-1: Conditions des houles à modéliser.	152
Tableau IV-2: Description des prélèvements de sédiments.	171
Tableau IV-3: Résultats du calcul volumétrique différentiel entre le MNT ; actuel, 1 et 2.	187
Tableau IV-4: Caractéristiques des niveaux d'eau (BRGM et al., 2013).....	188
Tableau IV-5: Résumé des volumes calculés pour estimer le volume de sable nécessaire au rechargement de la plage aérienne.	189
Tableau IV-6: Estimation du volume total du sable de rechargement (m3).	190
Tableau IV-7: Qualité des algorithmes de différenciation.....	199
Tableau IV-8: Seuillage de la bande bleue.	199
Tableau IV-9 : Surfaces dunaires urbanisées (ha) dans la zone d'étude de 1960 à 2015.....	201
Tableau IV-10: Débits solides des cours d'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2014).	203
Tableau IV-11 : Sources, années et échelles des data du trait de côte.	204
Tableau IV-12: Corrélation entre urbanisation - dunes - trait de côte.	208
Tableau IV-13: Bilan surfacique des surfaces perdues au niveau des falaises de Zerzouria.....	225
Tableau IV-14: Comparaison entre indices de vulnérabilité côtière.....	230
Tableau IV-15: Présentation des variables retenues pour le calcul de l'IVC physique.	234
Tableau IV-16: Résultats du traitement statistique du IVC physique.....	242
Tableau IV-17: Variables retenues pour le calcul de l'IVC socio-économique.....	244
Tableau IV-18: Population des trois communes dans la zone d'étude (MATE, 2008).....	245
Tableau IV-19: Présentation des résultats du traitement statistique du IVC socio-économique.....	250

Résumé

La côte d'Alger, qui s'étend sur 87 km, connaît actuellement un développement socio-économique et urbain très intense provoquant de graves perturbations de l'environnement côtier. L'enjeu principal de cette étude est de comprendre les tendances évolutives de ce système et d'évaluer son état de vulnérabilité face au phénomène d'érosion. Ce problème d'érosion émane de la conjugaison entre phénomènes naturels et anthropiques. La pénurie sédimentaire causée entre autre, par la construction de barrages, l'hydrodynamique particulièrement pénalisant ainsi que la lithologie fragile pour certains des secteurs dans la zone, font que l'impact anthropique soit plus ressenti sur l'ensemble de la côte algéroise.

L'occupation de l'espace littoral de la zone s'est déroulée en plusieurs épisodes et s'est faite progressivement au détriment de nombreux espaces dunaires qui ont été dégradés (dunes actuelles meubles et dunes anciennes consolidées) et représentant environ 70% des espaces dunaires. Leur disparition s'est répercutée négativement sur l'alimentation naturelle en sédiments des plages dans cette zone. Semblablement, les plages et les falaises de la région algéroise subissent de nombreuses pressions. En effet, la perte des terres est très considérable (pas moins de 10 hectares seulement dans la région Est), menaçant parfois les biens et les infrastructures.

En effet, le besoin de loger les populations grandissantes d'une part, et, d'autre part la présence d'une côte vulnérable mettent en péril la fragilité du littoral. La mise en place d'un réseau de surveillance a permis un suivi multi-temporel de l'espace côtier de la région algéroise et ainsi, d'établir un diagnostic des éventuels liens de cause-à-effet et des corrélations entre les différents phénomènes observés sur le système côtier algérois. Cette compréhension permettra une meilleure aide à la prise de décision en matière de protection côtière pour le futur dans la région.

Abstract

The coast of Algiers, which stretches over 87 km, is currently experiencing a very intense socio-economic and urban development causing serious disturbances to the coastal environment. The main aim of this study is to understand the evolutionary trends of this system and to assess its state of vulnerability toward the phenomenon of erosion. This erosion problem stems from the combination of natural and anthropogenic phenomena. The sediment shortage caused by dams construction, a particularly penalizing hydrodynamic, as well as the fragile lithology of some of sectors in the area, make the anthropic impact more felt on the whole of Algiers coast.

The occupation of the coastal area occurred within several episodes and was done gradually at the expense of many dunes area (bordering dunes and consolidated old ones), approximately 70% of the dunes area has been degraded. Their disappearance has had a negative impact on the natural sediment supply of beaches in this area. Similarly, the beaches and cliffs of the Algiers region are undergoing many pressures. Indeed, the land loss is very significant (more than 10 hectares in the Eastern region), and sometimes threatens properties and infrastructures

The need to accommodate the growing population on the one hand, and the presence of a vulnerable coast in the other hand, endanger the area. The setting of a coastline monitoring network has enabled multi-temporal overseeing of the coastal area of the Algerian region which allows the establishing of a diagnosis of the possible cause-effect relationship between the various phenomena observed on the Algiers coastal system. The understanding of the coastal geosystem of Algiers will provide a better support for future decision-making for an optimal coastal protection of this sensitive area.

المخلص

يشهد ساحل الجزائر ، الذي يمتد على طول 87 كم ، تنمية اجتماعية واقتصادية شديدة الكثافة حالياً ، مما يسبب اضطرابات خطيرة في البيئة الساحلية. يكمن التحدي الرئيسي لهذه الدراسة في فهم الاتجاهات التطورية لهذا النظام وتقييم حالة تعرضه لظاهرة التآكل.

فعليا ، مشكلة التآكل التي يعيشها ساحل الجزائر ناجمة عن مزيج من العوامل الطبيعية والبشرية: إن النقص في الرسوبيات الناجم عن بناء السدود ، الهيدروديناميكا العنيفة والموجهة بشكل غير ملائم على الساحل ، وكذلك الخصائص الصخرية الهشة ، في بعض أجزاء المنطقة ، تجعل التأثير البشري أكبر على جميع أنحاء الساحل الجزائري.

لقد تم إعمار ساحل المنطقة تدريجياً على عدة حلقات و على حساب العديد من مناطق الكثبان الرملية التي تدهورت (الكثبان الساحلية الحالية والكثبان القديمة المتصلبة) : هذا التدهور يتراوح في حوالي 70% من مناطق الكثبان الرملية. وكان لاختفاء هذه الكثبان تأثير سلبي على الإمداد بالرواسب الطبيعية للشواطئ في هذه المنطقة. بالمثل ، تعاني الشواطئ والمنحدرات في منطقة الجزائر من العديد من الضغوط حيث يعد مقدار خسارة الأراضي كبير جداً (ما لا يقل عن 10 هكتارات في المنطقة الشرقية فقط) ، مما يهدد الممتلكات والبنية التحتية في اغلب الحالات.

إن الحاجة المتنامية إلى إسكان المواطنين جهة، و وجود خط ساحلي هش من جهة أخرى، يعرض الساحل لخطر تفاقم الهشاشة. لقد أتاح إنشاء شبكة الرصد لمراقبة الساحل لمنطقة الجزائر العاصمة، تشخيص الروابط المحتملة بين السبب والنتيجة والعلاقات بين مختلف الظواهر الملحوظة على النظام الساحلي الجزائري. هذا الفهم سيسمح بدعم أفضل لصناع القرار في المنطقة لحماية المناطق الساحلية في المستقبل.

Introduction générale

Introduction générale

La notion de “littoral” désigne dans son sens général, l’interface de contact entre la terre et la mer. Bien que le terme soit apparu dès la fin du XIXe Siècle, sa définition exacte est cependant difficile à déterminer, compte tenu des différents concepts qui lui sont accordés (géographiques, géomorphologiques, océanographiques, biologiques, juridiques ou populaires). Dans ce travail nous entendrons par littoral, l’entité géographique et géomorphologique pour laquelle la signification a évolué, au cours des deux derniers siècles, selon plusieurs aspects influençant aujourd’hui différentes approches d’étude : depuis la considération d’une simple interface linéaire vers celle d’un système complexe composé d’unités spatiales plus vastes ([Giuliano, 2015](#)).

La zone côtière est un espace complexe de par ses composantes ainsi que par les facteurs qui régissent son évolution. Cette approche a engendré la définition des systèmes côtiers, dont l’évolution est dépendante de leurs états antérieurs, des forçages hydro-météorologiques, ainsi que des facteurs anthropiques ([Wright et Thom, 1977](#) in [Christophe Brière, 2005](#)).

Le littoral algérois, très diversifié (falaises, plages, dunes et zones humides), souffre dans sa majorité d’un problème d’érosion, qui ne cesse de croître en raison des forces naturelles et anthropiques auxquelles il est exposé à différentes échelles ([Bouhamadouche, 1993](#)). Ces contraintes induisent un recul du trait de côte qui provoque la disparition de certaines plages ([Dean, 2000](#)).

L’aspect anthropique et la croissance de la population dans l’algérois se concentrent principalement dans la zone côtière ([PAC, 2005](#)). Les activités liées directement à la mer ont pris une place prépondérante, notamment dans les collectivités côtières ([Bachari, 2009](#)). Cet engouement pour ce milieu suit une tendance mondiale et n’est que le reflet des enjeux socio-économiques que présente la zone côtière. Par ailleurs, les projets de développement du tourisme prévus par le SDAT (Schéma Directeur de l’Aménagement Touristique) visent une nouvelle stratégie d’aménagement touristique à l’horizon 2030 ([CNERU GROUPE, 2004](#)) et prévoient douze ZEST (Zones d’expansion touristique) pour la wilaya d’Alger ([PAT, 2012](#)). De plus, l’activité industrielle est présente dans la métropole algéroise, son influence est souvent indirecte sur le secteur littoral à travers les cours d’eau, qui eux d’ailleurs, voient leurs débits fortement réduits après la construction de barrages en amont sur le bassin versant,

Introduction générale

ces infrastructures ont perturbé le budget sédimentaire et les flux d'échanges (Otmani et al., 2019).

La conjugaison des forts aléas littoraux, des enjeux naturels et socio-économiques concentrés sur un espace réduit crée une grande vulnérabilité. Ceci constitue un sérieux déficit de gestion pour le milieu côtier, ses ressources et les activités qui s'y pratiquent.

En effet, la présence d'une côte vulnérable met en péril la fragilité du littoral. Aussi, les obligations de faire face à de forts aléas naturels, les besoins en espaces de loisirs liés à la population grandissante ainsi que le défi touristique (Meddtl, 2010), font que la compréhension des systèmes côtiers devienne une nécessité pour l'évaluation de la vulnérabilité, lutter contre l'érosion et ainsi protéger l'homme et ses intérêts sur la zone côtière.

La vulnérabilité des systèmes côtiers est spécifique à un emplacement, à un secteur ou à un groupe donné et dépend de ses caractéristiques physiques et socio-économiques (Hinkel et Klein, 2007). Elle est dynamique, car l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation varient selon le temps. De nombreux travaux traitent du concept large de la vulnérabilité (Rabehi 2018 ; Mihoubi et Belkessa, 2014). Dans cette perspective, les évaluations nécessitent divers outils à différentes échelles spatio-temporelles. Ce travail se distingue par l'élaboration de son propre diagnostic sur terrain à travers la mise en place d'un réseau de surveillance, par la suite, puiser dans la base de données générée pour définir un état de vulnérabilité via différentes approches sur le système côtier algérois.

Ce travail rentre dans le cadre d'un programme de recherche dans le laboratoire de recherche de l'ENSSMAL (Laboratoire de écosystèmes marins et littoraux : EcosysMarL) adossé à l'équipe de recherche « Géodynamique des zones costières ».

Ce travail a été élaboré dans un thème de recherche orienté vers l'évaluation et la prédiction de la vulnérabilité du système littoral algérois, en vue d'une gestion des risques. Les éléments issus sont indispensables pour orienter les aménagements, appuyer les décisions de protection, et faciliter la mise en valeur de cet espace. La problématique est cadrée principalement autour de :

1. La compréhension des processus d'évolution gouvernants le système côtier algérois ;
2. La mise en place d'un réseau de surveillance de la dynamique côtière ;

Introduction générale

3. L'étude des interactions des facteurs d'évolution définis, afin de prévoir les tendances.

La démarche vise à mettre à la disposition des gestionnaires du littoral, des éléments techniques de compréhension de la vulnérabilité à travers l'injection de données récentes de haute résolution dans une méthodologie pertinente. Dans cette optique et pour mener à terme ces objectifs, la thèse a été structurée autour de quatre chapitres :

Chapitre I : porte sur le cadre général de l'étude à travers une synthèse bibliographique et la présentation de la zone d'intérêt.

Chapitre II : est consacré à l'élaboration d'un diagnostic, le plus complet possible, afin de placer la zone dans son contexte géographique, naturel et anthropique.

Chapitre III : englobe les différents procédés et contraintes de mise en place du réseau de surveillance du trait de côte (une étude chronologique sur 60 ans à partir des données collectées et générées).

Chapitre IV : a pour objectif d'exploiter un récapitulatif des résultats obtenus, il se penche sur des études de cas traitants des problématiques majeures auxquelles fait face le système côtier algérois.

Ce travail se solde par une synthèse et des recommandations.

Chapitre I : Généralités

Partie 1 : Synthèse bibliographique

1.1 Présentation du géo-système littoral

La notion de “littoral” désigne dans son sens général l’interface de contact entre la terre et la mer. Bien que le terme soit apparu dès la fin du XIXe Siècle, son exacte définition est cependant difficile à déterminer compte tenu des différents concepts qui lui sont accordés (géographiques, géomorphologiques, océanographiques, biologiques, juridiques ou populaires). (Giuliano, 2015).

La plupart des plages sableuses sont en « équilibre dynamique » entre les processus d’érosion et d’accumulation (Bird, 1996 ; Cartier, 2011). Les processus évoluent à différentes échelles spatio-temporelles (Figure 1-1) jusqu’aux étroites interactions existantes entre le fluide et le sédiment (Van Rijn, 1986 ; Paskoff, 2010). Une compréhension globale de cette évolution et des processus qui en sont responsables nécessite donc un suivi de la zone côtière à différentes échelles (Jaud, 2011).

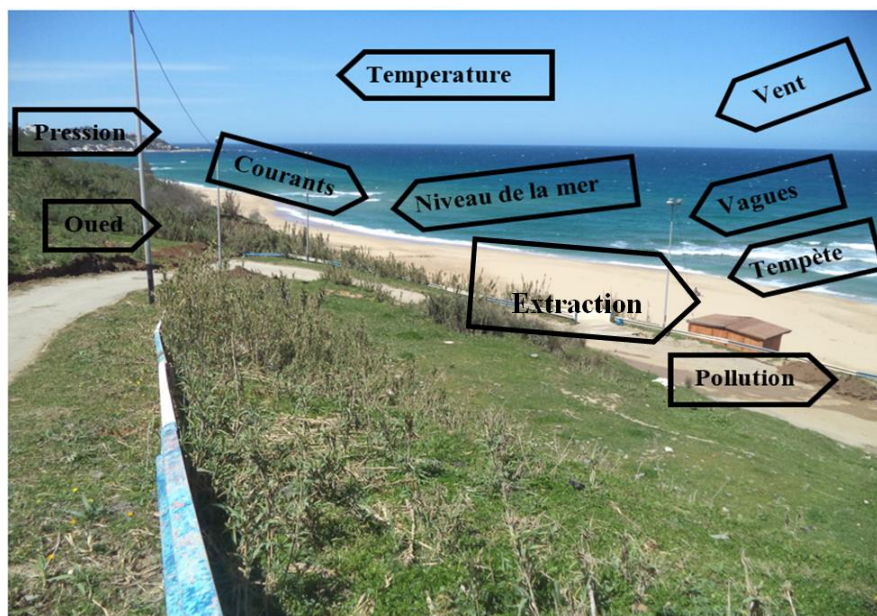


Figure I-1 : Les pilotes clés (physiques et humains) gouvernant les changements dans les systèmes côtiers.

L’évolution d’un système côtier est dépendante de l’état antérieur de ce système, des forçages hydro-météorologiques et des facteurs anthropiques. L’étude de l’évolution morphodynamique des littoraux consiste à relier les forçages aux différentes échelles de temps et d’espace par leur développement morphologique (Wright et Thom, 1977 in Brière, 2005).

En ce qui concerne le forçage naturel, l'explication serait dans la conjugaison de plusieurs principaux facteurs :

- La pénurie en sédiments enregistrée depuis la fin de la transgression postglaciaire, il y a environ 6000 ans B.P (Before present) ; transgression qui a engendré la baisse de la compétence des fleuves côtiers à charrier d'énormes quantités de sédiments (Giresse, 1989).
- La variabilité des conditions hydrométéorologiques.
- La remontée du niveau marin (Pirazzoli, 1993 ; Meur-Férec, 2006 ; GEIC, 2014).

Cependant, les conditions hydrodynamiques locales dépendent des forçages au large qui sont aussi fortement influencés par la topographie locale (Rihouey, 2014).

À ces causes naturelles, s'ajoutent de multiples actions anthropiques :

- Le piégeage des sédiments par les barrages hydroélectriques le long des fleuves pourvoyeurs de sédiments,
- L'extraction de granulats côtiers et marins,
- L'installation des infrastructures de transport et des ouvrages divers sur le haut de plage et dans les zones de transferts sédimentaires.

Tous ces facteurs participent aux déséquilibres de la dynamique sédimentaire et amplifient, de ce fait, le phénomène de l'érosion côtière. Le littoral se projette donc comme un milieu fragile. Dans une approche géomorphologique ; il se présente sous deux types de côtes :

Côtes dures : Rocheuses, majoritairement des falaises ou des rock beaches ; non couverte de végétation, parfois en forte pente, de hauteur très variable, au contact de la mer et de la terre et est dû à l'action ou à la présence marine.

Côtes d'accumulations : Accumulations des sédiments d'origine marine ou terrigène transportés par les vents et les houles. Dites côtes basses, dynamiques et changeables dans le temps.

1.1.1 Le budget sédimentaire

Les actions conjuguées de la mer et du vent ont pour effet de déplacer les sables et donc de modifier la morphologie du littoral. La forme de la côte et la dynamique des sédiments permettent d'identifier des cellules sédimentaires. Il existe une forte interdépendance entre les processus d'une même cellule (érosion/accrétion... etc.) (Mallet et Favennec, 2011).

1.1.1.1 Origine et puits des flux sédimentaires

L'équilibre sédimentaire des plages dépend des entrées et des sorties de sédiments. Les principales sources et pertes de sédiments pour le littoral sont ainsi :

Les sources :

- 1) La plage elle-même qui fournit les sédiments au littoral,
- 2) La dérive littorale qui apporte des sédiments des zones adjacentes,
- 3) Les cours d'eaux qui transportent vers la côte les sédiments du continent,
- 4) Vers la plage par le vent,
- 5) L'érosion de certains secteurs des côtes (falaises, côtes basses, etc.),
- 6) La zone intertidale et la zone marine qui apportent à la côte les sédiments déjà accumulés sous forme de bancs de sable ou de haut-fond.

Les pertes :

- 1) La dérive littorale qui emporte des sédiments vers les zones adjacentes,
- 2) Une perte vers la zone intertidale et marine par les courants d'arrachement,
- 3) Une perte vers les dunes par le vent (Kadri., 2016).

Le budget sédimentaire correspond donc à la quantification des stocks de matériaux présent, auxquels s'ajoutent les apports (arrivée longitudinale par dérive littorale, ou transversale, notamment de sédiments en provenance des petits fonds, de l'érosion du continent, des apports fluviaux ou, arrivée par recharge anthropique), avec considération des sorties (départ longitudinal par dérive littorale ou transversal, notamment vers les petits fonds, les dunes littorales et les estuaires ou départ dû aux extractions effectuées par l'homme) (Figure I-2).

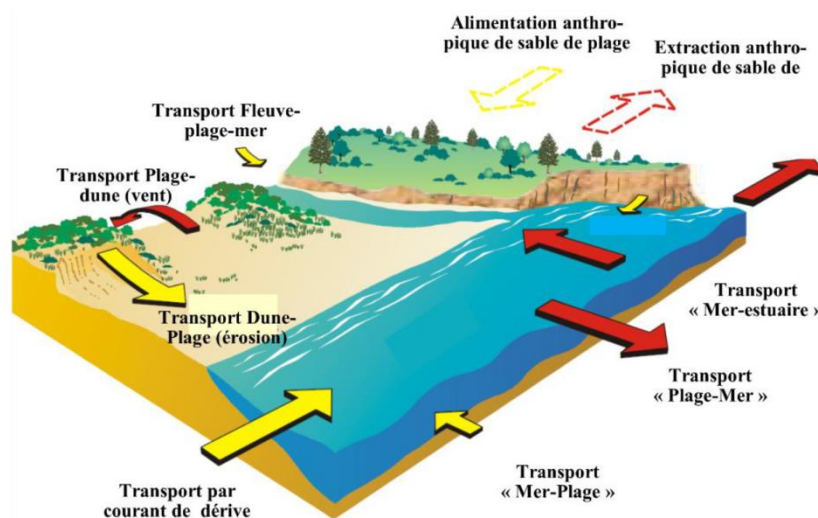


Figure I-2 : Etablissement du budget sédimentaire (Bain et Costa, 2016).

1.1.2 Morpho-dynamique côtière à échelle spatio-temporelle

L'étude de l'évolution morpho-dynamique des littoraux consiste à relier leur développement morphologique et les forçages aux différentes échelles de temps (Wright and Thom, 1977). Le trait de côte est par définition la ligne d'intersection de la surface topographique avec le niveau des hautes mers astronomiques et par extension, la limite entre la mer et la terre (Meedtl, 2010).

Plusieurs types d'indicateurs existent afin de déterminer les traits de côte (altimétriques, hydrodynamiques, géomorphologiques et botaniques). Le choix des indicateurs de trait de côte est fait selon la nature du lieu et les outils utilisés pour faire son levé. Les indicateurs de type hydrodynamique instantané peuvent être utilisés sur les rivages en contexte microtidal comme la limite instantanée du jet-de-rive (Mallet et al., 2012).

Dans un objectif de gestion du littoral, il est nécessaire de connaître l'évolution du trait de côte (avancée, recul ou stabilité) en fonction des échelles temporelles associées (saisonniers, annuelles). Pour analyser ces changements, une définition du « trait de côte » doit être donnée de manière à prendre en compte les différentes configurations géomorphologiques des littoraux ainsi que les notions d'évolution temporelle relatives (Mallet et al., 2012).

En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement d'un système morpho-dynamique côtier (plage, embouchure, dune, estuaire) peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une représentation spatiale se référant à l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu (DeVreind, 1991 ; Djouder et Smaoun, 2011). L'examen des relations spatio-temporelles qui conditionnent le devenir d'un système côtier constitue une mesure de la stabilité du système aux variations des forçages (Kroon, 1994).

Selon la nomenclature de (DeVreind, 1991), on peut en particulier distinguer les échelles suivantes (figure I-3) :

- La micro-échelle (échelle des processus) concerne les processus physiques constitutifs de la houle, des courants ou du transport sédimentaire et agissant sur une échelle plus courte que celle du comportement morpho-dynamique correspondant (houle, courant, transport sédimentaire, dont les effets sont à l'échelle dite morpho-dynamique).

- La méso-échelle (échelle dynamique) concerne le comportement morpho-dynamique dû à l'interaction entre les processus physiques et la topographie. Elle permet de dater, entre autres, la propagation des corps sédimentaires ou encore la migration des barres.
- La macro-échelle (échelle de tendance) concerne les tendances ayant lieu sur une échelle de temps plus longue que celle des comportements morpho-dynamiques primaires. Ces tendances peuvent être dues aux variations saisonnières du comportement ou à l'évolution progressive des forçages extérieurs (évolution du marnage, élévation du niveau moyen de la mer).

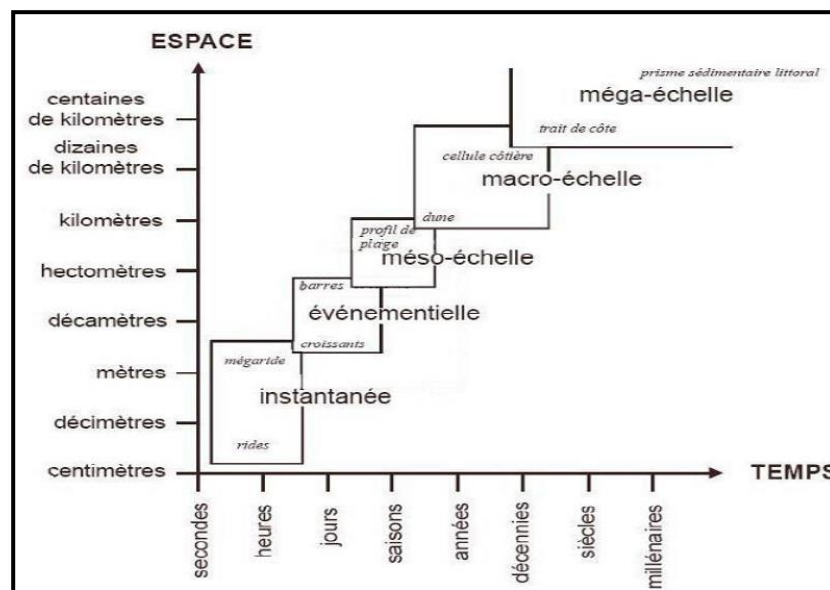


Figure I-3 : Relation spatio-temporelle des systèmes morpho-dynamiques côtiers (Giuliano, 2015).

1.1.3 Zoning hydrodynamique de la zone côtière

Un zoning du domaine côtier s'effectue en fonction des processus hydrodynamiques liés aux transformations des vagues lors de leur propagation (figure I-4) :

La zone du large (*zone offshore*) : Les vagues ne subissent aucune déformation liée à la topographie des fonds.

La zone de levée (*shoaling wave zone*) : c'est le siège d'interactions non-linéaires entre les vagues incidentes et le fond. Elle est caractérisée par une modification de la cambrure (augmentation de la hauteur des vagues H et diminution de la longueur d'onde L).

La zone des brisants (*wavebreaking zone*) : où le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d'eau devient faible devant la hauteur des vagues.

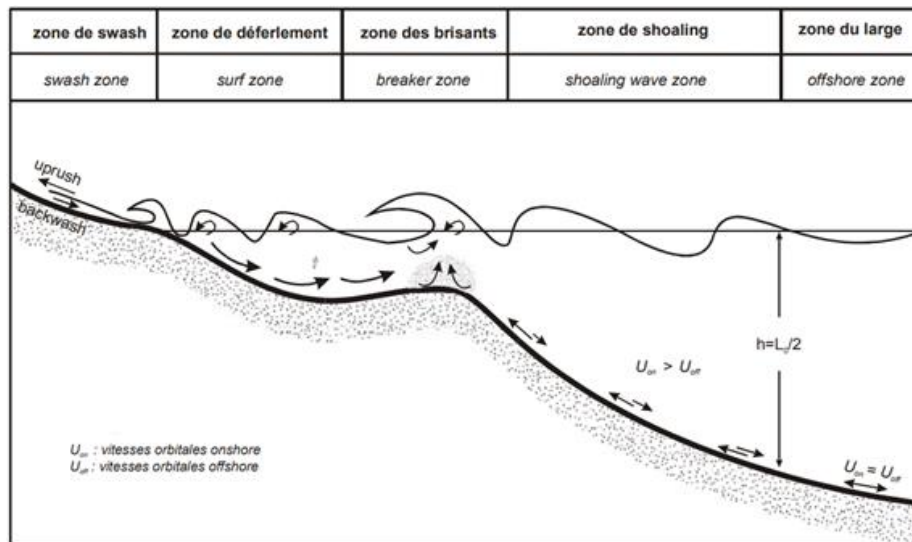


Figure I-4 : Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes (Giuliano, 2015).

1.2 Facteurs intervenants dans la dynamique sédimentaire

Les côtes sont dynamiques à l'échelle spatio-temporelle, elles peuvent avancer ou reculer selon les conditions hydrodynamiques et sédimentaires qui agissent sur l'apport et le départ des matériaux ou bien être stable quand l'équilibre sédimentaire est préservé. Les plages sont menacées de disparition due au déficit en sédiment.

1.2.1 Le phénomène d'érosion côtière

L'érosion est un phénomène naturel, généré par des mécanismes physiques agissant sur le système littoral, où il peut y avoir une perte des espaces côtiers et un gain de l'autre côté. Toutefois, l'action anthropique sur le littoral peut rendre le phénomène un risque côtier.

Une enquête internationale a montré que sur le total des plages du monde ; 70 % sont aujourd'hui en cours d'érosion ; 20 % sont stables et 10 % seulement présentent une progradation (Clus-Auby, 2003). Comprendre les facteurs et les processus clés des dynamiques côtières (Figure I-5) dans une échelle spatio-temporelle (Tableau I-1) et les activités humaines le long de la côte est fondamental pour une gestion appropriée des problèmes de l'érosion côtière.

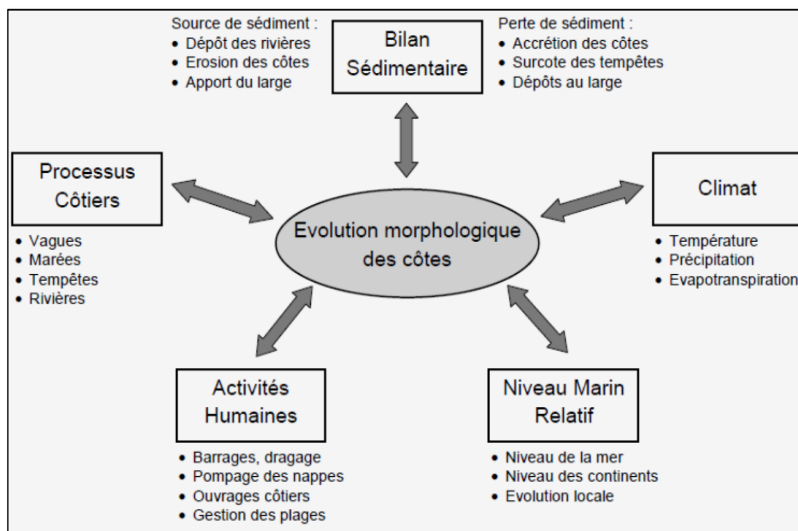


Figure 1-5 : Synthèse des paramètres influençant l'évolution morphologique des côtes (Grasso, 2009).

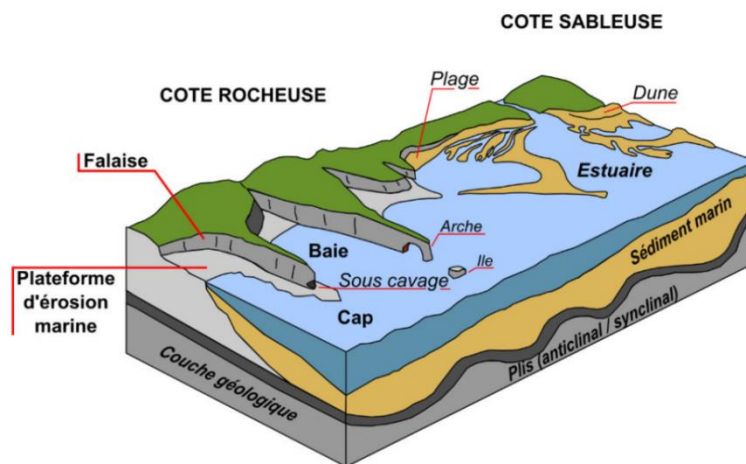
La remontée de la mer a d'abord mobilisé le stock sableux de la plateforme littorale pour former le littoral proprement dit. Cependant, ce « capital sédimentaire » est aujourd'hui consommé et ne se reconstitue plus. On assiste donc à un renversement de la tendance conduisant à l'érosion des côtes (Clus-Auby, 2003).

Tableau 1-1 : Résumé des facteurs naturels et les activités humaines qui modifient la ligne de côte (FAO,2005 in AMIS 2014)

Factor	Effects	Time scale									
		sec's	hours	days	months	years	10 years	50 years	100 years	1000 years	10.000 years
Natural Factors											
Short wave period	Erosion										
Waves of small steepnes	Accretion										
Large wave height	Erosion										
Storm surge	Erosion										
Alongshore currents	Accretion, no change or erosion										
Rip currents	Erosion										
Underflow	Erosion										
Overwash	Erosion										
Wind	Erosion										
Sediment supply (source and sink)	Accretion or Erosion										
Inlet presence	Net erosion; hig instability										
Sea level rise	Erosion										
Land subsidence (tectonic)	Accretion or Erosion										
Human activities											
Dredging	Erosion or Accretion										
Coastal defence	Erosion or Accretion										
Vegetation clearing	Erosion										
Harbour development	Erosion or accretion										
River damming	Erosion										
Land reclamation	Erosion										

1.3 Variété des systèmes côtiers :

Lors de la classification des systèmes côtiers, les phénomènes hydrodynamiques qui s'exercent sur les côtes sont souvent exploités. Toutefois, ce ne sont pas des « phénomènes majeurs » partout. Les classifications les plus simples sont basées sur l'observation de la morphologie et des phénomènes physiques. D'autres tiennent compte des conditions de formation et d'évolution de ces systèmes (Figure I-6).



1-6 : Illustration de la configuration générale du littoral rocheux et sableux (Giuliano, 2015).

1.3.1 Les dunes littorales

Les dunes littorales sont des monticules de sable créés par les dynamiques éoliennes et marines. La mer apporte des sédiments sur la côte qui sont par la suite remobilisés par le vent (Pinot, 1998). Autrement dit, c'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).

Les dunes stockent le sable dans la zone littorale active et tamponnent ainsi l'action érosive de la mer (Heurtefeux, 2007). La vulnérabilité d'une dune dépend beaucoup de sa couverture végétale et de l'orientation du vent (Suanez et Provansal, 1993). La plupart des écosystèmes de dunes côtières sont dégradés en raison de la pression humaine, principalement par le biais du tourisme et de l'urbanisation du littoral (UICN, 2012).

Selon la loi littorale 02-02, relative à la protection et à la valorisation du littoral et en référence à l'article 2, une distinction est faite entre le cordon dunaire et la dune. Le cordon dunaire est défini comme une langue de sable formée (dans un golf ou une baie) de débris déposés par un courant côtier et sur laquelle peut se développer une végétation spécifique (Bounoua et al., 2017).

1.3.1.1 Processus de formation des dunes

Le développement des dunes requiert une plage suffisamment large ainsi qu'une couverture végétale. Cette dernière réduit le taux de transport éolien dirigé vers la terre, ce qui permet l'accumulation de sable entre le pied et la crête du relief (Figure I-7).

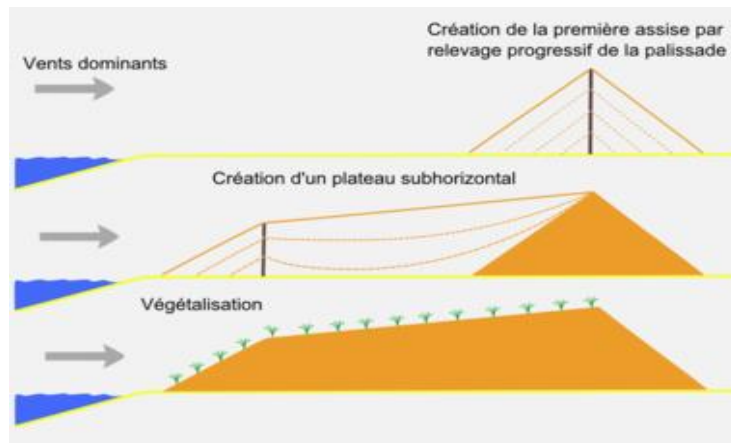


Figure 1-7 : Processus de formation d'un cordon dunaire.

1.3.1.2 Morphologie d'un système dunaire côtier

Selon le guide de l'IUCN de 2012, 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 haute plage.

Régime des vents et orientation de la plage : 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.

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 et réduit le flux de vent. Les grains en saltation sont donc interceptés.

Topographie de la zone terrestre adjacente : Il est nécessaire que la surface d'arrière-plage soit suffisamment large pour permettre l'existence des dunes.

Niveau de la nappe phréatique : Le niveau de la nappe phréatique, qui a tendance à se situer à de faibles profondeurs dans ces zones, conditionne la fixation du sédiment sableux et sa participation au développement de certains types de dunes.

1.3.1.3 Organisation spatiale du système dunaire

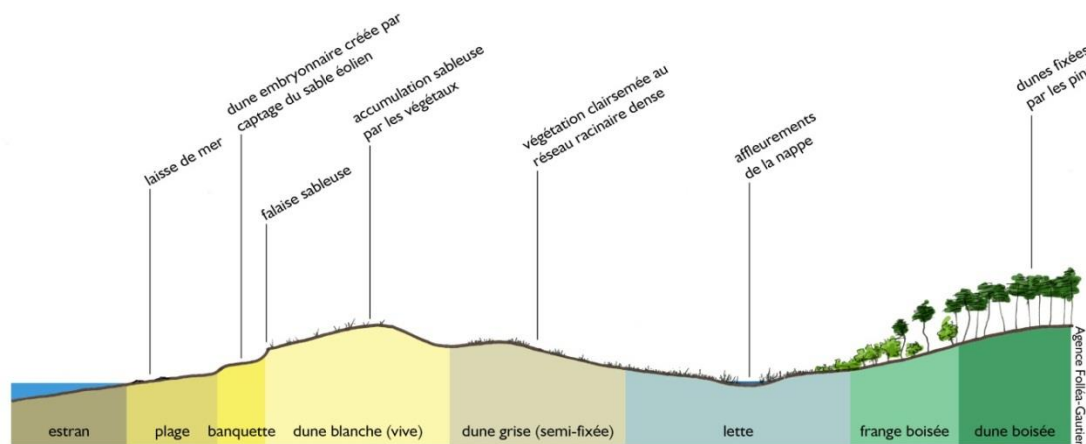


Figure I-8: Organisation spatiale du système dunaire (ONF, in Bounoua et al 2017).

La dune embryonnaire (ou avant-dune) : cet habitat se place entre la laisse de haute mer et le pied de dune,

La dune blanche (dune non fixée) : Elle correspond à un bourrelet dunaire où les sables sont mis en mouvement par l'action éolienne,

La dune de transition (dune semi-fixée) : elle se développe à l'abri du cordon de la dune blanche où les phénomènes d'accumulation et de transit sont atténués. Cette dune est caractérisée par la présence conjointe d'espèces de dune blanche et de dune grise,

La dune grise (dune fixée) : Bosselée ou plane, cette arrière dune est située entre la dune de transition et la forêt. On parle de dune fixée car la dynamique éolienne est moins forte et le milieu est plus stable.

1.3.1.4 Rôles des dunes

Les dunes constituent un habitat naturel primordial pour la protection des zones côtières. Développées par accrétion, elles permettent de stocker le sable dans la zone littorale active, qui pourra être ensuite remis au système. Elles tamponnent ainsi l'action érosive de la mer (Moulis et Barbel, 1999).

1.3.1.5 Les différents types de dunes

Les dunes sont classées 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 en annexe (Annexe N°01).

1.3.2 Les plages

Les plages sont des zones littorales d'accumulation de sédiments détritiques, des sables fins aux galets, mobilisés sur la plateforme par la dernière transgression (Guilcher, 1954 ; Paskoff, 1994). Selon (Mongi et Miossec, 2010), les plages sont une forme littorale où l'accumulation l'emporte sur l'érosion. Elles sont généralement relayées vers l'intérieur des terres par des dunes. Les matériaux d'accumulation sont constitués de sable fin à grossier (0.2-2mm) ou de galet (2-20cm) ou de bloc (plus de 20cm).

Les plages sont dynamiques, le profil change dans le temps selon l'apport et le départ des sédiments. Elles ont pour rôle de protéger la zone littorale de l'impact des tempêtes, par dissipation de l'énergie des houles (Stépanian, 2002).

1.3.2.1 Morphologie des plages :

Les plages bordent les zones littorales sous toutes les latitudes et sont soumises à différentes conditions climatiques. Environnements particulièrement variables à travers le monde, les plages et leurs caractéristiques dépendent de la géométrie du littoral (océan ouvert ou mer semi-fermée, courbure du trait de côte, présence de caps rocheux etc.), de la nature et du volume sédimentaire disponible, du régime d'agitation (saisonnier, cyclonique, alternance beau/mauvais temps) et enfin du contexte tidal (marnage, régime diurne, semi-diurne). Le régime climatique et la latitude ont un rôle également conséquent (Short, 1999). Le profil de plage présente généralement une forme concave depuis la dune vers le large. Il peut présenter des morphologies comme des barres sableuses sur l'ensemble du profil, ainsi que des croissants de plage. Dans les environnements côtiers, la zone littorale est compartimentée en plusieurs zones morphologiquement distinctes en fonction des niveaux de la mer (Figure I-9 et 10).

Le haut de la plage : Leur présence témoigne d’une constante alimentation de la plage en sédiments. Elle résulte principalement des processus marins et secondairement par les apports éoliens et fluviatiles.

Le bas de plage : Occupe la partie qui ne se découvre qu’au moment des marées basses. Le bas de plage est limité du côté externe par l’estran. L’estran est limité du côté interne par des croissants de plage (qui sont de petites accumulations meubles et éphémères). Résultat du mouvement de va-et-vient de l’eau sur l’estran.

L’avant plage : C’est ce qu’on appelle la plage sous-marine. Elle occupe l’avant-côte dont les sédiments constituent un stock pour la plage proprement dit (Mongi et Miossec, 2010).

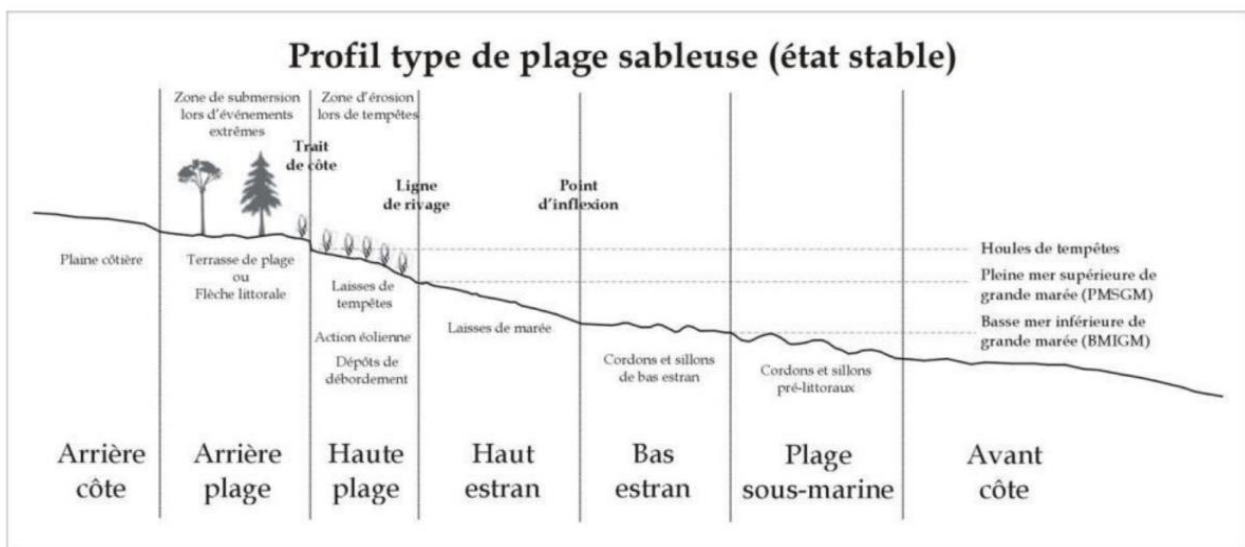


Figure I-9: Nomenclature des segments d’une terrasse de plage (Belkherroubi and Belguerguid, 2017).



Figure I-10 : Configuration type d’une plage.

1.3.2.2 Les types de plages :

La typologie des plages diffère en fonction de leurs formes et leurs allongements qui sont dépendants de l'exposition à la houle ainsi qu'à la répartition sédimentaire via la dérive littorale (Belkherroubi et Belguerguid, 2017) (Figure I-11).

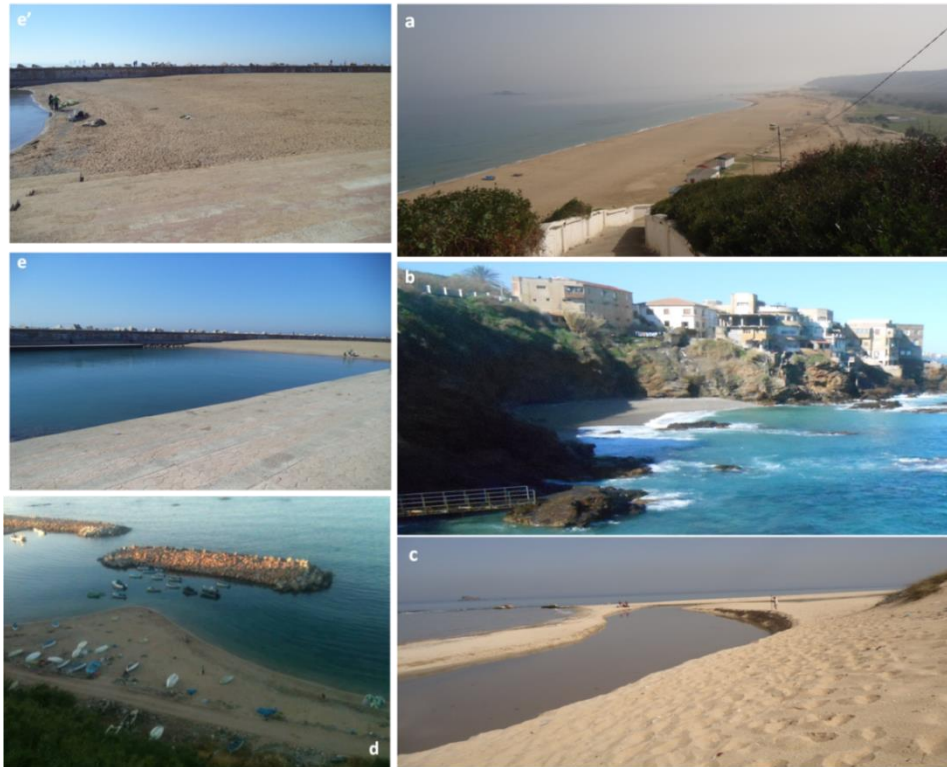


Figure I-11 : Les différents types de plages **a** : Plage rectiligne (El Kadousse, Heraoua 2014) ; **b** : Plage de fond de baie (Aouinet Hesni, Bouloghine 2015) ; **c** : Plage en flèche (Réghaia plage, Réghaia 2015) ; **d** : Plage en tombolo (Surcouf, Ain Taya 2017) ; **e** et **e'** : Plage artificielle (El Djamila, Ain Benien 2015).

Plages ouvertes : elles sont rectilignes sur de grandes distances avec un profil généralement bas (grande longueur) alimentées par un transit littoral permanent. Généralement, elles ne sont pas loin des embouchures (Figure I-11-a).

Plages de fond de baie : Occupent souvent le fond des baies ou des golfs où l'énergie des vagues est ralentie. Au sens classique du terme, ce sont des petites accumulations protégées, généralement conservées à l'état naturel (Figure I-11-b).

Plage en flèche littorale : C'est un cordon sableux lié à la côte. Il se présente sous la forme de flèche libre dont l'extrémité est généralement faite de crochets (ou crochon) recourbés. Ce sont des formes qu'on trouve aussi au niveau des embouchures (Figure I-11-c).

Tombolo : Accumulation avançant en pointe dans une partie marine moins agitée du fait de la présence d'un obstacle (Figure I-11-d).

Plages artificielles : Apport de matériaux allochtones, essentiellement anthropiques (Figure I-11-e).

C'est la configuration du trait de côte et le ralentissement de la dérive littorale bien alimentée en matériaux qui déterminent la formation, le maintien et l'allongement des plages, qui sont en fin de compte des types particuliers de plage (Miossec, 2010).

1.3.3 Les falaises

Le terme "falaise" désigne dans son sens général, une paroi soumise à l'action des vagues (Derruau, 1972 ; Foucault et Raoult, 1995). Quelle que soit son origine, rocheuse ou meuble, une falaise est un escarpement situé sur la partie supratidale (en amont de la plateforme d'érosion). Elle possède une pente supérieure à 15° avec des hauteurs très variées (Guilcher, 1967 in Derruau 1972) allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. La définition retenue est celle d'un escarpement abrupt supérieur à 30-50° situé au contact ou à proximité de la mer (Daigneau, 2001).

Lorsque l'escarpement est directement en contact avec la mer, la falaise est dite "vive". Toutefois, s'il est séparé de la mer par l'accumulation d'une zone d'éboulis on parle de falaise "morte" (Figure I-12). La partie basale est désignée comme étant le "pied de falaise", et la partie sommitale située au niveau de la rupture de pente comme étant la "tête de falaise".

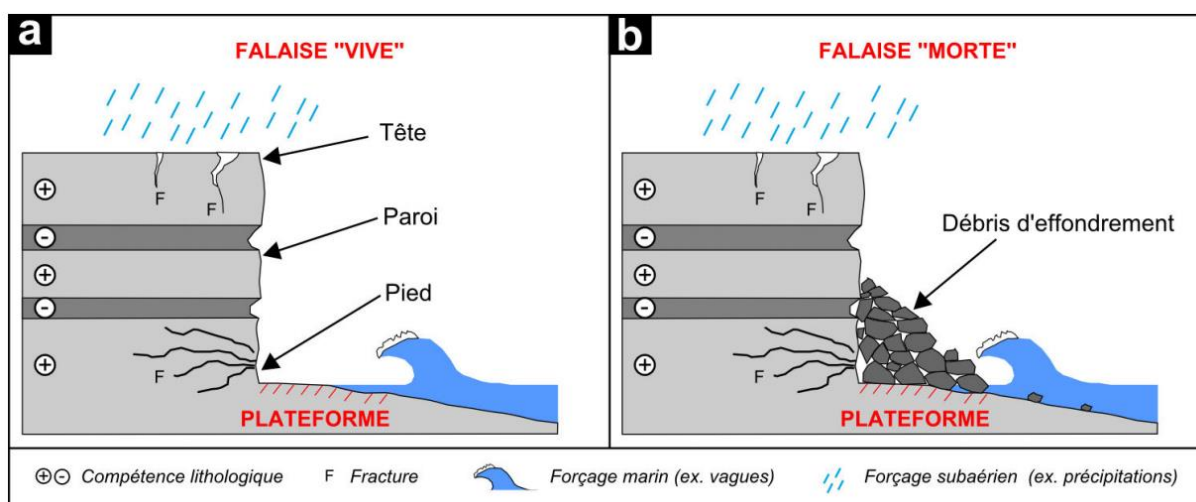


Figure I-12 : Configuration générale d'une falaise (vue en coupe) ; **a** : Illustration d'une falaise vive ; **b** : Illustration d'une falaise morte.

1.3.3.1 Formation et évolution

Les caractéristiques des falaises à savoir ; hauteur, profil et vitesse de recul, sont en fonction des conditions topographiques et structurales d'une part, et des processus morphogéniques en jeu d'autre part.

1.3.3.2 Conditions topographiques et structurales

Une falaise apparaît lorsque la mer entaille, par enlèvement d'un prisme de matériaux rocheux, un versant continental créé, suivant les cas, par l'érosion subaérienne, par l'activité éruptive ou par des mouvements tectoniques.

La configuration diversifiée des falaises dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont la nature lithologique, la structure géologique, la hauteur et les processus d'érosion en cours ou passés (Sunamura, 1992 ; Trenhaile et al., 2002 Nunes et al., 2009). A partir uniquement du critère lithologique, on peut distinguer trois types de falaises (Caplain, 2011) : consolidées, non consolidées ou intermédiaires.

Les falaises consolidées sont constituées de roches compactes et peu déformables (sédimentaires, métamorphiques, cristallines ou volcaniques). Elles présentent un profil topographique plutôt vertical avec des hauteurs maximales comprises entre quelques mètres et plusieurs centaines de mètres. La dynamique érosive s'exprime principalement par des effondrements gravitaires avec des taux de recul relativement "lents" (ordre du mm au cm/an) (Costa et al., 2004 ; Marques et al., 2006 ; Rosser et al., 2013).

Les falaises non consolidées sont formées de matériaux meubles tels que l'argile, le sable ou le gravier (Collins et Sitar, 2008) (Figure I-13), Les modes d'érosion se traduisent principalement par des effondrements, glissements et affaissements de terrain. Compte tenu cette raison qu'elles comptent parmi les formations côtières les plus étudiées (Naylor et al., 2010) puisque l'érosion est facilement observable (Hall, 2002 ; Moore et Griggs, 2002 ; Dong et Guzzetti, 2005 ; Himmelstoss et al., 2006 ; Collins et Sitar, 2008 ; Lee, 2008 ; Young et al., 2009 ; Brook et Spencer, 2010 ; Castedo et al., 2012).

Les falaises intermédiaires possèdent, les caractéristiques combinées des deux précédents types de falaises. Cette dernière typologie inclue donc une très grande variété de configuration qui dépend de la disposition des matériaux.

Les traits géologiques et géomorphologiques le long du littoral Est algérois, laissent apparaître deux types de falaises qui se succèdent :

- Les falaises entaillées en formation tendre,
- Les falaises édifiées en roches.

Les falaises entaillées en formation tendre : les falaises de la côte Est algéroise, entre Jean Bart et Réghaia plage, se caractérisent par des hauteurs atteignant en moyenne 10 à 35 m. Ces falaises entaillées dans des roches tendres qui s'altèrent aisément par l'interaction des roches tendres et par l'interaction des processus marins et continentaux.

Les falaises entaillées dans des roches dures : elles se situent au niveau du Cap Matifou tout au long de la côte d'El Marsa et s'interrompent vers le port de Jean Bart. Ce sont des falaises atteignant en moyenne 20 à 40m. Elles sont en contact direct avec les agitations marines, par endroits et laissent devant elles de petites criques sableuses (Bouakline, 2009).



Figure I-13 : **a :** Falaise d'El Marsa 2018 (ex. Jean-Bar) et **b :** Falaise de hammamat 2018 (ex. Bainem).

1.3.3.3 Processus en jeu

Les processus marins jouent un rôle sur :

- L'attaque basale qui contribue à faire effondrer la falaise par pans,
- L'enlèvement des débris à son pied, d'où le maintien d'une forte pente propice à l'instabilité de l'escarpement,
- L'abaissement de la plateforme d'abrasion à mesure qu'elle s'élargit par recul de la falaise, ce qui permet à la mer de continuer à agir au pied de l'escarpement,

- L'action mécanique des vagues est importante. Les lames qui déferlent contre les parois exercent des pressions considérables. La multiplication des chocs ébranle les roches et finit par les fissurer. Les cassures sont élargies par l'air qui s'y comprime. Au moment du retrait de l'eau, un phénomène inverse d'aspiration se produit. Des blocs peuvent alors être déplacés. La fracturation favorise ce délogement.

La hauteur de la falaise dépend du volume du relief ainsi attaqué. Plus il est important, plus la dénivellation est forte, mais, toutes choses étant égales par ailleurs, plus le recul est lent.

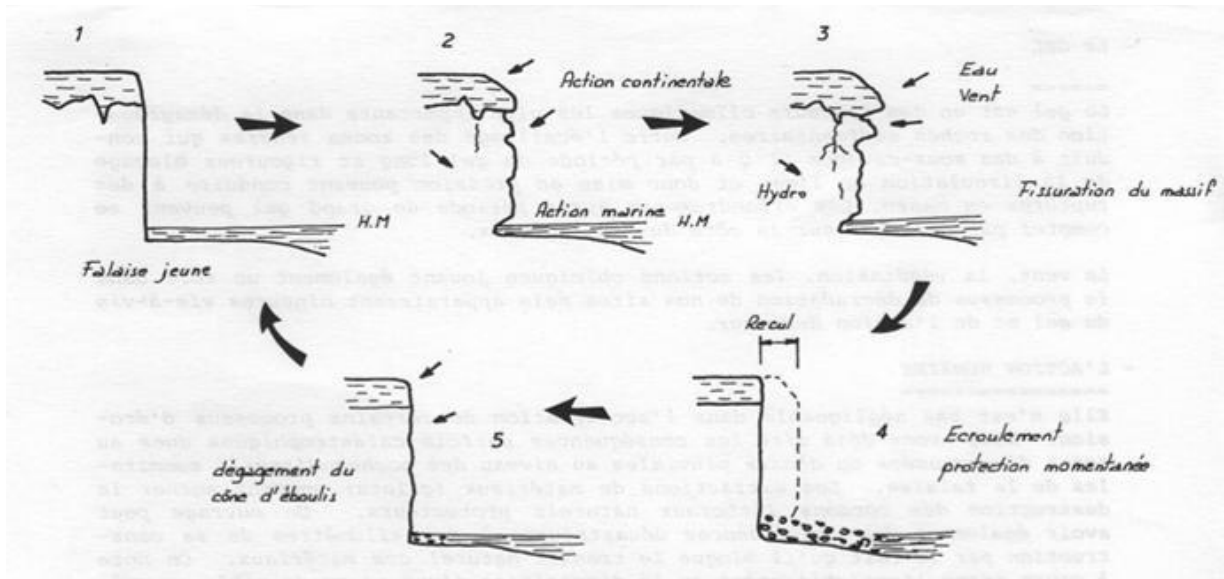


Figure I-14: Schéma représentative du cycle d'évolution des falaises. (Maquaire, 2011).

De ce fait, la tendance générale des profils topographiques dépend du caractère homogène ou hétérogène des lithologies. Cependant, le pied de falaise peut aussi être affecté par un renfoncement d'érosion, appelé sous-cavage ("notch") ce dernier est un marqueur caractéristique de l'érosion marine (Erikson et al., 2007).

La diversité des profils de pente illustre plusieurs modes d'érosion associés à la variabilité des paramètres intrinsèques de la roche et plus particulièrement à celle des forçages (Pascoff, 2014). Ainsi, les degrés de contribution des facteurs d'érosion diffèrent fortement d'un environnement à un autre (Figure I-15). Pour ces raisons, certains auteurs considèrent comme forçage principal :

- L'action marine (Budetta et al., 2008 ; Dornbush et al., 2008),
- L'action subaérienne (Brook et Spencer, 2010 ; Kuhn et Prüfer, 2014),
- La combinaison des deux facteurs (Sallenger et al., 2002 ; Colantoni et al., 2004).

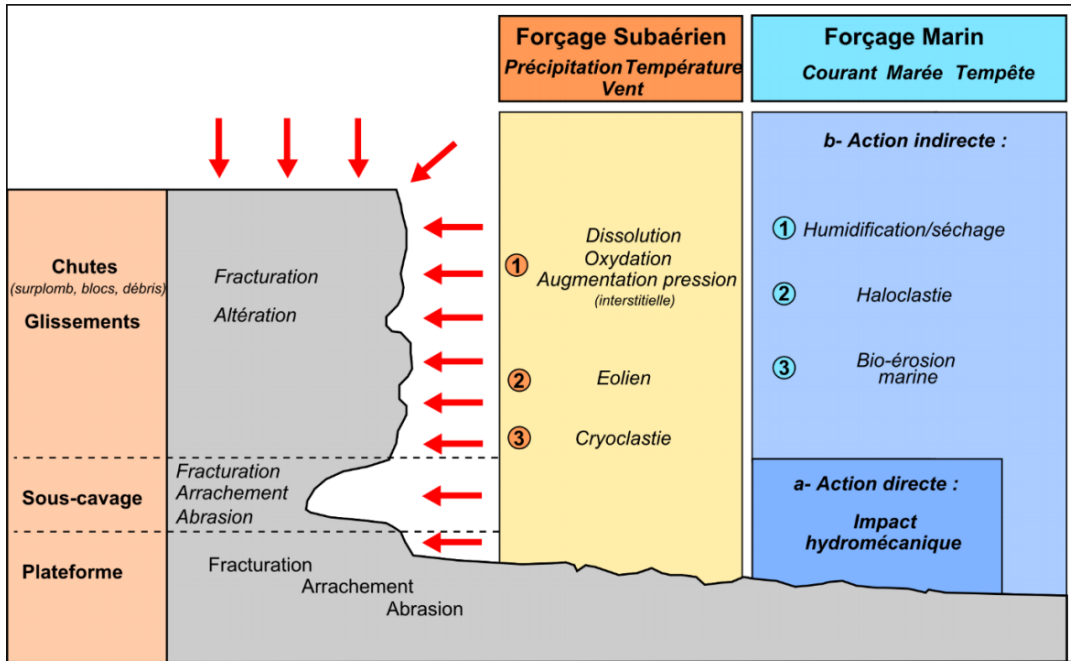


Figure I-15: Schéma conceptuel des différents processus d'altération et d'érosion affectant les falaises soumises aux forçages subaériens et marins.

Partie 2 : Cadre général et présentation de la zone d'étude

1.4 Caractérisation de la zone d'étude

1.4.1 Situation et choix de la zone

1.4.1.1 Situation géographique

La wilaya d'Alger est limitée par la mer Méditerranée au Nord, la wilaya de Blida au Sud, la wilaya de Tipaza à l'Ouest et par la wilaya de Boumerdes à l'Est. Le linéaire côtier s'étend sur une longueur d'environ 80 km, il est compris entre les latitudes $36^{\circ}38'41.604''\text{N}$ et $36^{\circ}55'1.279''\text{N}$ et les longitudes $2^{\circ}47'46.184''\text{E}$ et $3^{\circ}23'59.733''\text{E}$ et se divise en trois zones distinctes :

- Le secteur Est, allant du Cap Matifou à la plage Réghaïa,
- Le secteur centre, comprenant la baie d'Alger,
- Le secteur Ouest qui s'étend de Rais Hamidou jusqu'à l'Oued Mazafran.

La wilaya d'Alger s'étend sur une superficie de $809,22 \text{ km}^2$ et compte 13 circonscriptions administratives regroupant 57 communes, dont 20 occupent la partie littorale de la wilaya (Miclat, 2017).

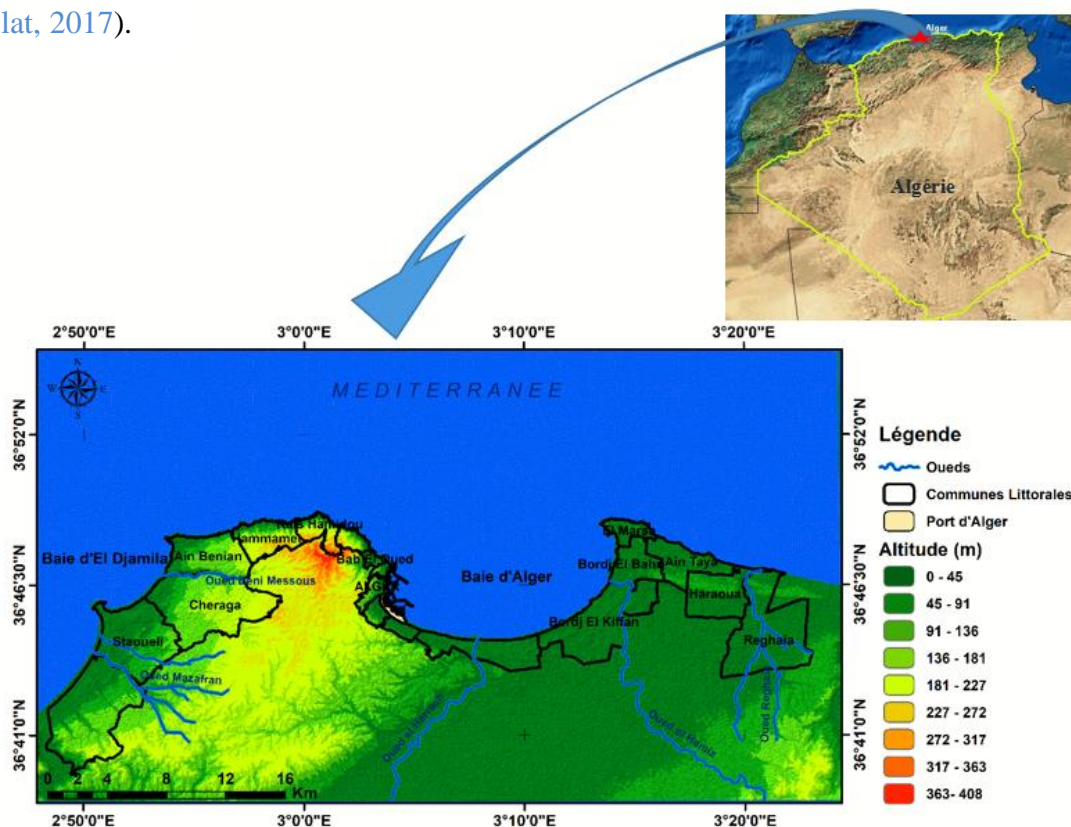


Figure I-16: Localisation géographique de la zone d'étude.

1.4.1.2 Choix de la zone d'étude

La zone d'étude se localise au Nord de la wilaya d'Alger (Algérie) et constitue le secteur centre algérois. Elle est comprise d'Ouest en Est, entre les deux Oueds Mazafran et Réghaïa respectivement, elle s'étale sur 80 km du pays et couvre 79 plages.

Le choix de la zone s'est fait en fonction de l'observation du secteur algérois sur différentes échelles temporelles, où les facteurs géologiques et climatiques ont permis l'existence d'un faciès morphologique riche et variable : des plages, des dunes, des falaises, des cours d'eau et des zones humides,

D'un point de vue vulnérabilité, l'intérêt de la zone apparaît sur une échelle de temps millénaire. En effet, au cours des dernières décennies, le développement anthropique issu des enjeux convoités par de nombreux acteurs opérants sur la zone ; favorisé par le potentiel ainsi que l'emplacement de cette dernière, cette anthropisation s'est installée d'une façon particulièrement rapide et perceptible au détriment du patrimoine naturel sur place.

1.4.2 Cadre géologique et sismique

La connaissance de la géologie et de la géomorphologie locale d'un site permet de définir sa sensibilité face aux agressions marines (Otmami, 2014). Cette analyse permet aussi de mieux cerner et comprendre les différents phénomènes d'érosion et d'altération contrôlant les quantités sédimentaires acheminées en mer (Meddtl, 2010).

1.4.3 Cadre géomorphologique

1.4.3.1 Le plateau continental

Toutes les caractéristiques de la marge continentale algérienne se retrouvent au niveau de la région algéroise. La marge continentale des baies de Bouismail, d'Alger et de Zemmouri se caractérise par une remarquable extension. Ces baies sont géographiquement séparées par le massif de Bouzaréah et le cap d'El Marsa (Bakalem, 2008). Par contre, en face des baies où l'orogénie est peu active, le plateau est plus développé (baie de Bouismail, d'Alger et de Zemmouri) et où se trouve les cours d'eau les plus importants (CNERU GROUPE, 2004).

La cartographie permet d'évaluer le littoral à l'échelle régionale, en termes de comportement probable de chaque type côtier (Fairbank et al., 2006). L'élaboration d'une carte synthétique de la géomorphologie côtière (Figure I-17) permet d'avoir une vue d'ensemble des différents traits morphologiques de la zone.

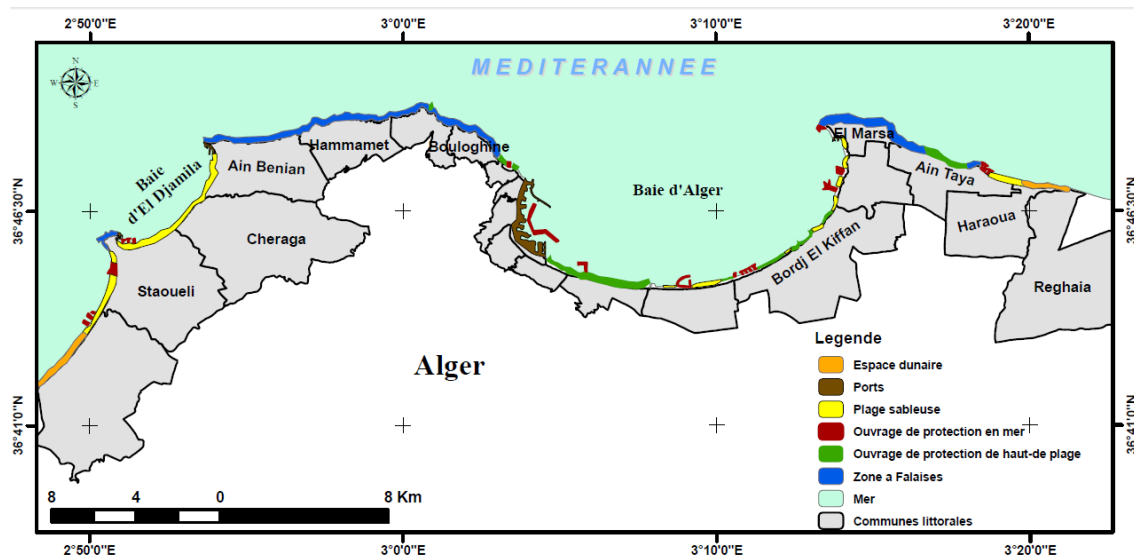


Figure I-17: Distribution simplifiée des différents types géomorphologiques de la côte de la wilaya d'Alger.

1.4.3.2 Les cordons dunaires

Les grands champs de dunes accompagnent presque toujours les plages bien alimentées en sable (Paskoff, 2010). Le système plage-dunes doit être considéré comme un système unique. L'évolution de la côte dépend du bilan sédimentaire de ce système, qui doit être évalué et suivi au sein des différentes cellules hydro-sédimentaires, unités fonctionnelles de base du fonctionnement côtier (Ley de la Vegal et al., 2012).

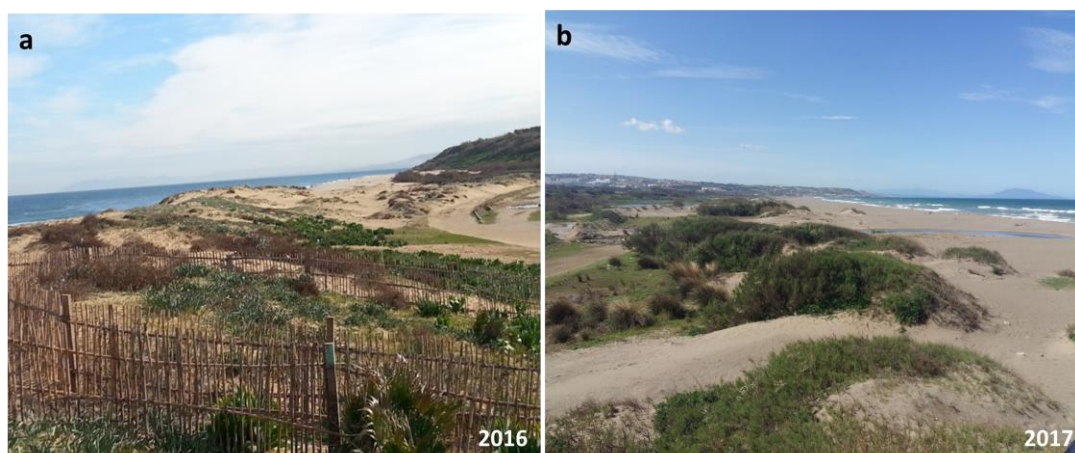


Figure I-18 : Systèmes dunaires à Alger ; **a :** Dunes de Kadousse, **b :** Dunes de Zéralda.

Malencontreusement, le long de la côte algéroise, la dégradation des systèmes dunaires est essentiellement due à la grande urbanisation, les constructions incontrôlées des structures de plage et l'extraction de sable pour les constructions (Amis, 2004). A l'heure actuelle, seulement deux entités dunaires subsistent sur son rivage, les dunes du Mazafran (Commune de Zéralda) à l'Ouest et celles d'El Kadousse (Commune de Heuraoua) à l'Est (Figure I-18-a et b). Les observations menées sur terrains ont permis de constater quelques traces d'existence de dunes quasi ou complètement dégradées (Figure I-19-a), notamment dans le secteur qui couvre la partie entre la plage Est de Sidi Fredj (commune de Staoueli) jusqu'au niveau de la plage les Dunes (commune de Chéraga), zone adjacente à l'embouchure de l'oued Beni Messous (Figure I-19-b).



Figure I-19 : Traces de systèmes dunaires à Alger ; a : plage el Bahdja ; b : Dunes de Réghaïa.



Figure I-20 : Sidi Fredj avant/après ; a/a' : Plage EST (1959-2019) ; b/b' : Plage El Riadh (1959-2019).

1.4.3.3 Les plages

La majorité des plages de la zone d'étude sont sableuses, qui ne diffèrent que dans la forme entre plage rectiligne et de poche ou de pied de falaise.

La zone algéroise est caractérisée par l'abondance des plages sableuses ouvertes le long de la baie d'El Djamilia jusqu'au oued Mazafran dans le secteur Ouest, des plages plus réduites par l'effet de l'érosion entre l'oued El Harrach et l'oued El Hamiz au centre ainsi que de larges plages sableuses présentes au-delà de la zone de Ain Taya jusqu'au niveau de l'embouchure de l'oued Reghaia. Pour le secteur Bab El Oued- Hammamet, on dénote la présence des plages en poche et de pied de falaises au niveau du linéaire rocheux au centre (Tableau I-2, Annexe N°02).

1.4.3.4 Les falaises

Le terme de « falaises côtières » se réfère aux pentes raides le long de la ligne de côte. Le terme escarpement se réfère aux pentes érodées le long des océans et des lacs. Falaise et pente comprennent les façades verticales inclinées sur la ligne de rivage où une rupture de pente est formée par écoulement ou érosion côtière (Amis, 2004).



Figure I-21 : Effondrement des falaises à Ain Taya ; a et b: Facteur lithologique ; c: Facteur marin.

Les falaises et les côtes rocheuses sont localisées dans différentes régions de la zone d'étude (Tableau I-3) (Annexe N°3). D'Ouest en Est, elles sont à la fois vives et mortes, notamment dans la partie Ouest où des plages de sable fin à moyennement grossier, arrivent jusqu'aux pieds de ces dernières (CNERU GROUPE, 2004). Elles présentent également dans certains secteurs une érosion très rapide, où on dénote un recul très prononcé des falaises de Zerzouria (ex Soufrran) dans la commune de Ain Taya. Cette dynamique semble être favorisée par le facteur lithologique ainsi qu'à l'exposition à l'hydrodynamisme marin (Figure I-21).

1.4.4 Cadre géologique

1.4.4.1 Géologie régionale

La géologie de la région algéroise connue sous le nom de massif d'Alger (Sekkal, 1986), est constituée d'un socle métamorphique primaire au niveau de cap Matifou et au mont Bouzaréah (Figure 1-22), bordée de part et d'autre de dépôts sédimentaires du Sahel et de la Mitidja (Messaoud, 1987), (Annexe N°04).

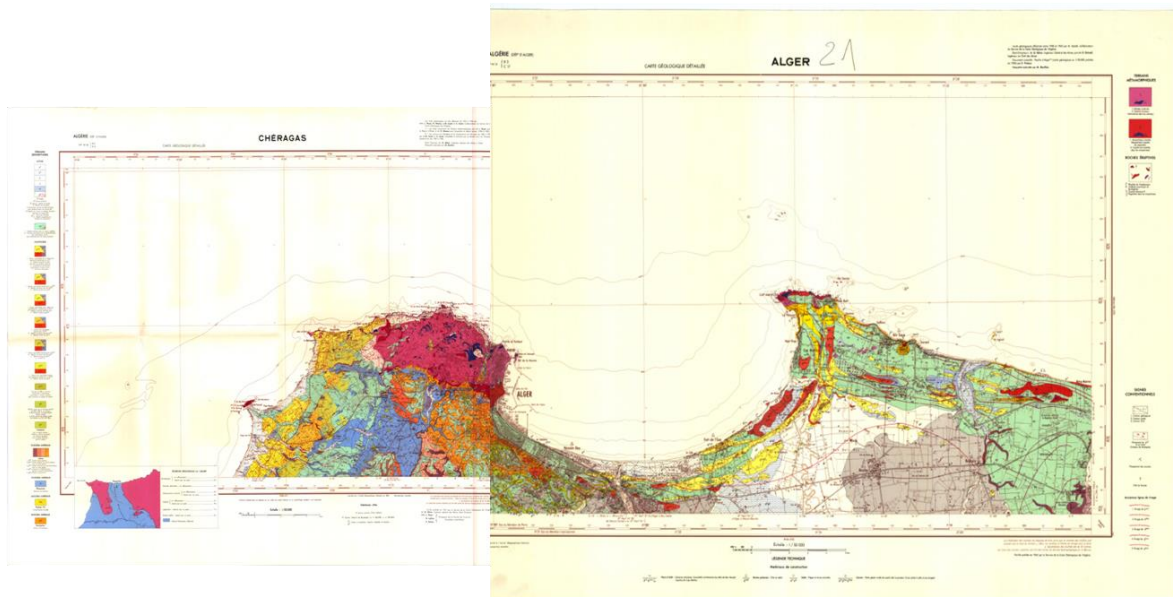


Figure I-22 : Carte géologique de la zone d'étude (Glangeaud, 1963), (Source : INCT).
(Pour une meilleure visibilité la carte est présentée en annexe N°04).

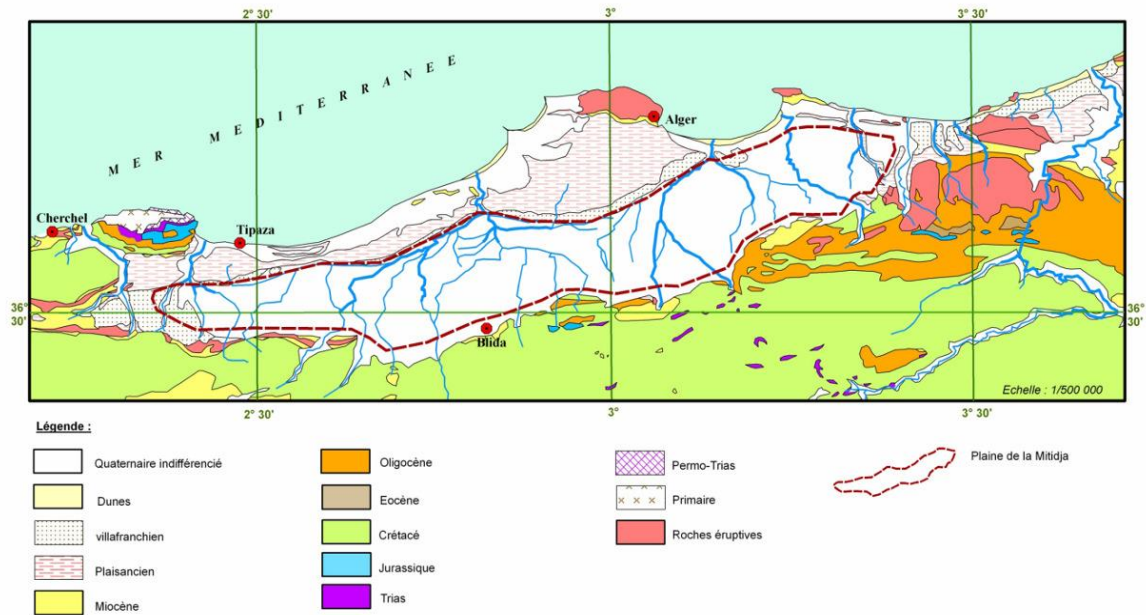


Figure I-23 : Carte géologique simplifiée de la plaine de la Mitidja (PNE, 2010).

1.4.4.2 Stratigraphie de la région

La région d'Alger a connu une très grande lacune de sédimentation au cours du Secondaire et de base du Tertiaire (Éocène-Oligocène). Seuls le Primaire et le Mio-plio-quaternaire y sont représentés, mais la formation la plus importante est celle du quaternaire (Bougherara, 2011).

Le faciès du Quaternaire marin, largement représenté tout le long du littoral, présente une succession de couches qui débutent par un calcaire coquillier (connue aussi sous le nom de lumachelle), puis viennent ensuite un grès, les dépôts de plage (qui terminent l'épisode marin) et enfin les dépôts dunaires, plus lapidifiés (terrasses plus récentes)(Figure I-23). Les dépôts marins peuvent atteindre 10 mètres d'épaisseur alors que les dépôts éoliens atteignent une trentaine de mètres d'épaisseur (Sogreah, 2010).

1.4.4.3 Géologie locale

Plusieurs faciès se distinguent le long du littoral, on distingue essentiellement (Figure I-24) :

Le Quaternaire est la principale formation géologique qui domine le littoral Est Algérois. Cela révèle que la lithologie de cette zone est peu résistante, mis à part le massif ancien de cap Matifou qui est formé de terrains métamorphiques du socle Kabyle.

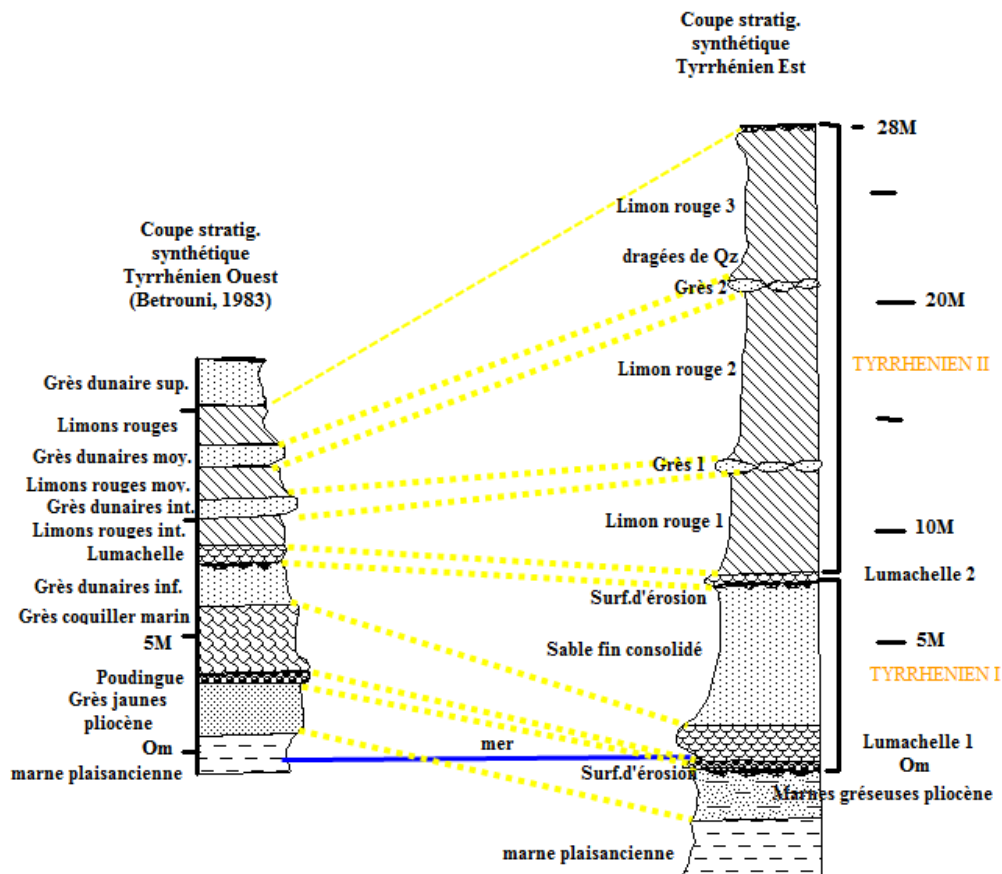


Figure I-24 : Stratigraphie des couches géologiques des régions Est et Ouest (Betrouni, 1983. in Bouhamadouche, 2012)

Les formations tertiaires se traduisent comme des formations du Burdigalien situées entre El Marsa et Ain Beida. Elles sont représentées par une épaisse série argilo-marneuse grise à bleue grise. Au niveau des cassures, elles montrent des feuilles très minces dans un matériau friable. Des bancs de grès décimétriques à métriques s'intercalent dans les niveaux argileux marneux. Le granulo-classement décroissant de la base au sommet des couches est fréquent dans ces grès et dont la couleur varie du gris au beige (Agabi et Benbrahim, 2018).

Dans les formations du Quaternaires, on distingue les formations calabriennes et villafranchiennes à matériels dunaires et caillouteux des formations tyrrhéniennes réparties en terrasses marines à lithologie dominée par le quartz « pilulaire ».

Le massif de Bouzaréah ou le massif d'Alger est un relief constitué de roches cristalphylliennes, de mica et de schiste. Les bords Nord de ce massif sont caractérisés par des barrières de terrasses marines. Le substratum métamorphique de la presqu'île de Sidi

Fredj et d'El Marsa est constitué de granites et de gneiss largement fissurés et diaclasés (Nadir, 2016).

1.4.5 Cadre sismique

La zone côtière algérienne et le Tell constituent des zones de forte sismicité. Des séismes dévastateurs y ont été enregistrés. L'ampleur des dégâts est due non seulement à la magnitude atteinte et au caractère superficiel des séismes, mais également au fait que la majeure partie de la population algérienne y réside.

L'activité sismique génère également des risques de tsunamis. Un risque naturel majeur pour l'aménagement du littoral qui se trouve aggravé par la croissance démographique que continue actuellement à connaître la région algéroise.

Tableau I-2. Quelques séismes enregistrés sur le sahel algérien (Matev, 2013).

Séisme	Année	Failles
Alger	1365	Sahel
Mitidja	1716	Blida
Oran	1790	Sahel
Blida	1825	Blida
Jijel	1856	Sahel
Gouraya	1891	Sahel
El Asnam	1954 (Ms 6,7) et 1980 (Ms 7,3)	Sahel
Boumerdès	2003(Mw 6,8)	Sahel

Selon le rapport de vulnérabilité établie en 2013 par le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de la ville, il est proposé de retenir que :

- Les séismes de référence de période de retour de 475 ans relatifs aux failles du Sahel et de Blida ;

- La faille du Sahel semble la plus dangereuse, sur une grande partie du secteur algérois (Figure I-25).

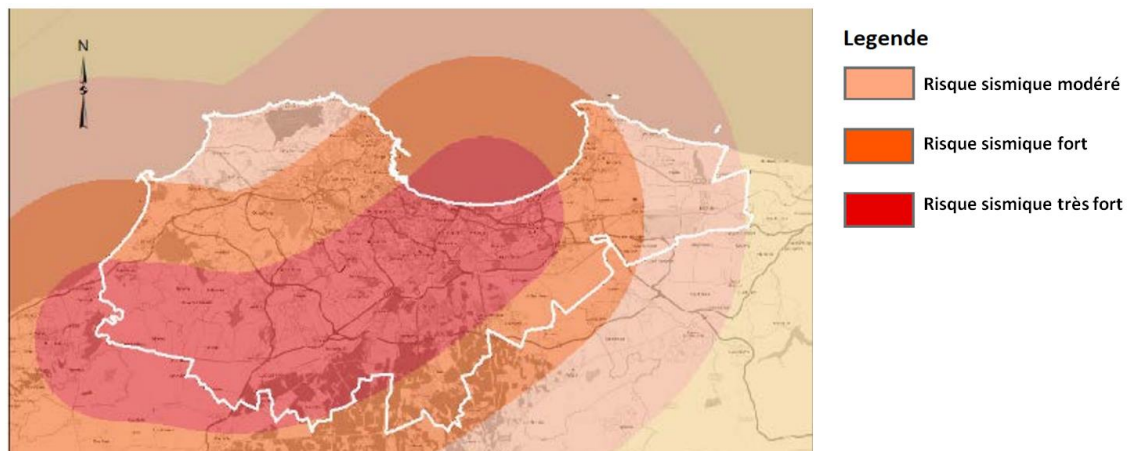


Figure I-25 : Secteurs les plus affectés par les séismes dans la région algéroise (Matev, 2013).

1.4.6 Cadre géotechnique

L'analyse du comportement géotechnique de la zone est un atout pour le processus de gestion des risques et des aléas côtiers. Elle exige une connaissance approfondie des faciès lithologiques, de l'hydrologie de surface et sous terraine, ainsi que les pentes et la topographie des reliefs.

La région algéroise présente des reliefs par endroits prononcés, source d'une certaine instabilité des terrains naturels. On distingue trois principaux types de mouvements de terrain dans la zone d'étude :

- Les glissements de terrain superficiels soudains, pouvant se transformer en coulées de boue,
- Les glissements de terrain progressifs, au rang desquels on compte, notamment les fluages,
- Les chutes de pierres et de blocs.

Une carte indicative de l'aléa mouvements de terrain a été réalisée dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité et des glissements de terrains effectuée par le (BRGM, 2005). En tenant compte de la topographie et de la nature du sous-sol, des zones à risque ont été révélées, notamment dans le secteur littoral dans la zone algéroise (Figure I-26). Deux zones se distinguent particulièrement, il s'agit du massif de Bouzaréah au Nord de la wilaya (Figure I-27, a) et de la partie Ouest du chaînon du Sahel (Figure I-27, b).

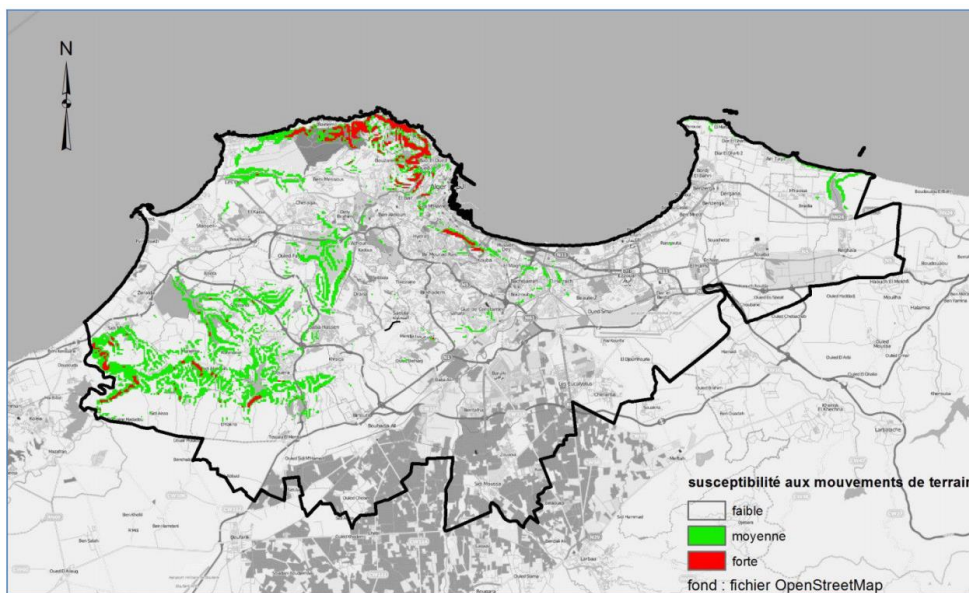


Figure I-26 : Carte indicative de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la wilaya d’Alger (Matev, 2013).

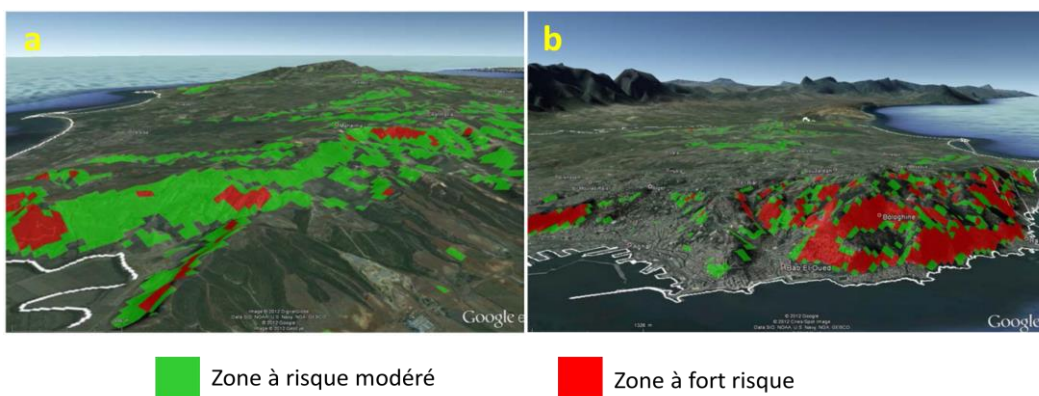


Figure I-27 : Projection en 3D des zones à risque (Matev, 2013).

La projection réalisée ne tient pas compte des remblais, talus superficiels et colluvions. Mais dans ces zones très fortement anthropisées, il convient de noter que celles-ci peuvent être plus particulièrement exposées au déséquilibre des versants. A cette échelle, l’interprétation ne tient pas compte, non plus, de la propagation des mouvements de terrain ; cela est d’autant plus important à noter dans le cas des glissements de terrains qui peuvent évoluer en coulées de boue (Figure I-28 et I-29).

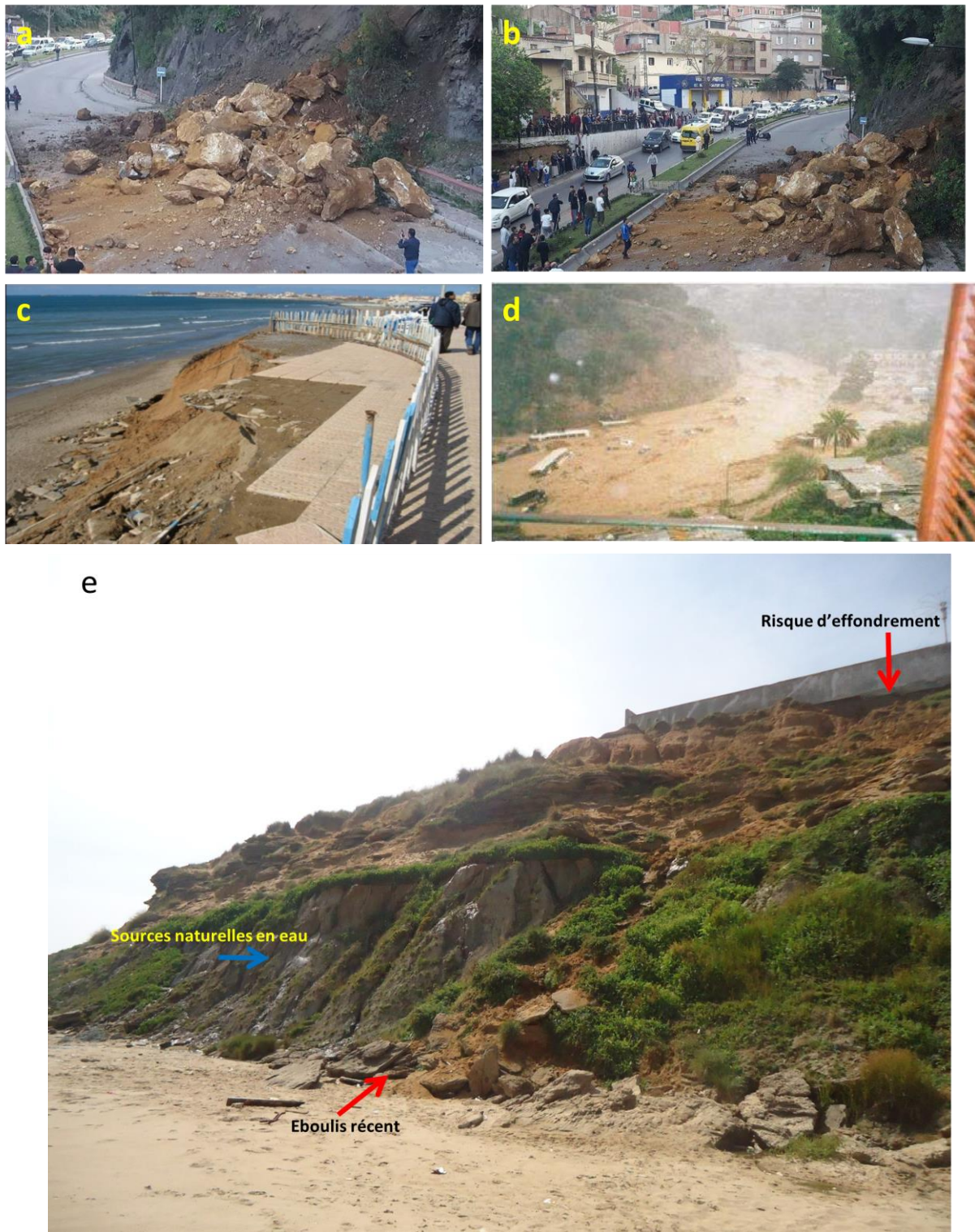


Figure I-28 : Risque côtier : **a et b** : Effondrement des falaises (Bab El Oued 2016) ; **c** : Effondrement du talus de la plage de Palm Beach (2009) ; **d** : Coulée de boue (Bab El Oued 2001) ; **e** : Glissement de terrain (Réghaia 2014).

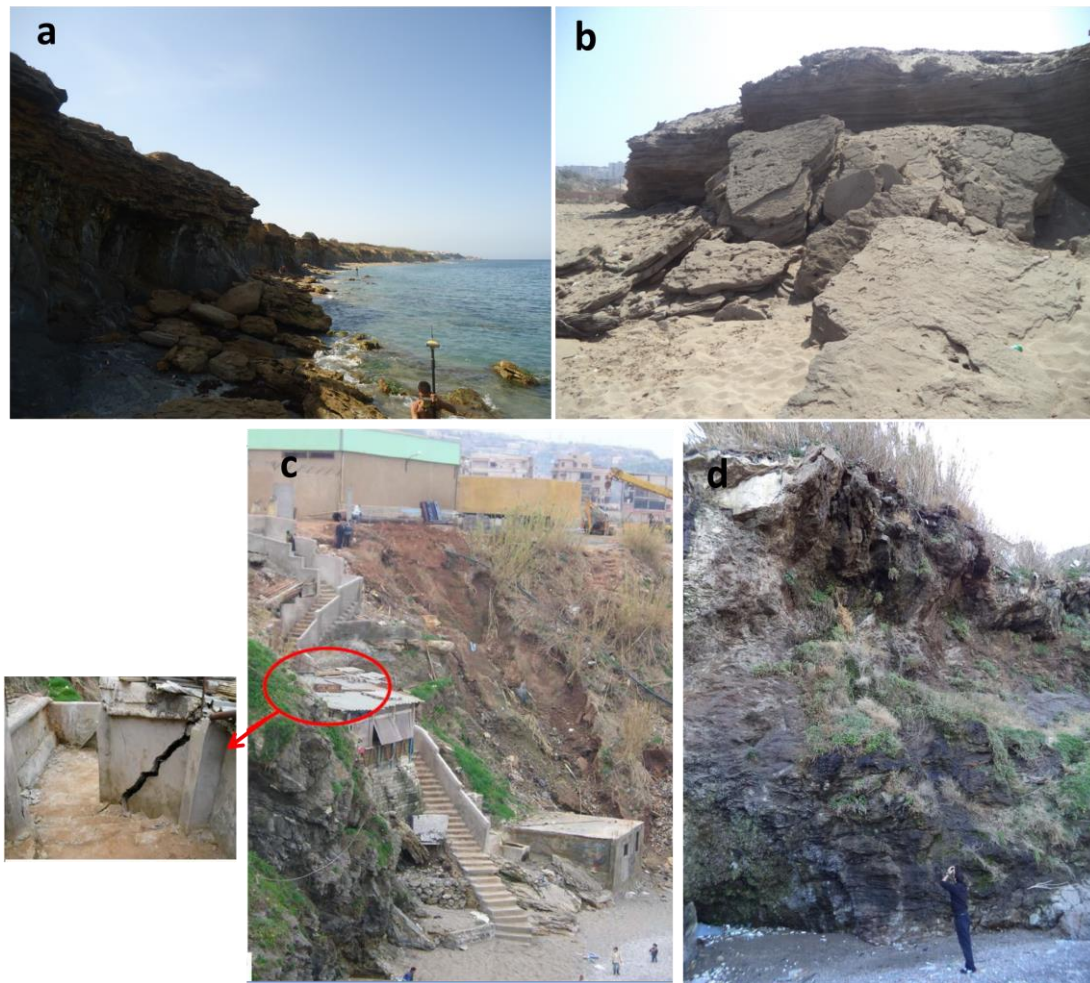


Figure I-29 : Risque côtier ; **a** : Effondrement des falaises (Ain Taya 2015) ; **b** : Effondrement de dunes consolidées (El Bahdja 2016) ; **c** : Glissement de terrain (Hammamet 2005-2014) ; **d** : Risque d'effondrement de falaises (Rais Hamidou 2016).

1.5 Conclusion du chapitre

A travers cette osculation générale, le système côtier à Algérie présente comme un système riche et variable, mais aussi, fragile et fragilisé. Un diagnostic plus poussé s'avère nécessaire pour mieux cerner ce système, comprendre son fonctionnement à travers l'étude des facteurs et des processus qu'ils engendrent et ainsi, tenter d'évaluer sa vulnérabilité.

Chapitre II : Diagnostic de la zone et évaluation des facteurs à impact sur le fonctionnement hydro-sédimentaire

2.1 Etude climatique et hydrographique

2.1.1 Cadre climatologique

2.1.1.1 Données climatologiques

La détermination du caractère climatique est très importante pour mieux apprécier les régimes hydrodynamiques se déployant dans notre zone d'étude et qui sont responsables de toute transformation morpho-sédimentaire.

L'irrégularité du régime climatique et l'alternance de deux saisons nettement contrastées, constituent les éléments fondamentaux du climat des pays du Sahel. La zone algéroise comme l'ensemble de la côte algérienne est caractérisée par un climat méditerranéen tempéré, relativement froid et humide en hiver, chaud en été.

La proximité de la mer confère à ces régions un climat remarquablement tempéré, dû à l'effet modérateur de la mer. Les données climatiques (précipitations et températures) restent à peu près voisines et uniformes sur le Sahel et dans la plaine de la Mitidja (légères variations dues à la disposition géographique de chaque ensemble) (Otmani, 2014).

Des données historiques infra-journalières brutes du climat local sont disponibles sur le site WINDGERU (observations au niveau de la station « Algiers » de la période entre 2005 et 2017).

Station : Algiers (Alger) Période : 01-01-2005 – 31-12-2017

Altitude : 154 m Latitude : 36,78 N Longitude : 03,05 E

Un complément de données historiques infra-journalières brutes du climat local ont été obtenues du site ("Réelles prévisions", rp5.ru), les observations sont de la station « Alger (port) ».

Station météo : Alger (port), Algérie Altitude : 8 m

Latitude : 36,77° N Longitude : 3,10°E

Afin de traiter convenablement ces données, une Macro a été programmée sous Excel, les résultats sont exprimés Sous forme de tableaux récapitulatifs (Annexe N°05) et en graphiques représentatifs des différents paramètres climatologiques (Figure II-2, 3, 4 et 10).

2.1.1.1.1 Les précipitations

L’analyse des données de précipitations sur les 12 ans a permis de distinguer deux saisons : une première très pluvieuse qui s’étale du mois de Septembre jusqu’au mois de Mai, avec une moyenne maximale de 97,76 mm/mois observé au mois de Février et une autre, plutôt sèche, allant du mois de Juin au mois de Septembre, avec une moyenne minimale de 5,97 mm/mois. Il existe cependant, une période transitoire entre Avril et Mai qui indique la fin de la période des tempêtes (Figure II-1).

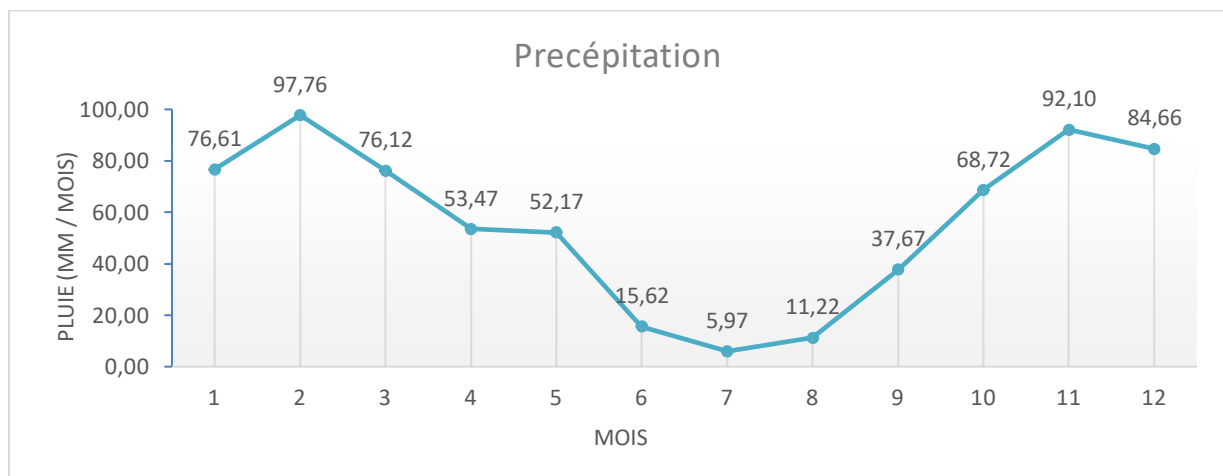


Figure II-1 : Variations de moyennes mensuelles des précipitations dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).

L’analyse des variations des moyennes annuelles des précipitations sur la période entre 2005 et 2017 révèle une variation dans le régime des précipitations qui avoisine les 600 mm entre 2005 et 2010, puis un pic dépassant les 1006 mm en 2013, pour revenir au régime habituel en 2014 (Figure II-2).

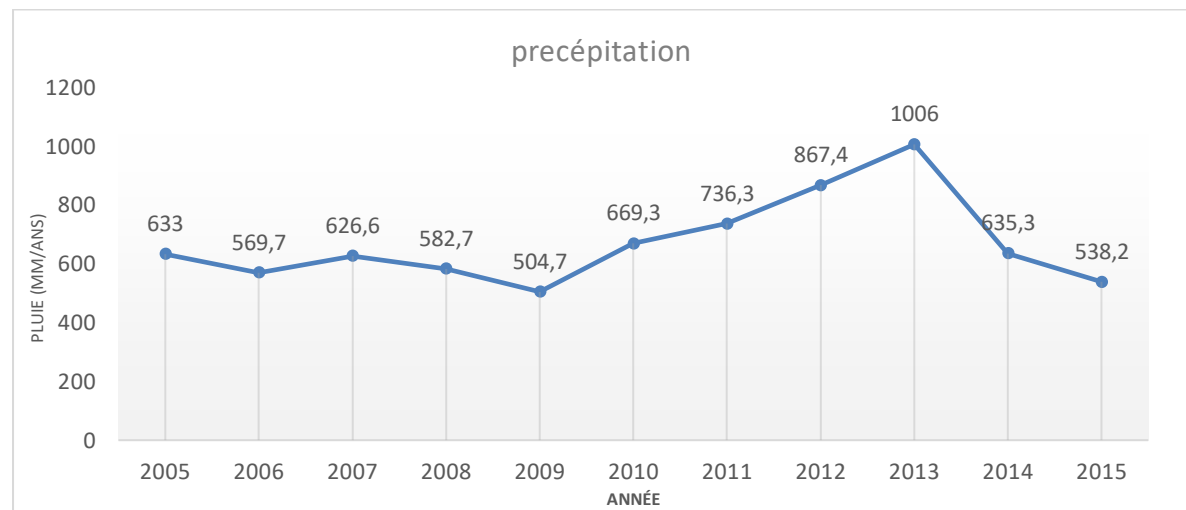


Figure II-2 : Variations des moyennes annuelles des précipitations dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).

2.1.1.1.2 La température

L’analyse des températures mensuelles enregistrées pendant 12 ans (entre 2005 et 2017) montre une moyenne annuelle de température de 18,66°C, Ou la température moyenne maximale enregistrée est observée pendant le mois d’Août (26,5°C) avec un écart à la moyenne de 03 à 04 °C.

La valeur moyenne minimale de température est enregistrée pendant la saison hivernale Durant le mois de Février (12°C) avec un écart à la moyenne d’environ 02 à 03°C (Figure II-3).

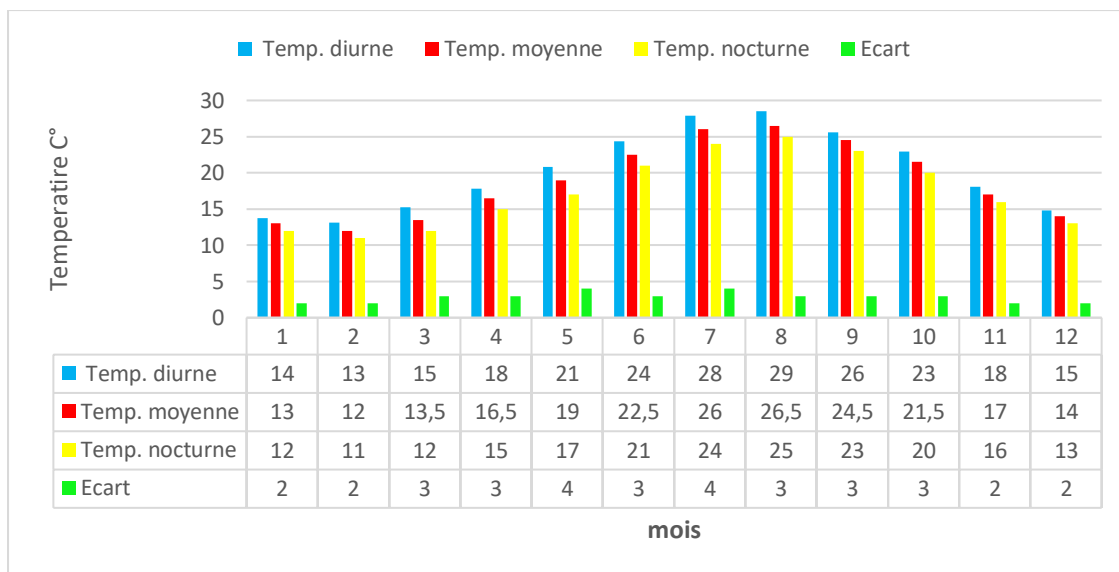


Figure II-3 : Températures moyennes en °C, (Données windguru, 2005-2017).

2.1.1.1.3 Intérêt et impact

La battance

L’impact des gouttes de pluie désagrège et disperse les éléments superficiels meubles alors que les éléments grossiers sont déplacés par les chocs et par les rebondissements : les déplacements peuvent atteindre plus d’un mètre (Bourti et Henda, 2014).

Le ruissellement

L’écoulement de l’eau exerce un effet de cisaillement sur les particules à la surface du sol. Après une forte pluie, les eaux empruntent les fissures du sol et les élargissent progressivement en chenaux parallèles qui fusionnent par l’écroulement des crêtes qui les

séparent. En même temps, les têtes de chenaux reculent vers l'amont (érosion régressive) (Bourti et Henda, 2014).

L'effet gel-dégel

Cet effet est très peu perçu dans notre zone d'étude, il s'agit des migrations d'eau générées par les différences de pression résultant du changement de phase. Ce phénomène est apte à diminuer la résistance de la matrice rocheuse ou à augmenter la contrainte générée lors du cycle de la dilatation volumique de l'eau lors de son passage de l'état liquide à l'état solide et cela après l'infiltration.

2.1.1.1.4 Les vents

Le vent est un élément important dans la dynamique des eaux marines. En effet, il est à l'origine des houles, des clapots (déferlement au large) et des courants superficiels par frottement à la surface (Salomon, 2008 ; MIOSSEC, 2009). Aussi, il est le moteur essentiel intervenant dans la génération des vagues qui régissent l'évolution, la mobilité et la reconstitution des dunes (MIOSSEC, 2009). Par ailleurs, il intervient aussi dans l'érosion mécanique des falaises (Agabi et Benbrahim, 2018).

Sélection des données :

L'analyse du régime des vents locaux des dernières années a été effectuée à partir de deux sources de données météorologiques afin de comparer et valider la fiabilité des sources :

- Des données windguru de la station Algiers (2005 à 2017) ; la station Alger (port), obtenues du site ("Réelles prévisions", rp5.ru), mesures de vitesses chaque trois (03) heures de 1h à 22h, (2008-2017) ;
- Des données du site internet windfinder ; (2012 et 2016), à partir des enregistrements infra-journaliers (intervalle de trois heures) de 7 h à 19 h au niveau de la station « Port d'Alger ».

L'analyse statistique des données du vent a permis de déterminer les fréquences d'apparition des vents par secteurs à deux échelles : annuelle et saisonnière.

Echelle annuelle : les vents dominants sont de secteur NE avec une fréquence moyenne de 11.4 % et un champ de vitesse moyen entre 3 et 9 m/s. Les vents calmes représentent 42.8 % (Figure II-4).

Echelle saisonnière : Les figures II-5, 6 et 7, ci-dessous, ont bien montré l'abondance de deux régimes : hivernale et estivale.

La période hivernale : les vents abondants sont de secteur O à NO avec une fréquence de 8 % et un champ de vitesse moyen de 3 à 9 m/s avec une fréquence de 37 %. Cette période est caractérisée par l'apparition des vents de tempêtes avec des vitesses supérieures à 12 m/s d'une fréquence moyenne de 3 %.

La période estivale : les vents qui dominent sont de secteur NE à NNE avec une fréquence d'apparition de 12.63 %, le champ de vitesse est de 3 à 8 m/s avec une fréquence de 40.24 %.

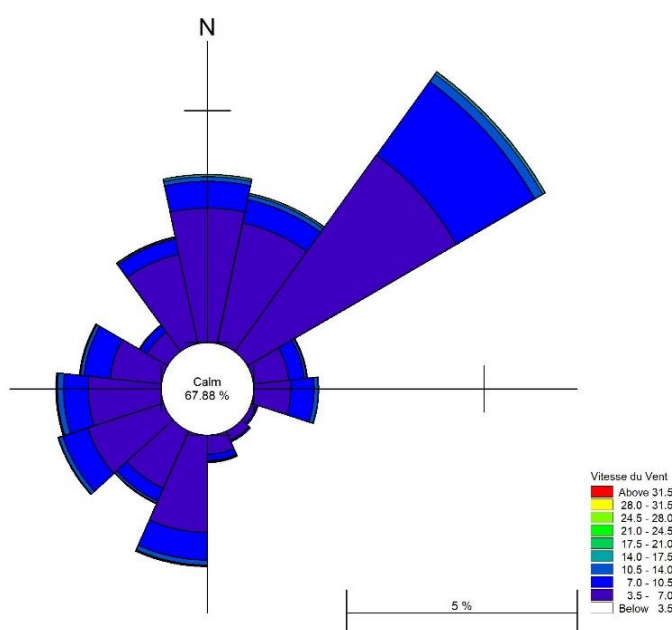


Figure II-4 : Répartition annuelle des vents en %, Station port d'Alger (2008-2017).

Les mesures issues de la station d'Alger (Port) indiquent que les vents soufflent environ 32% du temps dans la région. Cependant, les vents les plus importants (secteur NE) ne représentent que 6.5%.

La période hivernale

Les vents dominants dans cette période sont de secteur Sud à Sud-Sud-Ouest avec une fréquence d'apparition de 8.5 % et un champ de vitesse moyen de 4 à 9 m/s. La période hivernale est caractérisée par l'apparition des vents de tempêtes avec des vitesses qui peuvent dépasser les 13 m/s.

La période estivale

Les vents les plus abondants sont de secteur Nord à Nord-Est avec une fréquence d'apparition de 19.5 % et un champ de vitesse moyen de 2.5 à 9 m/s.

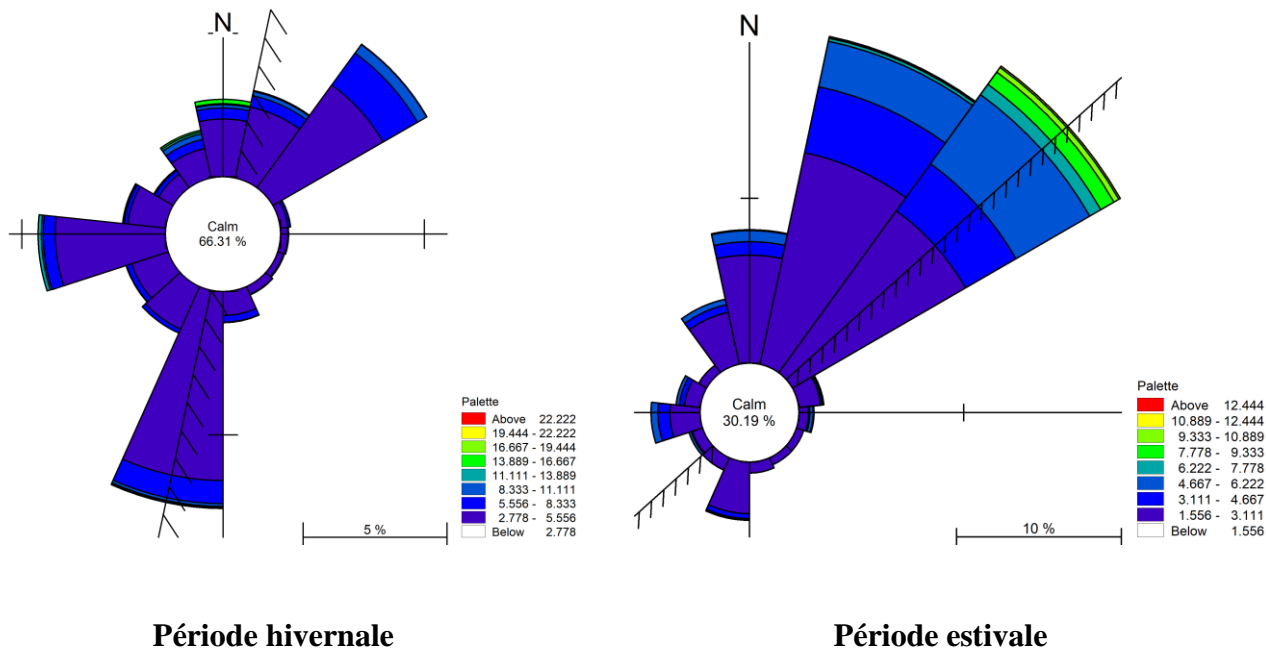


Figure II-5 : Roses récapitulatives saisonnières des fréquences d'apparition du vent au large en fonction de leurs vitesses. Région algéroise (Données windguru, 2005-2017).

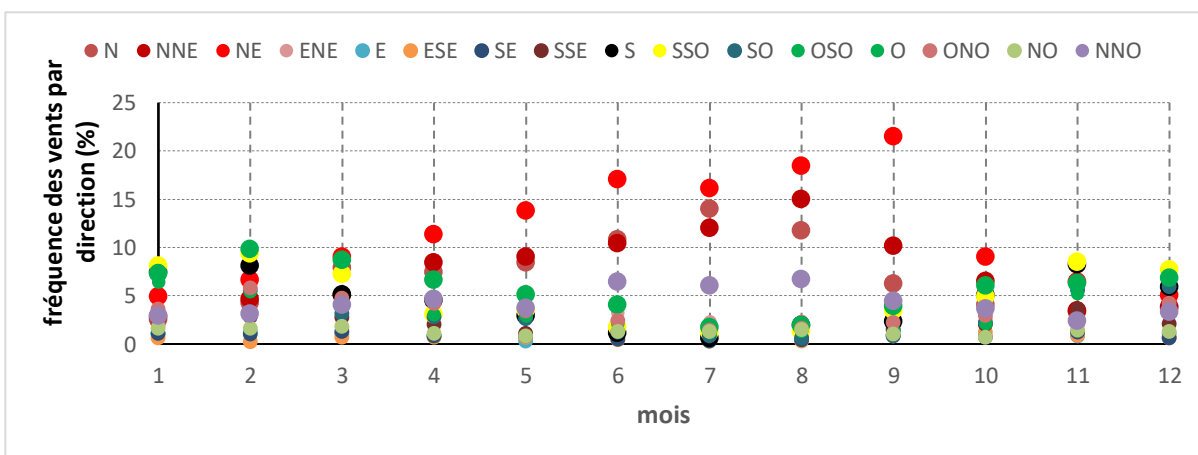


Figure II-6 : Abondance mensuelle des secteurs d'apparition des vents dans la région algéroise (Données windguru, 2005-2017).

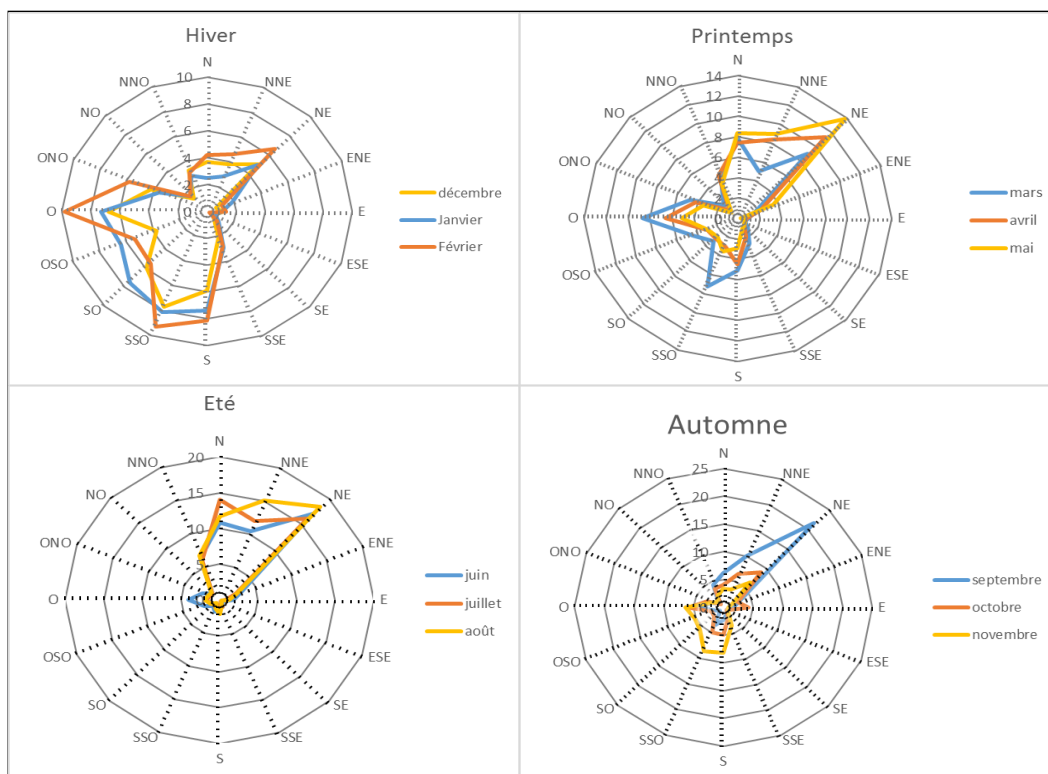


Figure II-7 : Roses des vents saisonniers : station Algiers (Données windguru, 2005-2017).

2.1.1.2 Conclusion

La côte algéroise bénéficie d'un climat tempéré connu pour être chaud et sec pendant une longue saison estivale et douce et humide pendant l'hiver. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes (Figure II-8).

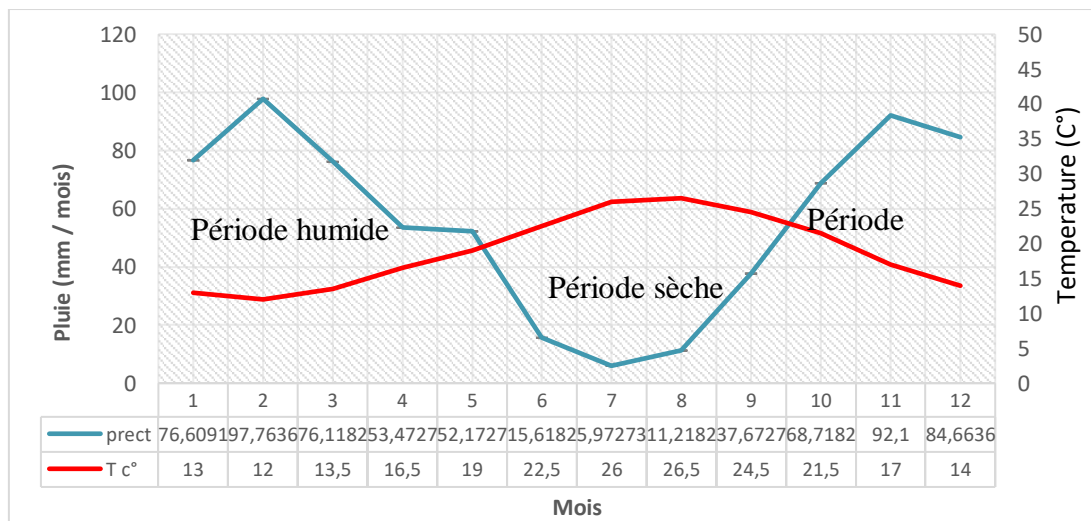


Figure II-8 : Diagramme ombrothermique de Gausse dans la région algéroise (2005-2017).

2.1.2 Cadre hydrographique

La mer ne produit plus de sédiments, au contraire elle en consomme. Les cours d'eau représentent la source majeure des sédiments charriés des bassins versants vers la zone côtière. Le réseau hydrographique de la côte algéroise est constitué essentiellement de cinq cours d'eaux importants qui semblent influencer la morpho-dynamique côtière ; la zone d'étude étant comprise entre l'oued Mazafran et l'oued Réghaia (Figure II-9).

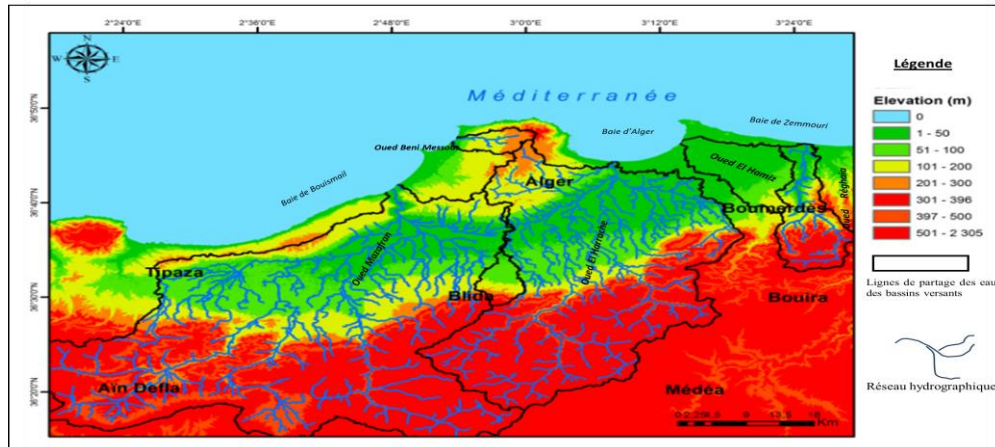


Figure II-9 : Bassins versants et réseau hydrographique de la côte Algéroise (USGS, 2016).

La région algéroise est alimentée en apports par les oueds, ces cours d'eau prennent leur source dans l'Atlas Blidéen, parcours la plaine de la Mitidja avant de déboucher en mer (Figure 2-2). Les régimes hydrauliques de ces oueds se caractérisent par un long étiage et des crues observées surtout en hiver (Abderrahman et Khedimi, 2008).

La nature des apports en suspension présente également une large variabilité dans le temps. Les suspensions Hivernales presque entièrement minérales et très abondantes pendant les crues, fournissent l'essentiel des apports à la mer. Les suspensions d'été, à peu près exclusivement organiques, sont assez abondantes (LEM, 1999).

2.1.2.1 Inventaire des cours d'eau dans la zone d'Alger

Les bassins de drainage les plus importants de la zone côtière d'Alger sont le bassin de la côte Algéroise (Figure II-10).

2.1.2.1.1 L'Oued Mazafran

Son embouchure se situe à la frontière Ouest de la wilaya d'Alger (figure II-11. a) au niveau de la commune de Zéralda (plage de Khaloufi 2). Il est caractérisé par un vaste bassin versant (1889 km²) dont les terrains sont d'âge et de faciès différents (Bensalah, 2016).

L'oued Mazafran prend source au niveau de la plaine de Matidja, c'est un oued à fort débit (le plus important des cours d'eau dans la région d'Alger) (Berkennou, 2012). Ce qui le rend un acteur important dans l'évolution de la morphologie côtière de la baie de Bou-ismail ainsi que la dynamique hydro-sédimentaire de la côte Ouest algéroise. Cet oued est formé principalement par la confluence de trois (3) oueds secondaires : Oued Djer, Oued Bouroumi et Oued Chiffa. Les aménagements existants sur ce cours d'eau sont : les barrages de Béni Amrane, de Ladrat et de Koudiat Asserdoun.

2.1.2.1.2 L'Oued Beni Messous

Débouche dans la baie d'El Djamilia au niveau de la plage El Bahdja (ex les Dunes), dans la limite entre les communes de Ain El Benian et Chéraga (figure II-11. b), son bassin versant est relativement réduit (33 km²), son débit est y proportionnel (200 tonnes/km²/an).

2.1.2.1.3 L'Oued El Harrach

Son bassin versant couvre une superficie de 966 km² et englobe en plus d'oued El Harrach, les oueds Djemaa à l'Est et Terro à l'Ouest. Il s'écoule du Sud vers le Nord à travers l'atlas Blidéen, la Mitidja et le Sahel où finalement il débouche en mer séparant les plages Piquet blanc et Mazela (figure II-11.c).

Le bilan des écoulements moyens annuels est de 950 tonnes/km²/an. L'oued El Harrach est connu par le fait de recevoir tous les rejets urbains, industriels et agricoles de la région. Les travaux d'aménagement dans la cadre de la création de la grande corniche « les Sablettes » ont impliqués l'endiguement de ses berges et par conséquent la fixation de l'emplacement de l'embouchure.

2.1.2.1.4 L'Oued El Hamiz

La superficie du bassin versant de l'Oued El Hamiz est de l'ordre de 160 km². Son embouchure se situe au niveau de la plage Stamboul et sépare les deux communes de Bordj el Kiffan et Bordj El Bahri (figure II-11. d).

L'oued El Hamiz compte de nombreux affluents dont les principaux sont (Abderrahman et Khedimi, 2008) : Oued Seguia et Oued Bareki (dérivé artificiellement dans l'oued El Hamiz). La présence du barrage d'El Hamiz réduit considérablement ses apports solides vers la mer (LEM, 1999 ; Otmani et al., 2019).

2.1.2.1.5 L'Oued Réghaïa

Il parcourt la partie orientale de la plaine de la Mitidja et traverse la ride sahélienne au Nord, au contact de laquelle se forme le marais de Réghaïa. Ce dernier croise en aval un cordon dunaire qui modifie son trajet vers l'Est pour enfin se jeter en mer (figure II-11.e). Les observations sur terrain ont permis de constater deux réorientations de l'embouchure du cours d'eau de Réghaïa (Figure II-12). En 2020, elle se trouve au niveau de la plage Réghaïa.

L'oued s'allonge sur 17 km, son bassin versant occupe une superficie de 63 km². Cet oued est lui-même attenant à deux affluents, à savoir oued Guesbai et oued Berraba.

Selon (Mezhoud, 2011) deux autres oueds secondaires font aussi partie du réseau hydrographique local à l'Est de la région :

- **L'oued El Biar** : sa longueur est de 4075 m et son bassin versant de 20 km². Cet oued prend naissance aux environs de la zone industrielle Rouiba-Réghaïa et traverse en grande partie des champs avant de se déverser au niveau du lac Réghaïa.
- **L'Oued Boureah** : c'est un affluent d'oued el Hamiz qui draine les eaux de ruissellement des terres agricoles de la Mitidja Nord-Est. La superficie de son bassin versant est de 20 km².

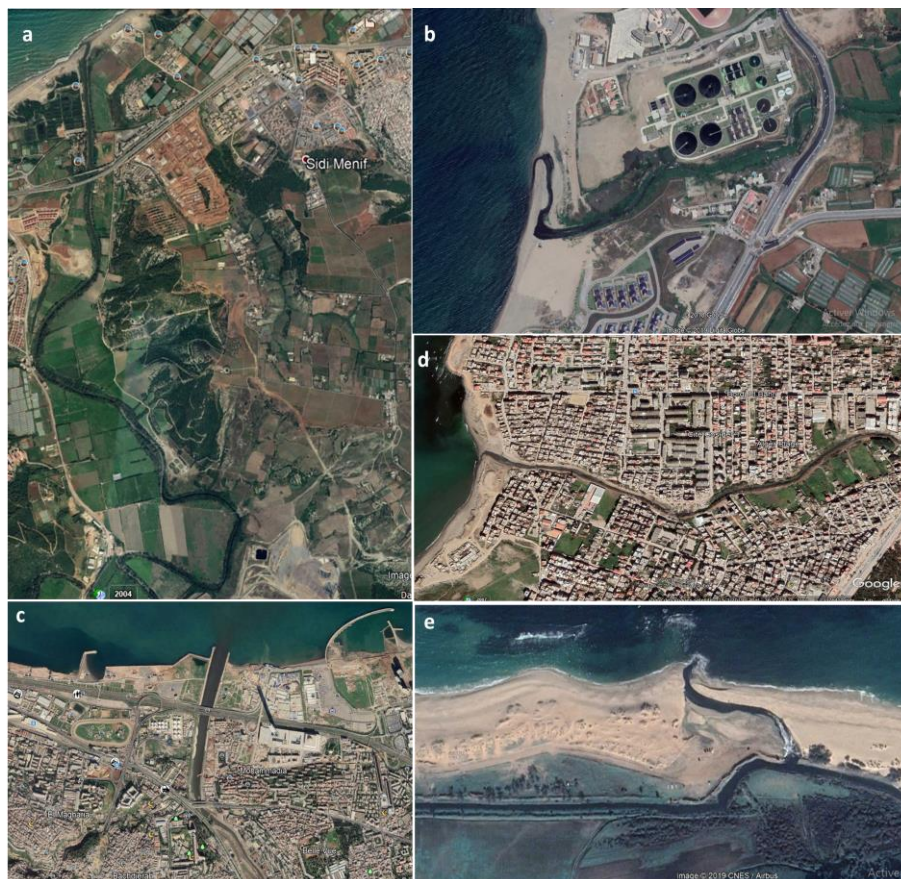


Figure II-10 : Cours d'eau au niveau de la zone d'étude ; **a** : oued Mazafran, **b** : oued Beni Messous, **c** : oued El Harrach, **d** : oued El Hamiz, **e** : oued Reghaia.

Tableau II-1 : inventaire des cours d'eau dans la zone d'Alger (ENSH, 2019).

Cours d'eau	Apports solides (moyenne annuelle) (t/km ² /an)	Longueur du principal cours d'eau (km)	Superficie du bassin versant (km ²)
L'oued Mazafran	1610	99	1889
L'oued Beni Messous	200	-	33
L'oued El Harrach	950	59	966
L'oued El Hamiz	730	60	160
L'oued Réghaia	400	17	63

2.1.2.2 Pressions anthropiques sur les ressources en eau et impact sur l'apport sédimentaire

Les ressources en eau en Algérie se trouvent en équilibre fragile, à cause de la pollution, des activités humaines, de l'augmentation de la demande d'eau, des changements climatiques et de la diminution des précipitations (PAC, 2004).

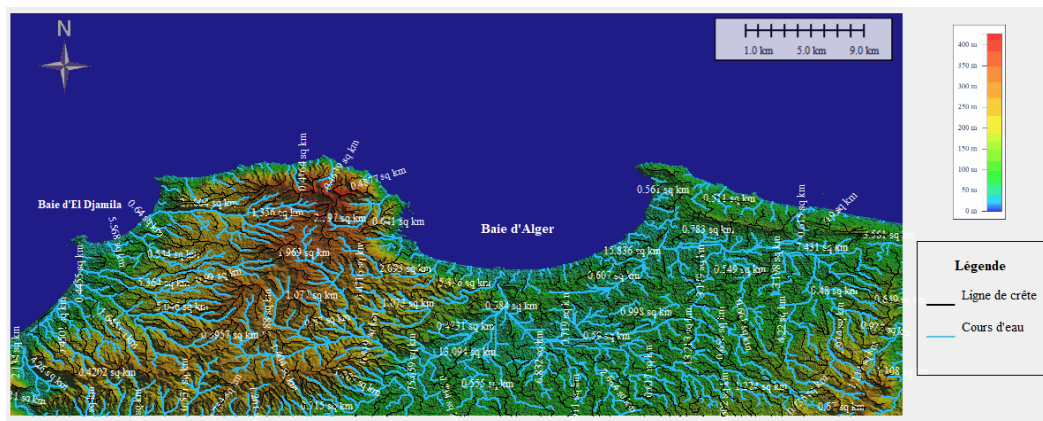


Figure II-11 : Réseau hydrographique de la zone Algéroise (Boukhediche, 2017).

L'urbanisation des rives de certains oueds notamment au centre d'Alger (Harrach et Hamiz) a fortement dégradé les apports en matière tant sur la qualité que sur la quantité. La construction des barrages en amont notamment pour l'oued Mazafran ainsi que les aménagements (figure II-12) pouvant induire le blocage de sédiments tel que les voutes entre le lac et l'oued Reghaia représentent aussi de sérieux facteurs qui réduisent le charriage du sédiment du continent vers la mer.

La fixation et/ou la déviation anthropique des embouchures (oued El Harrach-fixation, oued Réghaia-déviation) peuvent avoir un impact considérable sur la perturbation des apports qui semblent souvent se manifester à court et moyen terme (Otmani et al., 2019).

Il est à noter que l'aspect écologique et physico-chimique des eaux ainsi que celui des régions adjacentes (zone humide) à ces cours d'eau (lits majeur et mineur), n'ont pas été développés dans ce travail, sans pour autant exclure leur impact indirect sur les échanges, les flux et la distribution sédimentaire.

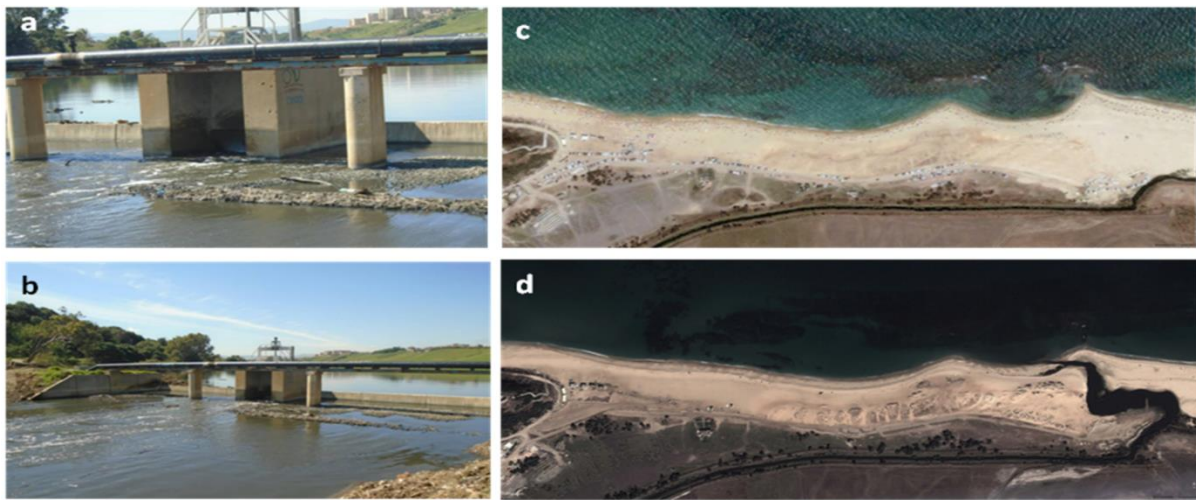


Figure II-12 : Impact anthropique et artificialisation des cours d'eau. **a et b :** valve de séparation entre l'oued et le lac Reghaia ; **c et d :** déviation de l'embouchure de l'oued Reghaia 2009-2018.

2.2 Etude bathymétrique

2.2.1 Introduction

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 (Agabi et Benbraham, 2018).

La profondeur des fonds marins est une donnée essentielle pour un grand nombre de domaines d'activités : scientifique, économique et politique. La bathymétrie, science de la mesure des profondeurs de l'océan, a des applications aussi diverses que la gestion des ressources minérales et vivantes et l'aménagement des habitats sous-marins (Tassan et Sturm, 1986 ; David, 1988 ; Grid-Geneva ; 2000).

L'étude bathymétrique est une étape indispensable dans le diagnostic et la résolution du problème lié à la vulnérabilité des systèmes côtiers. A partir de ce type de carte, des informations importantes à l'échelle spatio-temporelle, peuvent être extraites et un suivi diachronique de la morphologie sous-marine peut être établi (Otmami, 2014). Une vue générale sur la morphologie peut nous renseigner sur la typologie de la plage, les parcours des courants potentiels, les zones à risque... etc (Bouakline, 2009).

En plus de ces études, la carte bathymétrique est une donnée de base pour la modélisation de l'hydrodynamisme dans les zones côtières. L'étude topo-bathymétrique peut aussi être utile dans la sélection de l'emplacement et du type de la structure pour se protéger contre la dynamique littorale défavorable pour certains secteurs (Otmami, 2014).

2.2.2 Procédés d'investigation et d'acquisition des données

L'établissement des relevés bathymétriques dans les zones côtières pose de nombreux problèmes matériels. Les méthodes traditionnelles utilisent des moyens, tels que les sondes multifaisceaux sur les navires, qui nécessitent de longues campagnes, s'avérant onéreuses. Ces méthodes restent bien sûres, irremplaçables pour ce qui concerne la bathymétrie des zones profondes et pour les relevés ponctuels. Cependant, il n'est pas toujours possible d'utiliser ces moyens classiques de sondage, soit en raison des difficultés d'accès et de navigation, soit à cause des limites d'utilisation des échosondeurs.

Différentes sources de données existent, elles restent néanmoins difficiles à combiner afin d'en tirer un maximum d'informations sur l'état des fonds à différentes échelles temporelles.

Dans notre cas, les données bathymétriques de la zone algéroise ont été obtenues à partir des cartes marines, Navionics Sonar Chart (TM), téléchargées grâce à l'application SAS planet, en format GeoTiff (georéférencées) et importées sous un SIG (ArcGis).

Après avoir créé un shape file et digitalisé le maximum de points (environ 24 000 points), les profondeurs ont été extraites à partir des isobathes. La bathymétrie obtenue présente des valeurs comprises entre -0.5 et 1000 m de profondeur (Figure II-13).

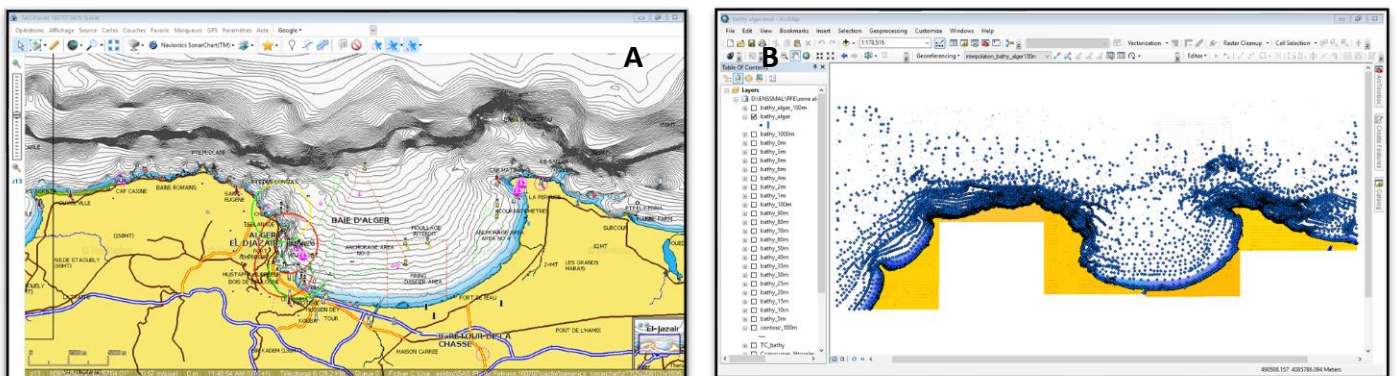


Figure II-13 : Acquisition des cartes marines des profondeurs (A) & Extraxion sous ArcGis (B).

Après l'acquisition des données bathymétriques, le traitement technique de ces données s'est effectué sur le logiciel ArcGis, qui utilise des approches numériques pour traiter et gérer ces données, dont l'interpolation (figure II-15).

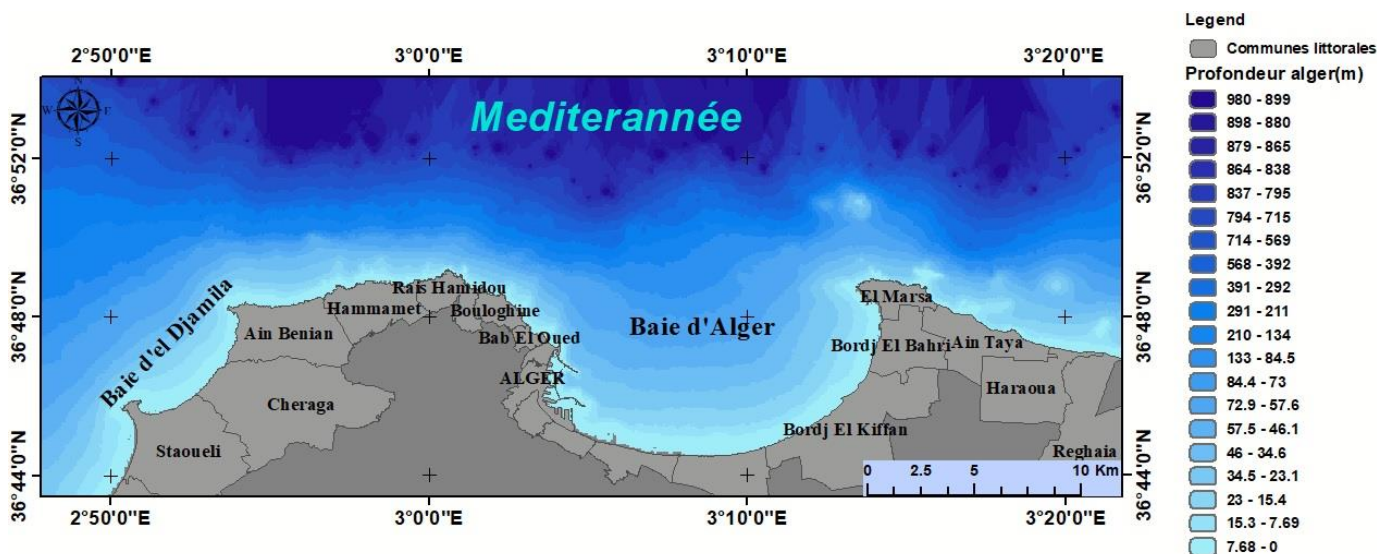


Figure II-14 : Morphologie côtière et sous-marine du littoral de la zone Algéroise.

L’observation des résultats de la morphologie côtière et sous-marine montre l’existence de deux types de fonds :

- Au niveau des côtes rocheuses (zones à falaises) : le fond est irrégulier et les isobathes sont très proches. C’est une preuve d’une pente abrupte dû à la déformation du fond.
- Les zones côtières d’accumulation : la pente évolue sans irrégularités particulières, ce qui correspond au schéma standard des côtes d’accumulations, où les fonds sont plus au moins réguliers.

Le modèle numérique de terrain (MNT) permet une meilleure observation de cette morphologie, il est projeté à l’aide du logiciel Arc-Scène (figure II-17).

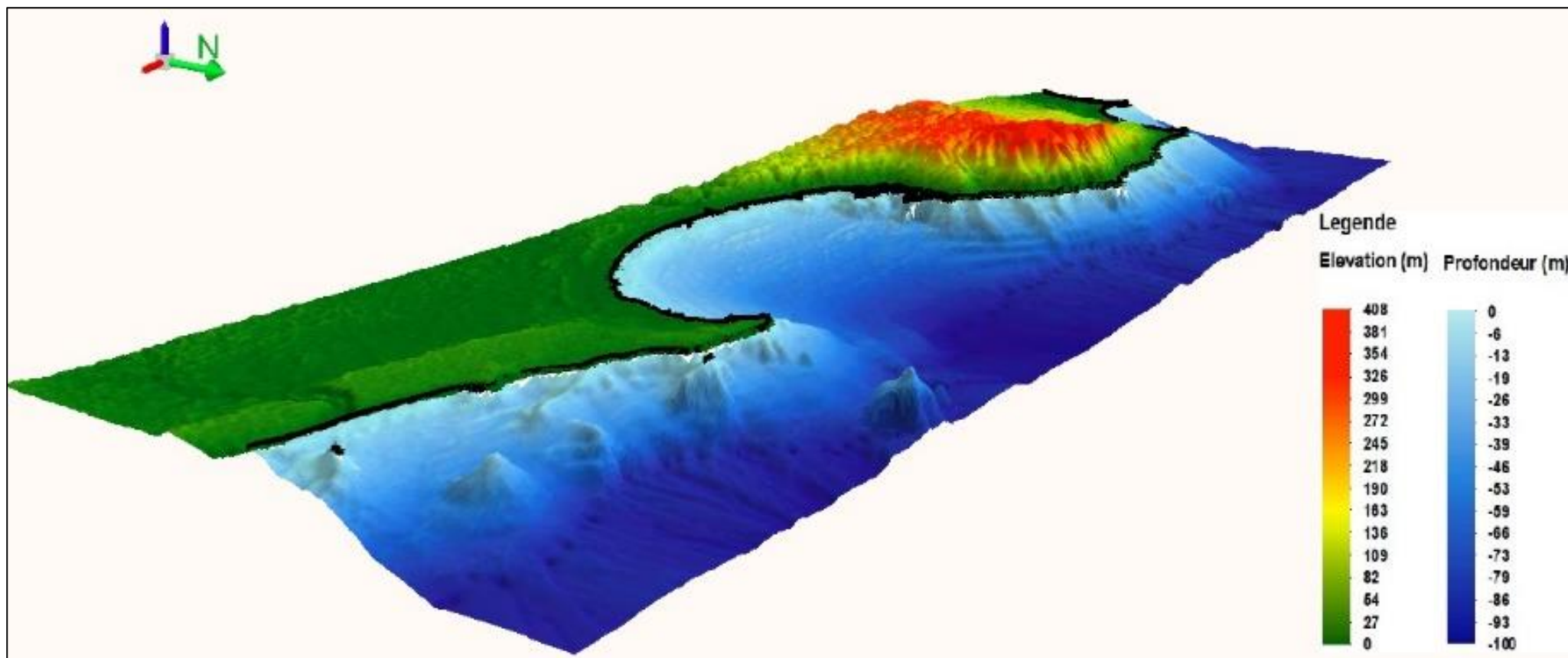
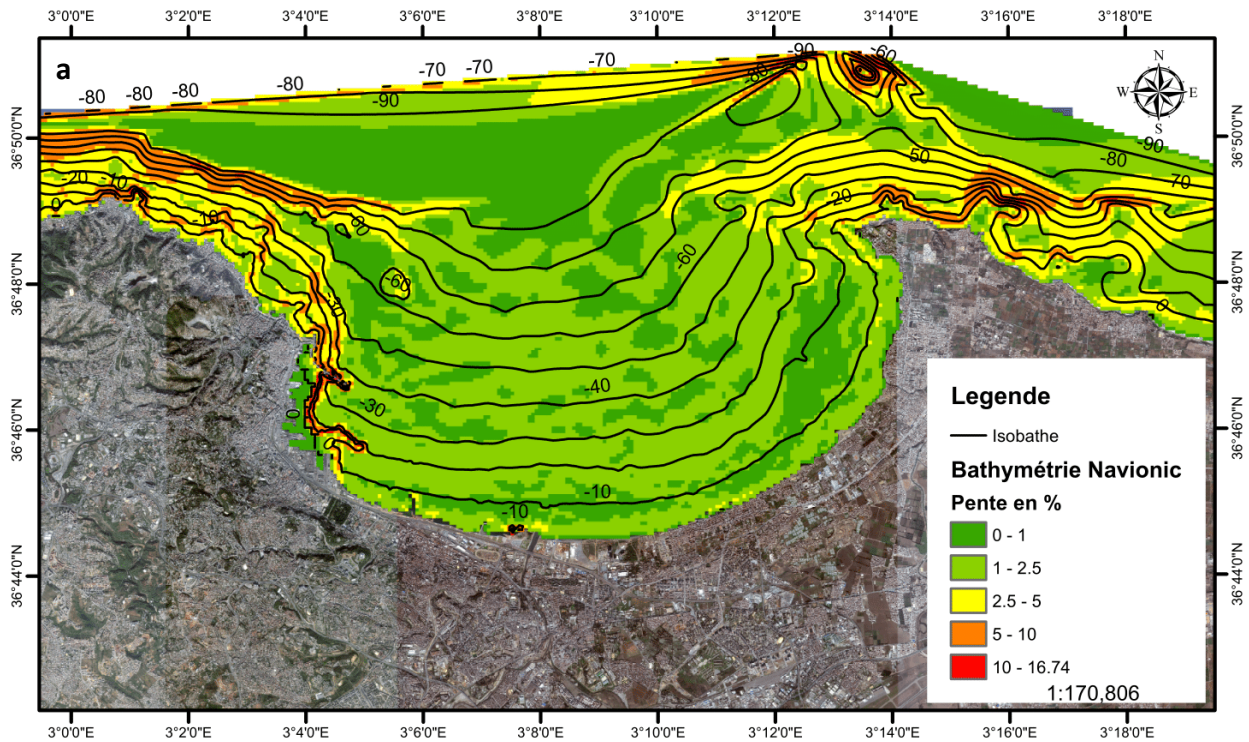


Figure II-15 : Modèle numérique de terrain de la zone Algéroise.

2.2.3 Etude des pentes

L'étude des pentes permet une meilleure compréhension des processus de transfert des sédiments à petite échelle de temps (tempêtes) et à long terme (façonnage du plateau continental) et pour déterminer le sédiment à apposer. (Belkessa, 2007) préconise d'étudier le degré de la pente à partir du fond marin jusqu'aux abords de la plage.

La carte des pentes (figure II-16) montre une répartition logique similaire à la bathymétrie. Des fonds à fortes pentes de 2.5 à 16 % sont observées le long du littoral rocheux et au niveau des caps et des régions à falaises alors qu'au niveau des baies, la pente de l'avant côte semble plus douce et varie entre 0 et 2.5 %.



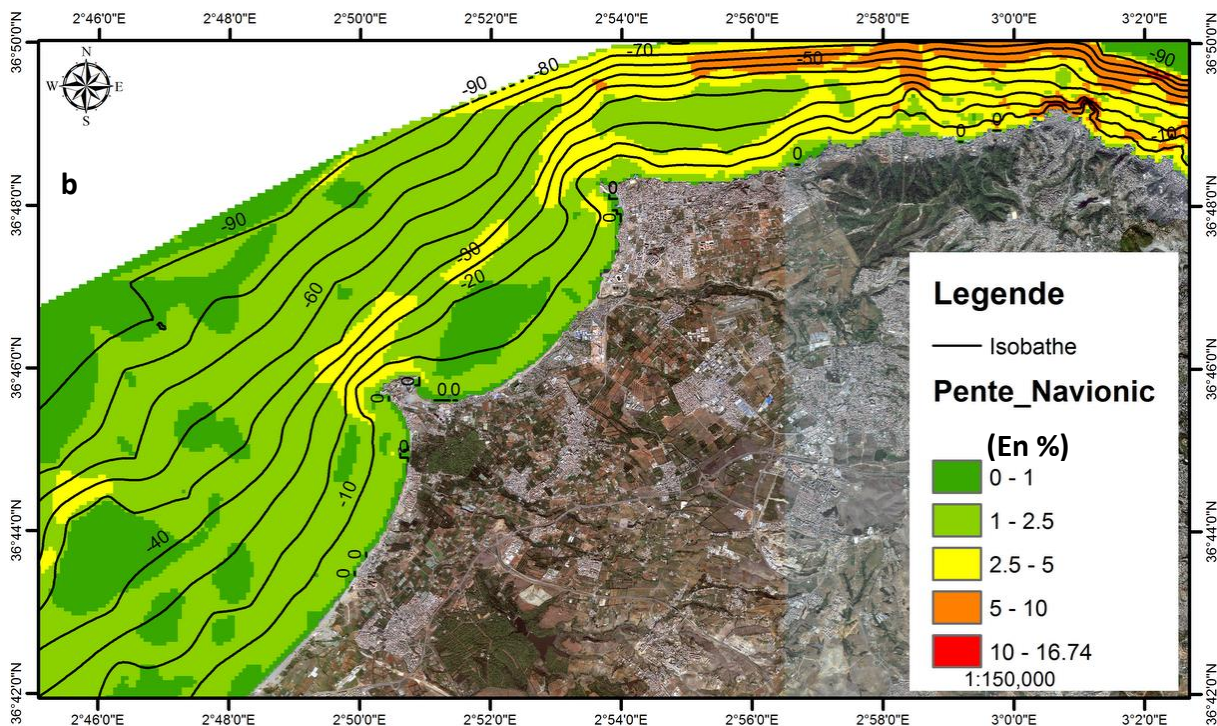


Figure II-16 : a et b : Cartes des pentes sous-marines de l'avant côte de la zone d'étude en (%).

2.2.3.1 Aspect des pentes

L'élaboration d'une carte des pentes (Figure II-17) à l'aide de l'outil 3D Analyst Tools (Surface Aspect) permet de décrire ses caractéristiques, à savoir : sa valeur, son orientation et sa longueur. Ceci rend visible les zones à déferlement intense et projette ainsi, les principales zones favorables au départ et à l'échappement des sédiments vers le large, et de ce fait, répond à un problème majeur de rechargement des plages (Capobianco et al., 2002).

La carte des pentes montre mieux l'aspect accentué et brusque des fonds du littoral rocheux (zone favorable au transfert des sédiments vers le large). Les pentes douces des baies d'El Djamila, de Bou-ismail ainsi que la baie d'Alger, dans un second degré, permettent de ralentir le déplacement des sédiments vers le large.

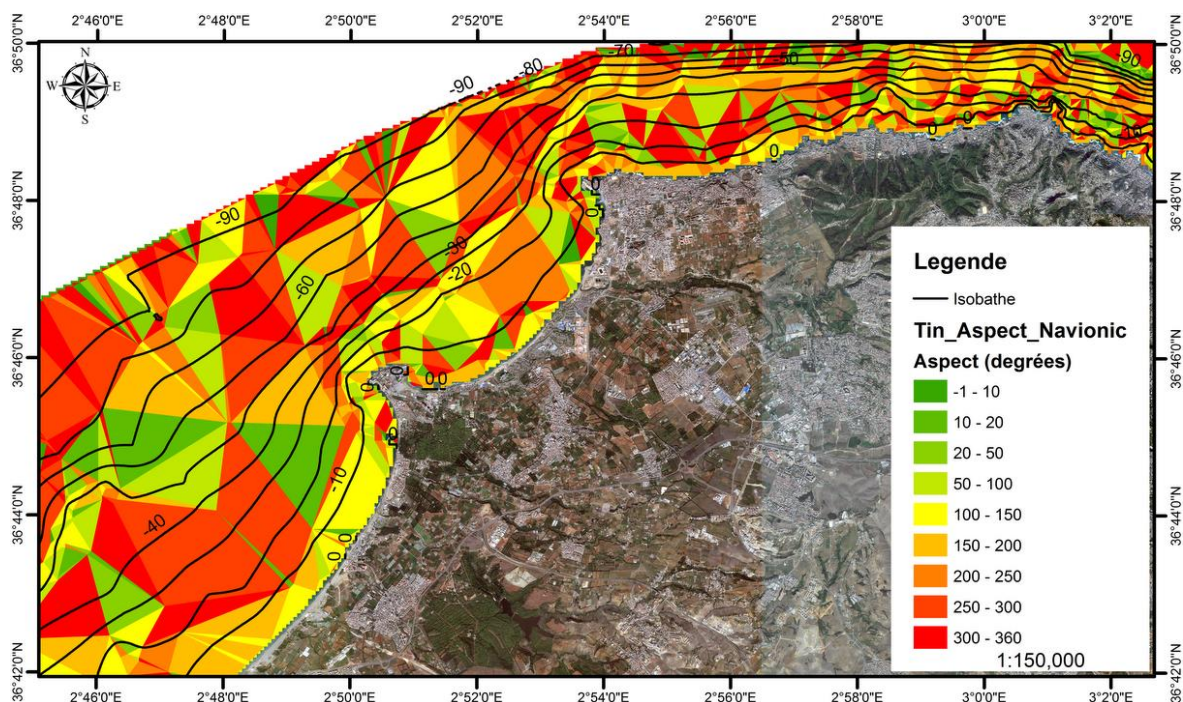


Figure II-17 : Aspect des pentes de l’avant côte de la zone algéroise.

2.2.4 Etude des profils bathymétriques

L’étude des profils bathymétriques est une étude de morphologie de détail, qui vise à mieux observer et étudier la morphologie sous-marine. Cela peut conforter les analyses faites sur les observations réalisées sur les différentes formes du relief lors de l’étude bathymétriques précédemment réalisée, ainsi que sur le modèle numérique de terrain.

Douze (12) profils ont été établis (Figure II-18, 19, 20, 21, 22 et 23) couvrant la globalité de la zone d’étude.

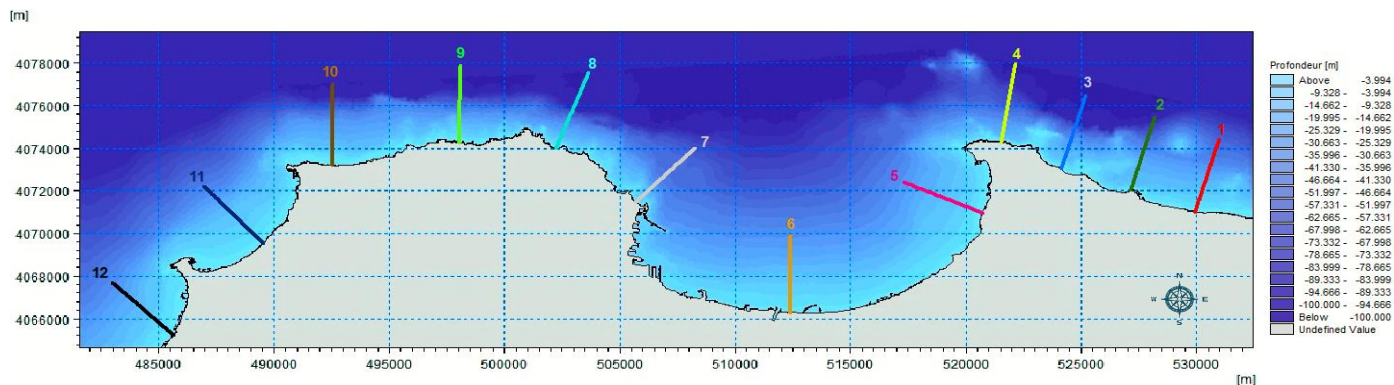


Figure II-18 : Carte de répartition des profils bathymétriques dans la zone algéroise.

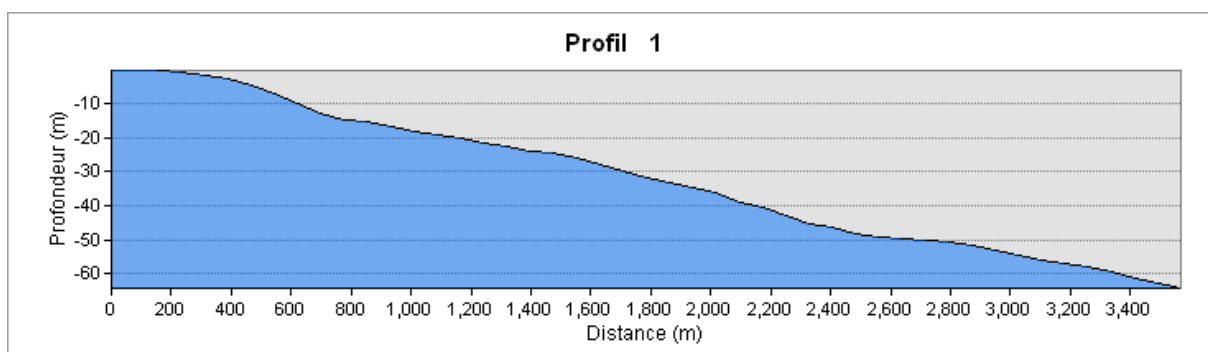


Figure II-19 : Profil bathymétrique n°1.

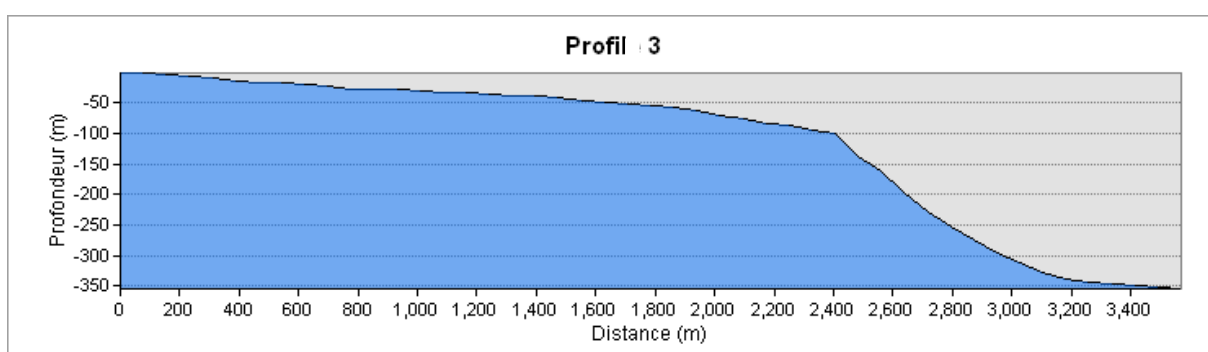


Figure II-20 : Profil bathymétrique n°3.

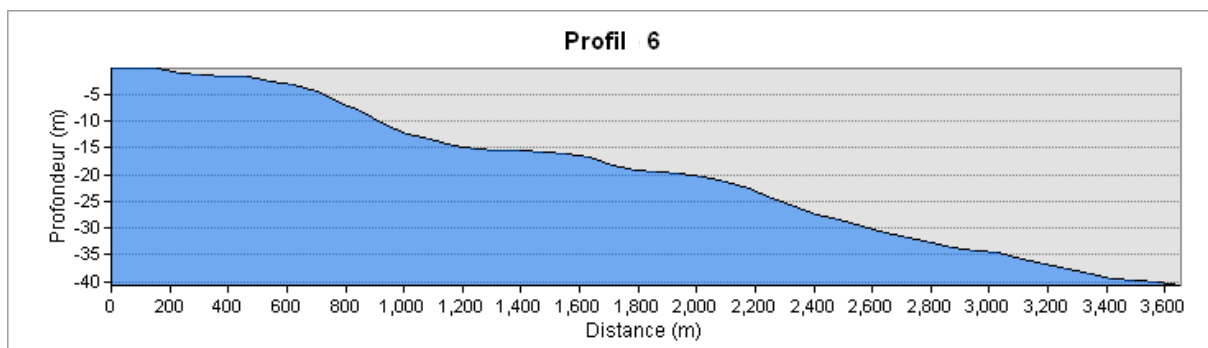


Figure II-21 : Profil bathymétrique n°6.

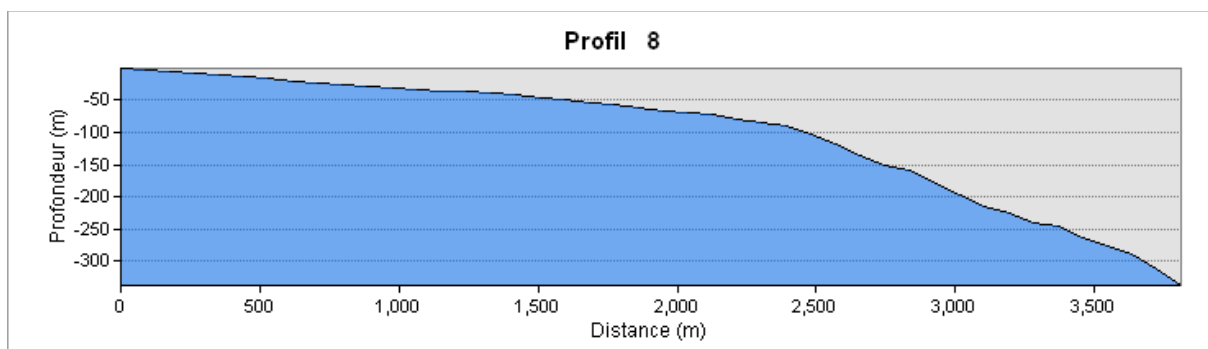


Figure II-22 : Profil bathymétrique n°8.

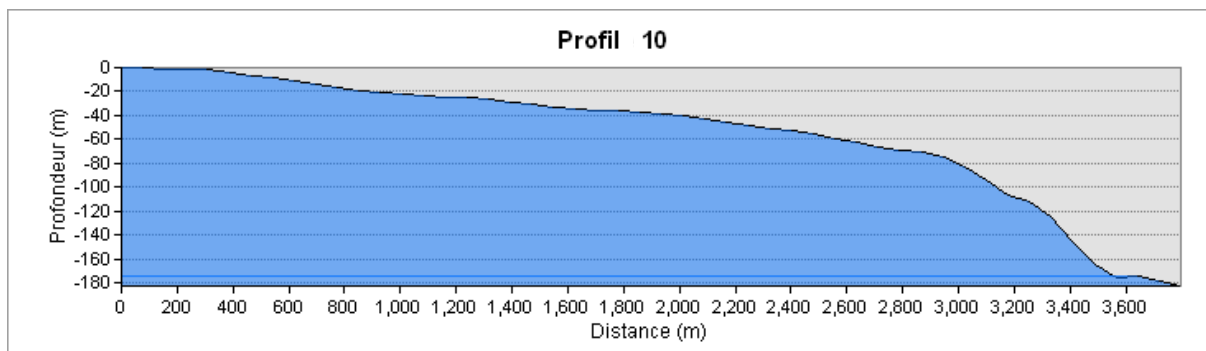


Figure II-23 : Profil bathymétrique n°10

2.2.4.1 Discussion de l'allure des profils bathymétriques

Les profils précédents représentent la variation de la profondeur en fonction de la distance (Annexe N°06). Ces profils présentent une pente relativement douce du côté des zones peu profondes. Ceci est dû aux côtes à plages où différentes formes d'accumulation sont observées lors des investigations de terrain (Réghaïa et l'Est de Ain Taya) de la baie d'Alger, avec des irrégularités de la pente autour de 5, 15 et 20m de profondeur.

A l'opposé de cela, la zone s'étalant sur l'Ouest de Ain Taya et El Marsa, (profils 3 et 4), la partie rocheuse depuis Hammamet jusqu'à Bab El Oued (profils 8,9 et 10) ainsi que le cap de Sidi Fredj présentent des pentes très raides, dont la profondeur est considérable, comparée aux précédents sites. Au-delà de 100 m de profondeur, une rupture de pente brusque est entamée.

L'étude des profils a non seulement confirmé les études précédemment réalisées sur les cartes bathymétriques et les MNT, mais a aussi montré que la zone d'intérêt peut être sujette à des perturbations hydro-sédimentaires dues aux différents aléas qui peuvent générer des irrégularités remarquables sur la pente.

L'étude hydro-sédimentaire va apporter des résultats approfondis concernant les données et les études réalisées précédemment.

2.2.5 Etude comparative entre les principales sources de données

L'étude est basée sur la comparaison entre les deux levés bathymétriques, un ancien du Service Hydrographique des Forces Navales (SHFN) et un autre récent, extrait de la base de données de Navionic, par la superposition des modèles numériques de terrain (MNT) des deux levés et la détermination du différentiel d'évolution entre les surfaces après interpolation, à l'aide des systèmes d'informations géographiques (SIG).

2.2.5.1 Conditions de la méthode

Plusieurs conditions indispensables à la superposition de ces deux modèles et la création d'un modèle d'évolution suffisamment fiable sont accomplies (Louati et al., 2009):

- Les deux cartes ont des échelles comparables (1/120000 pour le levé SHFN et 1/100000 pour celle de Navionic),
- Les données bathymétriques ont la même référence spatiale,
- Le niveau de référence altimétrique est le même lors des deux périodes de levés.

Remarque : il est à noter que les levés bathymétriques ont été obtenus par extraction numérique après géoréférencement (données SHFN) dans le système de projection WGS1984 UTM Zone 31, à partir des deux cartes à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2.2 (Figure II-24).

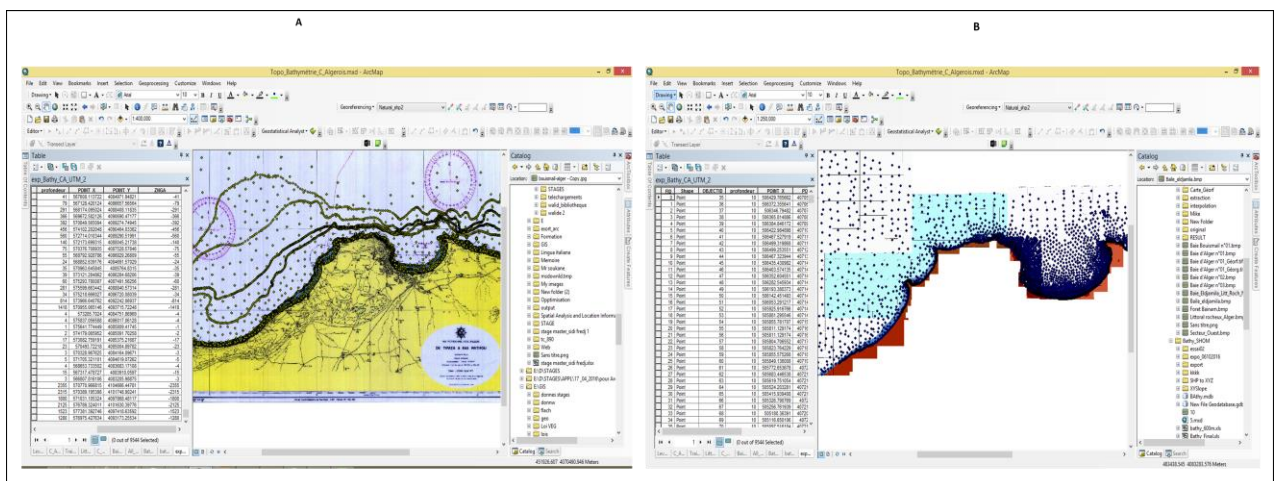


Figure II-24 : Captures d'écran de l'étape d'extraction de la bathymétrie ; A : Du SHFN - B : De Navionic, dans l'espace de travail ArcMap.

2.2.5.2 Précautions

Les résultats obtenus doivent être considérés avec les précautions suivantes (Louati et al., 2009 ; LEM, 2010) :

- La marge d'erreur qui est suffisamment large, à la fois horizontale et verticale ;
- La période entre les levés est très importante. Il est donc possible que des aménagements ou d'autres actions anthropiques réalisées (extraction de granulats, clapage, dragage ...etc.) puissent influencer le résultat ;
- La densité des points du levé de la carte SHFN est faible par rapport à celle de Navionic.

2.2.5.3 Méthodologie de traitement des données

Les données extraites ont subi successivement un traitement similaire par les outils : Spatial Analyst Tools et 3D Analyst Tools de Arc toolbox. Afin de performer le traitement, une extension que nous avons nommée "Interpolation_TIN" a été programmée sous Model Builder (Outil de programmation intégré sur ArcGIS à base du langage python), ce qui a permis de programmer des modèles de géotraitement (Figure II-25). (Annexe N°07).

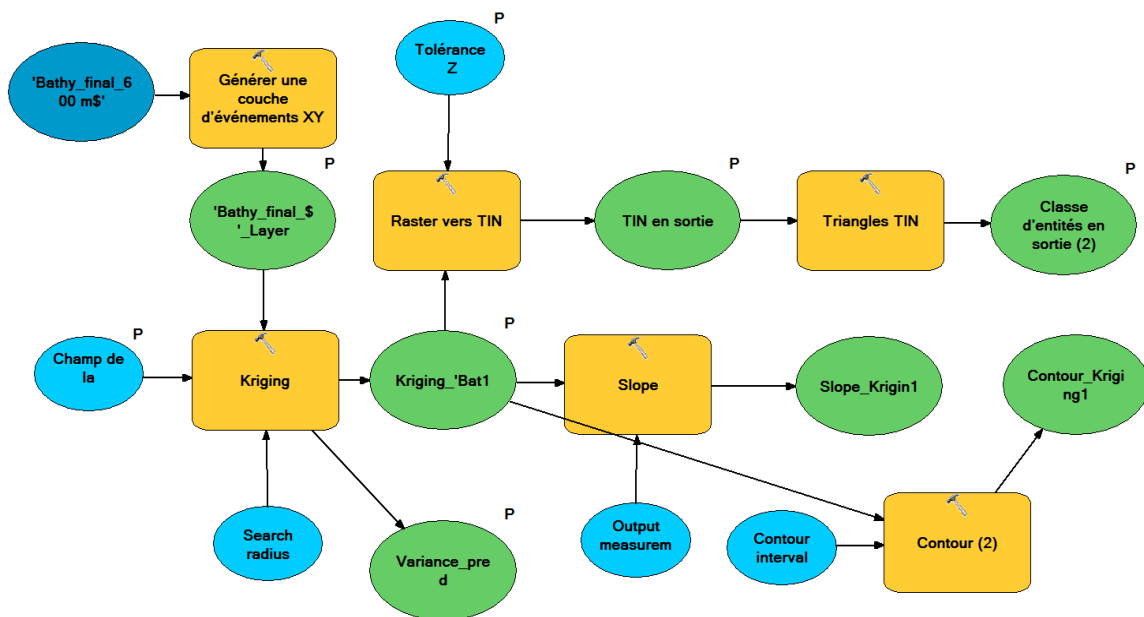


Figure II-25 : Modèle de l'extension Interpolation_TIN de traitement des fichiers bruts de la bathymétrie.

L'extension permet :

- L'importation et l'affichage des tableaux de bathymétrie sous forme de points géoréférencés ;
- D'effectuer une interpolation « Kriging » sur les nuages de points et la création des rasters en sortie ;
- La conversion des rasters d'interpolation en raster *TIN (Triangulation Irregular Network) ;
- La création des courbes de niveau (Isobathes) à partir des TIN ;
- La création des rasters des pentes à partir des rasters d'interpolation.

Les cartes bathymétriques sont élaborées avec des mailles de 100 m², de l'isobathe 5 m jusqu'à 100 m de profondeur, en raison de l'erreur moyenne quadratique qui se trouve plus faible que celle des autres méthodes pour cette configuration des données (Louati et al.,

2009). La méthode d'interpolation Kriging ordinaire a été adoptée, car elle est la plus adéquate pour le type de données dispersés d'une façon hétérogène et peu dense (Drouin et al., 2010 ; Arun, 2013).

2.2.5.4 Estimation d'erreur

Il est difficile d'estimer une marge d'erreur exacte, vu les précautions décrites précédemment qui doivent être prises en considération. Les levés de Navionic sont d'une assez bonne précision, l'erreur altimétrique est de l'ordre centimétrique et de 10 m dans le positionnement (source : Site Navionic). Contrairement à la bathymétrie de la carte marine dont la marge d'erreur est estimée à 30 cm sur la verticale et à 20 m sur la position selon le SHOM (Boukhediche, 2017).

2.2.5.5 Présentation des résultats

2.2.5.5.1 Différentiel bathymétrique

Les modèles numériques de terrains permettent de distinguer deux aspects différents de la bathymétrie. Un MNT accentué avec des isobathes très serrées et irrégulières, notamment dans les secteurs rocheux (dits à falaises). Ces secteurs sont représentés par une côte abrupte, dont le plateau continental est très étroit. Les secteurs à plages (dits côtes à accumulation) sont caractérisés par des fonds qui s'étalent faiblement et régulièrement vers le large et dont les isobathes sont bien espacées : jusqu'à 20 m de profondeur dans la baie d'El Djamila et la baie d'Alger, voire -50 m dans les baies de Bou-ismail et de Zemmouri. Cette partie de la zone correspond aux larges plages sablonneuses.

La superposition des deux MNT, ancien et récent (Figure II-26) montre bien la tendance érosive de l'avant côte du littoral rocheux à l'Est de la zone d'étude, en l'occurrence la zone Ain Taya. Aussi, la partie Ouest de la baie d'El Djamila, contrairement à la partie Est ainsi que la baie de Bou-ismail, dont les fonds augmentent par sédimentation jusqu'à la profondeur de fermeture en raison de l'apport sédimentaire des cours d'eau ainsi que les transits qui s'y opèrent (Boukhediche, 2017).

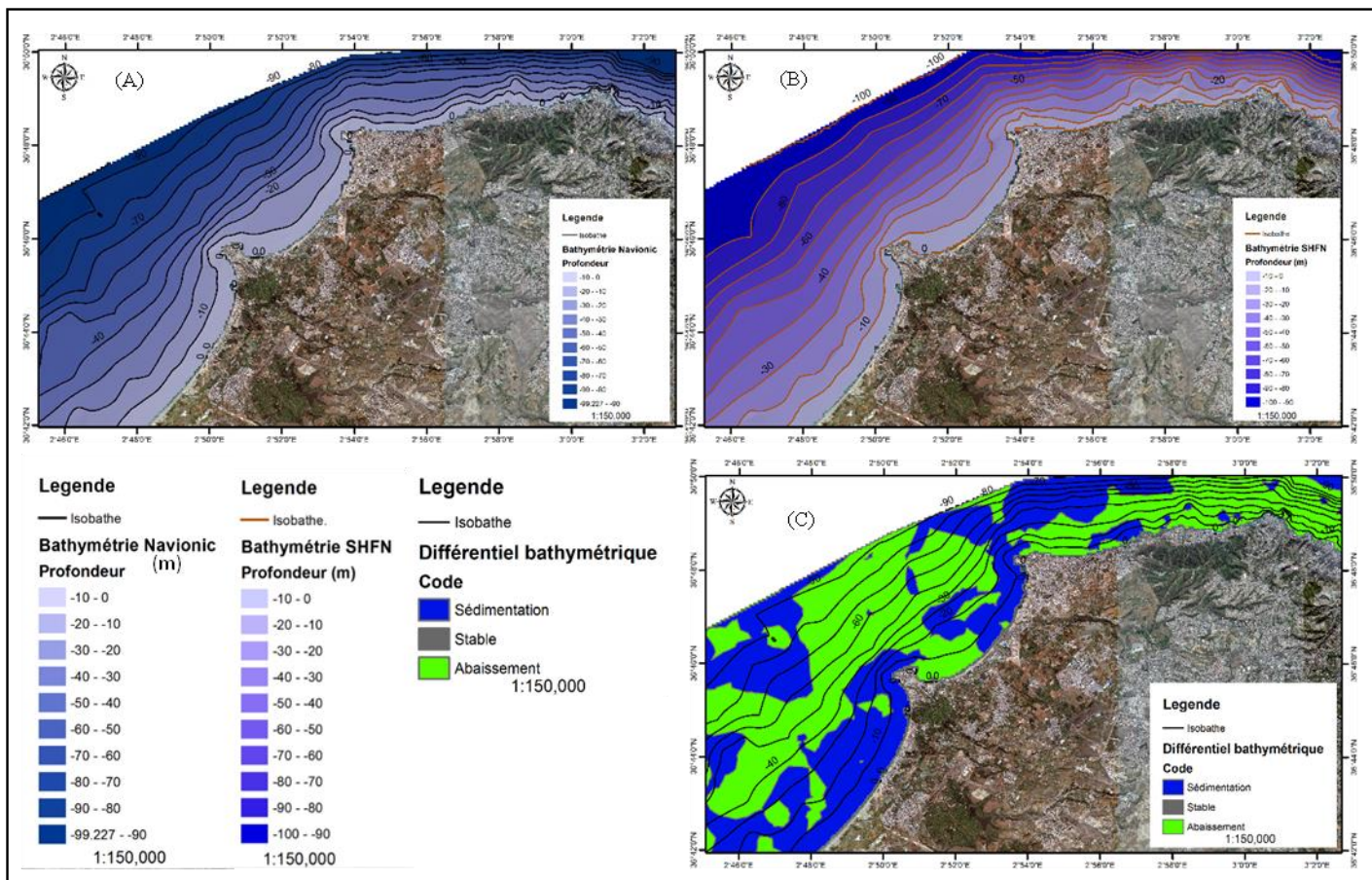


Figure II-26 : Comparaison entre la bathymétrie de SHFN et de Navionic (A)- Bathymétrie Navionic–(B)- Bathymétrie SHFN –(C)- Différentiel bathymétrique.

Variation des pentes

La figure II-27 représente les variations des pentes de l’avant côte de la zone élaborée à partir des MNT des deux levés Navionic et SHFN. La carte montre des variations très remarquables le long du littoral rocheux à l’Est, contrairement à la baie d’El Djamila et de Bou-ismail qui ne présentent pas des variations particulières.

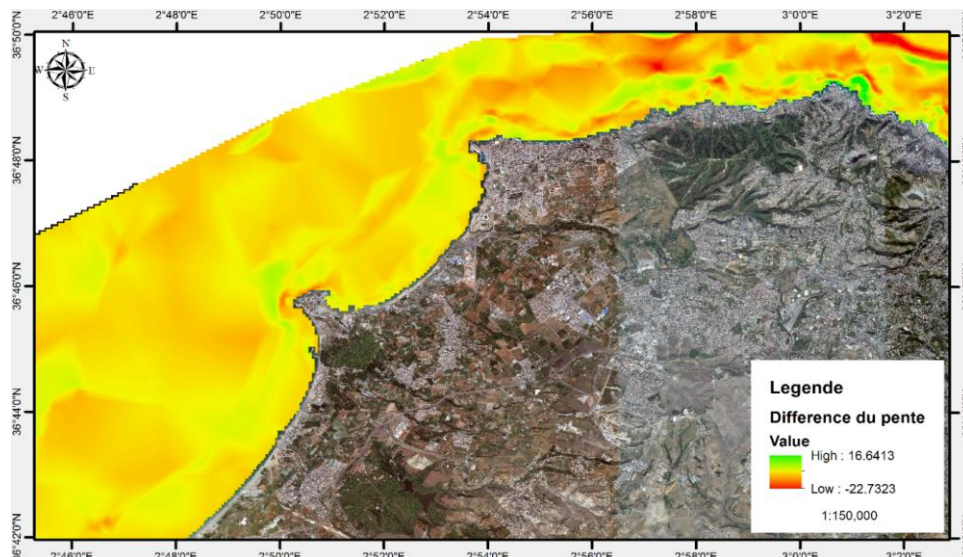


Figure II-27: Variation des pentes de l’avant côte entre la période 1867-1921 et 2005/2012 dans la zone d’étude.

2.2.6 Conclusion

L’étude de l’évolution des fonds Réalisée par l’exploitation des données bathymétriques historiques et à l’aide des systèmes d’informations géographiques a permis de détecter les variations de la morphologie et de distinguer les pentes favorisant la perte en sédiment. Ces deux indicateurs permettent de classer les plages rocheuses comme géomorphologiquement défavorables pour la rétention des sédiments et vont être exploitées dans la partie consacrée au rechargement artificiel.

2.3 Etude hydrodynamique

2.3.1 Cadre océanographique

Les côtes évoluent par érosion et sédimentation. Ces phénomènes s’expliquent d’abord par le jeu des vagues et des marées ainsi que par celui des courants qu’elles engendrent (Paskoff, 2010). Le Nivellement Général Algérien (niveau NGA) se trouve à + 0,34 m par rapport au zéro hydrographique (Zéro Carte Marine) (SOGREAH, 2010) comme présenté dans la figure II-28. Les données altimétriques acquises dans ce travail ont été homogénéisées dans un système unique prenant comme référence le Zéro NGA.

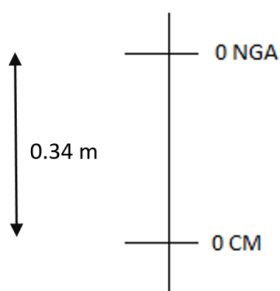


Figure II-28 : Correspondance entre les systèmes altimétriques NGA et ZH à Alger.

2.3.2 La marée et les variations du niveau d'eau marine

La marée est un mouvement périodique qui affecte le niveau général des océans et des mers. (MEDDTL, 2010). L'évocation de ce phénomène naturel est très pertinente, notamment lors des tempêtes, qui peuvent avoir un impact érosif amplifié si elles coïncident avec une période de marées.

En Algérie, le port d'Alger est celui de référence pour ce phénomène. La marée astronomique à Alger est de type semi-diurne micro-tidale. En moyenne, la marée de pleine lune est de 25 à 30 cm (marée de vives-eaux) et celle de la nouvelle lune est de 5 à 15 cm (marée de mortes eaux). Elle est masquée le plus souvent par les surélévations ou l'abaissement du niveau de la mer dû aux conditions climatiques (Pression atmosphérique, rafales des vents ...etc) (SOGREAH, 2010).

2.3.3 La houle

Au niveau du littoral algérois, les houles ont un régime saisonnier comme le reste du littoral algérien (Leclaire, 1972). C'est un paramètre hydrodynamique qui dépend directement des vents et joue un rôle majeur dans la zone de déferlement (Otmani, 2014).

Pour l'étude de la houle près de la côte, des statistiques d'apparition sont disponibles sur le site internet *Wisuki* basées sur des données recueillies depuis le 01 Janvier 2012 de la station Alger port, dirigée par l'Agence Interactive Cool Z. La présentation de ces données a été effectuée via le tableur Excel (Figure II-29).

Pour l'analyse des houles au large, des données d'enregistrement issues de la plateforme MEDATLAS (1999-2004) ont été exploitées. Ces données au large de la baie d'Alger sont disponibles au point de coordonnées 37°N et 3°E, à une profondeur d'environ 2500m (AMIS, 2004) (Annexe N°08).

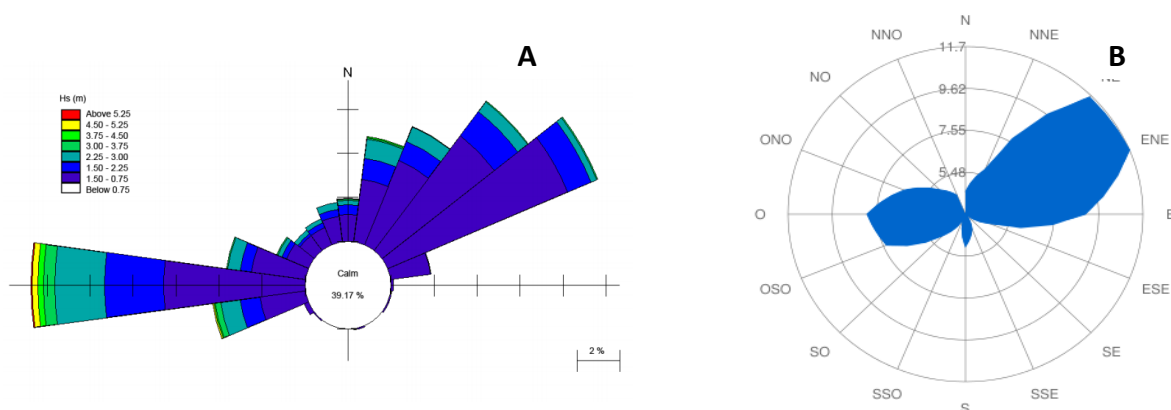
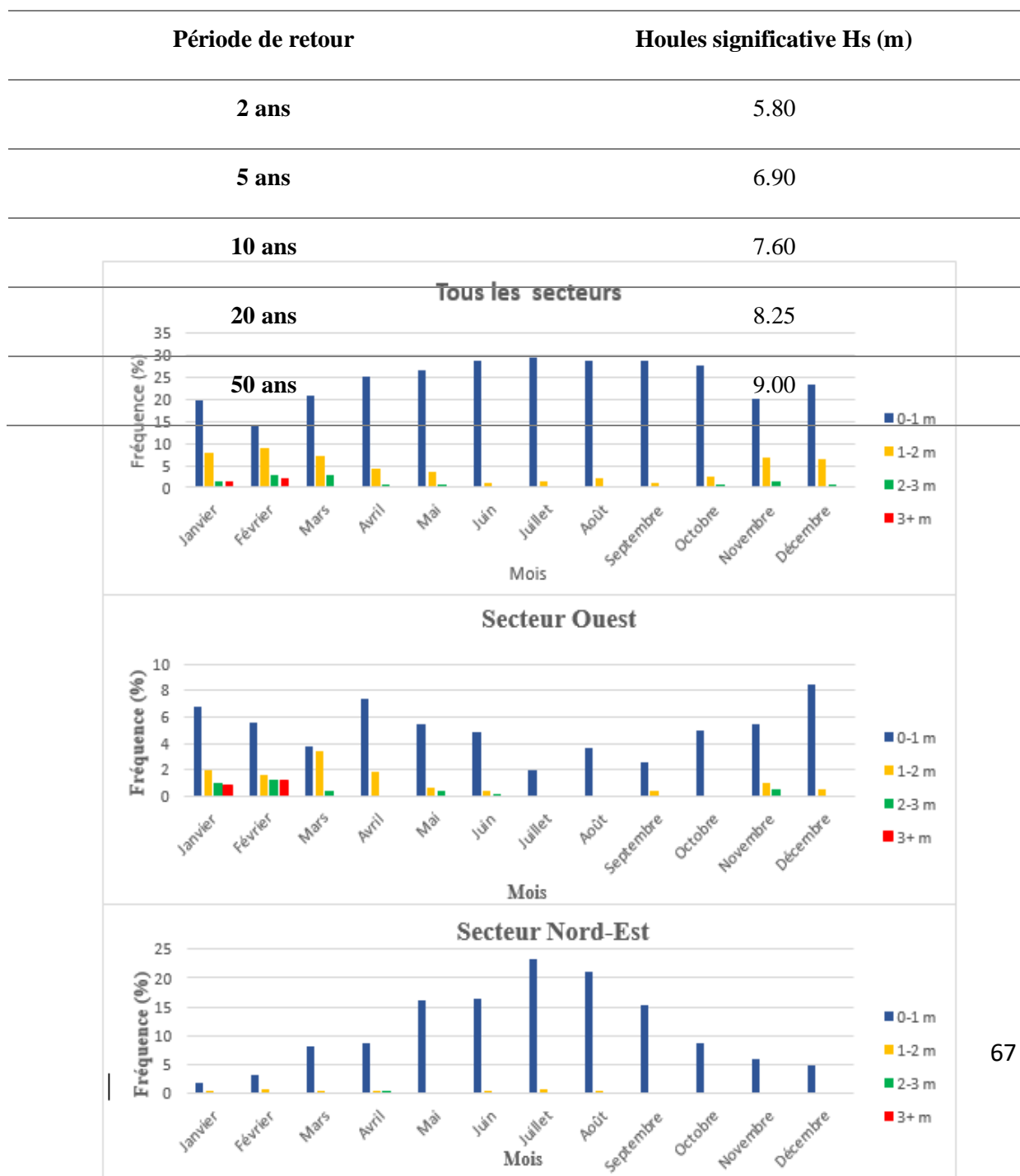


Figure II-29 : Rose des houles annuelle ;

A : Large d'Alger Groupe AMIS, 2004, B : Station Alger port WISUKI, 2012-2016.

L'analyse des houles de large menée dans le cadre de cette étude a conduit aux données reportées dans le tableau, ci-après :

Tableau II-2 : Caractéristiques des amplitudes Hs des houles de large en fonction de la période de retour dans la zone algéroise.



2.3.3.1 Houles saisonnières

Figure II-30 : Fréquences des hauteurs de la houle pour la station Alger Port données Wiziku 2012 -2016.

Les roses saisonnières montrent que :

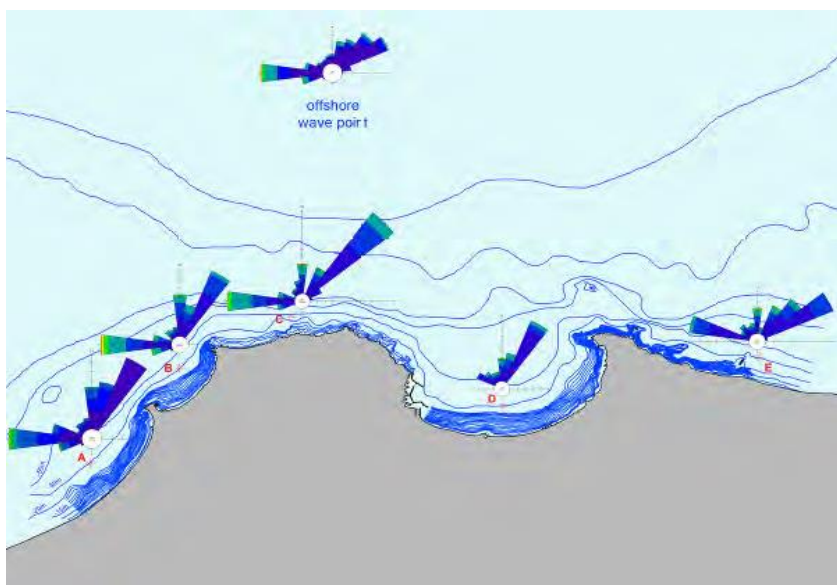
- Durant l'hiver et l'automne, les fréquences maximales proviennent des houles de secteur Ouest avec des fréquences de 18,86% et 17,58% respectivement, et une houle significative maximale comprise entre 6.50 à 7.00 m en hiver et 5.00 à 6.00 m en automne.

- Durant le printemps et l'été, ce sont les houles de secteur Nord-Est qui sont les plus fréquentes. Elles représentent respectivement 36,16 % et 58,18 % des observations. Les houles significatives maximales sont comprises au printemps entre 3.00 et 3,50 m, alors qu'en été, elles se situent entre 2,50 et 3.00 m. La houle significative la plus forte est du secteur Ouest et provient au printemps (entre 5.00 et 6.00 m). En été, des houles de secteur Ouest comprises entre 3.00 et 3,50 m peuvent également être observées au large (Annexe N°08).

2.3.3.2 Propagation et transformation de la houle du large à la côte

Lors de la propagation de la houle du large à la côte, ses caractéristiques (amplitude, direction) changent du fait de la variation de la profondeur.

Le groupe AMIS a étudié au moyen du modèle Mike 21-NSW les modifications à atteindre

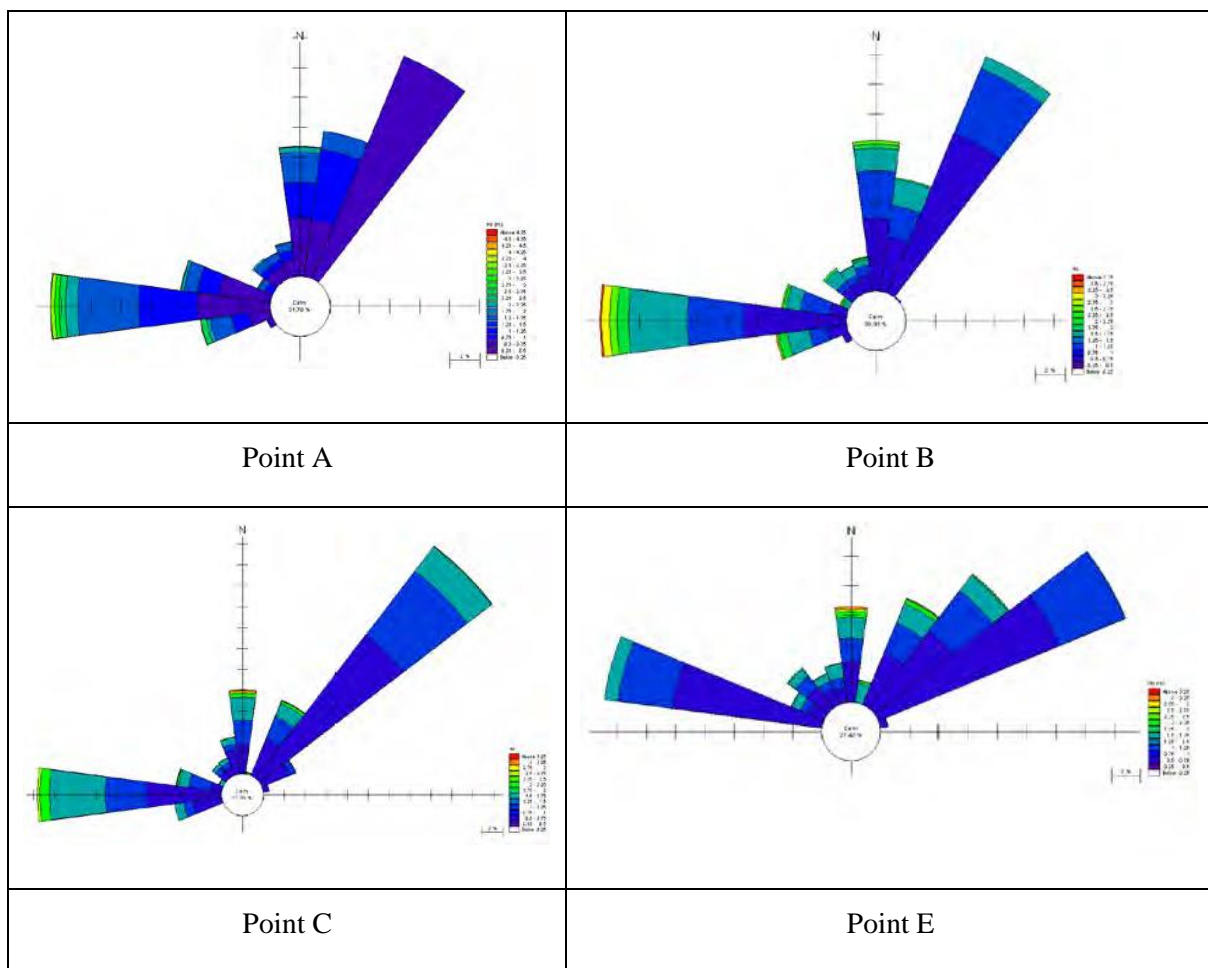


compte tenu de la morphologie des fonds entre le large et la côte.

Pour mettre en évidence l'évolution des houles entre le large et la côte, cinq points dans les fonds à -30 m, ont été choisis pour l'extraction des résultats.

Les figures II-32, ci-dessous, illustrent les résultats obtenus en termes de direction et d'amplitude des houles.

Figure II-31 : Carte de propagation et de transformation de la houle du large à la côte algéroise (AMIS, 2004).



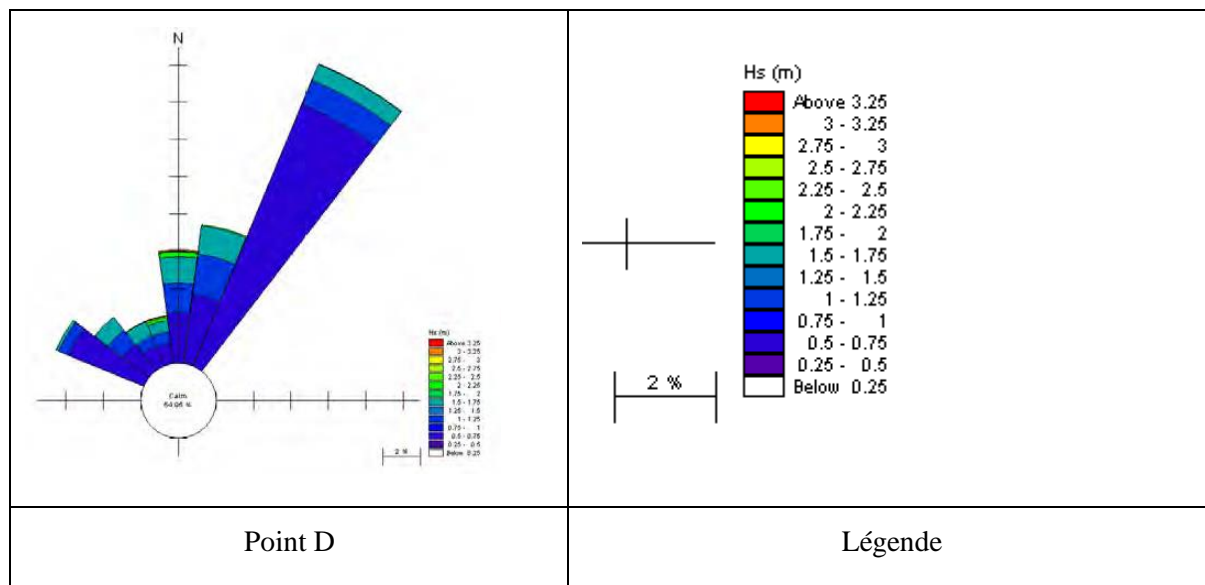


Figure II-32: Roses des houles aux différents points d'extraction au large à la côte algéroise (AMIS, 2004).

Il apparait en général, en direction, deux secteurs principaux de houle :

- Le long de la côte Ouest, les deux composantes proviennent de l'Ouest et du Nord-Est,
- Le long de la côte Est, les houles venant de l'Ouest se trouvent réorientées vers l'Est à cause de l'orientation de la côte et de la bathymétrie. A l'approche de la côte, cette rotation continue, les houles prennent alors une direction plus perpendiculaire à la bathymétrie.
- Dans la baie d'Alger, les secteurs de direction sont plus étroits. La composante Ouest est presque absente, la composante principale provient du Nord-Est.

L'étude et l'analyse de la rose des houles et la comparaison avec les données du vent permettent de déduire que la répartition des vagues et de la houle est globalement concordante avec le régime des vents, cela confirme que ce dernier est le générateur principal de ces houles.

L'analyse des roses des houles annuelles et saisonnières et les histogrammes des fréquences d'apparition des hauteurs de la houle significative par rapport à la direction (figure 2-3) ont permis de constater une dominance de deux secteurs : Ouest et Nord-Est (tableau II-3).

Tableau II-3 : Synthèse des observations sur les roses de houles dans la région algéroise.

Secteur dominant	O (255°-285°)	NE (45°-60°)
-------------------------	----------------------	---------------------

(%) Observation	27.41%	34.42%
Similitude avec le régime des vents	Oui	Oui
Période	Hivernale	Estivale
Hauteur maximale (tempêtes)	5 m.	3 m.
% des houles max sur l'ensemble des observations du secteur	0.4%	0.2%

2.4 Simulation hydro-sédimentaire

Cette étude a pour but de décrire et de modéliser les phénomènes physiques à l'origine de la dynamique littorale. Son intérêt est fondamental afin d'évaluer l'action de ces facteurs sur la zone d'étude.

La modélisation numérique a apporté beaucoup de progrès dans la simulation des phénomènes côtiers (Camenen et al., 2000). C'est une approche basée sur des modèles mathématiques décrivant de manière suffisamment fiable les phénomènes physiques (Houle, courant et transport sédimentaire). C'est une méthode pratique vu qu'elle permet de tester les effets d'un grand nombre de paramètres (physiques et géométriques) en un temps relativement court et à moindre coût comparé à un modèle physique équivalent (Khalfani, 2014).

Dans cette partie de chapitre, notre objectif est d'étudier le comportement et la réponse de la zone algéroise face aux forces hydrodynamiques et leur éventuel impact sur la dynamique sédimentaire de la zone d'étude, soit dans le profil vers le large (cross-shore transport) ou bien latéralement vers les plages adjacentes (longshore transport).

La fiabilité des résultats fournis par les modèles numériques dépend essentiellement de la qualité des données d'entrée, la résolution spatiale des grilles de calcul (Amarouche, 2015) et du choix du modèle.

2.4.1 Choix du modèle

A la recherche des résultats les plus proches possible de la réalité, les modèles numériques adéquats pour simuler les processus étudiés doivent être choisis soigneusement, prenant en compte les limites et les hypothèses de base du modèle (Boukhediche, 2017).

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le « MIKE 21 » qui est un système logiciel développé par le Danish Hydraulics Institute (DHI), et reposant sur un maillage structuré (grille rectangulaire ou curviligne) ou pour certains modules, sur un maillage non structuré (grille triangulaire).

2.4.1.1 Données bathymétriques

Les données bathymétriques sont obtenues lors de l'étude bathymétrique précédemment réalisée, elles seront présentées sous forme d'un maillage avec l'extension « .mesh ».

a. Le choix des secteurs

Le secteur angulaire considéré correspond aux limites naturelles imposées, d'une part par la configuration géographique du site d'étude, et d'autre part, par le secteur d'intérêt des houles du large. L'orientation du trait de côte a permis de déterminer les secteurs pénalisés dans la zone d'étude (figure II-33).

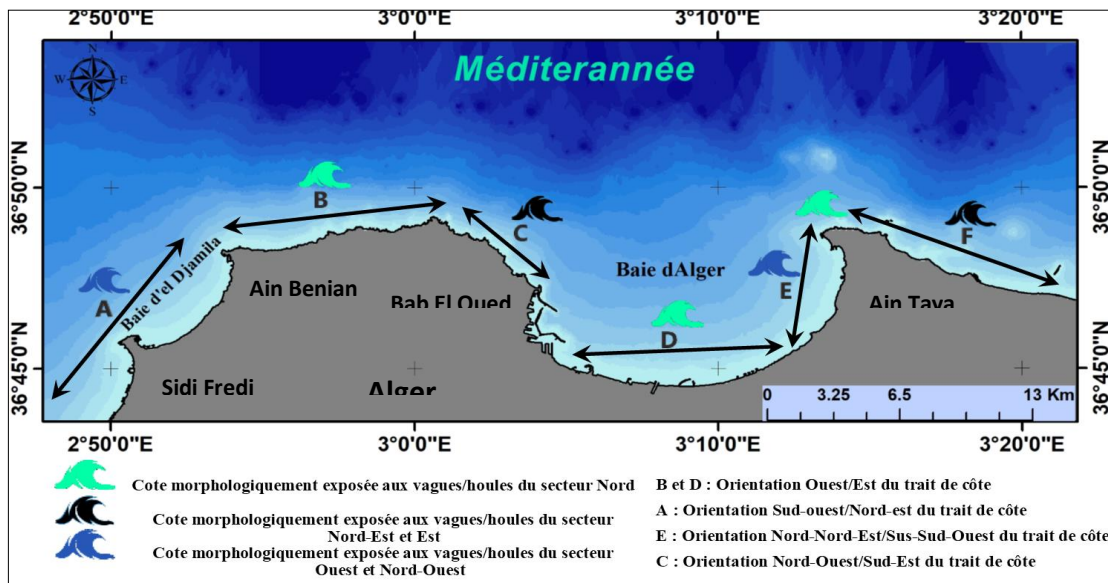
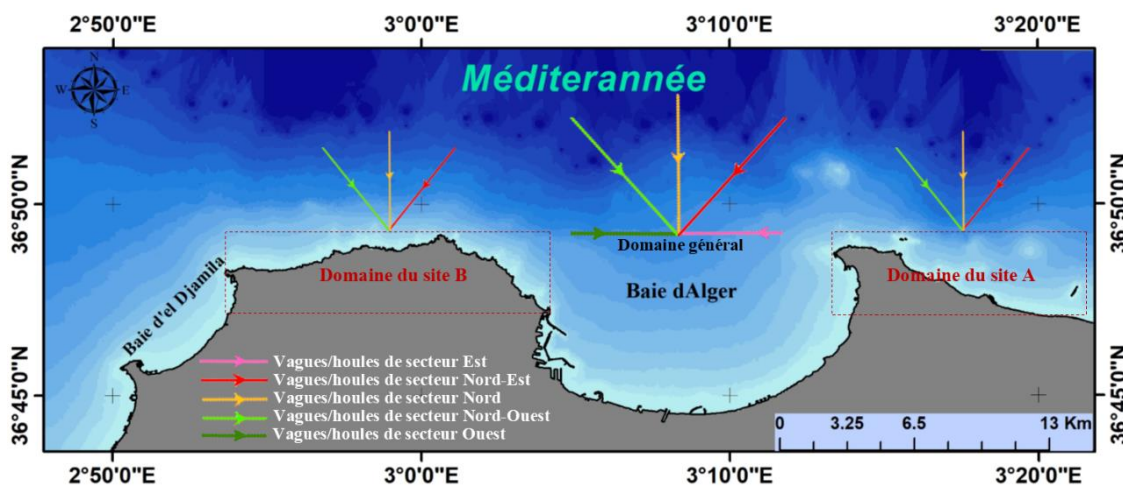


Figure II-33 : Orientation locale du trait de côte de la zone algéroise.

La synthèse de tous les indicateurs montre que la zone d'étude est régulée par une agitation hydrodynamique non négligeable (Agabi et Benbraham, 2018). L'examen des résultats de la



modélisation du forçage induit à la côte par les vagues fréquentes, montre que les hauteurs significatives des vagues se comportent différemment pour les directions étudiées. Les secteurs de vague privilégiés en domaine global sont comme suit : E (90°), NE (45°), N (360°), NO (315°), O (270°).

Figure II-34 : Les vagues sélectionnées comme entrée pour le modèle hydrodynamique dans la région algéroise.

b. Données de houle au large de la région algéroise

Les données de la houle se caractérisent par la hauteur significative, période et direction. La période de 8s étant la plus fréquente, elle a été sélectionnée pour cette étude.

Tableau II-4. Données retenues de la houle au large de la région algéroise.

Secteurs	E (90°)	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Hauteur significative (m)	2.53	2.56	2.67	2.64	2.67

2.4.2 Description du modèle de simulation Mike21 et configuration des modules

Le modèle est élaboré en configurant des modules choisis : le **SW** (Spectral Waves model), **HD** (Hydrodynamic model) et **ST** (Sand Transport model) du système couplé par le Mike21/3FM.

2.4.2.1 Le module SW

La connaissance des conditions de houle à la côte est nécessaire pour quantifier leur contribution aux niveaux marins (Abdellaoui et al., 2017). Le module SW fait partie des modèles spectraux vagues-vents de dernière génération, qui permet de simuler la propagation,

l'évolution et la transformation des vagues générées par les vents et des houles au large (Khalfani, 2014) dont les conditions sont connues.

Le SW est un module spectral de vague de 3^{ème} génération similaire au SWAN, avec certaines améliorations. Il simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague-vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle Mike21-SW utilisent une grille à maillage flexible. Le modèle équivalent sur maillage en différence finie est le modèle Mike21-NSW (Larbi, 2017).

Les données nécessaires pour l'étude de la réfraction de la houle insérées en entrée du module SW sont :

- Le mesh (la bathymétrie) ;
- Directions des houles dominantes, la période et les hauteurs significatives aux frontières mentionnées dans le tableau II-4.

Après avoir introduit le fichier de mesh, les conditions aux limites sont définies (direction dominante de propagation des vagues) ainsi que les données sur la direction et la vitesse du vent.

2.4.2.2 Le module HD

La modélisation des champs de courants générés par les houles approchant le rivage se fait au moyen du module HD, dont les résultats sortants du module SW, ainsi que les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs hydrodynamiques. Ceux-ci, permettront de calculer la vitesse et les directions du courant (Bengoufa, 2016).

Les principaux paramètres considérés sont les suivants :

- Le niveau de la mer est considéré variable.
- La viscosité et la résistance sont considérées comme valeurs par défaut (0.28 et 32 $m^1/m^3/s$ respectivement).
- Les vents sont pris en considération (Tableau II-4)
- Les données du vent (données de l'année 2017).

2.4.2.3 Configuration du module ST

Le module Mike21 ST permet de calculer les taux de transport de sédiments non cohésifs (sable) sous l'action combinée des courants et des vagues. (DHI, REMOTE SIMULATION USER GUIDE, 2014)

Les taux de transport de sédiments sont calculés à partir de :

- Données bathymétriques ;
- Les tailles et la graduation spatiale des sédiments ;
- Les variations spatio-temporelles des courants et des vagues (données de houle au large et les secteurs d'incidences).

Ces tableaux doivent être générés au préalable par « Mike21 Toolbox » avec le choix de « Generation of Q3D Sediment Tables ». Ils doivent intégrer une condition quelconque de bathymétrie, courant, houle, ou sédiment prédite par le module intégré (DHI, 2014).

Cependant les paramètres granulométriques considérés sur l'ensemble du model sont :

- Le diamètre médian $D_{50}=0.175$ mm,
- Une porosité de 0.4.
- Un coefficient de gradient =1.1.

Pour le forçage des vagues (H_{m0} – T_p – Dir) et des courants (Vitesses et directions des courants) nous avons pris en considération ceux issus des modules SW et HD respectivement.

2.4.3 Etapes de réglages du model pour la simulation avec le Mike21

En premier lieu, un Mesh file est créé avant d'entamer la simulation. Ce dernier relie la profondeur des eaux, extraite de données bathymétriques avec le système de référence ZH, pour chaque point du domaine. Il contient donc les informations concernant la profondeur, les limites du mesh file (Boundary) et les éléments du maillage qui sont de type triangulaire plus serrés à la côte (Larbi, 2017).

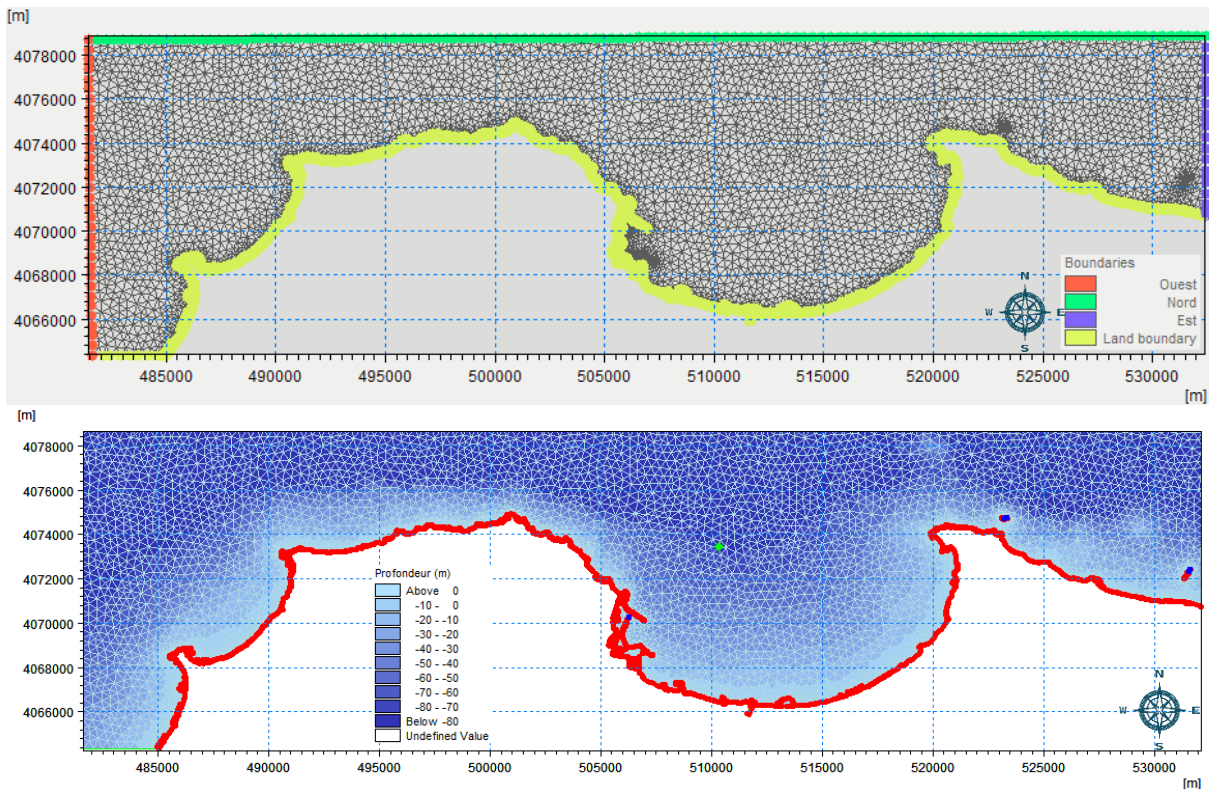


Figure II-35 : Maillage au niveau de la zone Algéroise.

Après la création du Mesh file, l'étape qui suit est les réglages du Setup qui contient les données de base pour la simulation :

- En premier lieu, introduire le domaine d'étude (mesh file) puis, préciser la durée de simulation qui est de 1 an (8760 h) avec un intervalle de 3 heures ou de 24h. Un intervalle d'une heure veut dire 1 output/heure (dans notre cas cela dépend de l'intervalle de prise des données du vent).
- Par la suite, la table sédimentaire est générée (Q3D Sédiment Transport Table). Elle permet de calculer les taux de transport des sédiments non cohésifs ($m^3/s/m$) en utilisant l'effet combiné des vagues et du courant (usage pour le modèle numérique de transport de sable Mike 21-ST).
- Enfin, la préparation des données de simulation se termine en intégrant les données relatives à la hauteur de la houle, la direction et la période issues des résultats du modèle numérique Spectral Waves (Mike 21-SW).

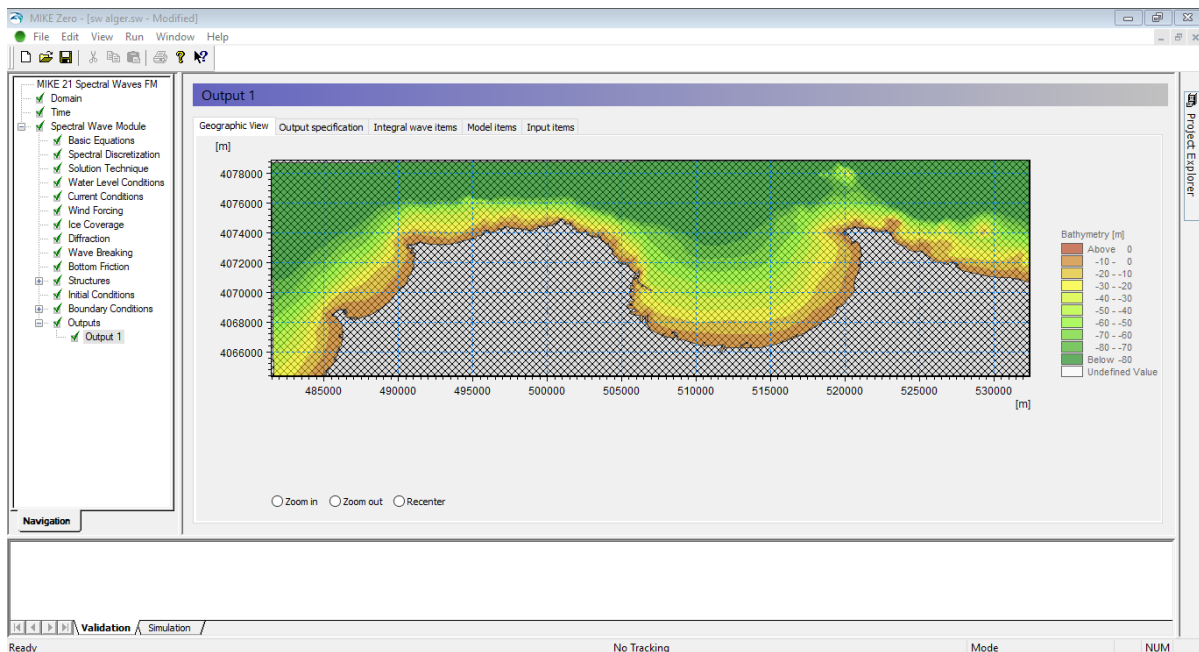


Figure 2-36 : Réglage du modèle couplé « Coupled Model ».

2.4.4 Les courants

Un courant est un déplacement d'une masse d'eau, c'est le moteur principal de la morphodynamique côtière (MIOSSEC, 2009). Leur intervention dans la mobilisation et le transport sédimentaire fait d'eux une variable à considérer lors des études de l'évolution des systèmes côtiers.

Les courants océaniques sont des déplacements d'eau dans le sens horizontal et vertical. Ces déplacements sont beaucoup plus lents et réguliers que ceux des courants aériens. Ils sont néanmoins régis par les mêmes phénomènes. Ils résultent de :

- L'inégalité de la répartition de l'énergie solaire entre l'équateur et les pôles ;
- La rotation de la terre (la force de Coriolis dévie les courants marins vers la droite dans l'hémisphère Nord).

Ils sont à l'origine de l'état dynamique sédimentaire (érosion, transport et accumulation). Par ailleurs, un constat de manque de données courantologiques a été établi, ce qui complique l'étude de ces derniers. Il existe en effet différents types de courants, en fonction de leur source de génération :

2.4.4.1 Les courants liés aux vents

L'intensité des courants ainsi que la fréquence et les directions des houles et des vents évoluent dans un même sens. Ces courants sont les facteurs essentiels qui entrent dans la dispersion et la remise en suspension des sédiments qui seront disposés au transport.

2.4.4.2 Les courants liés à la marée

Les marées atmosphériques étant faibles en Méditerranée, ne peuvent pas créer des courants de marée capables de jouer un rôle sur la distribution sédimentaire.

2.4.4.3 Les courants liés à la houle

Contrairement aux courants généraux et les courants liés à la marée qui n'ont aucune influence sur la distribution sédimentaire infralittorale, les courants induits par la houle sont seuls à agir sur le transit sédimentaire. Ce sont des courants qui prennent généralement naissance à partir d'une houle oblique. On citera également deux types de courants liés à la houle.

2.4.4.3.1 Les courants de retour (courant perpendiculaire à la côte)

Le courant de retour correspond à une zone de flot de retour à partir du déferlement de la houle contre la ligne du rivage. Les eaux superficielles poussées vers la côte s'écoulent sur le fond en créant le courant de retour. Ce dernier peut atteindre des vitesses suffisantes pour éroder le fond et transporter vers le large les particules mises en suspension par déferlement.

2.4.4.3.2 Les courants de dérive littorale (courant parallèle à la côte)

Les courants parallèles à la côte créent des dérives littorales qui provoquent le transit le long du rivage. Ces courants n'apparaissent que lorsque la houle atteint la côte avec une certaine obliquité par rapport au rivage.

La vitesse de ce type de courant dépend des paramètres de la houle, de l'obliquité de celle-ci et de la pente de la plage, elle peut atteindre plusieurs nœuds.

Il existe donc, en effet, différents types de courants le long de notre zone d'étude à savoir : les courants généraux, les courants de marée, les courants de dérive dus aux vents et les courants générés par la houle (MATEV, EAU, IAU-IDF et BRGM, 2013). Les trois premiers types peuvent être considérés comme négligeables le long du littoral d'Alger car :

- Ils sont liés à la circulation de grandes masses d'eaux océaniques ;
- Les courants de marées sont faibles ;

- Les courants dus aux vents ne dépassent pas 15 à 20 cm/s et ne concernent que la partie superficielle de la masse d'eau.
- Seuls les courants dus à la houle sont susceptibles d'agir sur le transit littoral dont :
 - Les courants de translation et de compensation ;
 - Les courants de retour ;
 - La dérive littorale ;
 - Les courants d'expansion latérale.

2.4.5 Résultats et discussion de la simulation

Les résultats de simulation sont présentés ci-après. Les directions considérées sont Nord-Est et Nord-Ouest, les autres directions sont représentées en annexes (Annexe N°09).

2.4.5.1 Réfraction de la houle (domaine global)

L'observation des résultats de la modélisation des différents secteurs sélectionnés montre que la propagation des vagues se fait de manière à s'abattre en fonction des incidences sur les zones les plus exposées particulièrement les zones à falaises (zone de caps) dans lesquelles les vagues semblent être moins amorties (Au niveau des falaises d'El Marsa jusqu'à Ain Taya, les falaises du cap de Sidi Fredj ainsi que celles comprises entre Ain Benian et Bab El Oued). Les zones côtières les plus exposées aux vagues du secteur O et NE (secteurs les plus dominants en fonction des saisons dans la région algéroise), sont situées au niveau des littoraux rocheux et les zones à falaises où les vagues déferlantes se dissipent modérément.

Toutefois, la modélisation de la réfraction montre que les vagues sont moins énergiques au niveau des parties abritées de la zone d'étude notamment la partie centrale. Ceci semble s'expliquer du fait que la pente est relativement douce, ce qui provoque la dissipation de leur énergie.

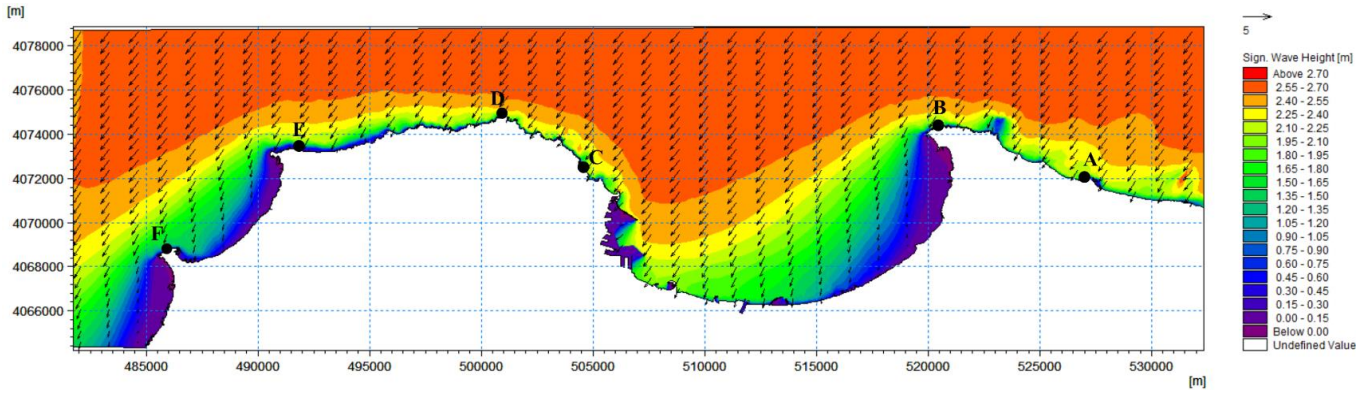


Figure II-37 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise vagues du secteur NE.
 $H_s = 2.56$ m. $T = 8$ s

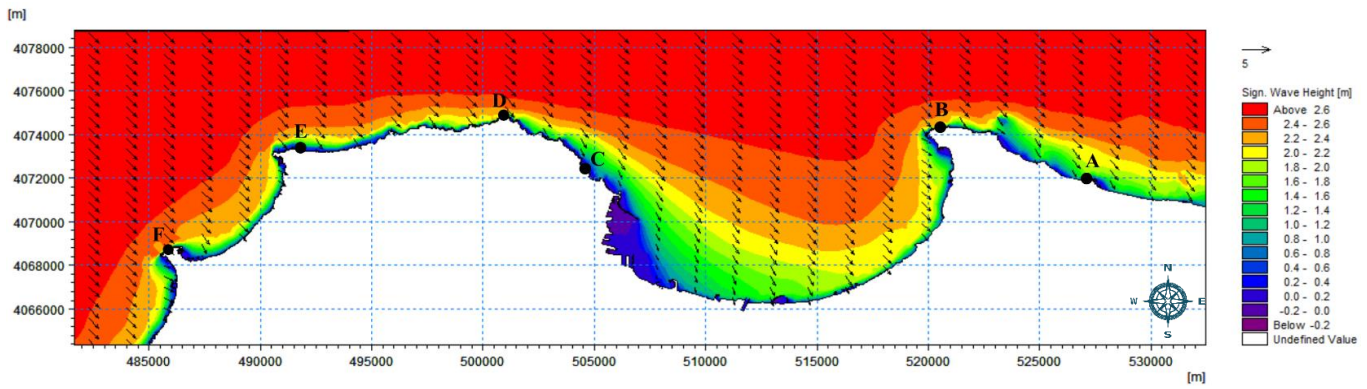


Figure II-38 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise vagues du secteur NO.
 $H_s = 2.64$ m. $T = 8$ s.

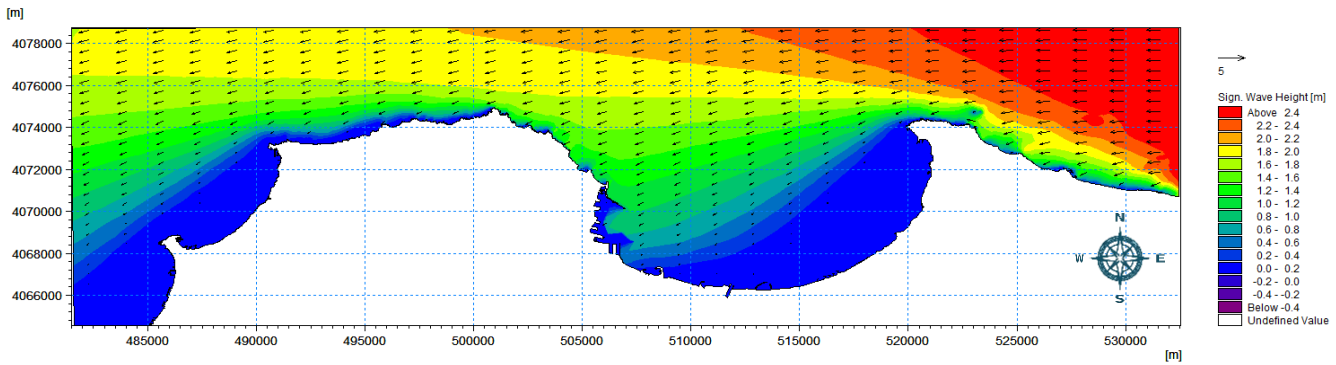


Figure II-39 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise, vagues du secteur E.
 $H_s = 2.53$ m. $T = 8$ s.

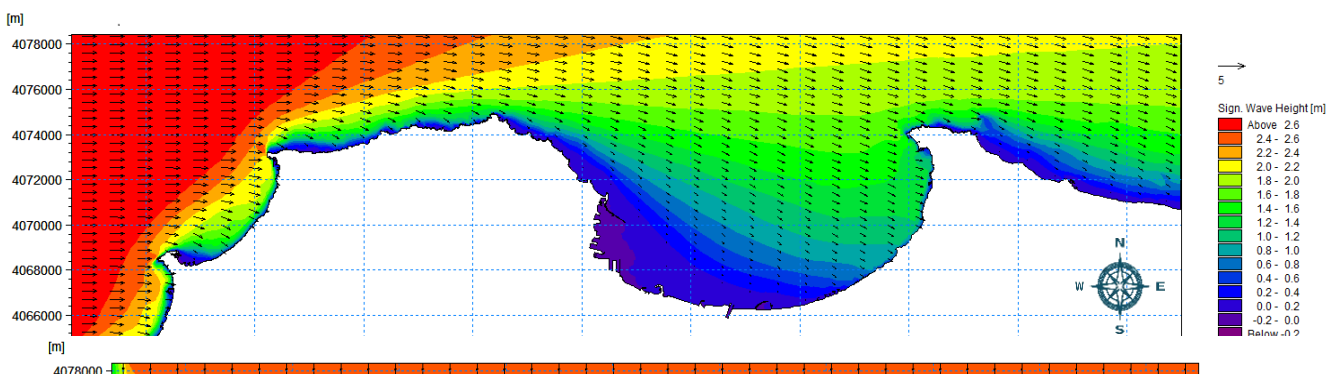


Figure II-40 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise, Vagues du secteur O. Hs= 2.67 m. T= 8s.

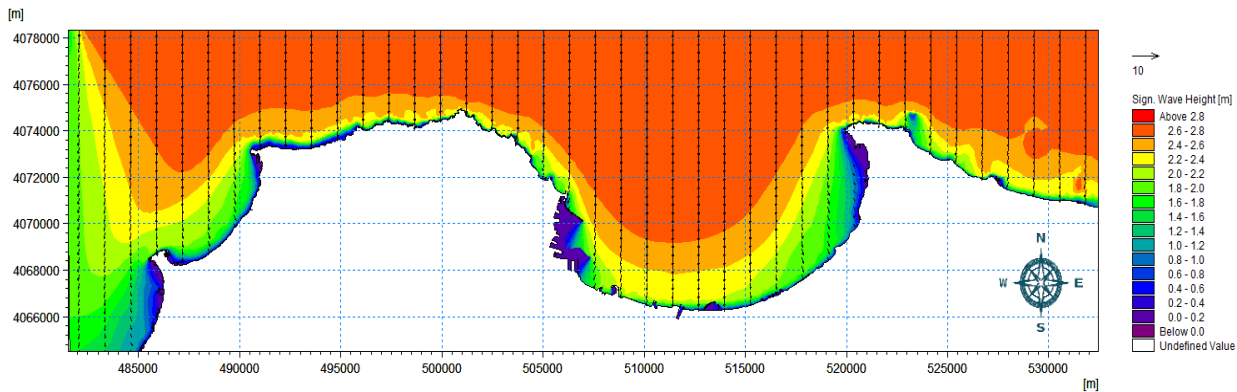


Figure II-41 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise, vagues du secteur N. Hs= 2.67 m. T= 8s.

L’observation combinée du forçage induit par les vagues des différents secteurs sélectionnés pour la modélisation montre que les zones côtières à forts potentiels énergétiques sont essentiellement induites par :

- Leur degré d’exposition aux vagues provenant du large,
- Des positions par rapport aux caps et promontoires voisins,
- Des pentes sous-marines proches côtières.

L’énergie des vagues transportée par front d’onde est proportionnelle à la hauteur significative des vagues. Elle s’exprime par l’équation suivante (Hemdane et al., 2016) :

$$P = 0.4 H_s^2 T \text{ (kW/m)}$$

Avec Hs, hauteurs significatives des vagues (m) et T, période de pic du spectre (s).

Tableau II-5. Estimation de la puissance des vagues dans la zone de déferlement de la région algéroise.

Secteur Ouest (O)						
	A	B	C	D	E	F
Hs	0,187125	0,646081	0	0,437195	0,359563	0,852319

T(s)	8	8	8	8	8	8
P(kw/m)	0,11	1,34	0,00	0,61	0,41	2,32

Secteur Nord-Ouest (NO)

	A	B	C	D	E	F
Hs	0,55	1,05	0,09	0,55	0,4	0,98
T(s)	8	8	8	8	8	8
P(kw/m)	0,97	3,53	0,03	0,97	0,51	3,07

Secteur Nord (N)

	A	B	C	D	E	F
Hs	0,587616	1,726211	0,691726	2,586946	0,404672	0,883275
T(s)	8	8	8	8	8	8
P(kw/m)	1,10	9,54	1,53	21,42	0,52	2,50

Secteur Nord Est (NE)

	A	B	C	D	E	F
Hs	0,57	0,95	2,02	1,84	0,39	0,52
T(s)	8	8	8	8	8	8
P(kw/m)	1,04	2,89	13,06	10,83	0,49	0,87

Secteur Est (E)

	A	B	C	D	E	F
Hs	0,403979	0,069845	0,657995	0,365234	0,180515	0,000032
T(s)	8	8	8	8	8	8
P(kw/m)	0,52	0,02	1,39	0,43	0,10	0,00

Le Tableau illustre les résultats de l'estimation de la puissance des vagues (P) en (kW/m) représentés par des points situés dans la zone de déferlement des vagues de la zone d'étude (profondeurs inférieures à 10 m) (figure II-37). Ces résultats font état du niveau de puissance qui peut atteindre 21 kW/m notamment pour le secteur Nord. Le secteur NE suit avec une valeur de plus de 13 kW/m.

Il est à noter que ces estimations sont relatives aux vagues fréquentes régulant la partie côtière de la zone d'étude. En effet, ces estimations peuvent facilement dépasser 20 kW/m lors des périodes de tempêtes modérées voire même 100 kW/m lors de fortes tempêtes (Hemdane et al., 2016).

2.5 Conclusion du chapitre

Le diagnostic effectué sur la région algéroise a permis de répondre clairement à certaines des questions qui concernent la qualification physique de ce secteur côtier.

L'étude climatique, particulièrement celle des régimes des vents concorde et explique une bonne partie des résultats obtenus lors de la simulation hydrodynamique. Aussi, La pénurie sédimentaire a été accentuée par l'aspect anthropique et la mise en place d'infrastructures de blocage (barrages d'eaux) réduisant encore les apports en matériaux. Cette dernière est en forte corrélation avec le volet bathymétrique, où la variation des pentes influe fortement sur les directions et l'intensité des propagations.

Les différents volets traités s'imbriquent pour alimenter, voire déclencher, des éléments de réponses pour les interrogations posées dans la problématique. Toutefois, ce diagnostic doit nécessairement être complété par une étude de variation de la ligne de rivage afin d'établir les liens de cause à effet entre le système côtier algérois et les facteurs qui régissent son évolution.

Chapitre III : Etude de la cinématique
du trait de côte et cartographie de
l'érosion marine

3.1 Introduction

L'érosion du littoral ainsi que les risques de submersion des côtes constituent un sujet de préoccupation de plus en plus prégnant pour la zone algéroise, compte-tenu de l'augmentation des enjeux dans cette zone, qui est soumise à des aléas naturels récurrents.

Le trait de côte est généralement la ligne qui sépare la terre et la mer, cependant, avec la complexité de la morphologie côtière, il est souvent très difficile à déterminer sur terrain. Pour analyser ces changements, une définition du « trait de côte » doit être donnée de manière à prendre en compte les différentes configurations géomorphologiques des littoraux ainsi que les notions d'évolution temporelle relative (Le Berre et al., 2008).

L'évolution du trait de côte est un phénomène naturel engendré par la conjonction d'un certain nombre de processus dynamiques (marins, continentaux et biologiques) et dépendant des caractéristiques géomorphologiques des systèmes littoraux. Néanmoins, ces phénomènes naturels sont exacerbés par des actions anthropiques perturbant l'équilibre dynamique des milieux littoraux (Daniel et Hubaud, 1996).

Afin de prévoir l'état de la vulnérabilité lié à la mobilité de la ligne de rivage, une analyse de l'évolution de la frange côtière à différentes échelles spatio-temporelles est indispensable. Elle peut contribuer à donner des éléments de réponse à différentes problématiques ou soutenir la prise de décision dans les cas où la compréhension de la cinétique côtière s'avère primordiale pour l'aménagement du littoral. Car cet espace, convoité mais fragile, concentre une grande part de la population et des activités économiques (JEGO, 2003).

Le trait de côte doit avoir la qualité de représenter schématiquement mais correctement l'état global du littoral du point de vue de son évolution sédimentaire (Mellet et al., 2012). Ce n'est pas une définition théorique du trait de côte, généralisable à tous les environnements qu'il convient de donner, mais une définition « fonctionnelle » de la frange côtière en fonction du type de littoral et des objectifs de suivi. (Elizabeth et al., 2005) suggèrent d'aborder la notion de frange ou de bande côtière qui s'étend du domaine marin au domaine continental, au sein de laquelle un ou plusieurs indicateurs géomorphologiques sont définis selon les types de côtes.

3.2 Approche méthodologique

Le choix de la méthodologie du suivi du trait de côte doit être en fonction des caractéristiques du milieu, des moyens et outils disponibles ainsi que les besoins en matière de précision. Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour la méthodologie proposée par le BRGM (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) et basée sur une logique de progression d'étapes à entreprendre (Mellet et al., 2012). L'organigramme synthétise l'application de ces différentes étapes sur notre zone d'étude (Figure III-1) :

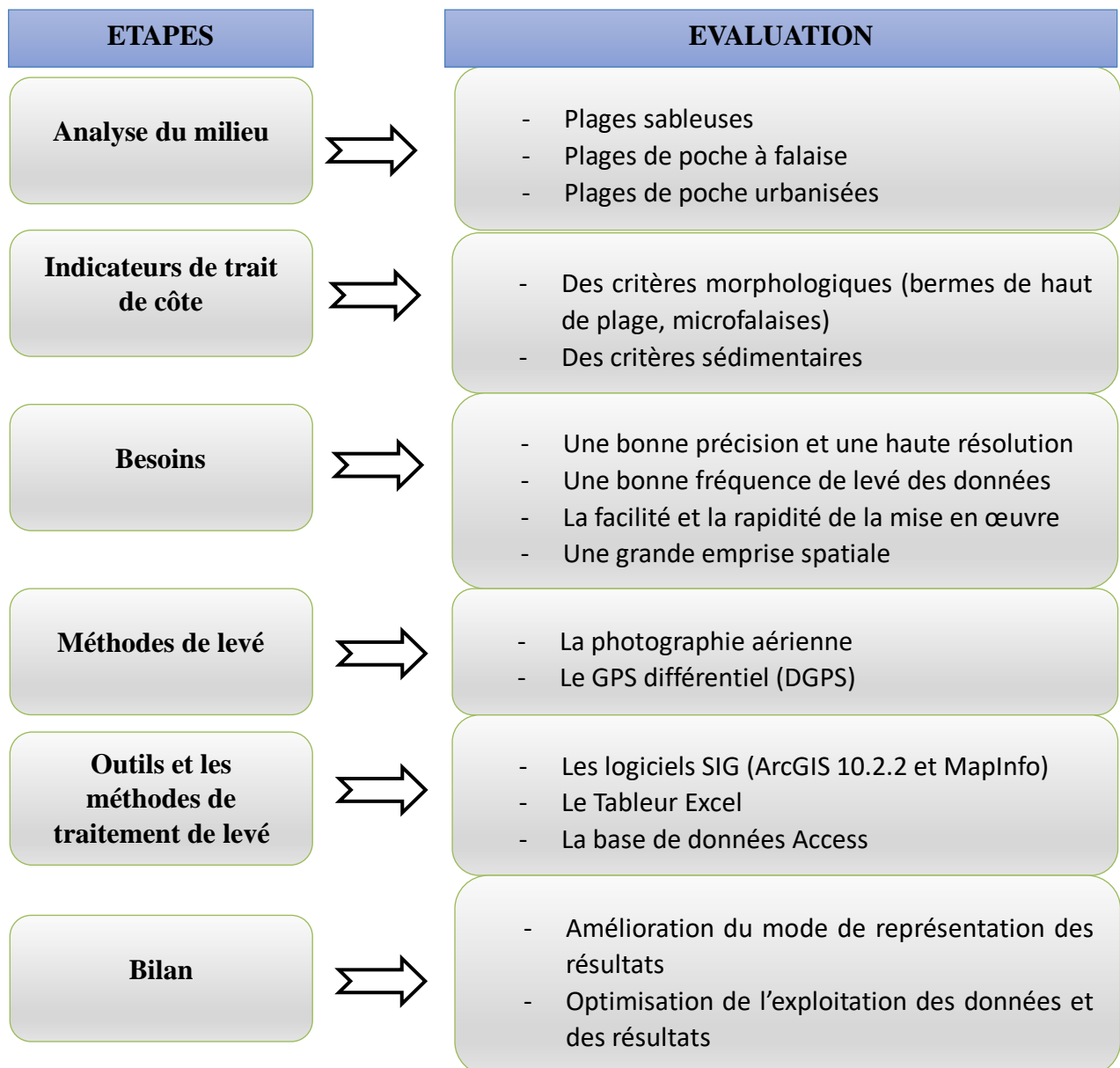
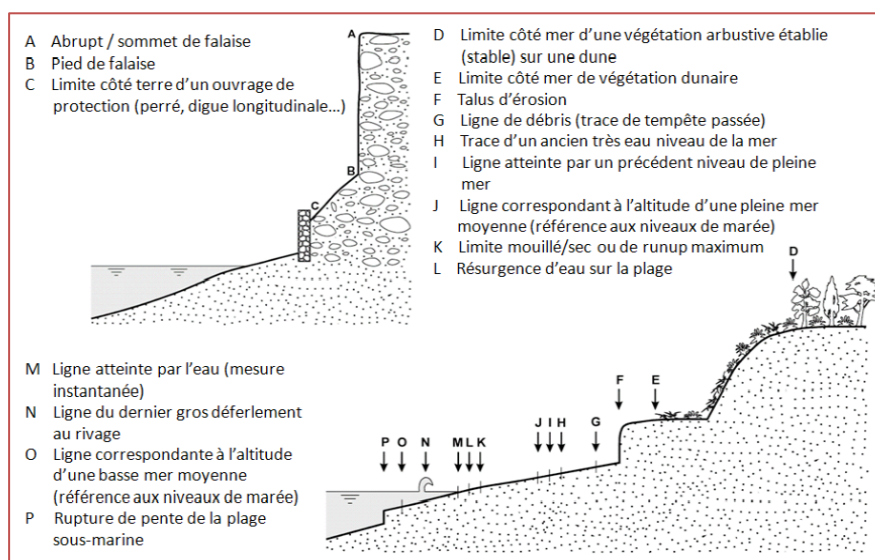


Figure III-1 : Organigramme de la méthode de suivi du trait de côte.

3.2.1 L'analyse du type de milieu

Cette étape vise à caractériser le contexte géographique et géomorphologique de la zone de manière à acquérir une connaissance globale du secteur étudié et à analyser les différents mécanismes présents (érosion et submersion). Elle permet d'identifier les enjeux exposés et les différents aménagements réalisés à proximité du secteur. L'ensemble de ces données apporte un aperçu du contexte géodynamique global de la zone d'étude.

- La côte étudiée comprend une variété géomorphologique marquante, à savoir les plages et les cordons dunaires ainsi que les falaises situées entre Réghaia et Ain Taya et en prenant en considération la présence d'ouvrages de protection (épis, digues, etc.) (Figure III-2).
- Il faut noter aussi que la tendance à l'érosion est généralisée sur la totalité de la côte Est algéroise (Bouakline, 2009).



3.2.2 Difficulté de représentation

Le trait de côte n'a pas une, mais plusieurs définitions selon la thématique choisie, il est censé représenter la frontière linéaire entre les domaines maritime et terrestre. L'analyse de la cinématique littorale requiert avant tout le choix d'un indicateur du trait de côte et la mise au point d'une méthode d'extraction et de suivi adaptée au marqueur utilisé selon le type de côte, le matériel et les données disponibles (Faye, 2010).

En raison de la diversité des critères d'identification, Marc 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.

3.2.3 Indicateurs et choix de ligne de référence

Les différentes lignes utilisables en cinématique côtière ont fait l'objet de plusieurs synthèses. Parmi les lignes indiquées, peu d'entre elles correspondent au trait de côte tel qu'il est défini (Bird, 2007). En effet, ce ne sont que des indicateurs de base pour analyser l'évolution d'un rivage donné. Ces lignes sont rangées en sept catégories selon les entités auxquelles elles se réfèrent (ruptures de pente, limites de végétation, niveaux instantanés de marée, datums marégraphiques, entités virtuelles, surface de la plage et conditions météorologiques) (Faye, 2010).

3.2.3.1 Les lignes instantanées de rivage et les limites d'humectation

La position de ces lignes est inhérente au niveau atteint par la marée sur l'estran. Elles déterminent la limite du jet de rive à un moment donné en fonction des conditions météorologiques. Parmi ces lignes qui font référence à un niveau d'eau momentané (Figure III-3), on distingue :

- (A) Ligne instantanée de rivage,
- (B) Limite de la zone de saturation,
- (C) Limite sable sec/sable mouillé,
- (D) Ligne du niveau des pleines mers précédentes,
- (E) Niveau atteint par une pleine mer antérieure.



Figure III-3 : Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage (Boak et Turner, 2005).

3.2.3.2 Critique

L'extrémité du jet de rive ou ligne instantanée de rivage représentée par (A) dans la figure III-3 forme l'interface entre le plan d'eau et la pente de la plage à tout instant et correspond parfois à la limite de l'écume du jet de rive (Shoshani et Degani, 1992 ; Kraus et Rosati, 1997).

C'est une ligne très mobile dont la position sur l'estran fluctue au rythme du jet de rive et de la nappe de retrait. Les fluctuations de l'emplacement de cette ligne sont dictées par la pente, la puissance des vagues, les conditions atmosphériques (vent et pression) et essentiellement le niveau de la marée.

En conséquence, sur les littoraux mésotidaux et macrotidaux, l'amplitude de ces déplacements est considérable et peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Ce n'est pas le cas pour notre zone. En effet, ses variations sont de moindre importance, voire même négligeables en général si les lignes sont acquises dans des conditions de mer, de marée, de vent et de pression semblables (Frihy et al., 1994 in Faye, 2010).

De plus, cette ligne de contact entre le haut de la plage et l'arrière plage est facilement reconnaissable sur les photos aériennes puisqu'elle représente la limite des surfaces mouillées (sur les photos elles apparaissent en gris foncé) (Dolan et al., 1992). Mais la présence de plusieurs lignes selon la teneur en eau des sédiments est une source potentielle de confusion surtout entre la limite sable sec/sable mouillé et la limite de la zone de saturation en eau.

La référence pour les différents types du littoral (Figure III-5) est ainsi (Faye, 2010):

- **Milieu dunaire** : pied de dune, lisière de haut de falaise dunaire et ligne de crête dunaire ;
- **Littoral à falaises** : lisière du sommet de falaise / pied de falaise ; sommet / base de l'éboulis et contour de la cicatrice d'arrachement ;
- **Littoral artificiel** : ouvrages de défense (limite côté mer / côté terre et ligne de crête).

Selon la typologie morphologique de notre côte, la limite du trait de côte choisie est la ligne de rivage instantanée (Figure III-4) qui correspond à la limite d'humectation « En mer calme » (Sabatier, 2001 ; Bouakline, 2009).



Figure III-4 : a, b et c : Extrémité du jet de rive dans la zone d'étude (Sidi Fredj Est, Octobre 2018).



Figure III-5 : La ligne de rivage instantanée choisie pour définir le tracé du trait de côte.

3.2.3.3 Modes d'acquisition des levés du trait de côte

L'analyse spatio-temporelle de la ligne du rivage nécessite l'emploi de techniques à la fois modernes et classiques.

L'acquisition des positions de la ligne de rivage pour l'analyse multi-temporelle s'est faite à travers deux modes de hautes précisions : la photographie aérienne et le GPS différentiel (DGPS). Les images satellitaires quant à elles, ont été exclues pour ne pas altérer la qualité des résultats vu leur marge d'erreur qui reste assez importante par rapport aux deux précédents modes. Le besoin a été formulé dans les optiques suivantes :

- Sectoriser et localiser l'évolution du trait de côte (volet cartographique),
- Mesurer et quantifier puis représenter cette évolution de façon statistique.

3.3 Méthodes de détection des variations de la position de la ligne de rivage

Parmi les techniques mises en œuvre pour étudier la mobilité d'une ligne de référence donnée, on distingue les méthodes de terrain privilégiant l'observation directe et les méthodes fondées sur l'observation indirecte.

3.3.1 Approche indirecte

3.3.1.1 La photographie aérienne

C'est une méthode d'observation indirecte et pertinente qui s'appuie sur tous les types de milieux. La photographie aérienne à but cartographique est caractérisée par son format, sa résolution pixel de 10 à 50 cm et par son échelle, allant de 1/8 000 jusqu'au 1/50 000 ([Mellet et al., 2012](#)). L'estimation de la marge d'erreur de la position du trait de côte via la photographie aérienne est fixée à $\pm 10\text{m}$ ([Suanez, 1997](#) ; [Sabatier, 2001](#) ; [Boutiba, 2006](#)).

Les images brutes saisies sont redressées (mises en conformité géographique) et géoréférencées. Il est nécessaire pour cela de disposer de points de référence géographique de façon à localiser, recalibrer et redresser les images et éliminer ainsi les déformations dues à la prise de vue ([Faye, 2010](#)). Les images sont intégrées dans un ensemble d'images pour constituer un orthophotoplan géoréférencé, géré ensuite par un Système d'Information Géographique (SIG).

[Stafford et Langfelder \(1971\)](#) estiment que les erreurs dues aux déformations des clichés aériens verticaux sont tolérables si l'on travaille sur des côtes basses sur des périodes de dates très éloignées et en utilisant uniquement la partie centrale du cliché qui est la zone la moins

déformée. La méthode a l'avantage d'être simple, peu coûteuse et peut avoir une précision acceptable si elle est appliquée avec soin (Leatherman, 1983 ; Anders et Byrnes, 1991 ; Moore, 2000).

Par ailleurs, la fiabilité des taux d'évolution obtenus par cette technique dépend du nombre et de la répartition spatiale des points de référence. Cela peut être problématique sur les côtes disposant de peu de points d'appui (Dolan et al., 1979).

Pour les besoins de notre étude, les positions de la ligne de rivage ont été extraites par digitalisation des photos aériennes de 1959, 1972, 1980, 1999 et de 2003 après avoir été scannées et enregistrées comme des fichiers raster "* tiff "d'une résolution de 600 dpi (AMIS, 2004) puis redressées et géoréférencées à l'aide d'un logiciel SIG (Figure III-6).

3.3.1.2 Estimation de l'erreur

Le groupe du projet AMIS a estimé l'erreur à +/- 3 m. Cette erreur se résume essentiellement en trois types :

- **L'erreur graphique** : représente l'erreur de la phase de digitalisation, elle est estimée à 0.2 mm fois l'échelle générique (N) soit $0.2 * N$, c'est-à-dire 4 m pour l'échelle 1 :20 000 et 2 m pour 1 :10000.
- **L'erreur liée à la résolution des rasters** : elle est considérée comme la moitié de la dimension du pixel soit 5 cm.
- **L'erreur de l'opérateur** : la position lors de la prise de vue, ou lors du géoréférencement.

Le tableau III-1, résume les échelles des photos acquises pour chaque campagne aérienne.

Tableau III-1 : Années et échelles des photos aériennes (AMIS, 2004).

Année de la campagne aérienne	Echelle
1959	1 :25 000
1972	1 :20 000
1980	1 :10 000
1999	1 :10 000
2003	1 :10 000

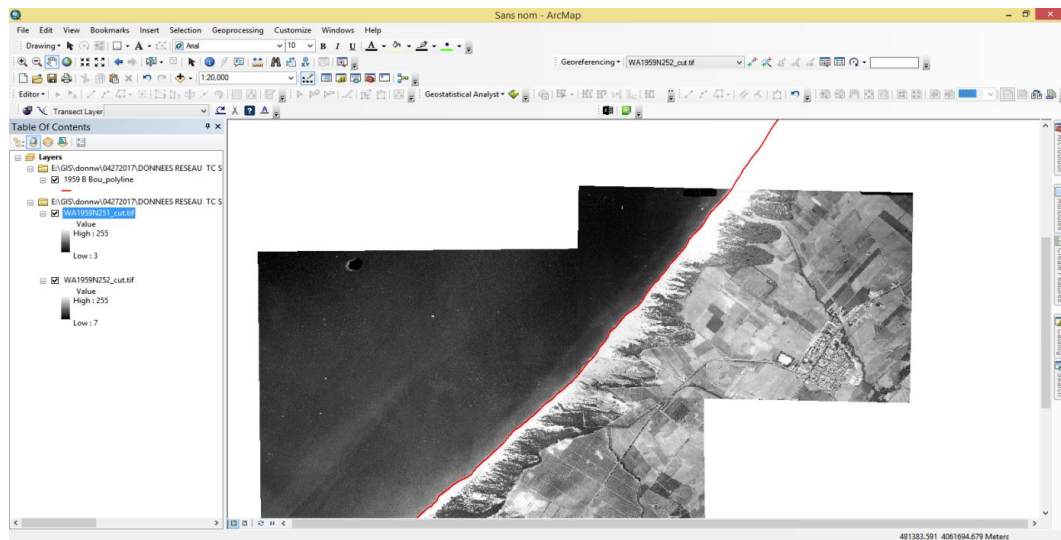


Figure III-6 : Etape de géoréférencement des photos aériennes et digitalisation du trait de côte.

3.3.2 Approche directe

Elle est basée sur des mesures topographiques périodiques (hebdomadaires, bihebdomadaires, mensuelles, semestrielles et annuelles) à l'aide de matériels de levés allant des appareils à principe optique (niveau de chantier, théodolites, etc.) aux appareils électroniques à laser (tachéomètre électronique et Lidar) ou le positionnement par satellites en mode différentiel (Récepteur DGPS).

Les mesures peuvent concerner uniquement la ligne de référence ou le profil de plage et doivent être raccordées à un même système de référence relatif ou absolu pour faciliter la comparaison entre différents levés.

Les données fournies par les levés de terrain sont extrêmement précises pour la quantification de la mobilité du trait de côte mais leur acquisition réclame beaucoup de temps. Pour cette raison, elles sont limitées dans la plupart des cas à quelques sites spécifiques pour des études sur le court terme (Dolan et al., 1978a ; Dolan et al., 1979 ; Smith et Zarillo, 1990 ; Morton et al., 1993 in Faye, 2010).

3.3.2.1 Levés DGPS (GPS différentiel)

La technique DGPS est une méthode destinée à améliorer la performance de positionnement ou de synchronisation du GPS. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une ou de plusieurs stations de référence à des emplacements connus, chacune équipée d'au moins un récepteur GPS (Kaplan et al., 2006).

Les campagnes ont été réalisées en utilisant la méthode de positionnement différentiel avec deux récepteurs géodésiques ; fixe (Base) et mobile (Rover). Spécifiquement; le modèle « *Topcon Hyper Pro* » pour la station de base et « *Rover Pro* » pour la mobile qui constitue le récepteur avec une antenne géodésique, un modem radio et un contrôleur intégrés (Figure III-7). C'est une technique à double différence satellite-récepteur, qui permet de calculer la position relative d'un point par rapport à un autre de coordonnées connues de façon précise.

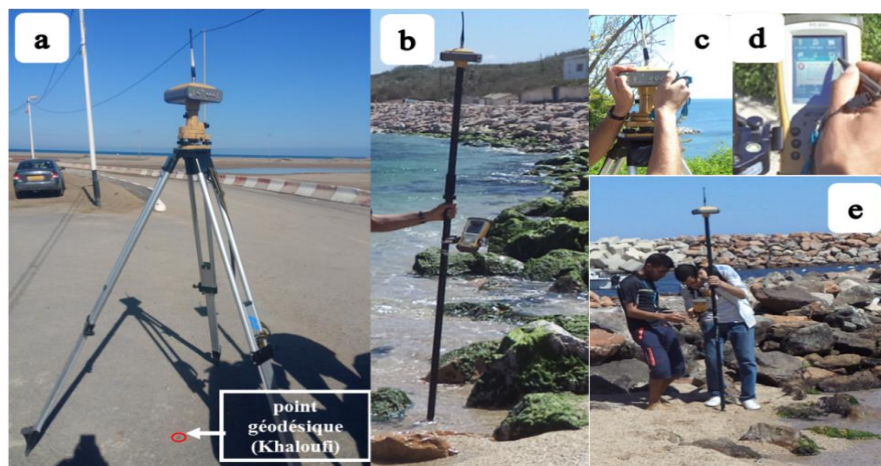


Figure III-7 : Système complet du DGPS levé RTK base temporaire avec repaire, **a :** station de base, **b :** Station mobile, **c, d, e :** réglage de signal calibration station base- station mobile.

Le réseau de surveillance du trait de côte algérois, instauré par l'Agence de Protection et de Promotion de Littoral (APPL), comprend 15 points géodésiques au niveau desquels les stations de base peuvent être installées (Figure III-8). Ces points servent de référence invariante lors d'un levé topographique. A ce titre, ils sont fortement préconisés quelque soit le mode de levé choisi (Mellet et al., 2012).

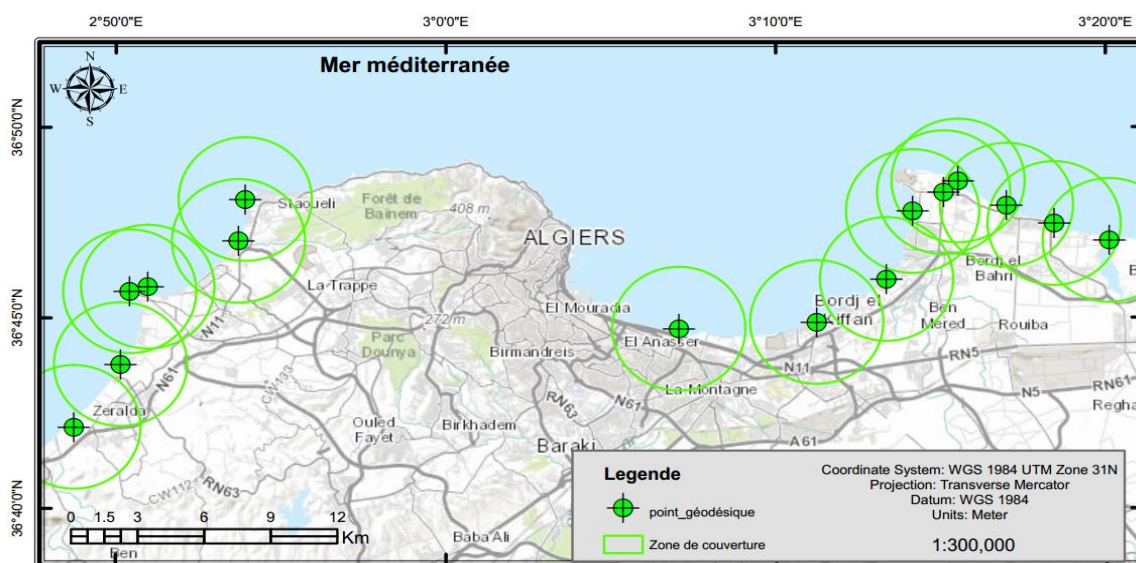


Figure III-8 : Réseau des points géodésiques de la côte algéroise mis en place par l'APPL.

3.4 Mise à jour du réseau de points géodésiques

Dans le cadre de cette thèse, la considération des points géodésiques du réseau de surveillance de l'APPL a été renforcée en collaboration avec l'équipe d'opérateurs de cette agence. De nouveaux points ont été créés afin de densifier le réseau déjà en place, faciliter l'acquisition des levés et couvrir une plus grande zone d'investigation.

Un point géodésique est un repère permanent marquant très exactement l'emplacement d'un point matérialisé dont on connaît précisément la longitude, la latitude et l'altitude. Ces points sont souvent constitués d'un ensemble de blocs de pierre ou de béton.

Les points au sol sont caractérisés par un repère géodésique métallique, scellé dans un élément solide et stable du paysage (rocher, réservoir, etc.), ou par une borne géodésique, implantée spécialement. Certaines bornes géodésiques peuvent aussi supporter des repères géodésiques (Figure III-9).



Figure III-9 : Procédé de l'installation d'un point géodésique ; a : plantation du clou, b : clou en place, c : relevé de la série des coordonnées sur le clou.

3.4.1 Critères d'installation des points

Dans le cas du relèvement, il est nécessaire d'avoir des points pouvant être stationnés et pouvant servir de repère (implantés au sol) pour installer d'autres points. L'installation d'un réseau de points géodésiques doit répondre à un nombre de critères indispensables pour leur bon fonctionnement.

3.4.1.1 Espacement entre les points

La distance entre les points dans un réseau varie en fonction du site. Elle est plus rapprochée en milieu urbain (5 km en moyenne) tandis qu'elle peut être plus espacée en milieu rural (15 km en moyenne) (MRNF, 2012).

3.4.1.2 Visibilité des satellites

Le site doit être dégagé au-dessus sans obstacles pour assurer une bonne capture du signal GPS. Aussi, il est impératif de s'assurer auprès des autorités et des services concernés qu'il n'y aura pas de constructions au moyen terme pouvant affecter l'emplacement du point géodésique et le dégagement du site (Figure III-10).

3.4.1.3 Assise

Il faut bien sélectionner un roc ou une structure en béton pouvant recevoir le clou d'ancrage. Il n'est pas recommandé de procéder par une installation sur des ouvrages de protection ou en milieux portuaires.



Figure III-10 : Procédé d'installation d'un point géodésique ; a et b : Mise en place de la station « repère », c : Relevé de la série des coordonnées, d : Installation de la station fixe point géodésique.

3.4.1.4 Traitement et calcul

- Un maximum de points est relevé sur la position du clou installé, (entre 6000 et 8000) positions,
- Le fichier brut est extrait de l'ordinateur de bord du DGPS (Figure III-11-a),
- A partir du fichier brut, est projeté le nuage de points sur Excel (ou un calculateur) pour chacune des composantes (X, Y et Z) (Figure III-11-b),
- Pour une haute précision, les points dispersés ont été éliminés,
- La moyenne et l'écart type sont calculés pour chacune des composantes.

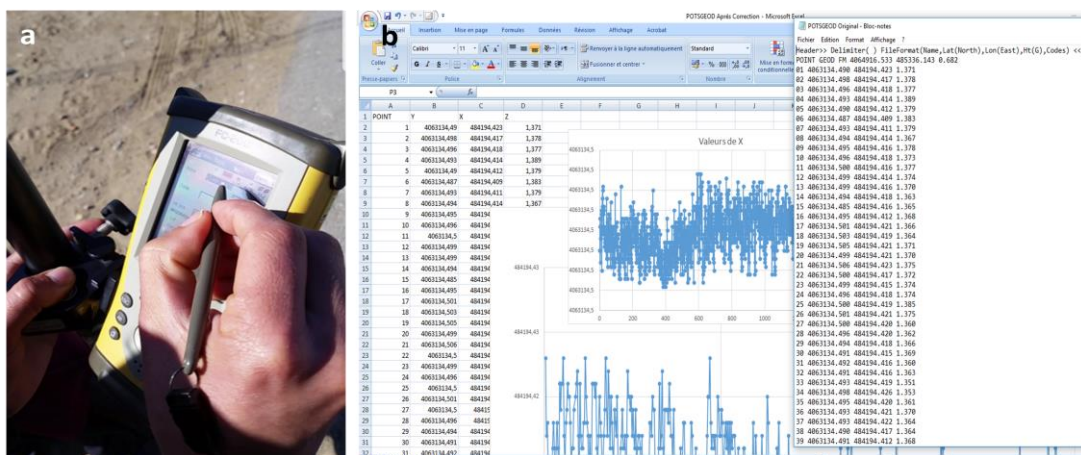


Figure III-11: a : Extraction du relevé brut, **b :** traitement des données et calcul des coordonnées du point géodésique.

La variété des faciès géomorphologiques sur le littoral a été un défi majeur dans cette étude, particulièrement les zones à falaises qui peuvent représenter un obstacle dans la diffusion du signal, bien que le côté « vers le large » soit dégagé (Figure III-12).

L'occupation de l'espace littoral ainsi que son réaménagement, peuvent faire disparaître un point en place ou changer sa position (Figure III-13). S'ajoute à cela les possibilités de mouvement à l'horizontale (inclinaison) et à la verticale (affaissement) des entités adjacentes à la zone littorale.

Il est aussi recommandé d'effectuer un contrôle régulier sur terrain des points géodésiques installés (Figure III-14).



Figure III-12 : **a :** Perte de signal du à un obstacle naturel et **b :** Perte de signal du à un obstacle artificiel, **c :** Terrain dégagé mais escarpé, **d :** Terrain à risque de mouvement.



Figure III-13 : **a :** Contrôle sur terrain des points en place ; **b, c, d, e, f, g, h, et i :** perte d'un point géodésique en raison de travaux d'aménagement (2016).



Figure III-14 : a et b : Contrôle de terrain, c, d et e : Marquage et signalisation des points géodésiques.

Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte

Tableau III-2 : Mise à jour et inventaire des points géodésiques dans le cadre du réseau de surveillance du trait de côte.

Référence	Commune	Appellation points	Statut	Année de la dernière mise à jour	X (m)	Y (m)	Z (m)	± Δ (cm) Planimétrique	± Δ (cm) Altimétrique
B1	Ain Taya	Surcouf (Ain Chorb)	Refait	2016	527399,4900	4071762,4300	21,690	4,0000	6,0000
B2	El Marsa	El Marsa ville	Perdu	2015	522422,6120	4073256,4100	41,5260	1,521	3,0000
B	El Marsa	El Marsa (Vieux port)	Refait	2016	523073,0330	4073828,3000	18,3716	1,5210	3,0180
B3	Ain Taya	Ain El Beida	Refait	2015	525255,1860	4072653,6300	8,7790	7,0000	5,0500
B5	Bordj El Bahri	Ondine Sud (Zerhouni)	Nouveau	2014	521022,6750	4072341,3500	1,9650	4,1500	5,5000
B6	Bordj El Kiffan (Fort de l'eau)	Bateau cassé	Nouveau	2015	519852,7400	4069043,9900	4,6300	3,3000	6,9000
B7	Bordj El Kiffan (Fort de l'eau)	Sirene II	Nouveau	2015	516707,0380	4066959,5000	4,6760	4,3500	5,9500
B8	Heraoua	El Kadouss	Refait	2014	529887,2950	4070944,7400	29,7640	4,0000	6,0000
B9	Hussein Dey	Nouvelle digue de Piquet blanc	Nouveau	2015	510493,1600	4066635,7300	2,9650	3,7500	5,7500
B10	Ain El Benien	Port El Djamilia	Nouveau	2015	490954,3900	4072924,9100	0,2200	3,0000	4,0000
B11	Ain El Benien	El Bahdja	Refait	2015	490653,9300	4070896,2700	1,9700	2,0000	3,7600
B12	Staoueli	Port de Sidi Fredj	Perdu	2014	486561,1700	4068675,1900	2,5100	3,0000	4,0000
B13	Staoueli	Thalassotheapie	Perdu	2015	485751,8300	4068450,4100	5,3400	3,0000	3,5000
B14	Zeralda	Complexe touristique	Refait	2014	485336,1430	4064916,5300	0,6820	3,3500	4,2000
B15	Zeralda	Khalloufi II	Refait	2014	483238,3730	4061871,9500	1,4810	3,5000	4,0000
B16	Zeralda	Familiale	Nouveau	2017	4063134,4939	484194,41268	1,3621	3,0000	4,0000
B17	Ain Taya	Tamaris	Nouveau	2017	526225,9760	4071991,4100	4,1090	1,5210	3,0180
B18	Staoueli	Palm beach	Nouveau	2017	485874,1580	4066005,8400	-0,3770	1,5200	3,0150
B19	Staoueli	Sidi Fredj Est	Nouveau	2017	486604,0270	4068218,0200	5,4750	1,5200	3,0135
B20	Reghaia	Reghaia	Perdu	2014	531950,9500	4070737,4500	8,2700	1,5160	3,0145

Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte

B21	Heraoua	Tarfaia	Nouveau	2017	528944,9790	4071183,2700	4,4890	1,5150	3,0145
B22	Ain Taya	Decaplage	Nouveau	2017	528621,4260	4071192,3100	25,7790	1,5190	3,0230
8A	Hammamet (Bainem)	Centre olympique de la voile	Perdu	2007	497249,91	4074332,29	13,41	3,50	4,50
9A	Rais Hamidou (La pointe)	Plage Vigie La Grande	Perdu	2007	501906,24	4074125,1	30,06	3,50	4
10A	Beb El Oued	Bastion 23 Kaa Sour	Perdu	2007	505629,41	4071512,05	10,49	3,50	4,50
11A	Hussein Dey	Embouchure Oued El Harrach Digue de rive gauche	Perdu	2007	511796,17	4066512,68	0,65	3,50	5
12A	Bordj El Kiffan (Fort de l'eau)	Fort Turc	Perdu	2007	516761,53	4067022,68	6,05	3	3
13A	Bordj El Bahri	Club Marina - Alger Plage	Perdu	2007	521062,82	4071825,8	0	6	6
2A	Zeralda	Epi Plage Sable d'Or	Perdu	2007	485318,25	4064925,27	0,71	3	3

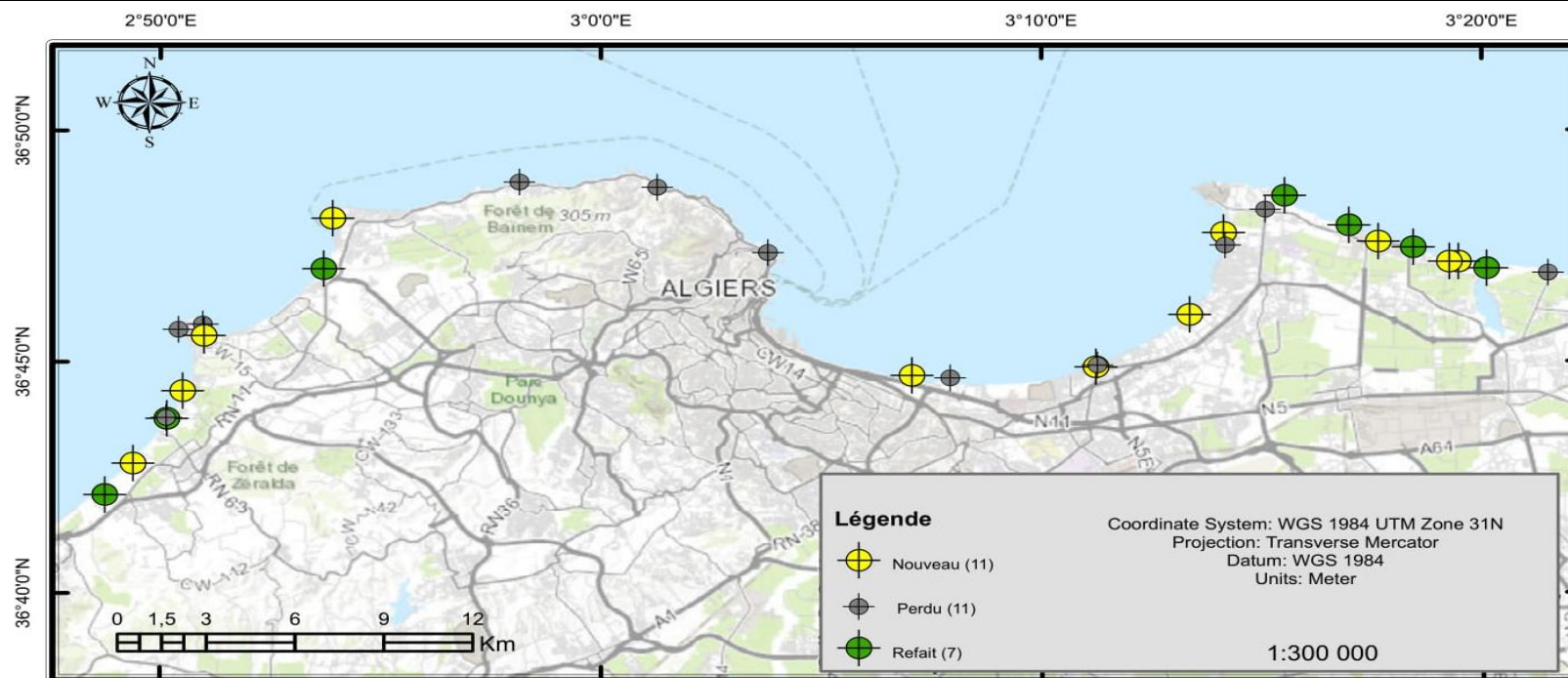


Figure III-15 : Réseau des points géodésiques de la côte algéroise mise à jour.

3.5 Principe de fonctionnement des levés DGPS

Les méthodes de détection du trait de côte sont multiples et variées en fonction des cas et de l'objectif des études. En ce qui concerne la nôtre, la méthode du DGPS s'est avérée la plus adéquate, vu son adaptabilité aux différents types de terrains lors des investigations (plages, falaises, dunes et côtes artificialisées) ainsi que sa précision élevée (centimétrique) et la rapidité d'acquisition des données.

Le principe du GPS Différentiel consiste à utiliser deux récepteurs, un fixe et un mobile. Le récepteur fixe sert de référence au mobile. La méthode du DGPS est basée sur le fait que ces deux récepteurs GPS soient situés à proximité l'un de l'autre (Messaoud, 2009). Ce qui permet à chacun de calculer ses propres coordonnées. Le positionnement de base étant connu avec précision (infra-centimétrique), il est donc possible de déterminer les corrections à appliquer par comparaison entre sa position calculée à partir des signaux satellitaires et ses coordonnées absolues afin de les transmettre à la station mobile (Kaplan et al., 2006 ; Faye, 2010). Les corrections sont transmises par le récepteur de la base vers le ou les récepteurs GPS mobiles distants par l'intermédiaire d'un système radio (Figure III-16).

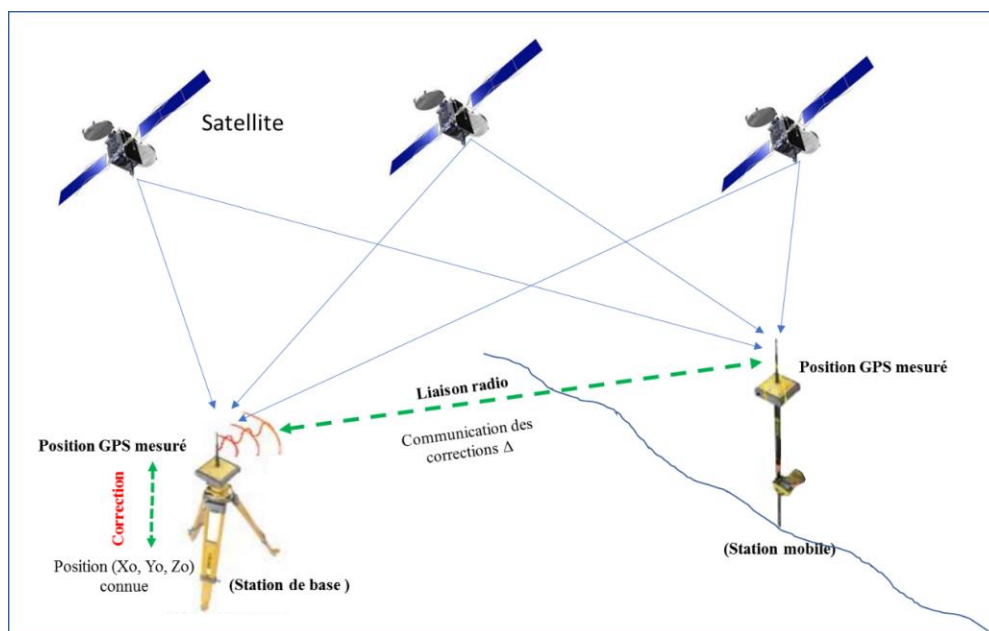


Figure III-16 : Principe de levé DGPS en mode RTK « Real Time Kinematic » (Boukhdiche,2017).

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 arrivant sur les deux appareils ont traversé les mêmes couches atmosphériques. Le récepteur fixe est localisé sur un site dont les coordonnées sont connues avec une grande précision. Ce récepteur calcule les distances qui le séparent des satellites en vue. Il soustrait à chaque distance calculée, la pseudo-distance correspondante mesurée pour obtenir une information de correction (Kara, 2009).

Le système complet se compose d'une base (récepteur radio), d'un mobile (Comprenant le « Controller » ou « Carnet de terrain ») et d'un système radio reliant ces deux récepteurs. Chaque levé génère un fichier de données dans la mémoire du DGPS et/ou du carnet de terrain. Ces fichiers sont sauvegardés sur un ordinateur portable après mesures (Figure 3-17).

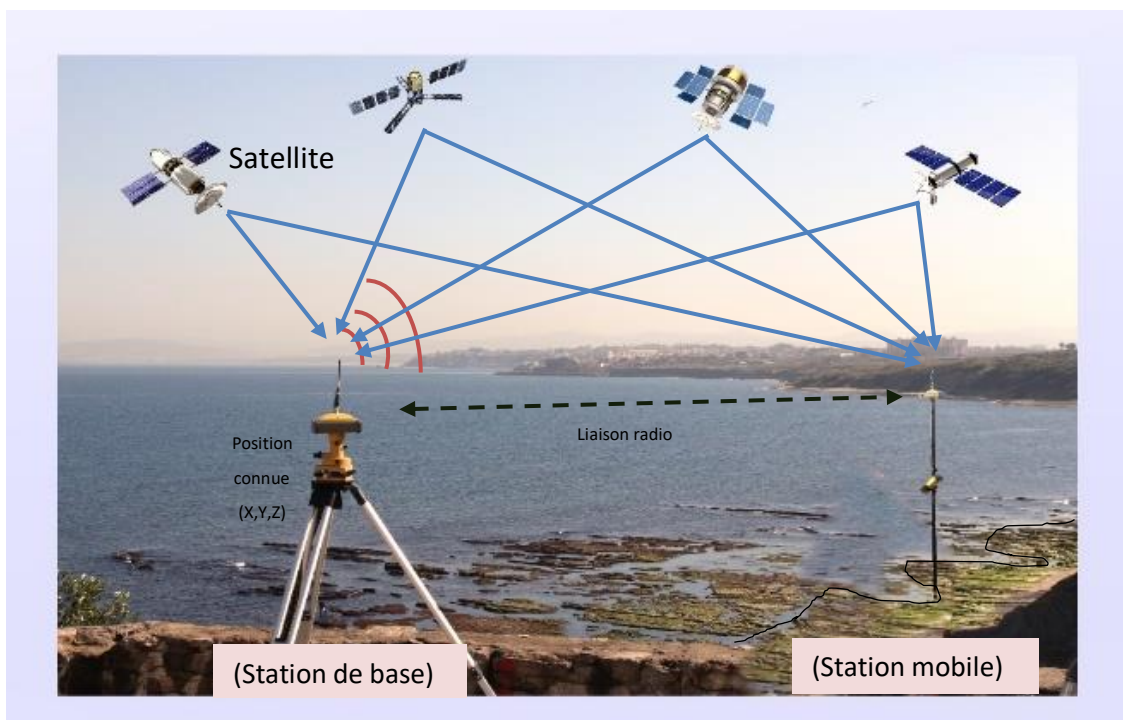


Figure III-18 : Schéma illustratif du principe de fonctionnement du DGPS (Agabi et al., 2018).

3.5.1 Performance du DGPS

Il existe deux types de levé pour mesurer les coordonnées de points à partir d'un DGPS.

- Levé RTK (Real Time Kinematic), la mesure (dite cinématique) se fait selon une précision centimétrique en temps réel (instantanée),

- Levé PPK (Post Processing Kinematic), 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).

Lors de cette étude, les levés sont élaborés en mode RTK, le GPS mobile est positionné en temps réel en recevant les corrections émises par la base. Celle-ci est déployée de manière spécifique et temporaire sur la zone d'étude.

Les récepteurs GPS sont utilisés suivant différents modes bien définis, permettant d'atteindre les objectifs de précision centimétrique (Figure III-18).

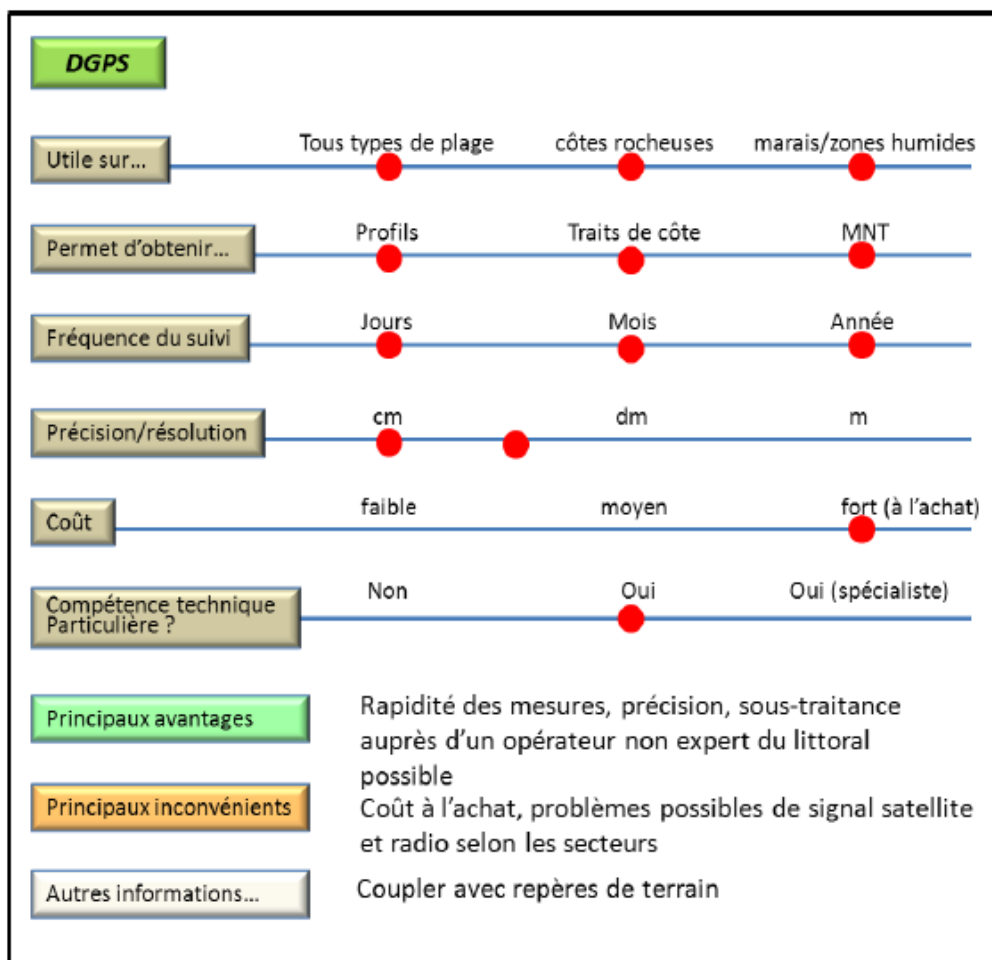


Figure III-19 : Fiche synthétique des caractéristiques du DGPS (Agabi et al.,2018).

3.5.2 Estimation des erreurs

Elles se résument en deux types d'erreurs, celles liées à la précision de système GPS lui même et celles liées au manipulateur. Le système GPS est affecté par 04 principales sources d'erreurs :

- L'horloge du satellite ;
- Les éphémérides ;
- L'ionosphère ;
- La troposphère.

Le DGPS élimine seulement la première, mais il augmente également la corrélation des autres sources (Messaoud, 2009).

Les erreurs du manipulateur 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 III-3, ci-dessous, résume les valeurs estimées pour ces erreurs.

Tableau III-3: Erreurs estimées du DGPS

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

3.6 Application de la méthode sur terrain

Pour mener à bien cette partie de l'étude, des investigations sur terrain en collaboration avec l'Agence pour la Promotion et la Protection du Littoral (APPL) de la wilaya d'Alger ont été tenues et fixées selon la météo marine de la région (s'assurer que la mer est calme pour acquérir des points de la position réelle du trait de côte). Le plan de mission a été le suivant.

3.6.1 Plan de mission

3.6.1.1 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 (Figure III-19),

- Installer le trépied sur le point géodésique, puis fixer l'embase universelle au trépied sur laquelle l'adaptateur est placé,
- Placer l'adaptateur de l'embase sur l'embase universelle,
- 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.

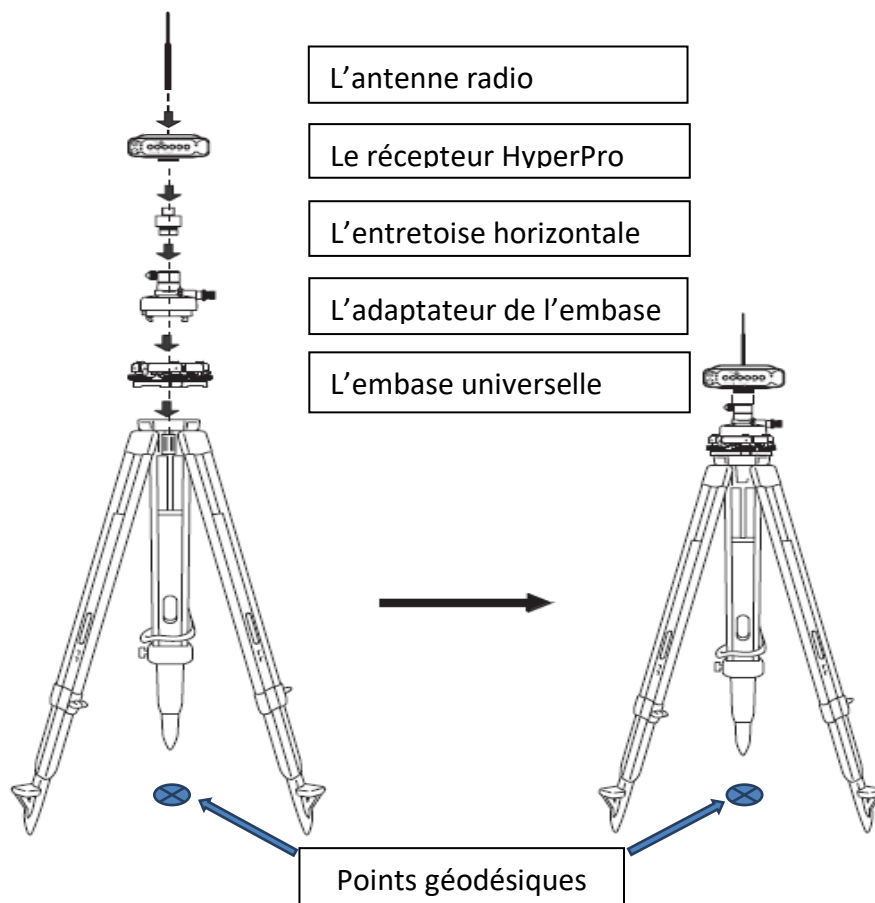


Figure III-20 : Schéma explicatif des étapes de la mise en place de la station de base.




<p>الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE ولاية الجزائر و ح ت س</p>	
<p>Wilaya d'Alger APPL</p> 	
<p>POINTS DE REPERES TOPOGRAPHIQUES CRES ET MESURES LE LONG DU LITTORAL DE LA WILAYA D'ALGER</p>	
<p><u>Nom du point</u> : El Marsa</p> <p><u>Créé par</u> : APPL</p>	<p><u>Acronyme</u> : B10</p> <p><u>Année</u> : 2016</p>
<p><u>Localisation</u> : Au tournant de l'accès menant au petit port de pêche. <u>Commune</u> : El Marsa</p> <p><u>Cordonnées</u> : UTM- WGS-84 Nord (Y) : 4073828,3 Est (X) : 523073,033 <u>Précision</u> : ±1.521 cm</p>	
<p><u>Description</u> : Clou enfoncé sur la chaussée (Au tournant de l'accès menant au petit port de pêche).</p> <p><u>Type de repère</u> : Clou Topographique</p>	
	
<p><u>Altitude</u> :</p> <p>Date de mesure : 18. 05. 2016 Elévation (au dessus du niveau de la mer) : 18,3716 m Précision : ± 3.018 cm</p>	

Figure III-21 : Fiche technique du point géodésique d'El Marsa (APPL, 2016).

3.6.1.2 Deuxième phase (création du projet)

La création du projet se résume dans 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 (mesurée 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 levé pour choisir la méthode d'acquisition de données.

3.6.1.3 Troisième phase (acquisition des données)

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

- **Auto topo** : c'est une acquisition régulière en fonction du temps ou en fonction de la distance. Cette méthode est beaucoup plus utilisée pour les levés des traits de côtes, des limites inférieures ou supérieures des falaises.
- **Point détail** : cette méthode est utilisée lors de l'acquisition des points dans les zones accidentées ou des points remarquables.

Après avoir choisi la méthode adéquate au cas d'études (dans notre cas c'est auto topo),

- Démarrer la prise des points,
- Parcourir tout le long du trait de côte et des limites inférieures et supérieures de la falaise en gardant la position de la station mobile à la verticale (Figure III-21),
- Stopper la prise de points,
- Enregistrer le projet,
- Exporter le fichier des points.



Figure III-22 : Acquisition des données lors des investigations de terrain (2018).

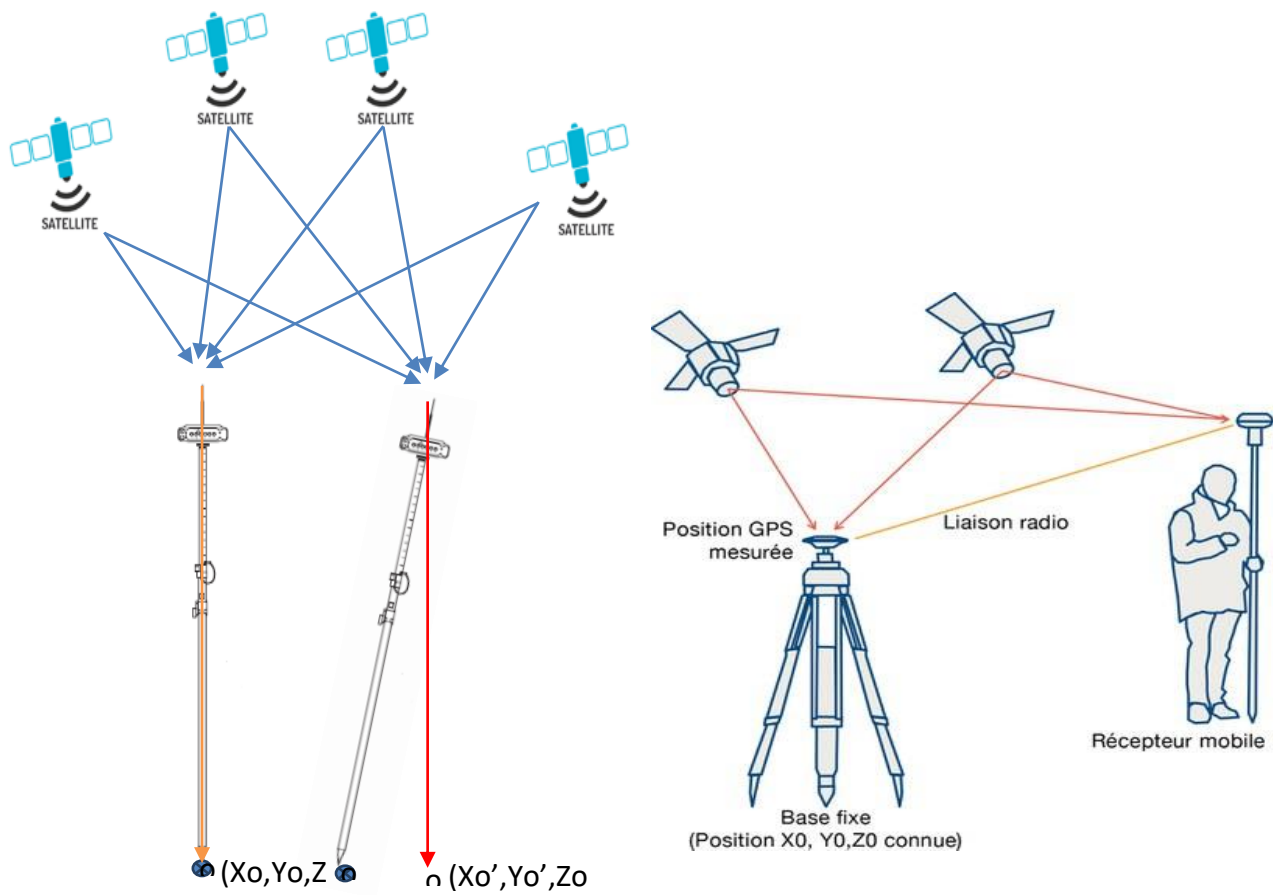


Figure III-23 : Schéma explicatif du principe des levés de la station mobile.

3.6.2 Types de données utilisées pour l'analyse des variations de la ligne de rivage

Le trait de côte (ou son indicateur) est obtenu par photo-interprétation pour les périodes les plus anciennes (photographies aériennes) et par mesure sur le terrain avec DGPS pour les périodes récentes et actuelles. Ce type de levé donne une représentation sur le plan (x, y) de l'indicateur du trait de côte sous forme d'une ligne. Le suivi de l'évolution du trait de côte réside dans la comparaison des lignes levées à des dates différentes (analyse multichronique). Le tableau III-4 synthétise les différentes acquisitions pour l'ensemble des données.

Tableau III-4 : Présentation des données exploitées et leurs sources.

Année	Provenance	Echelle	Résolution
1959	APPL (Photographie arienne)	1/25000	Métrique
1972	APPL (Photographie arienne)	1/20000	Métrique
1980	APPL (Photographie arienne)	1/10000	Métrique
1999	APPL (Photographie arienne)	1/ 10000	Métrique
2003	APPL (Photographie arienne)	1/10000	Métrique
2014	APPL (Photographie arienne)	/	Métrique
2015	Thèse/APPL (DGPS)	/	Centimétrique
2016	Thèse/APPL (DGPS)	/	Centimétrique
2017	Thèse/APPL (DGPS)	/	Centimétrique
2018	Thèse/APPL (DGPS)	/	Centimétrique

3.7 Traitement des données et visualisation des résultats

3.7.1 Traitement des données

Traditionnellement, la télédétection et les SIG sont des méthodes largement recommandées pour détecter et décrire l'évolution des côtes. L'exploitation des traits de côte par le biais d'un SIG peut être manuelle ou assistée par des outils de calcul automatisé des taux d'évolution (ex. DSAS, Mobi TC). Récemment, une combinaison de ces méthodes avec des techniques et des modèles, comme Digital Shoreline Analysis System (DSAS), a été efficacement appliquée (Thieler et al., 2009 ;Thinh et al., 2017).

Après l'acquisition des levés du trait de côte, l'évaluation de sa cinématique a été faite par l'application de l'extension DSAS sur l'environnement ArcGIS 10.2.2. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir de différents traits de côte (Thieler et al., 2009 ;Mellet et al., 2012).

Le DSAS est un système basé sur les SIG développés par United States Geological Survey (USGS). Deux versions de DSAS sont disponibles : le DSAS-Software, une extension de l'Institut du Système de Recherche Environnementales (ESRI) associé à son logiciel ArcGIS et le Web-DSAS (Thieler et al., 2009).

Le DSAS-Software a été sélectionné car il fonctionne plus rapidement et plus efficacement que la version Web pour le calcul des taux de variation du trait de côte dans un espace de temps précis (Cohen et al., 2003 ; Sheik et al., 2011). Il est capable de fournir une meilleure compréhension de la nature, de la dynamique et la tendance évolutive des côtes (Thinh et al., 2017).

Cinq principaux paramètres statistiques, dont le Net Shoreline Movement (NSM), Shoreline Change Enveloppe (SCE), l'End Point Rate (EPR), le Linear Regression Rate (LRR) et le Weighted Linear Regression Rate (WLR), peuvent être utilisés afin d'établir un diagnostic d'évolution. Pour cette étude l'EPR, le LRR et le WLR ont été retenus.

Le LRR est un paramètre décrivant les taux de variation du trait de côte. Il est déterminé en ajustant une ligne de régression par la méthode des moindres carrés à tous les points de la ligne de rivage pour un transect particulier. Le LRR a plusieurs avantages, à savoir :

- Toutes les données sont utilisées indépendamment des changements de tendance ou de précisions ;

Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte

- La méthode est purement computationnelle ;
- Il est basé sur des concepts statistiques acceptés ;
- Il est facile à utiliser (Dang Van et al., 2008).

L'EPR est un paramètre statistique qui décrit le tracé et les distances parcourues par les variations du trait de côte (Thieler et al., 2009). Il est calculé en divisant la distance entre la position du trait de côte initiale (année 1959) et la plus récente (année 2018) par le temps écoulé (60 ans).

L'avantage principal de l'EPR est sa facilité de calcul et les exigences minimales pour les données d'entrée (deux traits de côte) (Dang Van et al., 2008).

Le DSAS nécessite comme données d'entrée : la ligne de base qui est une ligne de référence parallèle à l'orientation globale de la côte et un fichier Shape file agrégeant tous les traits de côte dans une seule entité, dont la forme de table des attribues doit être respectée, le tout est stocké dans une géodatabase personnelle (annexe N°10).

- Le système de coordonnées choisi pour l'ensemble des travaux est le système WGS 84, la projection UTM Zone 31 ;
- Les équidistances entre les transects et leurs longueurs sont respectivement de 10 m et 300 m. La marge d'erreur par défaut est considérée de +/- 3 m ;
- Les transects générés doivent être ajustés manuellement dans les zones où le trait de côte se trouve très déformé.

Les résultats en sortie sont spécifiés dans l'étape de choix des statistiques à calculer et dont on a choisi un intervalle de confiance de 95 %. La figure III-23 illustre les différents paramètres à définir.

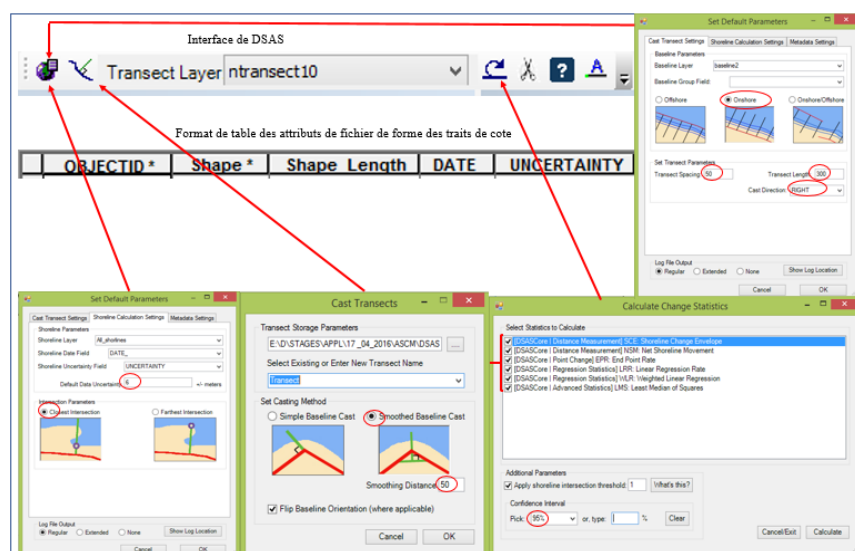


Figure III-24 : Les différents paramètres et interfaces de DSAS.

3.7.2 Visualisation des résultats et normalisation de la cartographie

Les linéaires côtiers aux différentes dates sont représentés par un figuré de type trait. Pour une meilleure distinction, la variable visuelle la plus sélective a été utilisée, à savoir la couleur. Elle oppose efficacement des phénomènes de même nature (limite entre terre et mer par exemple) mais géographiquement proches (Faye, 2010).

Pour illustrer le changement diachronique de la position de la ligne du rivage de notre zone sur une période de 60 ans, des cartes ont été élaborées. L'ordre diachronique de l'évolution entre un trait de côte récent et ancien, est représenté grâce à un code couleur suivant une norme de nuance des plus chaudes aux plus froides (Faye, 2010).

Par convention, le rouge évoquera le trait de côte le plus récent. À partir du rouge, la variation des couleurs devra respecter l'ordonnance du spectre solaire jusqu'au bleu (Figure III-24-A). Toutefois, si le nombre de traits de côte est supérieur à cinq, il est nécessaire d'intercaler entre ces cinq couleurs de base des nuances en combinant les couleurs avec une ou deux valeurs au plus (Figure III-24-B). Dans tous les cas, le rouge représentera le trait de côte le plus récent et le bleu le plus ancien.

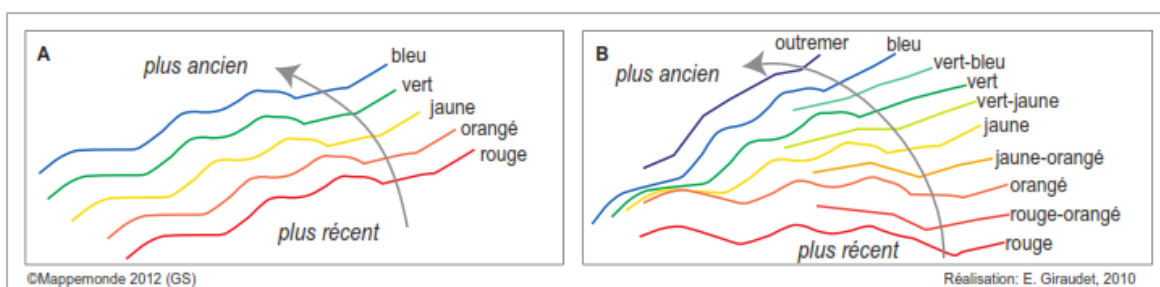


Figure III-25 : Légende pour le trait de côte représenté à plusieurs dates (Giraudet, 2010).

L'incertitude est calculée automatiquement avec l'application DSAS. Eci est la marge d'erreur liée aux calculs des EPR. Elle peut être calculée sur de petites périodes de temps ou sur toute la période d'étude (Kermani et al., 2016) par l'équation suivante :

$$ECI = \frac{\sqrt{(EtA)^2 + (EtB)^2}}{\text{date}(A) - \text{date}(B)}$$

- Ou :
- (Et A)= incertitude de la position du trait de côte A,
 - (Et B)= incertitude de la position du trait de côte B,
 - date (A): Date du trait de côte A,
 - date (B): Date du trait de côte B.

3.8 Etude des profils aériens et sous-marins

L'évolution du profil moyen peut expliquer le comportement global de la plage sur plusieurs kilomètres le long de la côte. Le profil de la plage est déterminé par la topographie concernant la plage aérienne et par la bathymétrie pour la plage sous-marine ; le profil varie d'une plage à une autre selon le budget sédimentaire et les forces mises en jeux. La plage se caractérise par une pente qui peut être douce quand la composition sédimentaire est fine ou accentuée si les sédiments sont grossiers.

3.8.1 Les profils d'équilibre

Dans la morphodynamique des plages, le profil d'équilibre est un profil de plage vers lequel tend une plage soumise à un régime de vague constant (Pilkey, 1993). Quand cette forme de profil est atteinte, il n'y a plus de variations de morphologie.

Le profil d'équilibre est la notion théorique d'une configuration stable vers laquelle tend une plage donnée pour un climat de forçage donné.

Dans la réalité, l'équilibre n'est jamais atteint, notamment parce que le forçage est variable. (Dean, 1991) avance que concrètement le profil d'équilibre résulte de l'interaction entre les forces constructives (qui transportent le sédiment vers le continent) et les forces destructives (qui déplacent le sédiment vers le large).

Les profils d'équilibres ont des caractéristiques connus (Dean, 1991) : ils sont concaves, leur pente dépend de la granulométrie (plus le sédiment est grossier, plus la pente est forte), le haut de plage (beach face) est approximativement plat. La compréhension et la connaissance des profils d'équilibres d'une plage, sont nécessaires pour la prédiction de la réponse d'une plage à un climat de vagues donné. Ces profils servent également de condition initiale pour les modèles numériques de morphodynamique.

3.8.2 Protocole de levé

L'étude des profils s'est effectuée sur l'ensemble des plages de la zone d'étude et sur différentes périodes à raison de 2 levés pour certaines plages et 3 pour d'autres.

Le levé topographique sur l'estran s'est réalisé le long des profils (préalablement définis sur logiciel SIG et importés sur ordinateur de bord du DGPS) depuis le haut de plage jusqu'à la ligne de rivage. Dans certaines plages, un prolongement du profil sur les petits fonds a été effectué.

Lors des mesures qui se sont faites à pied, les lignes de rupture au niveau des points d'inflexion du profil sont minutieusement levées de façon à ce que le profil mesuré s'ajuste parfaitement à la topographie observée (Figure III-25).

Pour cette investigation, l'option topo manuel a été employée afin d'obtenir une meilleure maîtrise de la collecte de données lors des mesures.

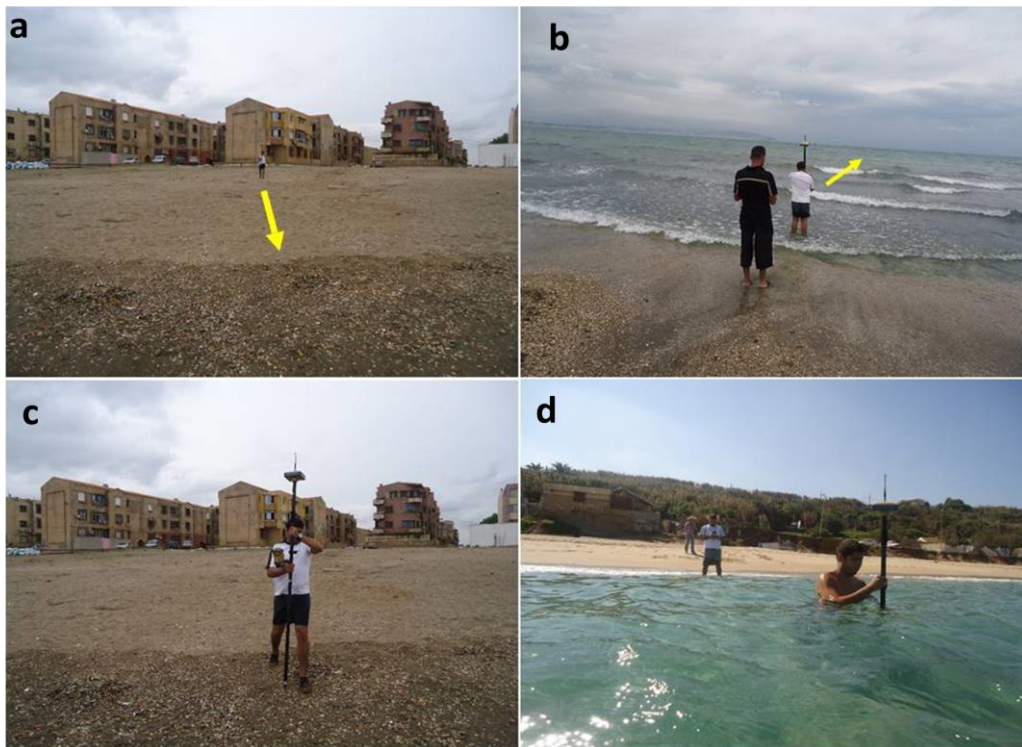


Figure III-26 : a et c : Elaboration de profil aérien, b et d : Elaboration de profil sous-marin.

Dans certains cas où le site et les moyens le permettaient, des modèles numériques de terrain ont été réalisés (Figure III-26). A l'opposé des relevés aériens et sous-marins, le choix de l'option auto topo, où le relevé d'un point est chronométré, (une mesure est réalisée toutes les deux secondes par exemple) s'est avéré non pratique.

L'objectif de cette investigation est :

- Le calcul du volume de sable qui transite au niveau des profils ;
- La détection et l'identification des plages nécessitant un rechargement ;
- L'estimation des volumes à injecter.

Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte

Des points de contrôle sont également mesurés lors de chaque relevé (Figure III-27). Il s'agit de clous topographiques installés sur des invariants (souvent des ouvrages bétonnés), dont les coordonnées géographiques sont connues, et permettant un suivi de contrôle avec le temps. On peut ainsi détecter d'éventuelles erreurs de mesures en X, Y ou Z (Nezhad, 2006).



Figure III-27 : a, c, b, c, d, e et f : Elaboration des model numérique de terrain.



Figure III-28 : a, b et c : Points de contrôle.

3.8.3 Données topographiques

Comme pour les levés de trait de côte, l'ensemble des points mesurés et stockés dans l'ordinateur de terrain (station mobile), le fichier brut extrait est directement exploitable sur un logiciel SIG.

Les incertitudes annoncées par le constructeur du GPS différentiel TRIMBLE sont d'environ ± 1 cm en horizontal et ± 2 cm en vertical pour le récepteur GPS du mobile et d'environ ± 5 cm en horizontal et vertical pour le récepteur GPS de la base (Gouriou, 2007).

3.8.4 Exploitation et intérêt

Les résultats de cette étude, en plus de conforter l'étude des pentes précédemment effectuée, vont être exploités dans l'étude de cas de rechargement artificiel.

Les mesures des profils aériens et sous-marin ainsi que les observations de terrain ont permis de constater l'action anthropique régulière qui s'exerce sur les plages de la zone d'étude. Elles permettent également la détermination des cycles morphodynamiques et ainsi, l'amélioration de la compréhension du système plage.

Pour mener à bien ce genre d'étude, il est indispensable de coupler des analyses sédimentaires, topographiques et physiques et par conséquent, de multiplier les collaborations scientifiques entre sédimentologues, naturalistes et physiciens, entre autres.

3.9 Résultats et discussions

En raison de la diversité du système côtier algérois (plages, dunes et falaises), nous avons opté pour une présentation des résultats par secteur et par système. Pour cela, la zone d'étude a été subdivisée en 03 régions, région Ouest, région centre et région Est.

Région Ouest (région 01) : correspond à la partie de la zone d'étude qui s'étale de la commune de Bab El Oued jusqu'à l'embouchure de l'Oued Mazafran (limite de la wilaya d'Alger administrativement). Elle couvre le littoral rocheux d'Alger, la baie d'El Djamila (la Madrague) et une partie de la baie de Bou-Ismaïl.

Région centre (région 02) : correspond à la partie de la zone d'étude qui couvre la baie d'Alger. Elle est comprise entre les communes de la Casbah et El Marsa (commune de Tamenfoust ex : la Pérouse).

Région Est (région 03) : correspond à la partie de la zone d'étude qui couvre la partie Ouest de la baie de Zemmouri et s'étend jusqu'à l'embouchure de l'Oued Réghaïa.

3.9.1 Résultats pour la région Ouest (région 01)

Les calculs des variations de la ligne de rivage sont effectués le long des 1645 transects espacés de 10 m et répartis sur 26 plages de la baie d'El Djamila et de la partie orientale de la baie de Bou-ismail, à l'exception des plages de la résidence d'état de la commune de Staoueli (Figure III-28-a). Les plages sont délimitées par des transects numérotés de l'extrémité de l'embouchure de l'Oued Mazafran à la limite de la commune de Zéralda (plage Khaloufi 1) vers le Cap Acrata à l'extrémité Est de la baie d'El Djamila (plage artificielle d'El Djamila). (Figure III-28-b)

3.9.1.1 Variation mi- séculaire de la ligne du rivage entre 1959 et 2017

Pour cause de présence de chantiers de travaux maritimes dans quelques secteurs, nous avons choisi de combler ces discontinuités par des levés de 2015 pour la plage thalassothérapie et de 2014 pour les plages El Sheraton, Club des pins, les Dunes et la plage Jeunesse.

Afin de choisir les dates des levés qui représentent les meilleures corrélations entre les taux d'évolution du trait de côte mesurés (EPR) et calculés par les modèles (LRR et WLR), plusieurs tests de calculs sont effectués.

La figure III-29-a montre que les périodes 1959 – 1980, 1980 – 1999 et 1999 – 2017 présentent les meilleures corrélations entre l'EPR et LRR avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.97$, et entre EPR et WLR avec un $R^2 = 0.94$. Le variogramme de la figure III-29-b confirme aussi cette forte relation entre les trois paramètres. Graphiquement parlant, elles sont bien superposées le long des transects (Figure III-30).

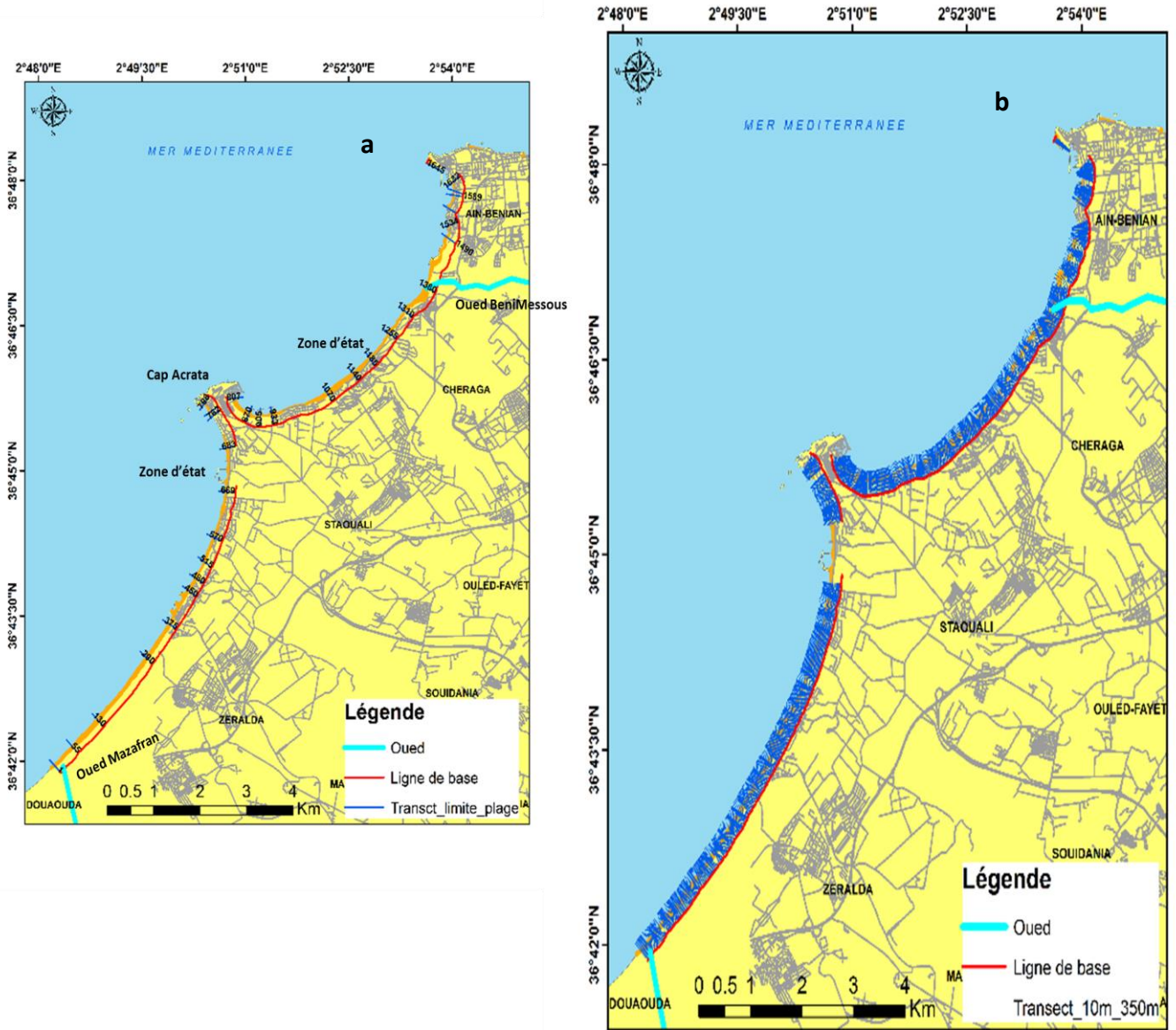


Figure III-29 : A-Répartition des transects le long de la zone d'étude. B- les transects limites des plages.

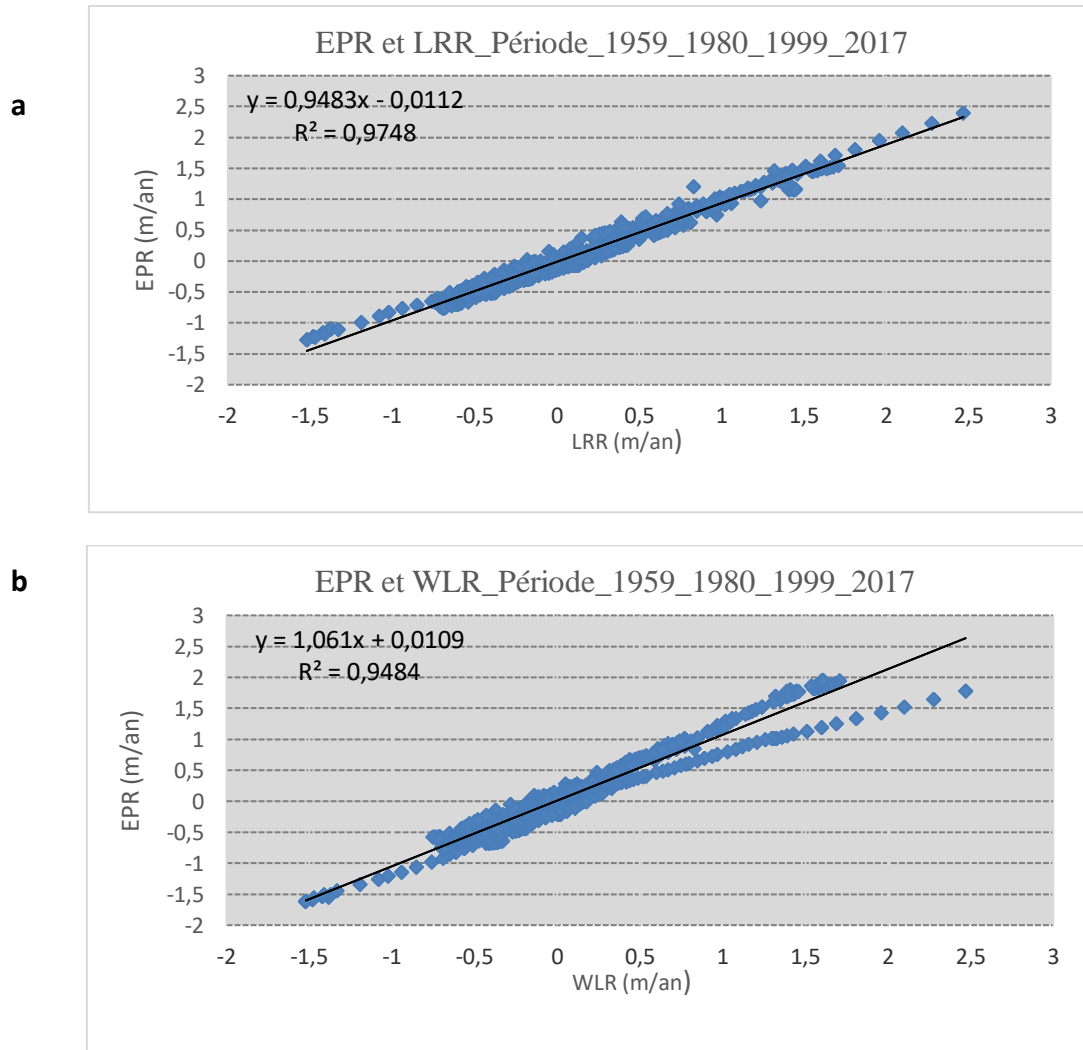


Figure 3-30 : Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés (LRR et WLR) pour la région Ouest.

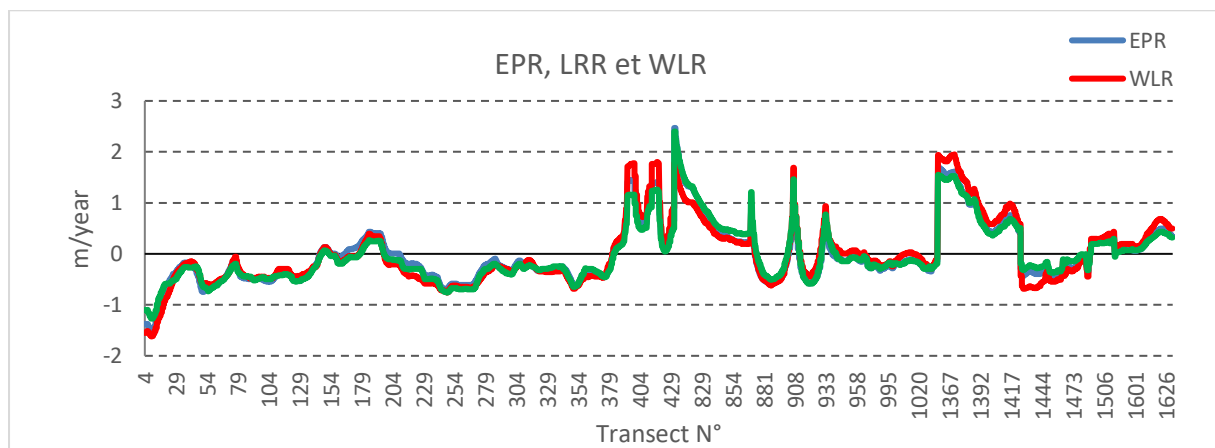


Figure 3-31 : La correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR.

L'avancé ou le recul de la ligne de rivage présenté par le NSM (Figure III-31) montre un maximum de progradation observée à 142.8 m au niveau de la plage Est de Sidi Fredj et maximum de recul avec -87.8 m au niveau des transects 09 et 10 correspondant à la plage Khaloufi 01.

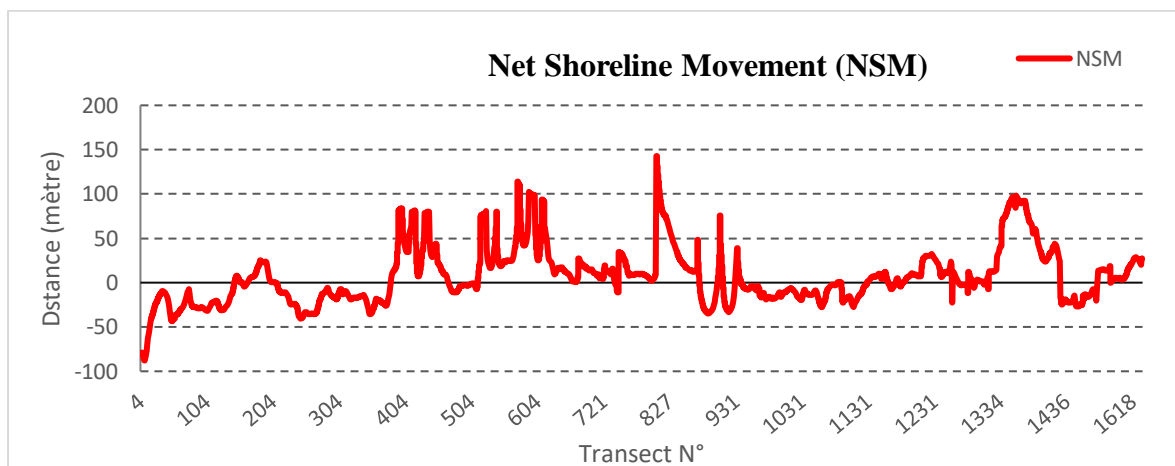


Figure 3-32 : Evolution du trait de côte le long de la zone d'étude entre 1959 et 2017.

La Figure III-32 présente une synthèse statistique sur les taux nets d'évolution mesurés EPR le long de la zone d'étude, accompagnée d'une classification des plages en termes d'aléa par rapport à l'érosion côtière.

Plage : Transects limite	Bate	Aléa	Taux d'évolution EPR (m/an)		
			Min	Moy	Max
El Djamilia : 1637 – 1645	El Djamilia	[Color bar]	Plage artificiel		
Méditerranée : 1594 – 1632			+0.1	+0.3	+0.54
Jeunesse : 1553 – 1589			-0.19	-0.02	+0.28
Fontaine : 1491 – 1534			-0.36	+0.14	+0.32
El Bahdja : 1381 – 1490			-0.47	+0.12	+1.14
Les Dures : 1311 – 1380			-0.13	+1.12	+1.75
Club des Pins : 1256 – 1310			-0.42	+0.03	+0.44
Plage d'Or : 1186 – 1255			+0.02	+0.29	+0.59
Dauphin : 1140 – 1185			-1.14	+0.05	+0.22
El Sheraton : 1071 – 1140			-0.5	-0.16	+0.12
Moretti : 934 – 1070			-0.5	-0.2	+0.39
El Menzeh : 906 – 933			-0.58	-0.12	+1.32
El Riadh : 871 – 905			-0.61	-0.28	+0.83
Est Sidi Fredj : 807 – 870			+0.22	+0.8	+2.47
Thalassothérapie : 769 – 798			+0.03	+0.22	+0.62
Ouest Sidi Fredj : 683 – 762	-0.2	+0.2	+0.47		
Zone inaccessible (Zone d'état)					
Palm Beach : 571 – 669	Bouismail	[Color bar]	+0.01	+0.71	+1.98
Azur Plage : 516 – 570			+0.29	+0.62	+1.4
Sable d'Or : 481 – 515			-0.19	-0.06	+0.22
CRF : 451 – 480			-0.19	+0.11	+0.74
Complexe touristique : 376 – 450			-0.44	+0.7	+1.45
Champ de Tir : 291 – 375			-0.62	-0.33	-0.13
Familiale : 131 – 290			-0.7	-0.18	+0.43
Khaloufi 02 : 56 – 130			-0.64	-0.46	-0.12
Khaloufi 01 : 1 – 55			-1.52	-0.68	-0.17

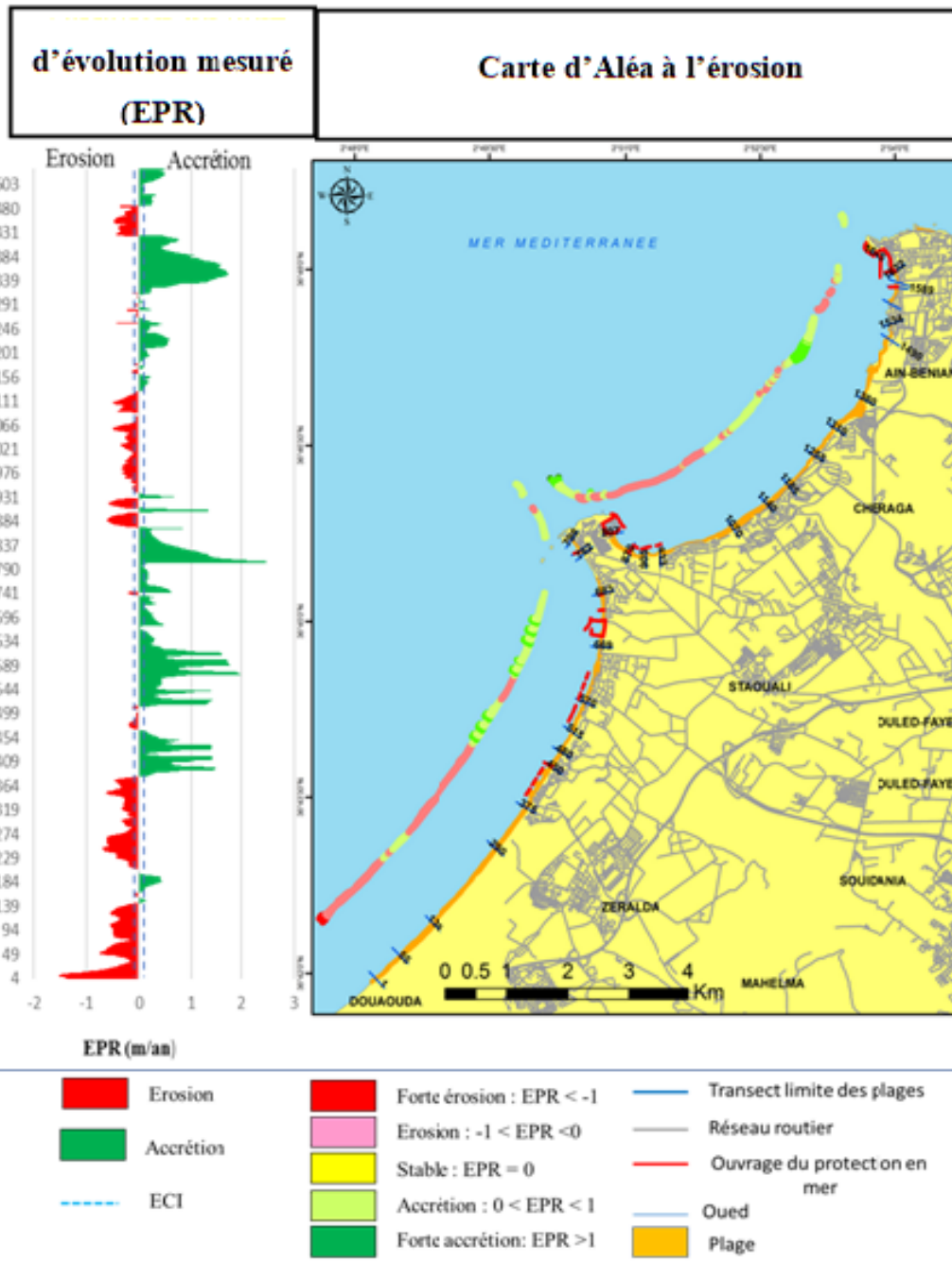


Figure III. 32 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière

Tableau III-5 : Surfaces gagnées et perdues le long dans la région Ouest d'Alger.

Plages	1959-2017			1959-2017		
	Gain (m ²)	Loss (m ²)	NSBS (m ²)	Gain (ha)	Loss (ha)	NSBS (ha)
El Djamila : 1637 – 1645	-	-	-	-	-	-
Méditerranée : 1594 – 1632	1590,95	0	1590,95	0,16	0,00	0,16
Jeunesse : 1553 – 1589	-	-	-	-	-	-
Fontaine : 1491 – 1534	3379	-432,8	2946,2	0,34	-0,04	0,29
El Bahdja : 1381 – 1490	17023	-10097,3	6925,7	1,70	-1,01	0,69
Les Dunes : 1311 – 1380	42257,3	-86,3	42171	4,23	-0,01	4,22
Club des Pins : 1256 – 1310	1665,3	-845	820,3	0,17	-0,08	0,08
Plage d'Or : 1186 – 1255	11225,1	0	11225,1	1,12	0,00	1,12
Dauphin : 1140 – 1185	1778,8	-665,4	1113,4	0,18	-0,07	0,11
El Sheraton : 1071 – 1140	520,2	-6630,1	-6109,9	0,05	-0,66	-0,61
Moretti : 934 – 1070	501,9	-16446,4	-15944,5	0,05	-1,64	-1,59
El Menzeh : 906 – 933	2358,3	-4459,2	-2100,9	0,24	-0,45	-0,21
El Riadh : 871 – 905	1311,3	-6900,6	-5589,3	0,13	-0,69	-0,56
Est Sidi Fredj : 807 – 870	28760,6	0	28760,6	2,88	0,00	2,88
Thalassothérapie : 769 – 798	7175,1	0	7175,1	0,72	0,00	0,72
Ouest Sidi Fredj : 683 – 762	7371,2	-364,6	7006,6	0,74	-0,04	0,70
Palm Beach : 571 – 669	38746,2	0	38746,2	3,87	0,00	3,87
Azur Plage : 516 – 570	19581	0	19581	1,96	0,00	1,96
Sable d'Or : 481 – 515	177,4	-1342,8	-1165,4	0,02	-0,13	-0,12
CRF : 451 – 480	2860	-907	1953	0,29	-0,09	0,20
Complexe touristique : 376 – 450	31263,4	-1040,6	30222,8	3,13	-0,10	3,02
Champ de Tir : 291 – 375	0	-15978,8	-15978,8	0,00	-1,60	-1,60
Familiale : 131 – 290	5255,1	-21486,2	-16231,1	0,53	-2,15	-1,62
Khaloufi 02 : 56 – 130	0	-19899	-19899	0,00	-1,99	-1,99
Khaloufi 01 : 1 – 55	0	-20280,6	-20280,6	0,00	-2,03	-2,03
Bilan total	224801,15	-127863	96938,45	22,481	-12,79	9,70

3.9.1.2 Discussion des résultats

Pour mieux cerner la zone, cette dernière a été divisée en 2 secteurs, celui de la baie d'El Djamila et celui de la baie de Bou-ismail. Cette analyse a abouti à l'identification de 10 plages en état d'érosion :

3.9.1.2.1 La baie de Bou-ismail

La plage Khaloufi 01 : elle est localisée à l'extrémité de l'Oued Mazafran. On dénote un recul de l'ordre de 87.8 m entre 1959 et 2017. Cette valeur représente le taux de recul le plus important de la zone avec une moyenne annuelle de -0.68 m/an, un maximum de recul de -1.52 m/an et un minimum de -0.17 m/an. Ce recul semble être dû à l'arrachement des sédiments de la plage par le fort débit de l'Oued Mazafran (Figure III-33-a).

La plage Khaloufi 02 et Champs de Tir : elles aussi connaissent une érosion dramatique comparée à la plage Khaloufi 01 sur tous les transects avec un taux de recul moyen de -0.46 m/an et -0.33 m/an respectivement. L'attaque frontale de la mer et la dégradation des dunes de l'arrière-pays, sont deux facteurs importants gouvernant cette situation (Figure III-33-b).

La plage Familiale et Sable d'or : Ces deux plages connaissent des variations dans les deux sens, un recul annuel maximal de -0.7 m/an et -0.19 m/an respectivement sur quelques transects. Alors qu'au niveau des autres transects, le taux d'accrétion n'arrive pas à mettre en équilibre les deux plages. Cette situation a abouti à un taux de recul moyen de -0.18 m/an et -0.06 m/an respectivement.

3.9.1.2.2 La baie d'El Djamila

Le secteur des plages El Riadh, El Menzeh, Moretti et El Sheraton : une tendance négative d'évolution des quatre plages est observée avec un taux de recul maximal de 0.6 m/an pour les deux premières qui connaissent une alternance entre avancé et recul. Cette situation logique est due à la présence de 03 ouvrages de protection (épis-brises lames), qui diminuent la virulence de l'attaque de la houle d'une part et bloquent le transit littoral d'autre part (Figure III-33-c et 33-d). La plage Moretti et El Sheraton ont aussi le même comportement érosif avec un taux de recul maximal de 0.5 m/an.

La plage jeunesse : elle présente un recul maximal de 11 m sur la rive gauche et une avancée du côté de l'épi de l'ordre de 16.24 m entre 1959 et 2014. Ceci a abouti à un bilan négatif de -1.16 m de recul de l'ensemble de la plage sur la même période.

Selon l'étude d'évolution des fonds et l'aspect des pentes réalisés dans le précédent chapitre, l'avant côte du littoral rocheux est classé comme favorable à la perte des sédiments continentaux vers le large. On déduit par cela, que ces plages sont donc géomorphologiquement défavorables pour le rechargement en sable contrairement aux plages (partie non rocheuse) de la baie d'El Djamila et de Bou-ismail qui sont retenues comme favorables au rechargement.

Tenant compte des résultats de l'étude des variations de la ligne de rivage entre 1959 et 2017, dix (10) plages présentant une tendance à l'érosion ont été identifiées, à savoir : Khaloufi 01 et 02, La plage Familiale, Champs de Tir, Sable d'or (baie de Bou-ismail), El Riadh, EL Menzeh, Moretti, El Sheraton et la plage Jeunesse (baie d'EL Djamila).

En raison de la présence des épis en forme L et T qui peuvent jouer le rôle dans la rétention du sédiment, les deux plages El Riadh et El Menzeh semblent être les plus favorables pour le rechargement et feront office d'une étude de cas dans ce sens, dans un chapitre ultérieur.



Figure III-33 : **a :** arrachement des sédiments (embouchure de l'Oued Mazagran). **b :** traces dunaires et exposition de la zone aux attaques frontales de la mer (Zéralda). **c :** Chantier et ouvrages de protection (Plage Est - Sidi Fredj). **d :** Recul du trait de côte (plage El Riadh - Sidi Fredj).

3.9.2 Résultats pour la région centre (région 02)

Les calculs des variations de la ligne de rivage ont été effectués le long des 683 transects, répartis le long des dix plages de la partie orientale (Figure III-34) de la baie d'Alger à l'exception des secteurs des Pins Maritimes (Commune de Mohammedia) inaccessibles en 2015 (zone militaire).

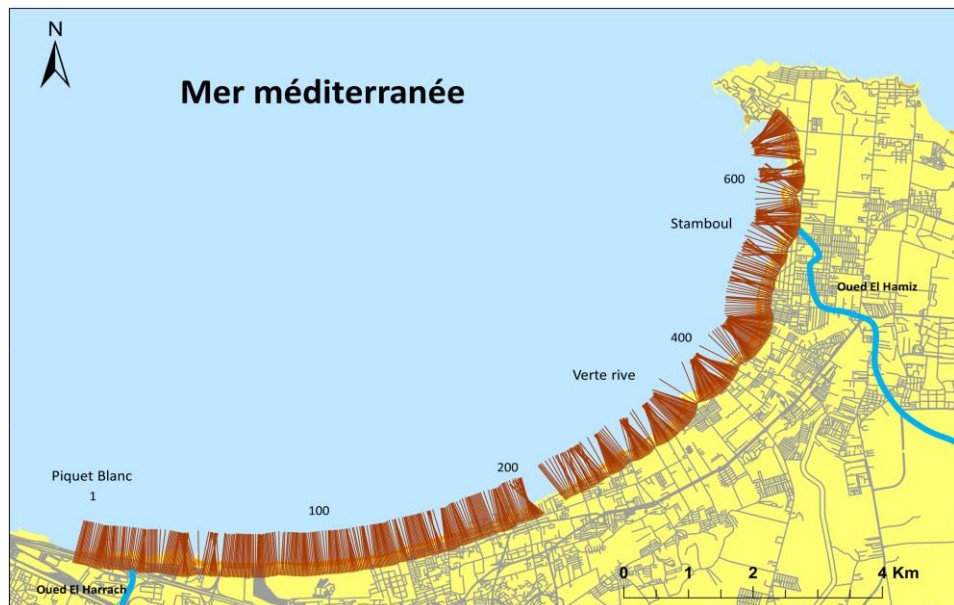
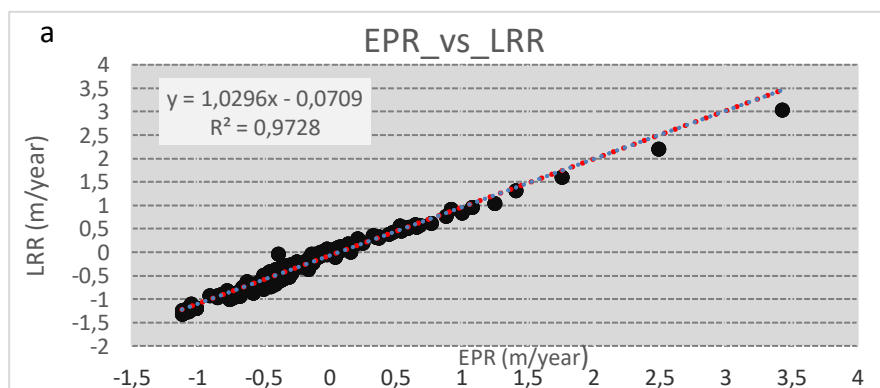


Figure III-34 : Distribution des transects le long de la région centre de la zone d'étude.

Les résultats sont présentés en EPR (End Point Rate) (m/an) et NSM (Net Shoreline Movement) (m). Ils matérialisent les minimums, les maximums ainsi que les vitesses moyennes des changements de la ligne de rivage.

Pour cette région, la Figure III-35 (a et b) montre que les meilleures corrélations entre l'EPR et LRR avec un $R^2 = 0.97$, EPR et le WLR avec un $R^2 = 0.96$. Le variogramme de la figure III-36 confirme aussi cette forte relation entre les trois paramètres. Graphiquement parlant, elles sont bien superposées le long des transects (Figure III-36).



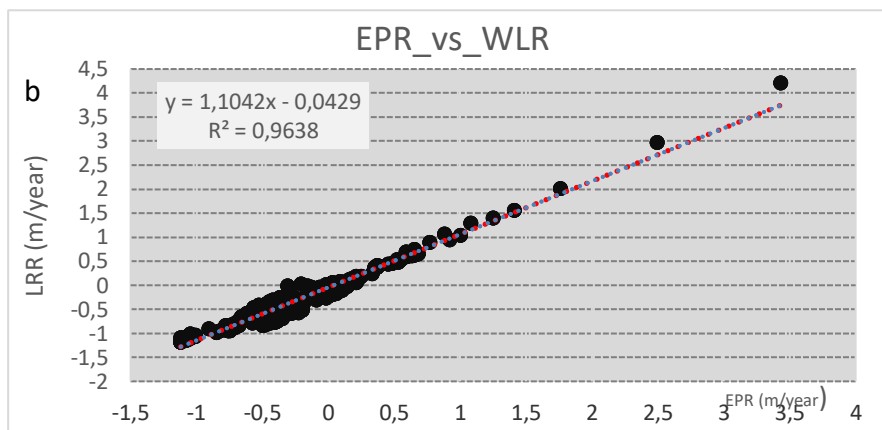


Figure III-35 : Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés (LRR et WLR).

Le NSM (Figure III-36) montre un maximum d'avancée dépassant les 200 m au niveau de la plage Piquet Blanc. Ceci est du à l'installation de la digue de protection dans le cadre des aménagements du projet Sablettes, un maximum de recul dépassant les -65 mètres au niveau des transects 510 correspondant à la plage Bateau Cassé.

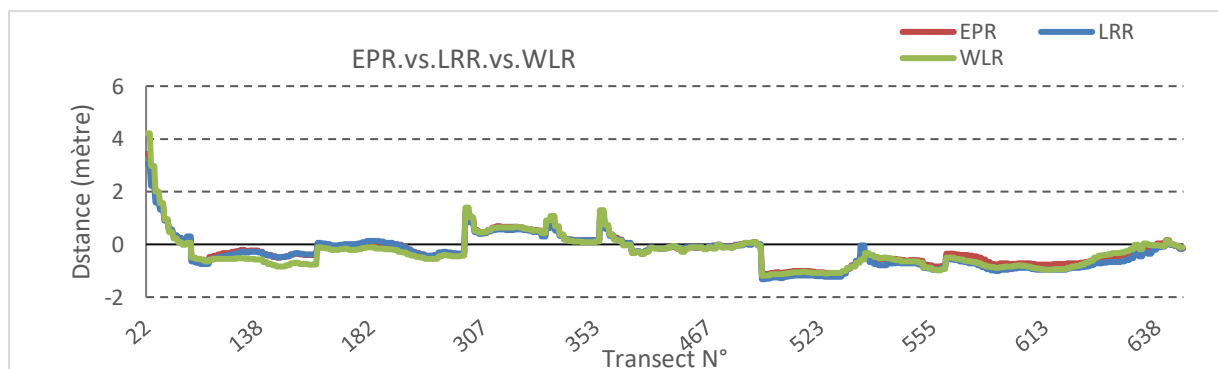


Figure III-36 : La correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR région centre.

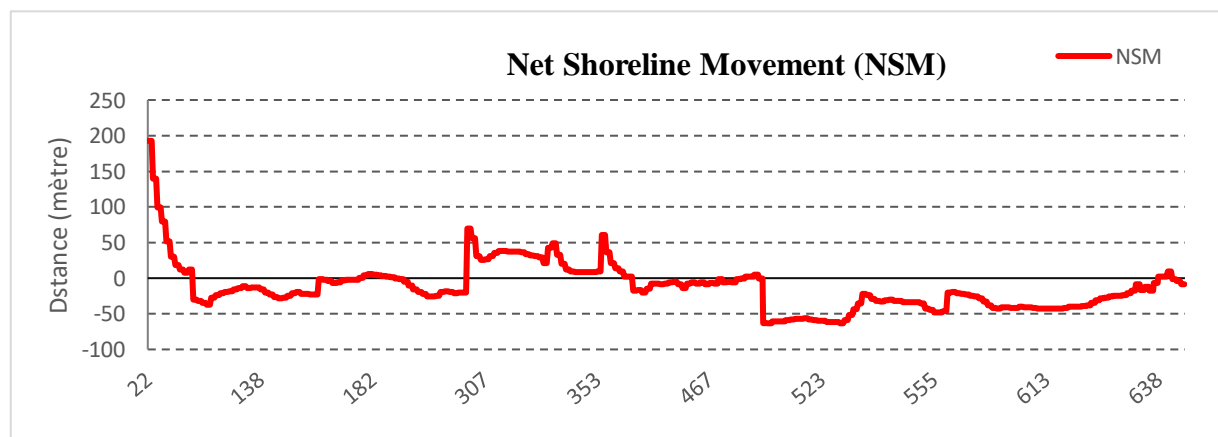


Figure III-37 : Evolution du trait de côte le long de la zone d'étude entre 1959 et 2015.

3.9.2.1.1 Période allant de 1959 jusqu'à 2015

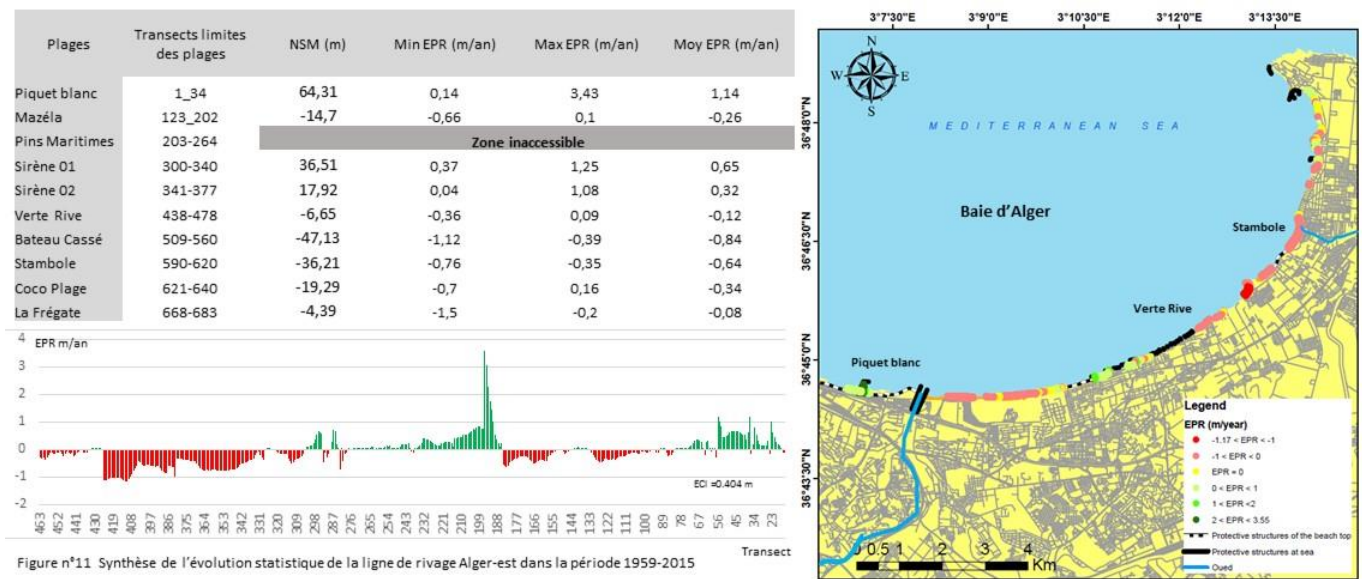


Figure III-38 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1959-2015.

Les résultats durant cette période montrent que la zone connaît beaucoup de fluctuation sur le bilan sédimentaire hormis certains secteurs protégés avec des structures lourdes contre l'érosion. De façon générale, l'ensemble des secteurs a subi un recul considérable.

La zone qui s'étale entre « Bateau Cassé » et « Verte Rive » semble être la plus affectée par le phénomène d'érosion. La perte de terrain s'est faite sur un rythme d'environ 0.85 m/an et a permis de constater un recul de plus de - 47mètres.

En revanche, la zone adjacente à l'embouchure de l'Oued El Harrach semble être la plus épargnée, en raison des différents aménagements qu'a subi cette partie de la zone. On observe par exemple plus de 64m de gain sur la plage de Piquet Blanc et où la vitesse d'accrétion avoisine les 3.5m/an, depuis l'installation de la jetée de protection de la plage qui bloque le transit sédimentaire (Figure III-38).

En vue de la forte anthropisation, il s'avère complexe de comprendre le fonctionnement de la mobilité de la ligne de rivage dans la région centre. Pour cette raison, une étude chronologique permettra une observation plus détaillée de cette dernière. Une analyse diachronique du trait de côte a donc été effectuée sur trois périodes distinctes, 1959-1980, 1980-2003 et 2003-2015. Les dates ont été sélectionnées de sorte à rendre l'impact du défrichement dunaire plus visible et ce, pour des besoins d'exploitation dans un cas d'étude ultérieur.

3.9.2.1.2 Période allant de 1959 à 1980

La figure III-39 montre que pour cette période, nous avons un EPR moyen de + 0.72 m/an et un NSM global de 15.18m. Ces valeurs montrent que la zone présente une forte accrétion qui dépasse parfois le +1 m/an. Cependant, ça reste non généralisée, vu que les plages qui se situent dans le secteur adjacent des Oueds semblent subir une érosion considérable due probablement à la dynamique naturelle des embouchures (Figure III-39).

L'état positif d'évolution qu'on peut qualifier de naturel, peut être expliqué par la nature géomorphologique de la zone et plus particulièrement la lithologie (Bouhamadouche, 1993) qui permet un apport sédimentaire régulier. Aussi, l'absence d'ouvrages ou de formes de protection consistantes peut induire à un changement de la dynamique sédimentaire de ce secteur.

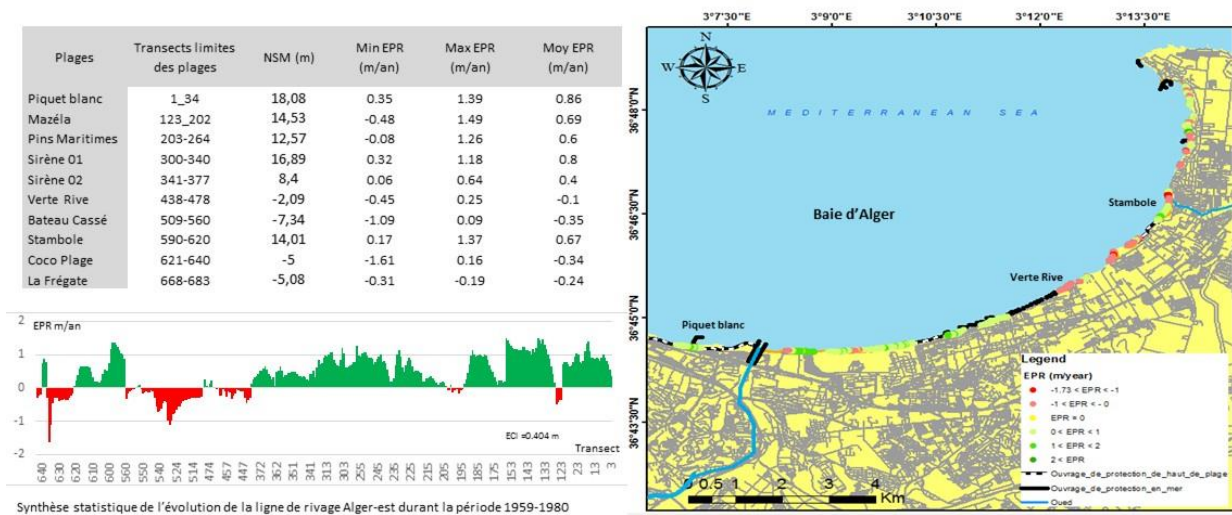


Figure III-39 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1959-1980.

3.9.2.1.3 Période allant de 1980 à 2003

Durant cette période, la zone connaît une érosion dramatique. Seules quelques plages sont épargnées de ce phénomène d'érosion. Les plages de la commune de Bordj El Kiffan (Fort-de-l'eau) présentent les maximums de recul avec des taux d'érosion moyens de l'ordre de - 0.41 m/an (Figure III-40).

L'EPR moyen pour cette période est de -0.54 m/an et le NSM est de -6.5 m. Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de l'attaque frontale de la mer et la dégradation des dunes durant cette période. Ces deux événements semblent être les principales raisons gouvernant ce

phénomène et reflétant ainsi, la forte vulnérabilité et la tendance à l'érosion à laquelle la zone fait face.

Par ailleurs, les enregistrements de l'ONM (Office Nationale de la Météorologie) au niveau de ces stations (Région Alger-Est) ont permis de détecter un nombre important de tempêtes qui ont fortement influencé l'évolution de la zone.

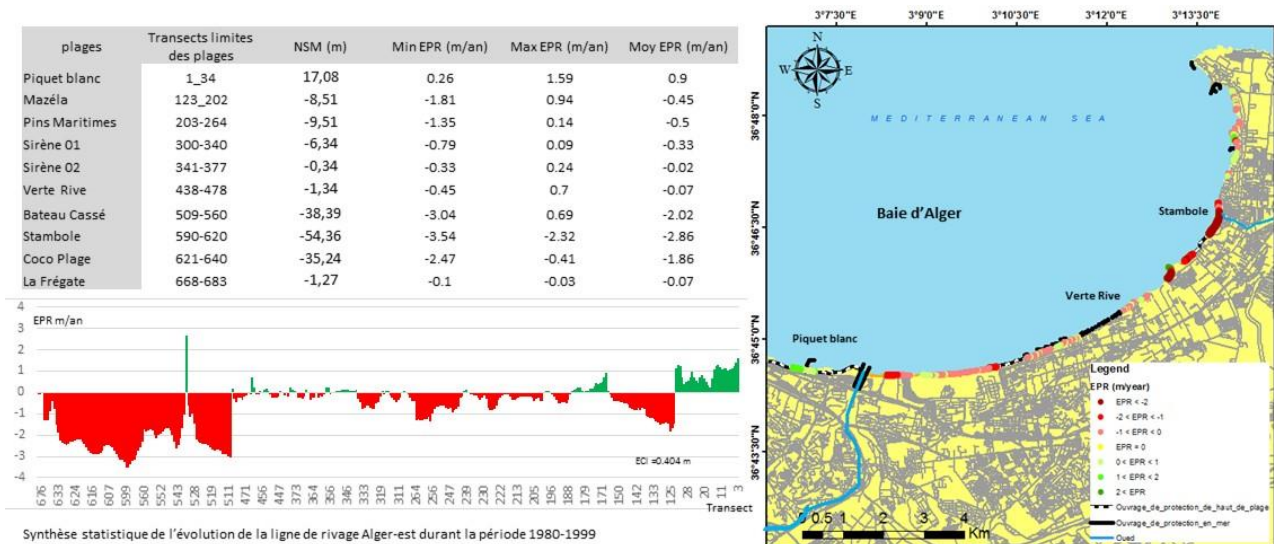


Figure III-40 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 1980-2003.

3.9.2.1.4 Période allant de 2003 à 2015

Nous observons pour cette période une rapide évolution négative avec des EPR de -1.32 m/an et un NSM de l'ordre de 1.8 m pour la zone (Figure III-41). En effet, l'expansion de l'urbanisation a induit l'augmentation des enjeux et avec cela, le besoin de protéger les biens installés sur la zone côtière, comme cela a été le cas suite aux épisodes de tempêtes de 2007.

Ces lourds ouvrages de défense ont eu un fort impact sur le transit du sédiment impliquant la formation de surfaces d'accumulation, entraînant un déficit dans le budget sédimentaire et accentuant l'érosion dans certaines parties des zones adjacentes (Otmani, 2014).

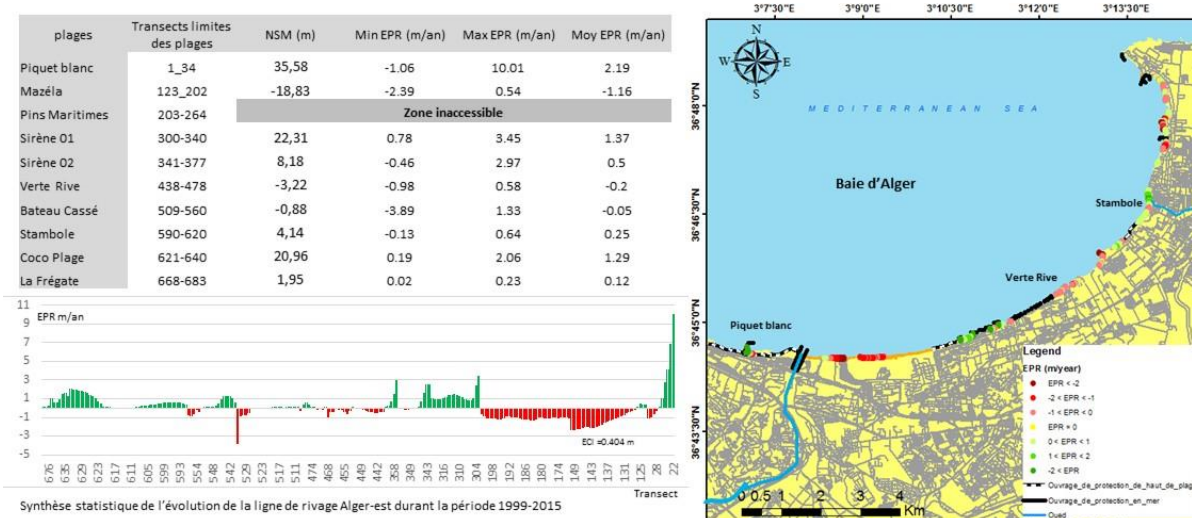


Figure III-41 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage dans la région centre durant la période 2003-2015.

Le tableau 3-1 représente les surfaces gagnées et perdues le long de la région centre d'Alger pour l'ensemble des périodes chronologiques étudiées.

Chapitre III : Etude de la cinématique du trait de côte

Tableau III-6: Surfaces gagnées et perdues dans la région centre d'Alger.

Période	1959-2015			1959-1980			1980-1999			1999-2015		
	Surface perdu (m ²)	Surface gagné (m ²)	Bilan (m ²)	Surface Perdu (m ²)	Surface gagné (m ²)	Bilan (m ²)	Surface Perdu (m ²)	Surface gagné (m ²)	Bilan (m ²)	Surface Perdu (m ²)	Surface gagné (m ²)	Bilan (m ²)
Piquet Blanc	0	12768	12768	0	10816.2	10816.2	0	10932	10932	-996	8112.2	7116.2
Mazéla	-18636.8	537.6	-18099.2	-969.6	20736	19766.4	-13529.4	1956.6	-11572.8	-23404.8	438.2	-22966.6
Pins Maritime	Zone Inaccessible			-32.2	15622.6	15590.4	-12045.4	64.2	-11981.2	Zone Inaccessible		
Sirène 01	0	13832	13832	0	6755	6755	-3776	203.2	-3572.8	0	8476.8	8476.8
Sirène 02	0	6451.2	6451.2	0	6048	6048	-992	762.2	-229.8	-517.8	3465.8	2948
Verte Rive	-3920	168	-3752	-1525.4	311.2	-1214.2	-1380	603.8	-776.2	-2343.2	474.4	-1868.8
Bateau Cassé	-38572.8	0	-38572.8	-6836.6	79.8	-6756.8	-34807.8	1021.2	-33786.6	-3395	2675.2	-719.8
Stambole	-21504	0	-21504	0	8408	8408	-31944.8	0	-31944.8	-231.6	2717.8	2486.2
Coco Plage	-7996.8	100.8	-7896	-3033.2	1032.6	-2000.6	-14098.2	0	-14098.2	0	8384.6	8384.6
La Frégate	-268.8	0	-1075.2	-304.6	0	-304.6	-76	0	-76	0	117	117
Total Secteur Harrach-Hamiz	-91705.6	33857.6	-57848	-12701.6	69809.4	57107.8	-112649.6	15543.2	-97106.4	-30888.4	34862	3973.6

3.9.2.1.5 Discussion des résultats

Les résultats du tableau III-6 reflètent la dynamique des secteurs, variable d'une période à une autre. Une accrétion considérable avait été constatée au niveau des plages durant la période allant de 1959 à 1980 (+ 5,70 ha). Cet état s'est complètement renversé au cours de la période 1980-1999 où la perte de terrains est devenue très importante et a dépassé les (-9,7 ha). Au cours de la dernière période 1999-2015, des mesures lourdes ont été déployées pour réduire les pertes de terres, ce qui a contribué à stabiliser le bilan d'évolution de la région centre (+0.39 ha). Toutefois, les zones en accrétion représentent seulement les secteurs où des infrastructures de protection ont été installées. L'érosion reste omniprésente dans le reste des secteurs, ce qui pousse les autorités à continuer dans cette politique d'artificialisation du linéaire côtier en vue de le protéger.

Les facteurs qui gouvernent cette tendance semblent être variables entre naturels et anthropiques. En effet, la région centre d'Alger a connu historiquement une très forte urbanisation due à de multiples épisodes d'exodes ruraux. Ce facteur a, non seulement, transformé les paysages, réduit les apports en sédiments mais aussi a soumis la région à une pression et risque côtier permanent.

L'étude hydrologique et hydrodynamique renforce ce constat. La réduction des apports solides des cours d'eau ainsi que l'augmentation des épisodes de tempêtes, contribuent à ce recul ressenti sur les plages, particulièrement quand leurs orientations sont pénalisantes par rapport à la côte.

Le transit sédimentaire quant à lui s'est retrouvé fortement perturbé. L'urbanisation illicite et anarchique autour de l'Oued El Hamiz, ainsi que l'aménagement et l'endiguement de l'Oued El Harrach semblent avoir réduit les apports solides en sédiments « naturellement déjà en pénurie » (Réduction des stocks au niveau des bassins versants). Les ouvrages de protection édifiés dans la région contribuent aussi à cette perturbation de transit. Les « épis-brises lames » au niveau des plages sirènes 1 et 2, installés depuis 2008, ont eu un sérieux impact sur les zones adjacentes, à savoir les plages Lido, la Verte Rive et Bateau Cassé et force donc les autorités à lancer des projets de protection sur ces derniers. D'un autre côté, l'aménagement de la promenade des Sablettes (projet en cours) aura probablement un fort impact sur sa zone adjacente. Le constat de terrain montre que la digue de la plage Piquet Blanc bloque une grande partie des sédiments charriés au niveau de l'embouchure de l'Oued El Harrach.

La forte dégradation des ensembles dunaires, ayant existé historiquement au niveau de la région, peut-être une des principales raisons de la perturbation des flux sédimentaires constatées. En effet, l'urbanisation de la région centre d'Alger s'est faite au détriment des dunes et le défrichement dunaire s'est opéré sur différentes périodes et a touché, à la fois les dunes consolidées et bordières. (Rabehi, 2018) avance l'hypothèse que les plages ayant un lien direct avec ces anciennes dunes, se trouvent dépourvues de sources d'alimentation en sédiment. Cela conjugué à d'autres facteurs locaux (notamment l'accroissement de l'hydrodynamisme et piégeage de sédiment des oueds), les a rendus sujettes à une érosion accrue durant ces deux dernières décennies. Dans les prochains chapitres, une partie de ce travail sera dédiée à l'étude du défrichement dunaire et à son impact sur la région d'intérêt.

3.9.3 Résultats pour la région est (région 03)

Les calculs des variations de la ligne de rivage sont effectués le long des 423 transects, répartis sur sept plages de la partie occidentale de la baie de Zemmouri à l'exception des secteurs inaccessibles, à savoir la zone de Ain El Baidha (Commune de Ain Taya) ; Cette dernière se présente comme un littoral rocheux artificialisé (Figure III-42).

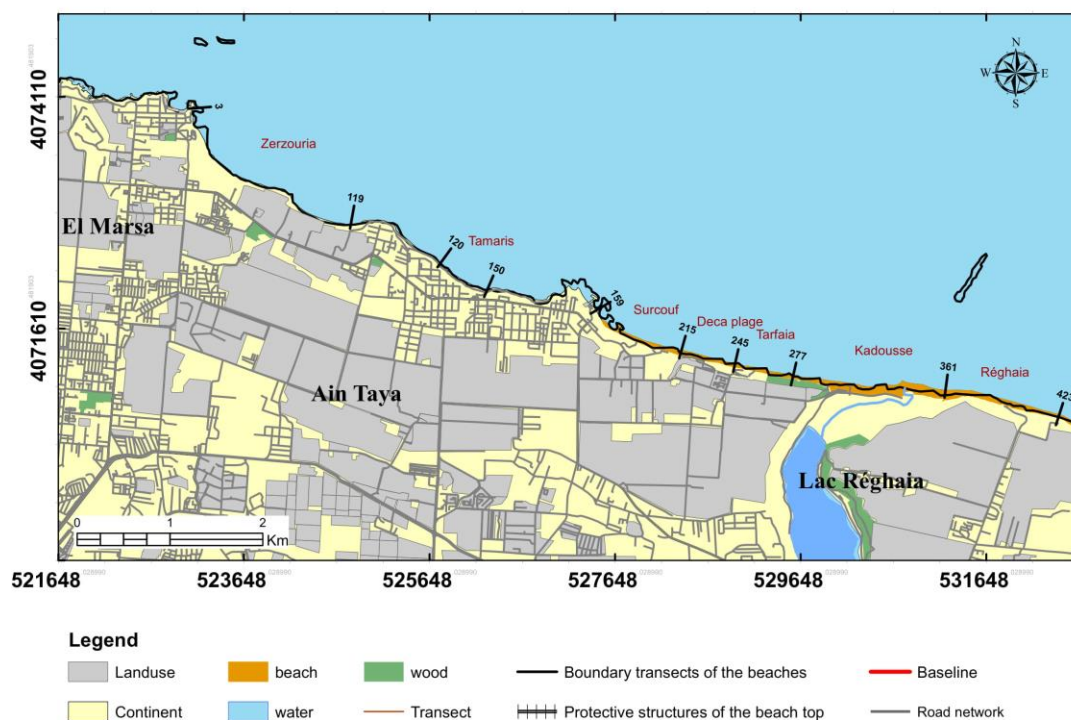


Figure III-42 : Répartition des transects le long du littoral Ouest de la région Est.

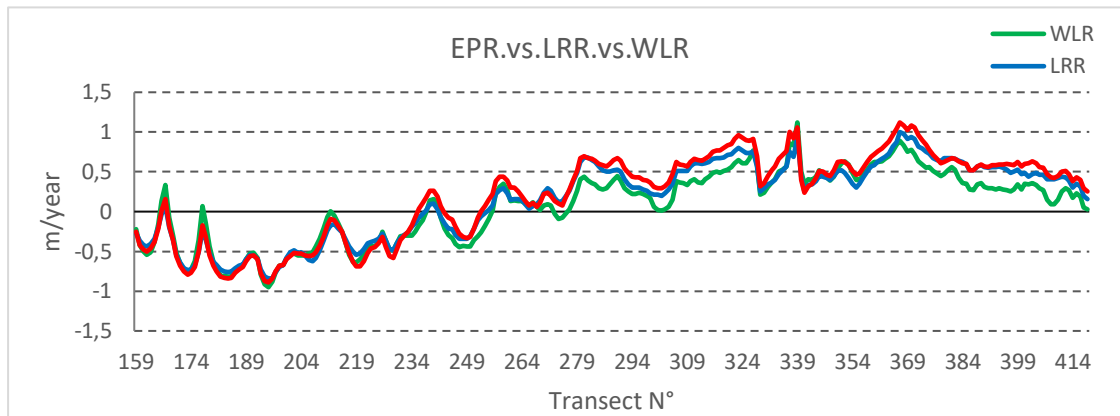


Figure III-43 : Correspondance entre les trois paramètres EPR, LRR et WLR.

Pour cette région, l'avancement ou le recul de la ligne de rivage présenté par le NSM (Figure III-43) montre un maximum de progradation au niveau des plages de Réghaïa et El Kadousse avec des taux net d'avancement avoisinant les 64 m et 61m respectivement. Ceci est essentiellement dû à l'apport de sédiments charriés par l'oued Réghaïa ainsi qu'à la présence du cordon dunaire qui procure une forme d'équilibre à la dynamique sédimentaire de ces plages. Cependant, un maximum de recul de l'ordre de 51 m est enregistré et correspondant à la plage Surcouf et plus précisément, à la zone comprise entre les transects 210-215. En effet depuis 2014, la zone de Surcouf est subdivisée en deux parties :

1. **Les Flots Bleus** où l'installation des ouvrages de défense a permis une protection ponctuelle de la zone en question. Cependant, le transit sédimentaire concernant cette cellule s'est retrouvé dans un état de perturbation.
2. **Hay El Chouhada** où l'installation des ouvrages au niveau de la plage adjacente a eu un fort impact direct sur l'apport en sédiments. Le maximum de recul a été relevé après la tempête du 12 mars 2014. Depuis, une protection en enrochement a été établie au niveau de cette partie de Surcouf (voir galerie Figure III-50)

3.9.3.1 Variation mi-séculaire de la ligne du rivage entre 1959 et 2017

Afin de choisir les dates des levés représentant les meilleures corrélations entre les taux d'évolution du trait de côte mesurés EPR et calculés par le LRR et WLR, plusieurs tests de calculs ont été effectués.

La Figure III-44 (a et b) montre que les périodes 1959 – 1980, 1980 – 2003 et 2003 – 2017 présentent les meilleures corrélations entre l'EPR et LRR avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.98$, ainsi qu'entre EPR et le WLR avec un $R^2 = 0.95$.

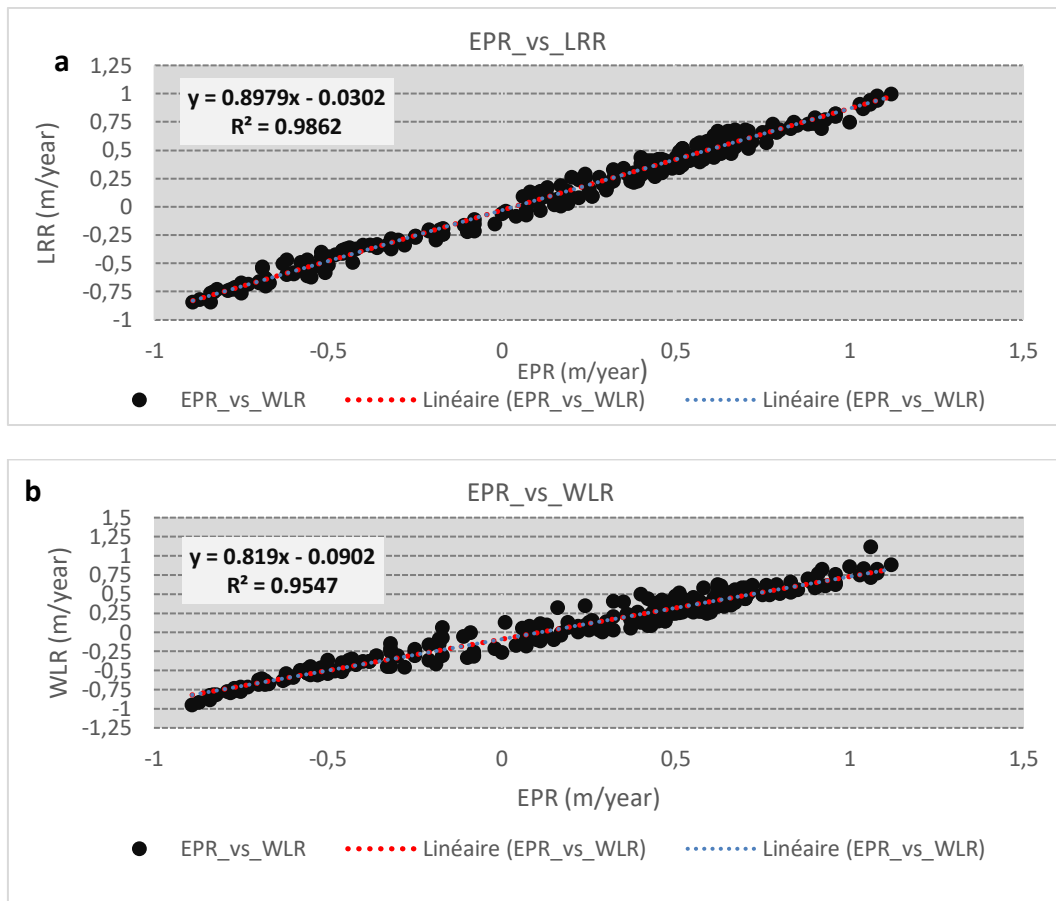


Figure III-44 : Corrélation entre les taux d'évolution mesurés EPR et calculés LRR et WLR.

Le linéaire sableux de la zone Ouest de la baie de Zemmouri est formé de plages à caractère morphodynamique intermédiaire. En effet, l'indice morphodynamique calculé montre que les plages tendent vers le caractère dissipatif à l'Est (Réghaïa) tandis qu'elles sont plutôt réfléchives en allant vers l'Ouest (Ain Taya) (Bouakline, 2009).

Les résultats sont présentés en EPR (m/an) et NSM (m), ils matérialisent les minimums, les maximums ainsi que les moyennes des changements de la ligne de rivage.

Une analyse diachronique du trait de côte a été effectuée sur trois périodes distinctes 1959-1980, 1980-2003, 2003-2017. Aussi, afin de mieux balayer la zone d'étude, nous avons subdivisé cette dernière en deux secteurs : secteur 1 pour la partie Est et le secteur 2 pour la partie Ouest.

Le tableau III-7 montre que dans la période avant 1980, le linéaire côtier était en accrétion avec un pourcentage de 69% et 31% respectivement pour l'accrétion et l'érosion. De 1980 à 2003, nous avons constaté un changement de tendance, avec un pourcentage de 38% et 62% respectivement pour l'accrétion et l'érosion.

Dans la troisième période (2003-2017), nous avons observé une accentuation de l'érosion (69%). Ces résultats nous ont amenés à étendre l'étude à une évolution périodique basée sur les statistiques EPR / NSM, afin d'identifier les causes et de comprendre leur impact sur la dynamique côtière.

Tableau III-7 : Pourcentage de l'évolution linéaire côtière le long de l'est d'Alger.

	1959-1980		1980-2003		2003-2017		1959-2017	
	Erosion	Accrétion	Erosion	Accrétion	Erosion	Accrétion	Erosion	Accrétion
Coastal linear (Km)	4,65	10,35	9,3	5,7	10,35	4,65	7,35	7,65
Total (%)	31	69	62	38	69	31	49	51

3.9.3.2 Période allant de 1959 à 2017 :

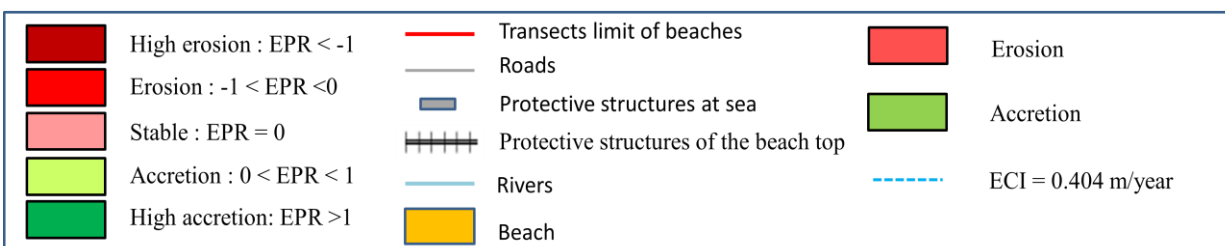
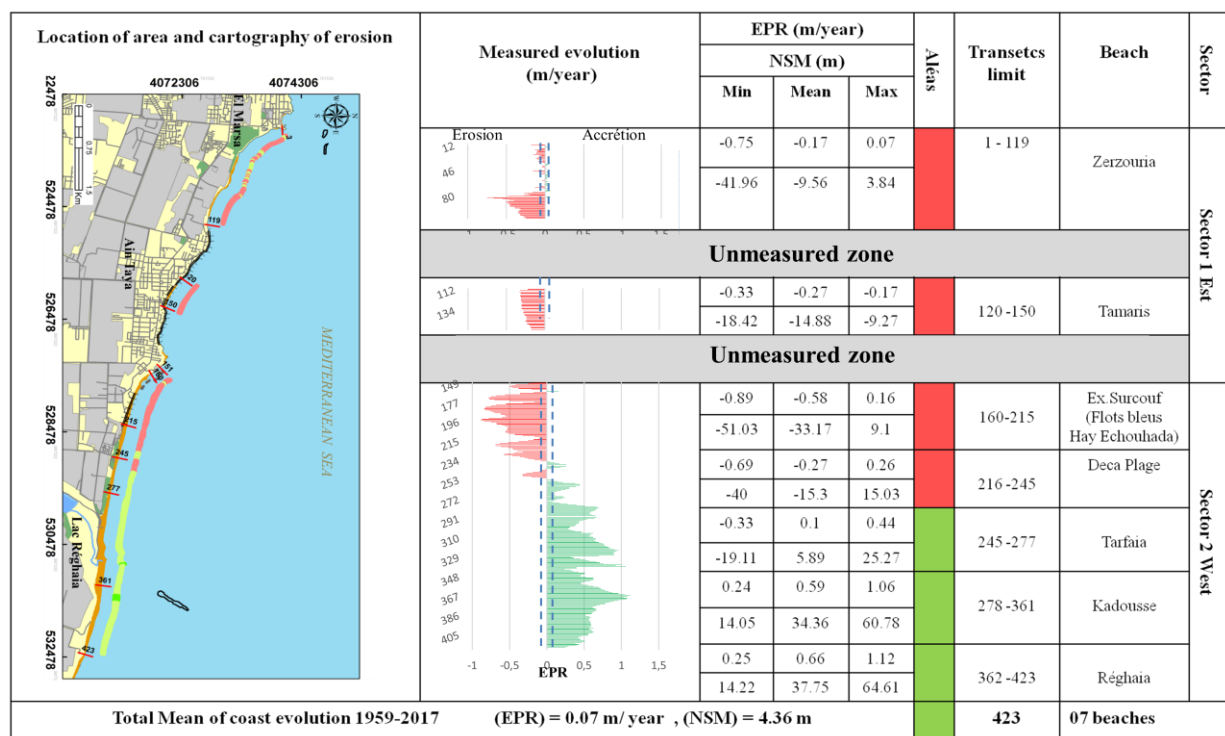


Figure III-45 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période 1959-2017 sur le littoral de la région Est.

Pour cette période, l'EPR global est de + 0.07 m/an, cette valeur montre que la zone est en légère accrétion. Toutefois, l'analyse chronologique indique qu'une érosion très importante est en train de se produire sur l'intégralité de la zone (Figure III-45).

Le secteur 01 comprend la partie qui s'étend de l'extrémité Ouest de la zone jusqu'à Ain El Baydha, il est compris entre les transects 1 et 150. Les observations sur terrain montrent que cette partie est caractérisée par une géomorphologie en falaises marines vives. Leur orientation est très favorable aux différentes attaques hydrodynamiques, notamment les houles des tempêtes incidentes du secteur ouest, Nord-Ouest et Nord et dont les hauteurs significatives fluctuent généralement entre 3.5 et 5.5m.

Globalement, sur la période totale de l'étude, ce secteur montre une érosion importante qui évolue dans le temps et dans l'espace. Une perte de près de 42 mètres a été constatée au niveau des falaises de Zerzouria avec un EPR moyen de -0.17 m/an. La plage de Tamaris connaît aussi une forte érosion avec un EPR de l'ordre de -0.27 m/an, les attaques marines et l'arrachage du sédiment vers le large sont les principaux facteurs qui régissent cette érosion.

Ce sont les mêmes observations remarquées au niveau du secteur 02, compris entre les transects 151 et 423 et qui s'étend sur 5 Km environ. Ce secteur connaît une double évolution qui se présente comme une forte érosion au niveau de la zone de Surcouf EPR= -0.58 m/an et Décaplage EPR= -0.27 m/an. Ceci est causé par l'activité hydrodynamique qui se traduit par les vagues et les courants qui s'accroissent à cause de la nature réfléchissante des plages. En outre, l'action anthropique et les infrastructures de défense installées causent une perturbation du transit sédimentaire ; les courants d'arrachement déplacent le sédiment, seules quelques parties abritées au niveau de Surcouf peuvent donc présenter des tombolos ou autres formes d'accumulation.

En revanche, dans la même période, les plages sablonneuses de Tarfaia, El Kadousse et Réghaïa présentent des EPR positifs pour les derniers 59 ans. Ils sont respectivement de l'ordre de 0.1m/an, 0.59m/an et 0.66 m/an.

Les valeurs maximales de l'EPR et NSM observées au niveau de ces plages, l'Oued Réghaïa ainsi que le cordon dunaire d'El Kadousse représentent les principales sources du flux sédimentaires et procurent un apport compensatif des pertes, notamment en périodes de tempêtes. De plus, l'étude de (Bouakline, 2009) a démontré que ces plages sont dissipatives et donc favorable à l'accumulation.

L'arrière-pays au niveau de cette zone est peu occupé contrairement à la zone de Ain Taya, ceci réduit l'action de l'homme bien qu'elle reste omniprésente.

La déviation de l'embouchure de l'Oued Réghaïa vers la plage El Kadousse en 2008 a induit une dégradation de son cordon dunaire, les réserves de sédiment ont été perturbées, L'impact a été très apparent durant les dernières années.

3.9.3.3 Période allant de 1959 à 1980

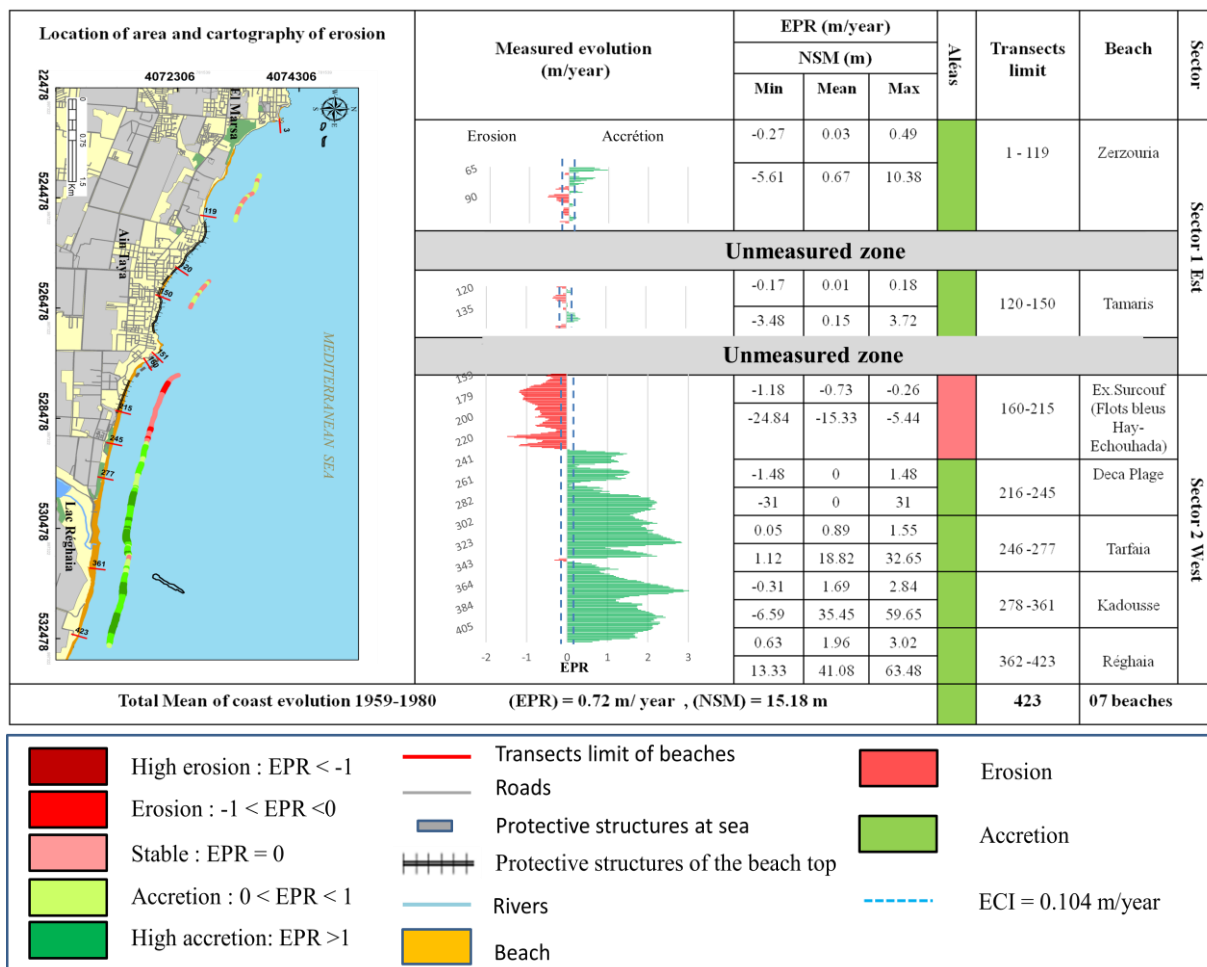


Figure III-46 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-1980 sur le littoral de la région Est.

Pour cette période, l'EPR moyen est de + 0.72 m/an et le NSM global est de 15.18m. Ces valeurs montrent que la zone présente une forte accretion non généralisée vu que la plage de Surcouf subit une forte érosion (Figure III-46).

Le secteur Ouest présente une stabilité qui peut être qualifiée de « naturelle » sur le plan évolutif, avec des EPR de l'ordre de 0.03 m/an au niveau des falaises de Zerkouria. La même observation est faite au niveau de la plage de Tamaris où les EPR avoisinent les 0.01 m/an. Ceci peut être expliqué par la nature géomorphologique de la zone, plus particulièrement la lithologie (Bouhamadouche, 1993). Aussi, par l'absence d'ouvrages ou de formes de protection consistantes pouvant induire un changement de la dynamique sédimentaire de ce secteur.

De même au niveau du secteur 02 pour cette même période, la plage de Surcouf, exposée à l'action hydrodynamique, présente un recul apparent dont le taux enregistré est le maximal EPR = -0.73 m/an. Ceci reflète le degré de vulnérabilité de cette partie de la zone d'étude.

Les plages de l'extrémité Est quant à elles, connaissent un engraissement important dû à leur caractère dissipatif qui favorise le dépôt et l'accumulation. La plage El Kadousse enregistre l'EPR maximal avec 1.69 m/an. Toutefois, dans cette zone, on remarque une légère forme d'érosion, naturelle, due aux mouvements de l'embouchure de l'Oued Réghaïa.

3.9.3.4 Période allant de 1980 à 2003

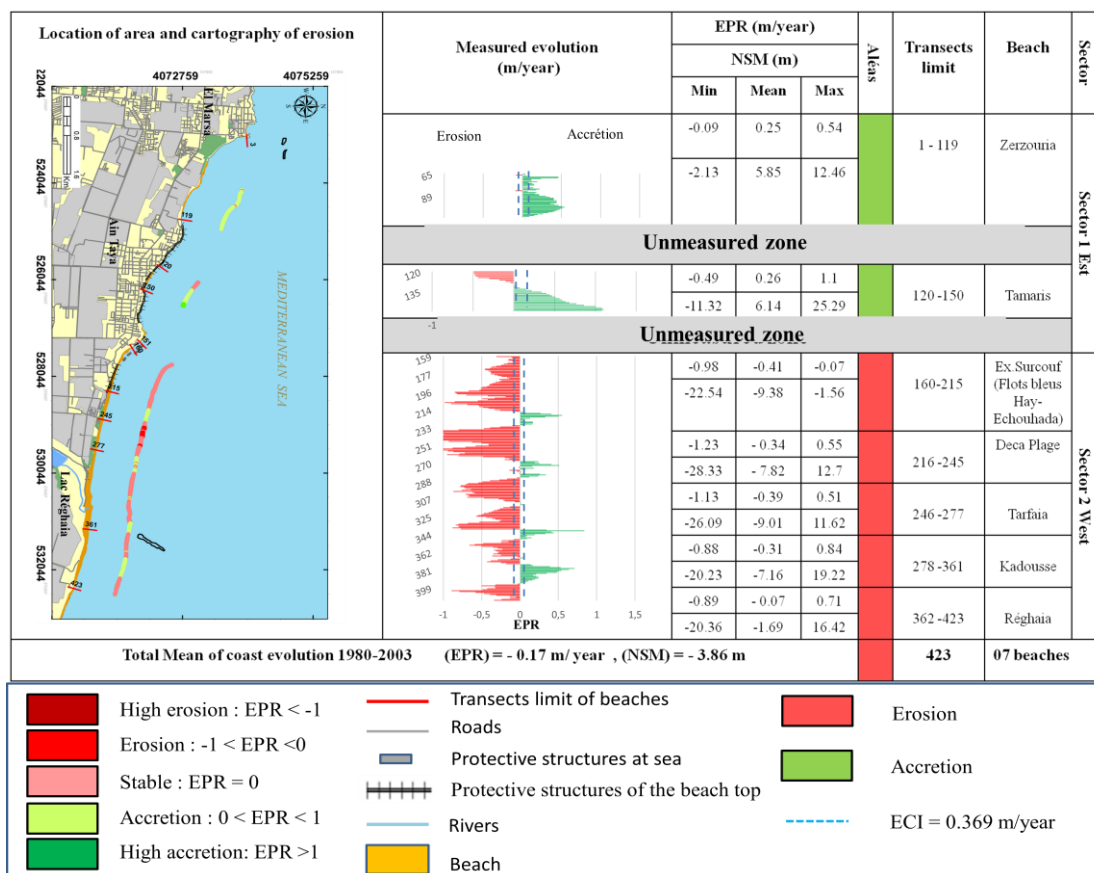


Figure III-47 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1980-2003 sur le littoral de la région Est.

Globalement, un EPR moyen de l'ordre de - 0.17 m/an et un NSM de -3.86 m sont observés, ces valeurs témoignent de la forte érosion que la zone a subie (Figure III-47). L'hypothèse de l'intervention de la dérive littorale dans le transport de sédiment du secteur 02 vers le secteur 01 n'est pas exclue.

Durant cette période, le secteur 01 connaît toujours une stabilité relative, voire une accrétion qui se traduit par des EPR équivalents et avoisinant les 0.25 m/an sur l'ensemble des plages. Ceci peut être expliqué par le cycle naturel du dépôt de sédiment et de formation de plages au pied des falaises marines, conformément au schéma classique de la dynamique sédimentaire.

Le secteur 02 dans cette période, connaît une érosion dramatique. Les plages Surcouf, Tarfaia et El Kadousse présentent les maximums de reculs avec respectivement des taux d'érosion moyen de l'ordre de -0.41 m/an, -0.39 m/an et -0.31 m/an. L'attaque frontale de la mer et la dégradation des dunes durant cette période sont les deux principales raisons qui gouvernent ce phénomène.

3.9.3.5 Période allant de 2003 à 2017

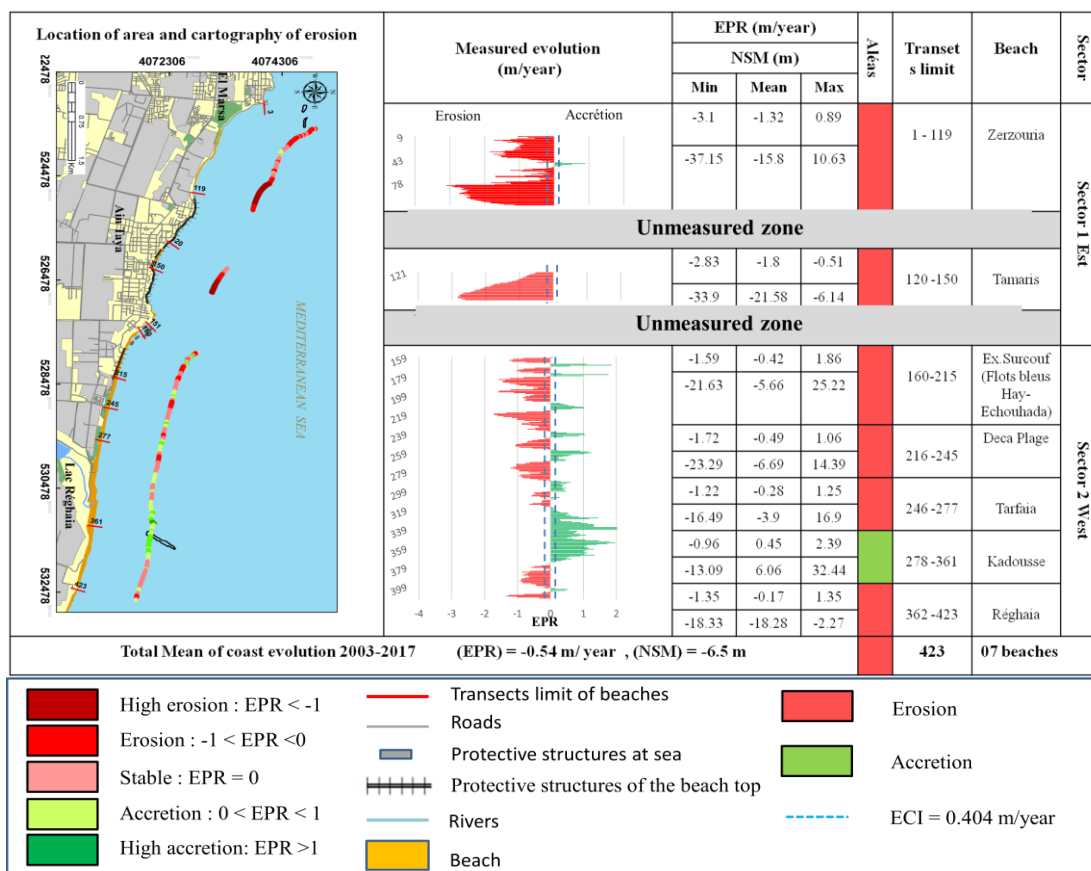


Figure III-48 : Synthèse statistique de la cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 2003-2017 sur le littoral de la région Est.

L'EPR moyen pour cette période affiche une valeur de -0.54 m/an et le NSM est de -6.5 m. Ces résultats concordent avec une étude récente sur la zone réalisée par (Bounoua et al., 2017) et confirment la forte vulnérabilité et la tendance à l'érosion à laquelle la zone fait face.

Durant cette période, une rapide évolution négative est observée avec des EPR de -1.32 m/an et de -1.8 m/an respectivement pour Zerzouria et Tamaris (Figure III-48). En effet, l'expansion de l'urbanisation a induit l'augmentation des enjeux et avec cela, le besoin de protéger les biens installés sur la zone côtière, comme cela a été le cas suite aux épisodes de tempêtes de 2007. A cet effet, les enregistrements de l'ONM, stations de la région Alger-Est, ont permis de détecter un nombre important de tempêtes qui ont fortement influencé l'évolution de la zone.

Ces ouvrages de défense ont eu un fort impact sur le transit du sédiment de façon générale, impliquant la formation de surfaces d'accumulation, entraînant un déficit dans le budget sédimentaire et accentuant l'érosion dans certaines parties des zones adjacentes.

Dans le même sens, des accrétions ponctuelles sont observées sur les plages du secteur 02 au niveau des infrastructures de protection Flots Bleus et Hay Echouhada (Ex Surcouf). Mais, celles-ci ne parviennent pas à réduire ni à rendre stable l'évolution négative que connaît la partie Ouest de ce secteur où l'on note un EPR de -0.42 m/an.

Un constat similaire est établi pour les plages : Décaplage, Tarfaia et Réghaïa où les EPR sont respectivement de -0.49 m/an, -0.28 m/an et -0.17 m/an. Il est à noter que la plage d'El Kadousse, qui se localise entre les deux plages de Tarfaia et Réghaïa, présente un EPR d'environ +0.45 m/an. Ceci est dû à la présence du cordon dunaire réduisant ainsi le taux d'érosion par compensation du sédiment pour cette plage et pour les deux plages adjacentes.

Le tableau III-8, présente les surfaces gagnées et perdues le long de la zone d'étude. En fait, les mesures des changements linéaires du littoral complétées par le calcul des bilans de surface offrent une vision de la cinématique côtière en deux dimensions (Kermani et al., 2016).

Selon le tableau III-8, la superficie totale des plages perdues au cours de la période allant de 1959 à 2017 est de 3,09 ha, à l'exception de la plage El Kadousse, située dans la partie orientale de la région Est, qui présente un gain de 5,77 ha. Cela améliore le bilan de l'ensemble de la zone à une valeur positive de 3,49 ha.

Tableau III-8: Surfaces gagnées et perdues le long de l'Est d'Alger. (NSBS= Bilan).

Beaches		1959-1980			1980-2003			2003-2017			1959-2017		
		Gain (ha)	Loss (ha)	NSBS (ha)	Gain (ha)	Loss (ha)	NSBS (ha)	Gain (ha)	Loss (ha)	NSBS (ha)	Gain (ha)	Loss (ha)	NSBS (ha)
Zerzouria	1 - 119	0.10	-0.10	0.00	0.57	-0.01	0.56	0.05	-3.30	-3.25	0.09	-1.81	-1.72
Tamaris	120 - 150	0.05	-0.06	-0.01	0.51	-0.14	0.37	0.00	-1.25	-1.25	0.00	-0.81	-0.81
Surcouf	160 - 215	0.00	-1.75	-1.75	0.00	-1.07	-1.07	0.31	-0.96	-0.65	0.02	-3.48	-3.46
DecaPlage	216 - 245	0.05	-0.63	-0.58	0.14	-0.60	-0.47	0.11	-0.51	-0.40	0.13	-1.04	-0.92
Tarfaia	246 - 277	0.35	0.00	0.35	0.09	-0.67	-0.58	0.20	-0.45	-0.25	0.58	-0.20	0.38
El Kadouss	278 - 361	1.52	-0.03	1.49	0.18	-1.39	-1.20	1.35	-0.33	1.02	5.77	0.00	5.77
Réghaia	362 - 423	1.29	0.00	1.29	0.28	-0.46	-0.17	0.28	-0.51	-0.23	0.00	4.25	4.25
Total		3.35	-2.56	0.79	1.77	-4.33	-2.56	2.31	-7.32	-5.02	6.58	-3.09	3.49

3.9.3.6 Discussion des résultats

Les résultats des tableaux III-7 et III-8 confirment l'évolution dynamique qui change d'une période à l'autre. Nous avons constaté que les plages étaient stables avec peu d'accrétion durant la période allant de 1959 à 1980 (+ 0,79 ha). Cet état a commencé à changer au cours de la période (1980-2003) où la perte de terrains est devenue importante (-2,56 ha). Au cours de la dernière période (2003-2017), une perte massive de terres a été constatée, atteignant les 5,02 ha. La perte maximale survenue au cours de cette période est d'environ 7,32 ha.

Cette analyse a montré que la région est exposée au risque d'érosion lorsque la tendance évolutive du littoral est en récession ces dernières années. En effet, le tableau III-7 montre que l'évolution du linéaire côtier fluctue dans le temps, celui-ci ayant globalement progressé de 1959 à 1980 (69% d'accrétion contre 31% d'érosion). Cette évolution a totalement changé durant la deuxième période. Ainsi à partir de 2003, on observe une inversion totale de la tendance de l'évolution avec 31% d'accrétion contre 69% d'érosion.

Les résultats du tableau III.3 sont cohérents avec ceux du tableau III.4 et où la superficie totale des plages perdue entre 1959 et 2017 est de 3,09 ha. De nos jours, la zone présente une tendance à l'érosion. Cette tendance a évidemment des facteurs déterminants. En effet, la région Est d'Alger se caractérise par une nature très attractive et une diversité géomorphologique (grande plage, falaise, zones humides, îles...) la soumettant à une pression permanente.

Au cours de son évolution, la côte Est d'Alger a connu une transformation sans précédent. Essentiellement une expansion de la construction locale afin de répondre aux besoins dans différents domaines : logement, industrie et tourisme. Ces actions anthropiques ont provoqué l'altération et la transformation des paysages côtiers, par conséquent, la probabilité d'une augmentation des risques côtiers a été multipliée.

Il est à noter également que les plages de l'Est d'Alger sont exposées à de multiples facteurs naturels défavorables à leur progradation. La configuration et l'orientation de la zone sont très favorables aux attaques hydrodynamiques (Figure III-50.c), en particulier aux houles de tempête Nord-Ouest. De plus, les observations sur le terrain montrent également la lithologie vulnérable de certaines parties de la zone étudiée. Bien que les caractères morphodynamiques intermédiaires soient compris entre 1 et 6 dans toute la région, la zone occidentale connaît une récession en raison de son caractère réfléchissant.

La surfréquentation des plages, l'extraction abusive du sable (la figure III.50- i), Les sports mécaniques illégaux, la réorientation de l'embouchure de la rivière Réghaïa et la fermeture de la vanne séparant la rivière Réghaïa du lac sont les actions anthropiques qui ont fortement perturbé l'apport de sédiments sur les plages.

Cet aménagement a conduit au déficit de sédiments transportés par la rivière Réghaïa et à une forte dégradation du cordon dunaire d'El Kadousse qui a toujours constitué une protection naturelle contre les attaques de vagues.

L'étude comparative des contours des dunes sur dix ans (2006-2016), réalisée par (Bounoua et al., 2017), a montré que ces dunes avaient subi une réduction de surface d'environ 3659 m² (Figure III-49).

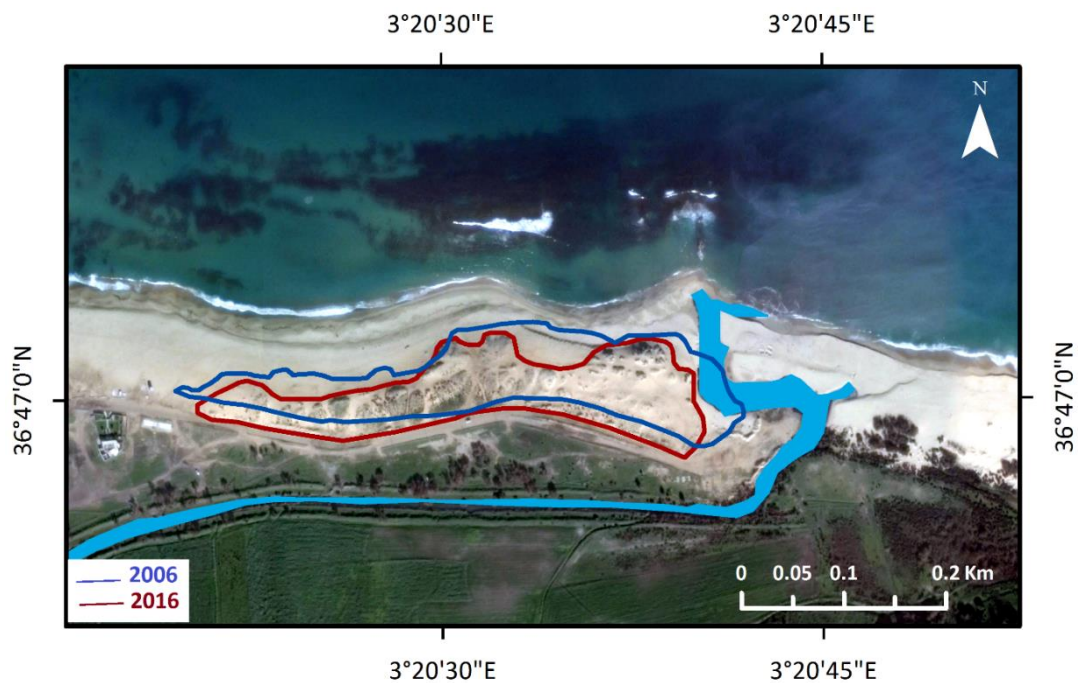


Figure III-49 : Evolution Surfâcique du cordon dunaire d'El Kadouss entre 2006 et 2012.

En outre, selon l'étude des tempêtes élaborée par l'Office national de météorologie (ONM, 2015), au cours du mois d'octobre 2012, une tempête s'est produite à une vitesse moyenne de 14,33 m/s, provoquant une régression du cordon de dune de 28.07 % (Figure III.50-j)

Les autorités locales ont pris conscience de la gravité de la situation. D'où l'initiative de restaurer la dune par une méthode flexible en septembre 2015. Cette restauration a montré une certaine efficacité (Figure III.50- g), mais le pâturage pratiqué par le bétail (Figure III.50- h) a engendré une nouvelle dégradation de la dune.

D'autre part, les infrastructures de protection (Figure III.50-d), installées en 2009 à Flots Bleus ne parviennent pas à réduire ou à stabiliser la tendance négative. Au contraire, ce type de protections lourdes a entraîné une modification de l'activité hydrosédimentaire dans la région.

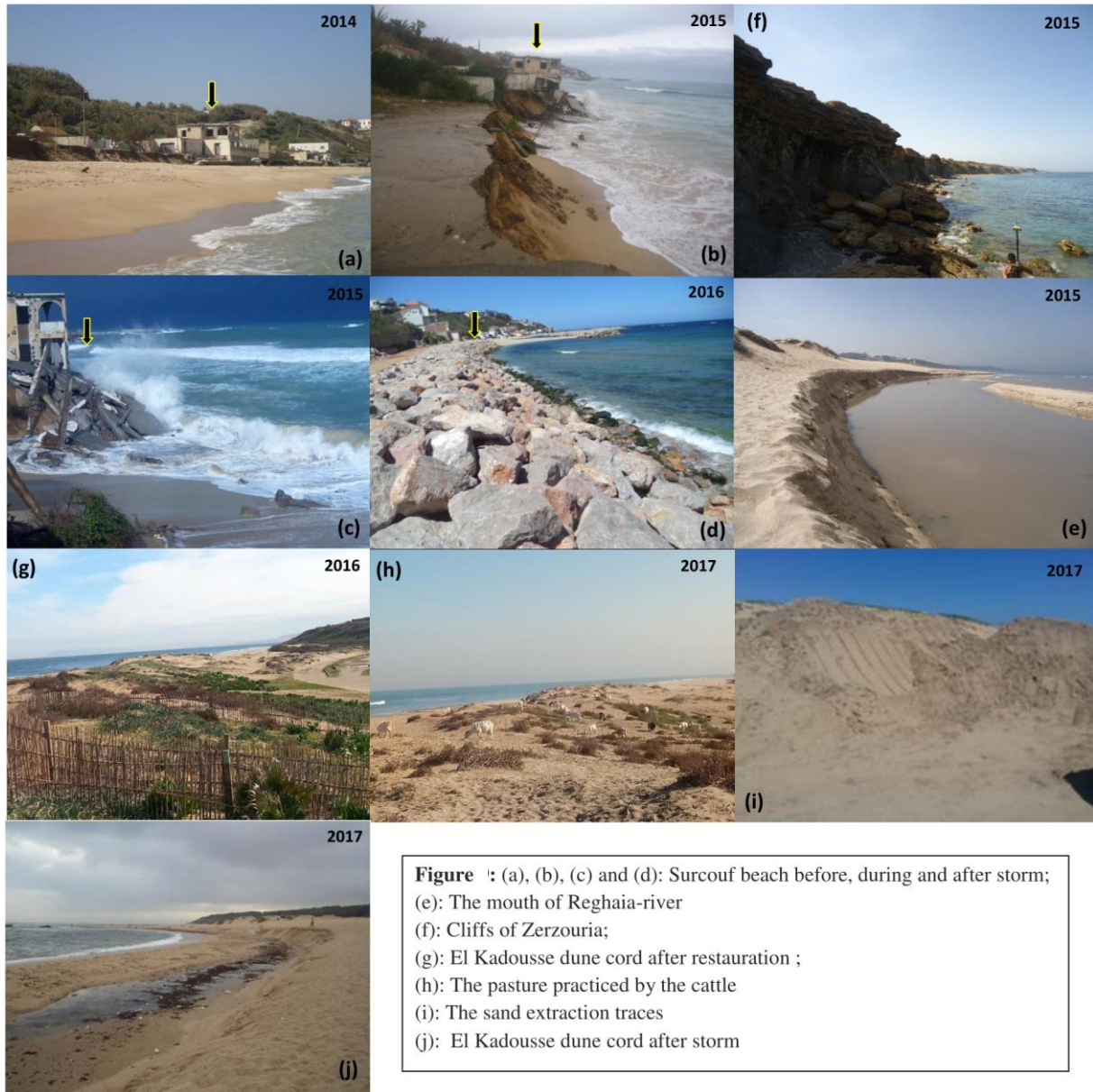


Figure III-50 : Galerie de photos de la région Ouest de Zone d'étude.

3.10 Conclusion

Tout au long de ce chapitre beaucoup d'informations ont été recueillies. Ces dernières nous ont permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

L'étude de la cinématique côtière est efficace pour appréhender une approche pragmatique, des observations de terrain à l'utilisation de techniques géospatiales avec un système d'information géographique (extension DSAS). Cette analyse a permis de formaliser le risque d'érosion en le caractérisant (calcul d'EPR et de NSM), de le qualifier (fort ou faible) et enfin de le cartographier, avec une perspective permettant de prédire la vulnérabilité côtière. Dans ce contexte, l'évaluation des bilans surfaciques montre une énorme perte de terrain de l'ordre de 3.4 ± 0.09 ha sur une période qui avoisine les 60 ans. Une tendance à l'érosion est donc signalée. Si rien n'est envisagé, le bilan des terres perdues risque encore de s'alourdir dans les prochaines années.

Le monitoring spatial de l'artificialisation de la côte couplé à des outils de calculs géostatistiques a donné des résultats satisfaisants en matière de tendance globale (Urbanisation/défrichement/érosion/accrétion). Dans ce diagnostic approfondi, des méthodes et techniques ont été co-construites pour une évaluation du risque d'érosion, afin de fournir un outil d'aide à la prise de décision pour les parties prenantes dans un processus de gestion intégrée des littoraux algérois.

Ce volet de travail a aussi montré que le couplage des techniques géo-spatiales, telles que les photographies aériennes et les données issues du DGPS dans des logiciels SIG, peut fournir des informations fiables et précises sur l'évolution des côtes. Aussi, l'utilisation de l'outil de calculs géostatistiques DSAS, a donné des résultats satisfaisants très cohérents avec les observations et la réalité terrain.

A terme, les différents travaux réalisés devraient permettre une meilleure connaissance du milieu côtier, un espace stratégique de première importance, puisqu'il est l'interface entre les océans et les continents et donc une meilleure gestion des zones littorales.

Chapitre IV : Cas d'études et application

4.1 Introduction

Le système côtier dégage une notion de diversification et de complexité. Ses composants interagissent en permanence. Cette interaction se fait de manière interne entre elles ou externe avec les différents facteurs biotiques et abiotiques.

Ce chapitre traite quelques cas dont les problématiques sont issues des systèmes côtiers dans la région algéroise. Ces cas d'études sont résolus de manière à exploiter la base de données générée par le réseau de surveillance lors de cette thèse. L'ensemble des cas exposent différents systèmes, plages (Rechargement artificiel), dunes (dégradation des dunes côtières par le phénomène d'urbanisation), falaises (recul et érosion des falaises) et un cas général de calcul d'indice de vulnérabilité côtière.

Les méthodologies adoptées pour résoudre ses cas sont celles qui ont été jugées les plus adaptées, bien qu'il existe souvent d'autres alternatives à celles-ci.

4.2 Cas d'étude N°01 : Faisabilité physique du rechargement artificiel de la plage El Riadh

4.2.1 Introduction

Cette partie de l'étude traite les processus physiques intervenant dans la dynamique sédimentaire du secteur de la plage El Riadh ainsi que l'identification des sources de gain des sédiments qui alimentent le site, les points de perte et la direction des fuites soit dans le profil vers le large (cross-shore transport) ou bien latéralement vers les plages adjacentes (long-shore transport). Cette méthode est recommandée dans les projets de rechargement artificiel (CBNP, 1995 ; Dean, 2002). De plus, il est nécessaire de bien appréhender au préalable la dynamique hydro-sédimentaire du site afin d'optimiser cette opération (De la Torre et al., 2014).

L'objectif de cette partie du chapitre est d'étudier la réponse de la plage El Riadh aux forces hydrodynamiques et leurs impacts sur le comportement du transit sédimentaire en considérant le régime des houles annuelles et lors des tempêtes. Ceci a pour but d'évaluer la pertinence ou le risque d'une opération d'alimentation et de juger sa faisabilité sur cette plage.

La méthodologie de la CBNP (*Committee on Beach Nourishment and Protection*) ainsi que celle de la CETS (*Commission on Engineering and Technical Systems*) permettent la prédiction de la performance d'alimentation d'une plage du point de vue physique. L'évaluation de l'impact des facteurs suivants est à considérer :

- La houle,
- Les courants,
- La dynamique sédimentaire,
- La variation historique du trait de côte,
- La variation des profils,
- Le bilan sédimentaire.

Pour notre cas d'étude, seuls les trois premiers facteurs ont été pris en considération. Aussi, afin d'évaluer l'action de ces facteurs sur le site d'étude, nous avons eu recours à la modélisation numérique (voir chapitre II). La simulation des phénomènes côtiers apporte de nombreuses explications pour la compréhension et le choix des actions pratiques à entreprendre lors des opérations de rechargements.

4.2.1.1 Justification du choix des modèles

La simulation dans un petit empirisme géographique (telle que la plage El Riadh) exige un choix de modèles numériques adéquats et adaptés aux besoins. Pour la modélisation des caractéristiques de la houle, nous avons opté pour le modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore) qui est un modèle spécialisé dans la simulation des paramètres physiques des vagues dans les zones côtières avec une résolution allant jusqu'à 20*20 m. La simulation du transport sédimentaire nécessite une superposition des processus hydrodynamiques (houle et courant) avec les paramètres sédimentologiques, c'est pourquoi nous avons choisi le modèle Mike 21.

4.2.1.2 Selection des conditions de houle à modéliser

Pour l'ensemble des modélisations de la houle, du courant et du transport sédimentaire nous avons sélectionné les conditions suivantes :

- Trois (03) conditions (pour des modèles locaux) représentent le régime annuel des houles obtenues lors du projet AMISMAP et extraites des données de MedAtlas (2004) (Tableau 4-1).
- Une condition exceptionnelle représentée par la tempête de 05 Février 2017, où les paramètres de météo-marines ont été enregistrés au niveau du site internet Windfinder (point Huecija) au large de la baie d'El Djamila et vérifiés sur terrain le jour même (Figure IV-1).
- Pour la modélisation de la tempête, nous avons procédé par l'élaboration de deux simulations ; une régionale qui servira à estimer les caractéristiques de la houle aux frontières de la zone d'étude et la deuxième, une modélisation locale au secteur de Sidi Fredj.

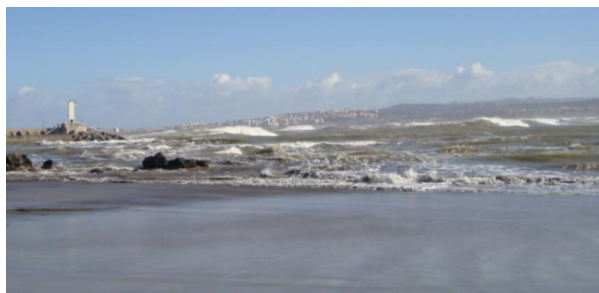


Figure IV-1: La tempête de 05 Février 2017 au niveau de Sidi Fredj.

Tableau IV-1 : Conditions des houles à modéliser.

Condition à modéliser	Emprise du modèle	Houle			Vent	
		Dir (°)	Hs (m)	T (s)	Vitesse (m/s)	Dir (°)
1	Local	21	1.82	5	8	45
2	Local	345	2.24	5.23	9	345
3	Local	270	2.71	5.78	9	270
Tempête 05/02/2017	Régional	270	4.8	11	15	270
	Local	283	5	6.8	15	270

4.2.1.3 Modélisation de la réfraction de la houle et de la dissipation d'énergie

4.2.1.3.1 Description du modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore)

C'est un modèle de propagation de la houle de troisième génération développé par l'université de Delft (Booij et al., 1999), basé sur l'équation d'équilibre de densité d'action spectrale. Il décrit l'évolution du spectre d'énergie de la houle pour certaines conditions spécifiques de vents, courants et bathymétrie, afin d'estimer les caractéristiques des houles dans les zones côtières (Boukhediche et al., 2017).

L'équation de conservation de la densité d'action spectrale de la vague est résolue par (Oukadr et al., 2017) :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \dots \dots \dots \text{(Équation 1)}$$

Où :

- N (σ, θ) = densité de l'action des vagues
- T = temps (s)
- x = distance dans la direction x (m)
- y = distance dans la direction y (m)
- σ = fréquence relative (Hz) comme on l'observe dans un cadre de référence se déplaçant avec la vitesse du courant
- θ = direction de la vague (degrés)
- C_x, C_y, C_σ, C_θ = vitesses de propagations (m / s) pour respectivement x, y, σ et θ
- S = sommes de termes source / puits de densité d'énergie

Les paramètres en sortie calculés par SWAN et qui nous intéressent dans ce cas d'étude sont :

➤ **La hauteur significative (Hs en mètre)**

$$H_s = 4\sqrt{\int \int E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \dots \dots \dots \text{(Équation 2) (DUT, 2006)}$$

Où :

- E (ω , θ) est le spectre de densité
- ω est la dispersion

➤ **La dissipation d'énergie** : Dissipation d'énergie par unité de temps due au frottement du fond, du white capping et de la rupture de vague induite par la profondeur (en W/m² ou m²/s)

➤ **Le setup** : Augmentation du niveau d'eau moyen dû à la présence des vagues.

4.2.1.3.2 Données d'entrée

Les données d'entrée utilisées pour la modélisation de la houle du modèle SWAN sont :

- Deux grilles bathymétriques, une établie à partir des données Navionic (chapitre II) pour le modèle régional avec une résolution de 200 * 200 m, et une deuxième, à partir des données de haute précision de l'APPL, avec une résolution de 20 * 20 m pour les modèles locaux.
- Les anomalies du niveau de la mer, extraites à partir des données du portail d'Aviso et de référence d'altimétrie, dont nous avons fixé une valeur max de 0.28 m.
- Pour les courants géostrophiques, nous avons négligé ce paramètre grâce à la fermeture du portail d'AVISO + (Boukhediche et al., 2017).

4.2.1.3.3 Mode de visualisation des résultats

Pour la visualisation des résultats de SWAN, une Macro a été programmée sous Excel (nommé T_R_SWAN), à l'aide du langage Visuel Basic pour le traitement automatique des tableaux des résultats de SWAN (Figure IV-2) et une deuxième extension sous Model Builder de l'environnement ArcGIS (Figure IV-3 et IV-4) pour la visualisation des tableaux des résultats traités.

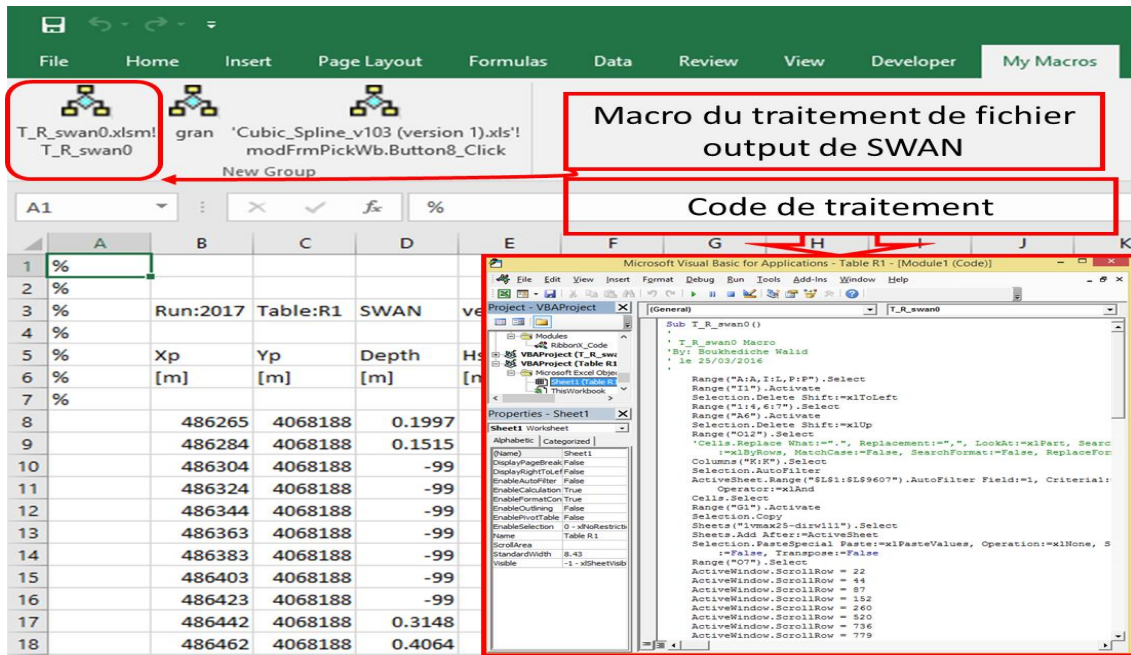


Figure IV-2 : Macro du traitement automatique des tableaux des résultats du SWAN.

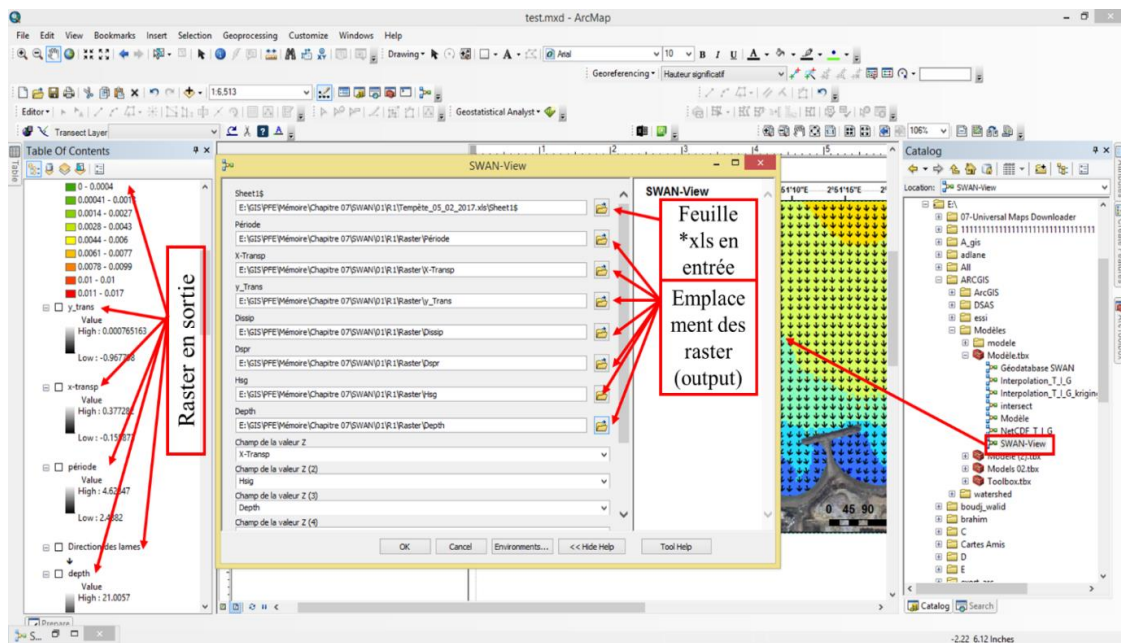


Figure IV-3 : Interface graphique de l'extension SWAN View de visualisation des résultats de SWAN.

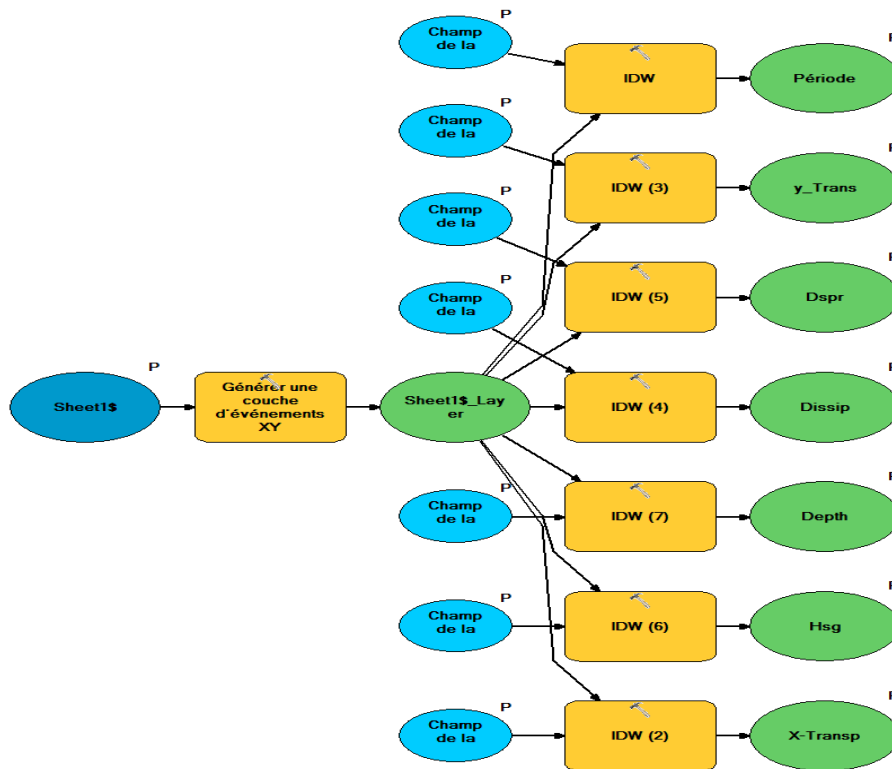


Figure IV-4 : L'extension SWAN View de visualisation des résultats de SWAN.

4.2.1.3.4 Mode opératoire d'exploitation du Modèle SWAN

L'organigramme ci-dessous (Figure IV-5) résume les étapes d'utilisation du modèle SWAN, pour la sélection des données mais aussi pour :

- Les traiter avec les méthodes les plus adéquates,
- Optimiser les résultats par des applications de traitement et de visualisation automatiques,
- Minimiser le temps d'exploitation et les erreurs,
- Tirer profit des langages de programmation et des systèmes d'informations géographiques.

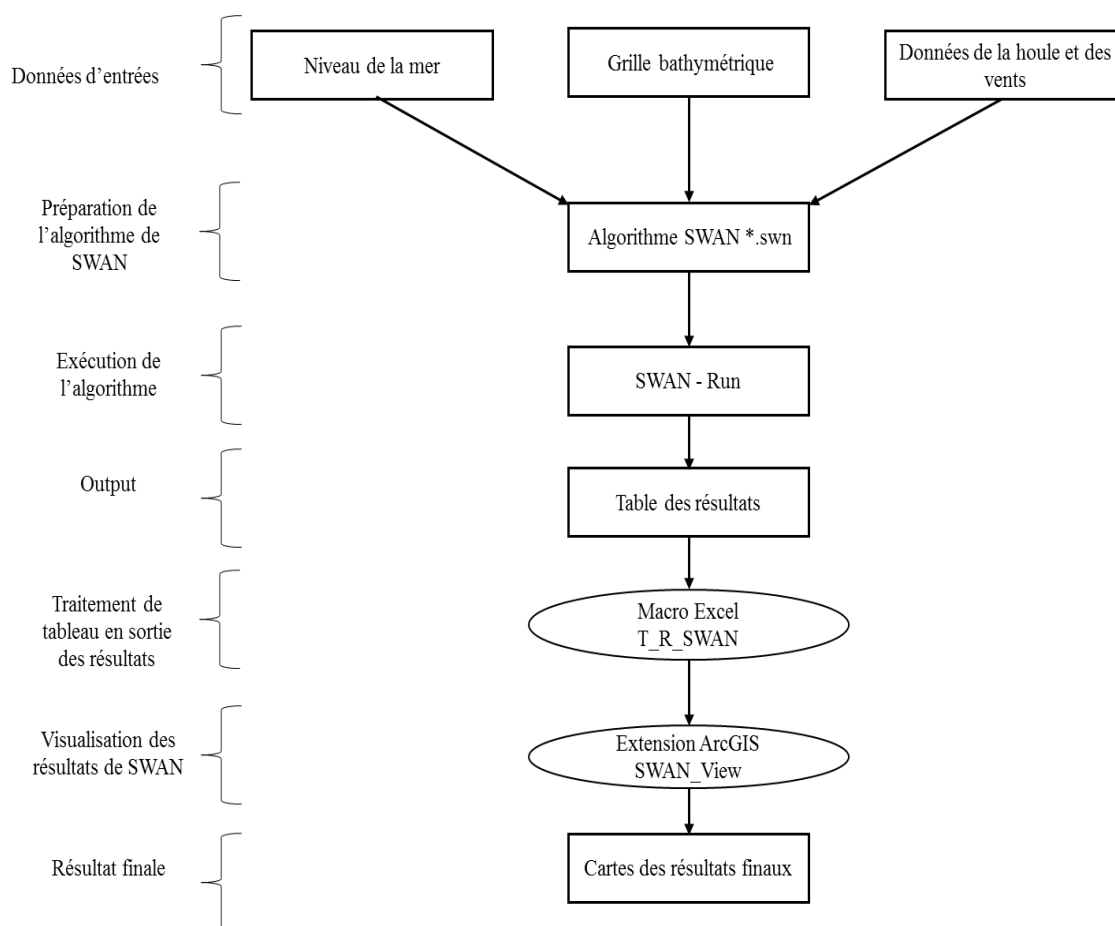


Figure IV-5 : Mode opératoire d'exploitation de Modèle SWAN.

4.2.1.3.5 Présentation des résultats

Les figures IV-6, IV-8 et IV-10 représentent les résultats de la réfraction de la houle annuelle près des côtes. On remarque que les houles provenant du secteurs N 270° sont les plus réfractées, par rapport aux autres directions N 21° et N 345° , dont les lignes des crêtes commencent à se réorienter dès leur premier contact avec le cap de Sidi Fredj, jusqu'au niveau des points de rencontre avec les ouvrages de protections ou une divergence des orthogonales est observée. Ceci permet à la houle de conserver partiellement son énergie (Figure IV-9).

Les houles de secteur N 21° et N 345° sont les moins réfractées. Elles gardent leurs directions jusqu'aux ouvrages au niveau desquels les parties des crêtes en contact frontal provoquent une forte dissipation d'énergie (Figure IV-7 et IV-11). Le reste de l'onde continue sa trajectoire avec le schéma conventionnel de la diffraction.

Suivant les schémas de réfraction des trois secteurs, la hauteur significative des houles du secteur N 270° atteint le rivage avec la hauteur la plus faible. Cette dernière diminue graduellement jusqu'à atteindre une valeur de 0.57 m au niveau de la passe d'entrée entre les

deux épis de la plage El Riadh, pour border la plage par la suite avec une hauteur de 0.3 m. Des résultats différents sont observés pour les deux autres secteurs N 21° et N345° où la hauteur significative des vagues aborde les trois épis avec presque 1.5 m de hauteur pour atteindre le rivage entre 0.3 et 0.6 m.

Les houles de secteur N 345° est la plus frontale à la plage El Riadh. En effet, elles sont les plus énergétiques (Annexe 08). Ceci les rend très dissipatives d'énergie notamment face à l'épi Est de la plage, bien qu'elle soit la plus active au niveau de la zone de swach par rapport aux autres secteurs de houle. La figure IV-6 montre bien la dissipation d'énergie dans cette zone, ce qui favorise et augmente la capacité de remaniement des sédiments par le biais de déferlement et l'affouillement au pied des ouvrages.

Les houles de secteur N 21° abordent frontalement les musoirs des ouvrages. La dissipation de leur énergie est due à la rupture du fond, cela favorise l'affouillement au pied de ces ouvrages. C'est une situation qui peut engendrer des processus de compensation des sédiments.

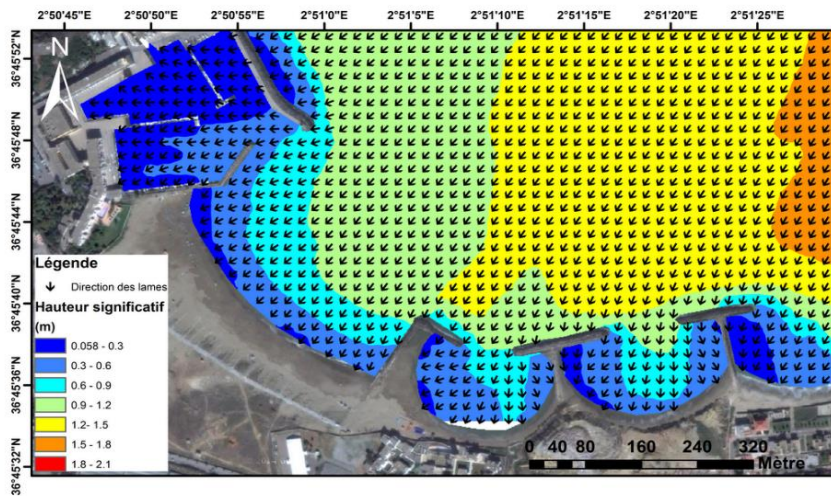


Figure IV-6 : Réfraction de la houle pour une direction N 21° et une période de 5.23 s

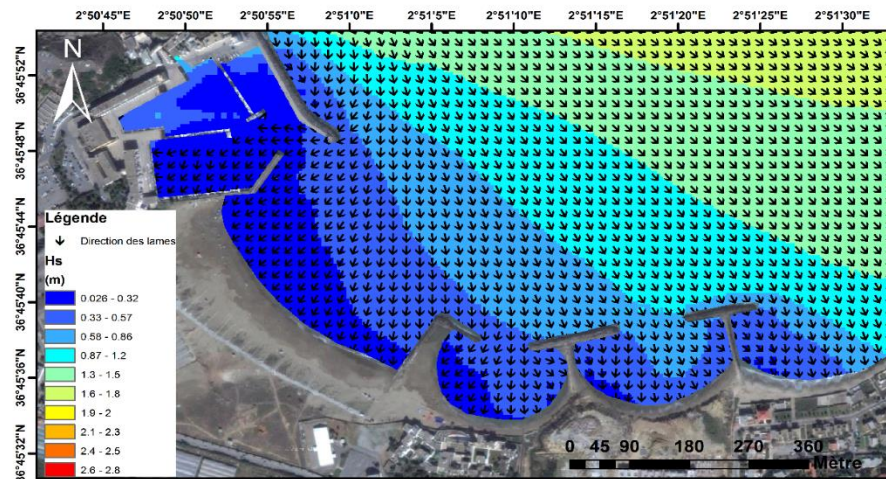


Figure IV-7 : Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 21° et une période de 5.23 s

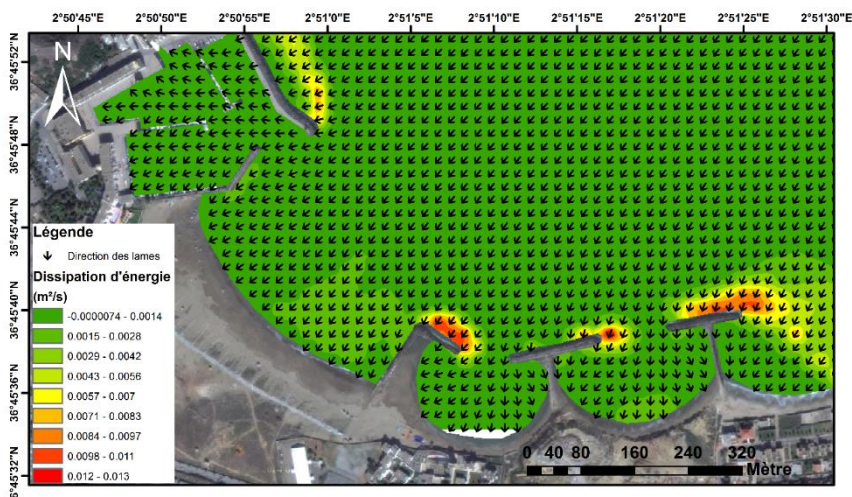


Figure IV-8 : Réfraction de la houle pour une direction N 270° et une période de 5.78s

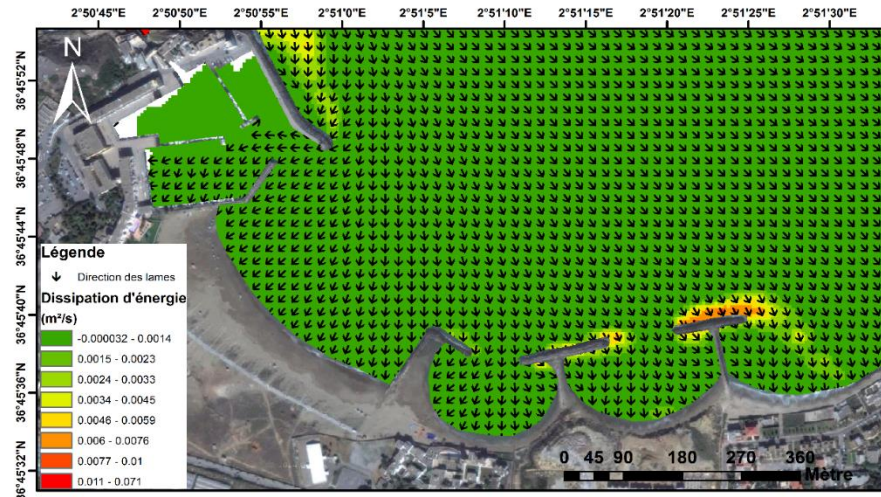


Figure IV-9 : Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 270° et une période de 5.78 s

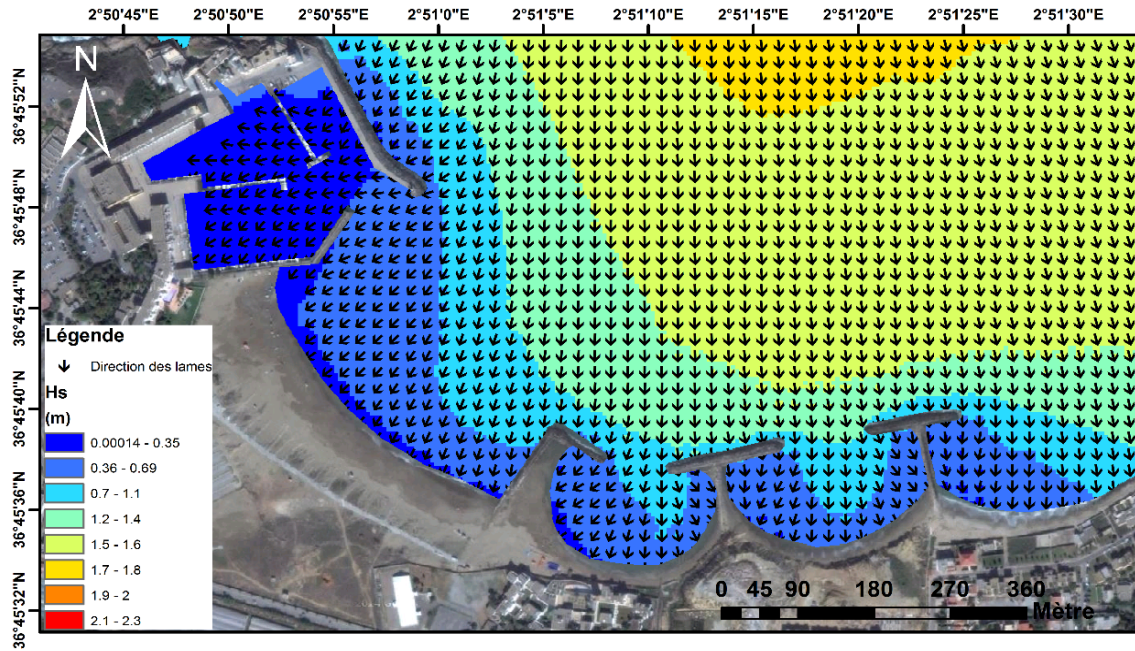


Figure IV-10 : Réfraction de la houle pour une direction N 345° et une période de 5.23 s.

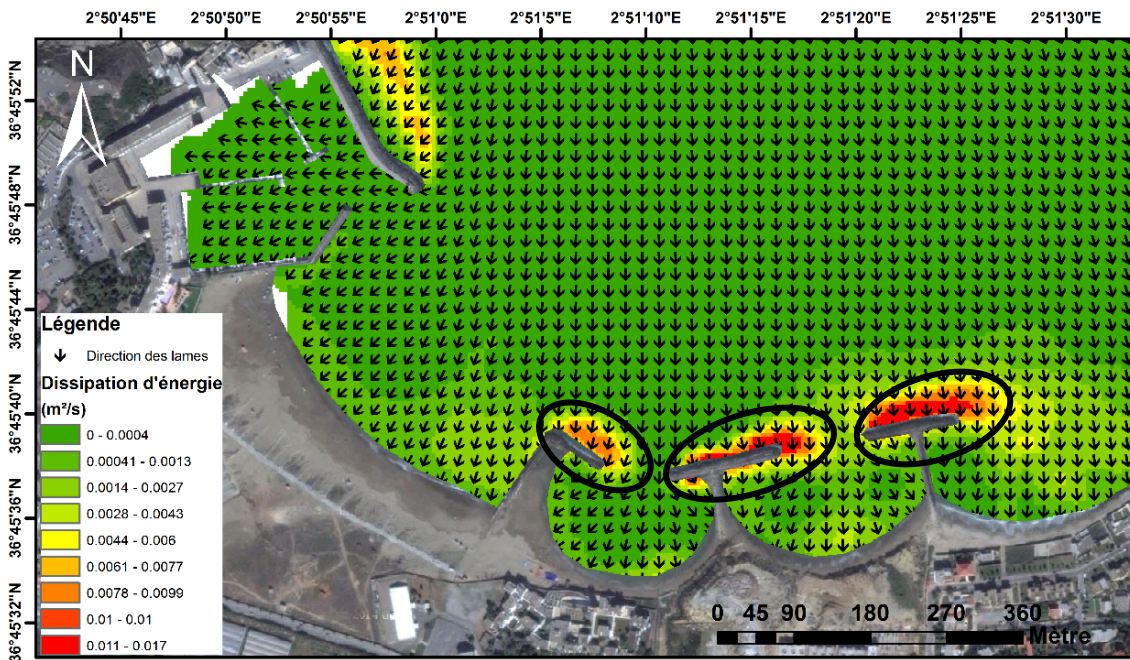


Figure IV-11 : Dissipation d'énergie de la houle pour une direction N 345° et une période de 5.23s.

4.2.1.3.5.1 Modélisation de la tempête du 05/02/2017

La figure IV-12 montre les résultats de la simulation régionale (résolution 200*200 m) de la variation des Hs du large à la zone côtière algéroise sous l'effet de la morphologie des fonds. Au large du secteur de Sidi Fredj, on remarque que la houle ne commence à se déformer qu'après du cap, où la Hs est de 5 m environ. Ce modèle sert à définir les caractéristiques de la houle aux limites du secteur de Sidi Fredj et d'où sont extraites :

- Les valeurs des directions des houles incidentes,
- La période et la hauteur significative des points situés aux frontières du modèle local,
- La valeur maximale comme condition d'entrée (Annexe 09).

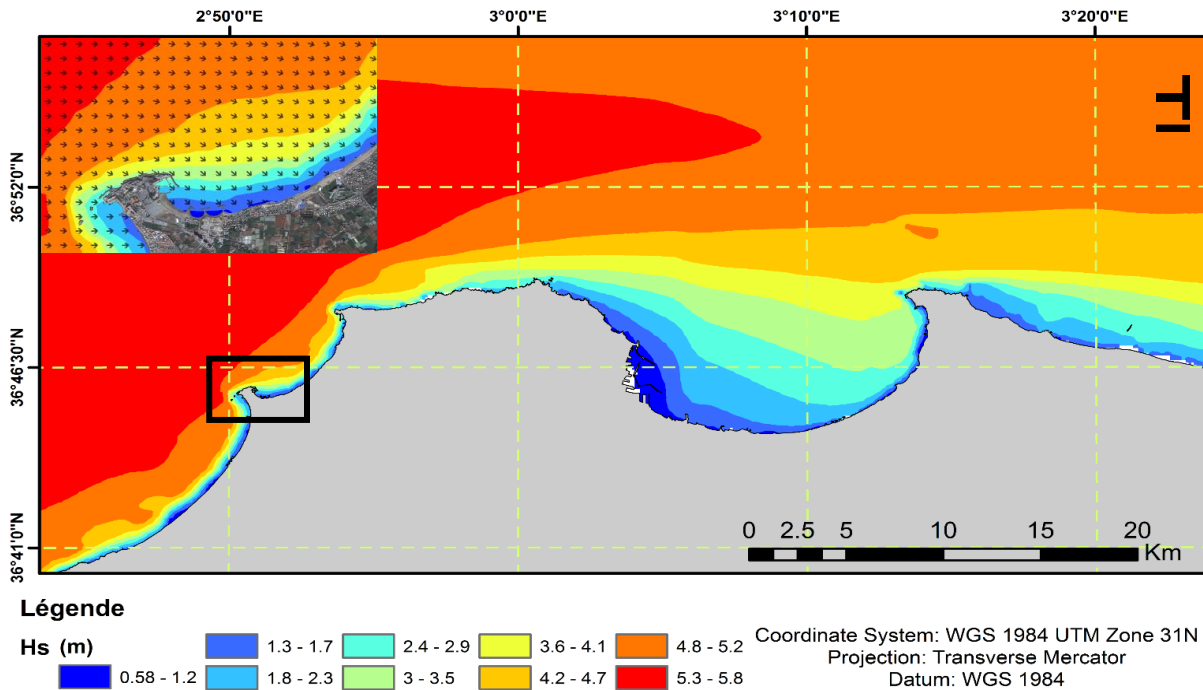


Figure IV-12 : Modèle régional des hauteurs significatives au niveau de toute la côte algéroise de la tempête du 05/02/2017.

La figure IV-13 représente les résultats de la simulation dont les conditions aux limites ont été extraites du modèle global. L'étude de la réfraction de la houle de tempête d'une direction N 283° pour les périodes 6 et 8s montre que ces houles atteignent la côte sans grande déformation. A l'approche des ouvrages de protection commence l'effet de la profondeur.

Les houles conservent partiellement leur énergie jusqu'à atteindre la jetée principale du port et des ouvrages de protection. Une diminution de l'énergie de la houle incidente est alors provoquée par dissipation (Figure IV-14). Les hauteurs significatives sont de 0.1 m pour les zones abritées et peuvent atteindre les 0.6 m dans les zones ouvertes à l'agitation des vagues.

La propagation se fait d'une façon oblique aux isobathes jusqu'à une profondeur de réfraction de 5 m. Au-delà de cette profondeur, les orthogonales commencent à se réorienter vers l'Ouest. Ces houles arrivent à la rive Est de la plage El Riadh avec des hauteurs entre 0.3 et 0.6 m et de 0.2 m environ au niveau de la rive Ouest.

La plage El Menzeh est la plus influencée par les houles de cette tempête. En effet, la partie centrale de la plage est directement exposée aux vagues entrantes au niveau desquelles beaucoup d'énergie se dissipe (Figure IV-14 et 16).

La carte représentée dans la figure IV-15, décrit la variation de surélévation du niveau moyen de l'eau (setup) dans la zone de Sidi Fredj. Les vagues qui arrivent à atteindre la plage El Riadh montrent un setup de 0.1 m, une valeur qui reflète l'effet des ouvrages et leur rôle dans la diminution des hauteurs des houles en réduisant leur énergie.

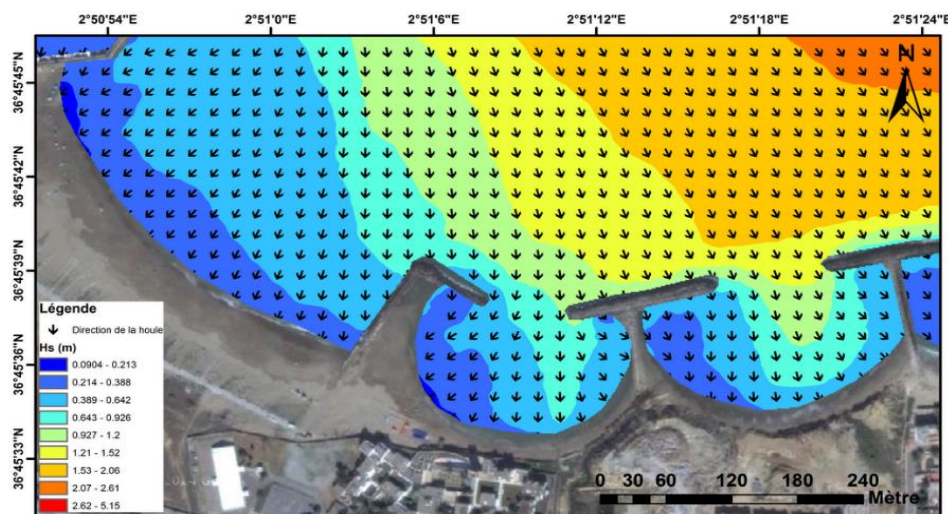


Figure IV-13 : Réfraction de la houle de la tempête 05/02/2017.

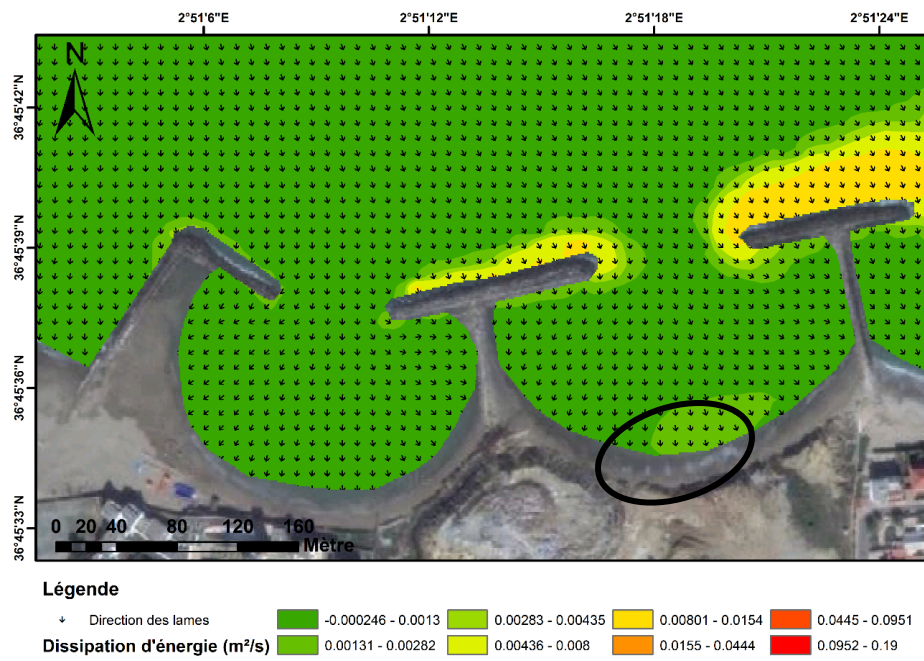


Figure IV-14 : Dissipation d'énergie de la houle de la tempête 05/02/2017.

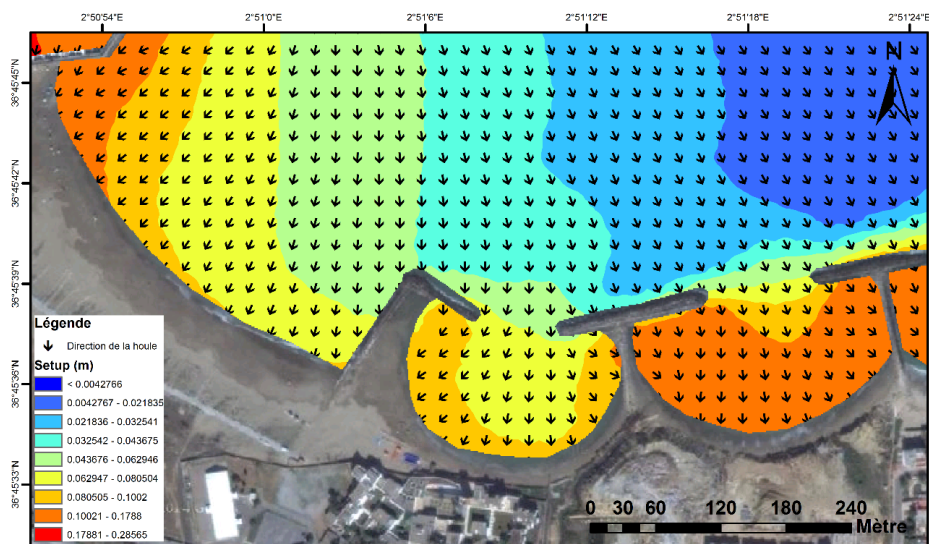


Figure IV-15 : Setup de la houle de la tempête 05/02/2017 au niveau de la plage El Riadh.



Figure IV-16 : a et b : Traces de déstabilisation et d'effondrement des ouvrages de protection de la plages El Riadh (2017),

4.2.1.3.6 Conclusions

L'étude et la modélisation de la propagation de la houle réalisée sur trois (3) directions de provenance a permis les constats suivants :

- Les houles du secteur N 345° sont les plus défavorables pour la plage El Riadh (c'est une zone qui se trouve ouverte à l'agitation des vagues de provenance N 345°).
- La nécessité d'étudier la courantologie et les taux de déplacement des sédiments non coésifs, (cela peut se faire par une approche de modélisation numérique de l'hydrodynamisme et du transport des sédiments).
- La partie Est de la plage El Riadh est la plus exposée aux houles des tempêtes de secteur N 270° et N345°. Cette information doit être prise en considération lors du calcul des volumes de rechargement.

La modélisation a permis de vérifier l'impact des ouvrages de protection sur les paramètres physiques et géométriques des vagues et leur performance face aux conditions des houles extrêmes.

4.2.1.4 Etude de la dynamique sédimentaire

Dans cette partie de l'étude, l'objectif consiste à reconstituer deux modèles pour le courant et transport sédimentaire pour deux conditions de houle. La première est de la tempête du 05 Février 2017 Sidi Fredj, le second est de la houle annuelle de direction N 345° qui semble être défavorable pour la plage site.

4.2.1.4.1 Méthodologie

Les simulations du courant et de transport sédimentaire des conditions de la houle annuelle du secteur N 345° et de la tempête 05/02/2017- Sidi Fredj, nécessitent la prise en compte des conditions permettant de calculer localement les phénomènes mises en jeu dans la zone d'étude.

Il s'agit donc de mettre en place une modélisation groupée intégrant :

- Un module de propagation de houle SW en considérant des paramètres de la houle au large et des niveaux d'eau calculés (voir chapitre II).
- Un module hydrodynamique HD (modélisation des courants) permettant de calculer les niveaux du plan d'eau en fonction du temps, en tenant compte des conditions du vent.
- Un module de transport sédimentaire ST, tenant compte des analyses granulométriques préalablement élaborées.

4.2.1.4.2 Emprise du model et maillage utilisé

L'élaboration du model de maillage (Mesh) est l'étape la plus importante qui définit la précision des résultats de la simulation par le Mike-21. Les inputs nécessaires pour l'élaboration du Mesh sont essentiellement les données bathymétriques.

Après l'insertion des données numériques de la bathymétrie, préalablement traitées et enregistrées sous format xyz, ainsi que celles du trait de côte à l'aide de l'outil « MeshGenerator », on définit les limites du Mesh à générer, ce dernier est composé d'éléments triangulaires dont la taille est ajustée suivant la précision souhaitée (Figure IV-16) (Boukhediche et al., 2017). Un modèle d'emprise est mis en place, il présente une extension de l'ordre d'un kilomètre du Nord au Sud et de 1.4 kilomètre d'Est en Ouest. Il s'étend de l'ouvrage Est de la plage El-Riadh

jusqu'à la jetée principale du port de Sidi Fredj. Cette délimitation est faite en fonction des données de terrain disponibles (Figure IV-17).

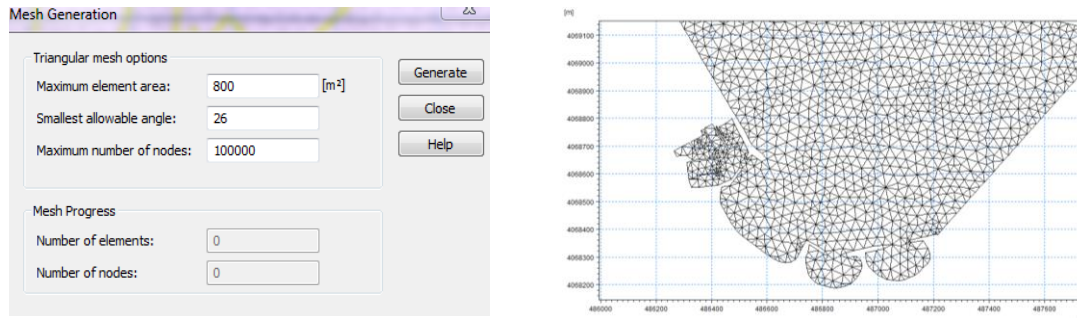


Figure IV-17 : Présentation du modèle de maillage effectué pour toute la simulation.

4.2.1.4.3 Configuration des modules

Le modèle est élaboré en configurant des modules choisis ; le SW (Spectral Waves model), HD (Hydrodynamic model) et ST (Sand Transport model) du système couplé par le MIKE21/3FM. La même configuration qu'au niveau du chapitre II a été appliquée pour les modules SW et HD.

Pour la configuration du module ST, nous avons opté pour la méthode STP qui utilise des valeurs de transport de sédiments interpolées au préalable sous forme d'une « table de sédiment ». Cette étape est effectuée avant la simulation à l'aide du générateur de table de sédiment disponible dans la boîte à outil du Mike « MIKE21 Toolbox » avec le module ST.

Les paramètres granulométriques considérés sur l'ensemble du modèle sont :

- Le diamètre médian $D_{50}=0.175$ mm,
- Une porosité de 0.4
- Un coefficient de gradient de 1.1

Pour le forçage des vagues (H_{m0} – T_p – Dir) et des courants (Vitesses et directions des courants), nous avons pris en considération ceux issus des modules SW et HD respectivement.

4.2.1.4.4 Résultats et discussions

- Simulation par le module HD

La figure IV-18 représente les directions et les vitesses du courant engendrés par les houles de provenance N 283°. Le modèle hydrodynamique a mis en évidence un courant longshore NO-SE généré par les houles du secteur Ouest. Lorsque les houles sont de fortes amplitudes, ce courant contourne le prolongement de la digue principale du port, les trois ouvrages de protection (l'épis Est de El Menzeh, les épis d'El Riadh) pour continuer vers l'Est.

Le gradient de vitesse est remarquable au niveau de la passe d'entrée du port et la jetée principale. Au niveau de la plage Est, il devient maximal en atteignant les 0.16 m/s. Deux vortex sont formés au niveau de la plage Riadh et El Menzeh. Le courant contourne les épis et rentre dans une zone abritée pour former des petits tourbillons (Figure IV-17), dont les vitesses ne dépassent pas les 0.05 m/s au niveau de la plage El Menzeh et 0.14 m/s au niveau de la plage Raidh.

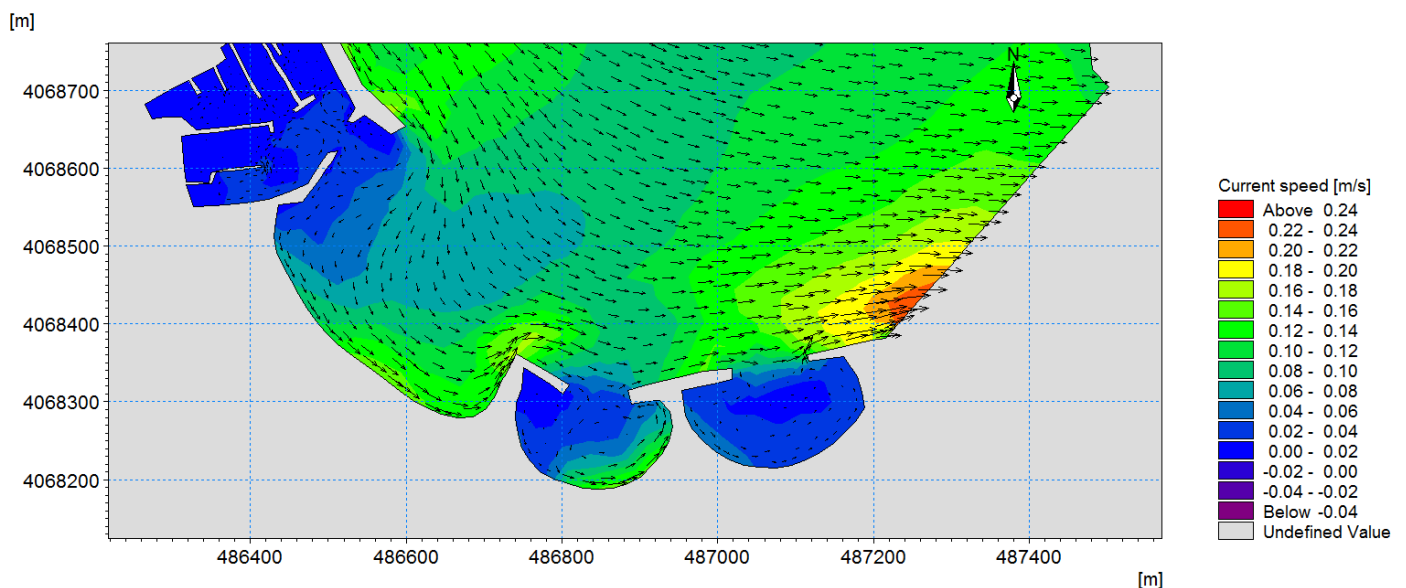


Figure IV-18 : Simulation des courants générés par les houles de secteur N 283°.

La figure IV-19 représente le champ de vitesse et les directions du courant engendré par les houles de provenance N 345° et simulé par le modèle hydrodynamique HD.

La simulation a mis en évidence un courant longshore Ouest-Est généré par les houles de provenance Nord-Ouest.

A proximité des ouvrages, le courant contourne les épis pour former des vortex. En effet, au niveau de la plage Est, le model a mis en évidence une dérive littorale d'une direction Est-Ouest où les gradients de vitesse dépassent les 0.25 m/s. Le courant continue jusqu'à la passe d'entrée du port avec une vitesse moindre de l'ordre de 0.1 m/s, il est réorienté par la suite vers l'Ouest pour former un vortex qui domine toute la plage Est.

Deux autres vortex sont formés au niveau de la plage Riadh et El Menzeh. Le courant contourne les épis sa vitesse ne dépassent pas les 0.25 m/s.

En aval des ouvrages de protection et au niveau de l'espacement entre les épis, deux autres vortex sont remarqués et où la vitesse maximale est de 0.44 m/s au niveau de l'épi Ouest de la Plage El Riadh.

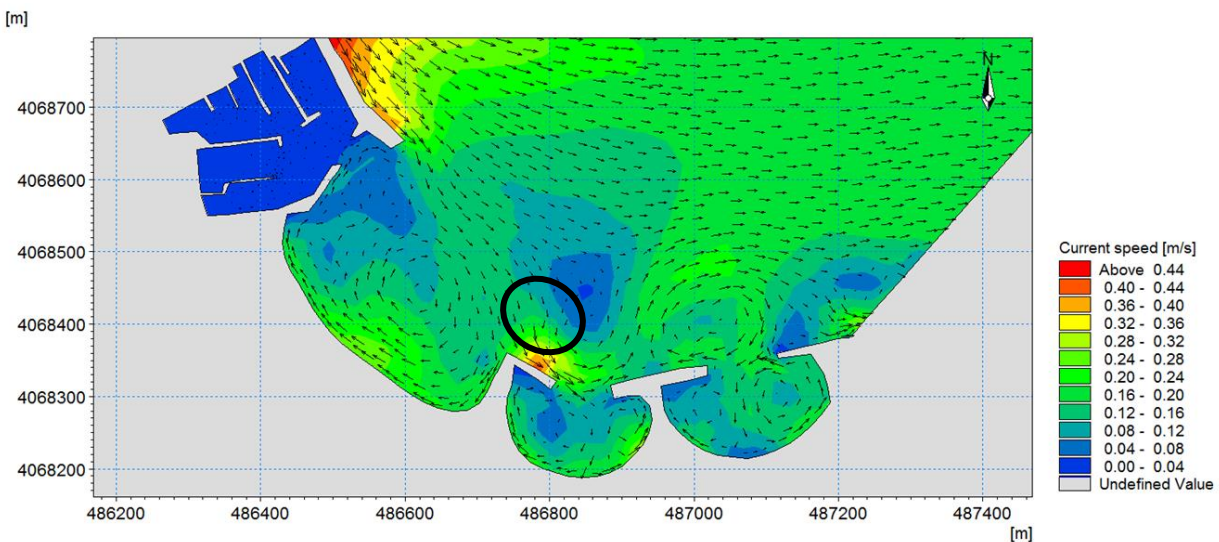


Figure IV-19 : Simulation des courants générés par les houles de secteur N 345°.

- Simulation par le module ST

L'interprétation des transports sédimentaire est basée sur le changement d'une maille à l'autre et de l'intensité du transport.

Une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou bien de dépôt potentiel des sédiments. Une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou bien un potentiel d'érosion (Khalfani, 2014).

La figure IV-20 représente le transit sédimentaire prédominant lors de la tempête en question.

Les courants modélisés semblent favoriser un transport sédimentaire de même trajectoire. En effet, les houles en provenance du N 283° engendrent un courant Ouest-Est qui entraîne le sable en provoquant une dérive littorale Ouest-Est avec un flux moyen de l'ordre de 220.752 m³/an/m. Le courant contourne la jetée principale du port pour arriver à la plage Est où il entraîne le sable vers l'Est.

Au niveau des plages, on observe de façon générale une tendance de dérive littorale de NO-SE (Localement vers l'Est). La plage Est connaît une tendance à l'engraissement dans sa partie Ouest abritée (1) bien que le transit sédimentaire soit moindre. Néanmoins, dans sa partie Est (2) où une augmentation des vecteurs adjacents indique un potentiel d'érosion considérable, on observe un flux sédimentaire très important de l'ordre de 567.648 m³/an/m.

Au niveau de la plage Riadh, on marque un transit sédimentaire maximal et un flux de 536 m³/an/m ainsi qu'une zone qui témoigne d'une période d'érosion (1), avec un flux de 315 m³/an/m.

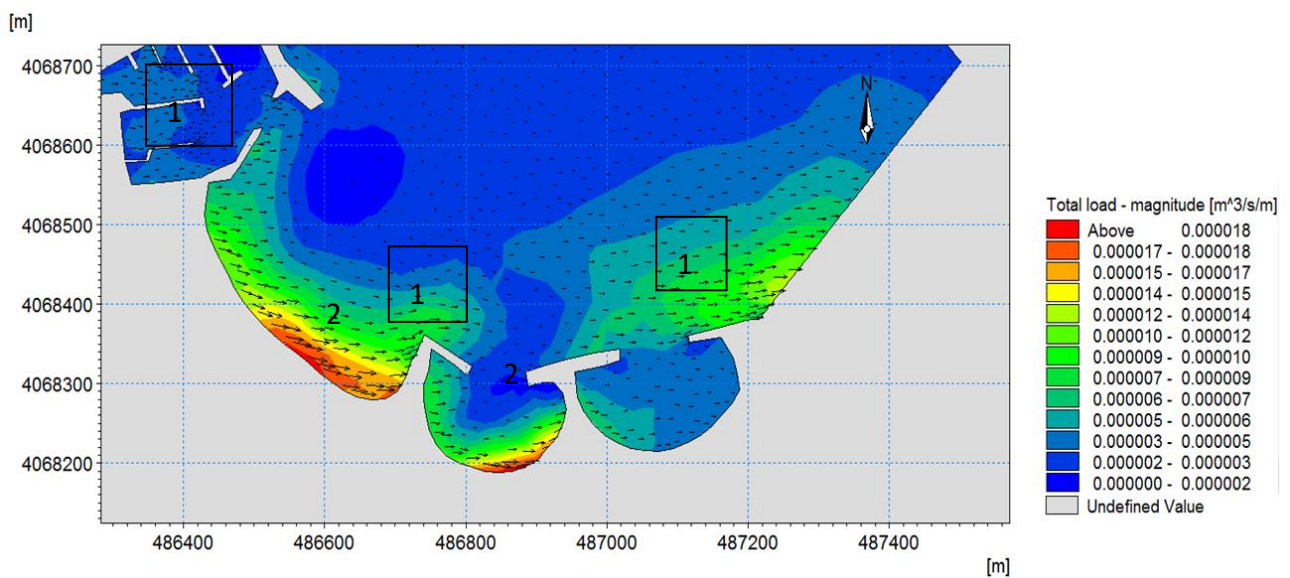


Figure IV-20 : Transport sédimentaire pour la direction N 283°.

La figure IV-21 représente le transit sédimentaire provoqué par les courants et des houles du secteur N 345°. Ces houles engendrent un courant qui provoque une dérive littorale entrainant le sable dans la plage Est vers l'Ouest (localement vers le NO) avec un flux moyen de l'ordre de 630.72 m³/an/m.

Au niveau de cette plage, une tendance à l'engraissement de la partie Est est observée. Les vecteurs du transport sédimentaire (carte représentée dans la figure IV-20) diminuent d'une maille à l'autre, indiquant le dépôt potentiel des sédiments à cet endroit jusqu'à la passe d'entrée du port. D'autre part, au niveau de la partie Ouest de cette même plage nous observons une tendance à l'érosion.

Le courant longshore contourne l'épi Ouest de la plage Riadh pour entrainer le sable avec un flux maximal vers le large de l'ordre de 2365.2 m³/an/m.

Au niveau des plages El Riadh et El Menzeh, on remarque un faible transit sédimentaire (473.04 m³/an/m pour la plage El Riadh). Les vecteurs du transit sédimentaire indiquent que cette zone subit une érosion considérable.

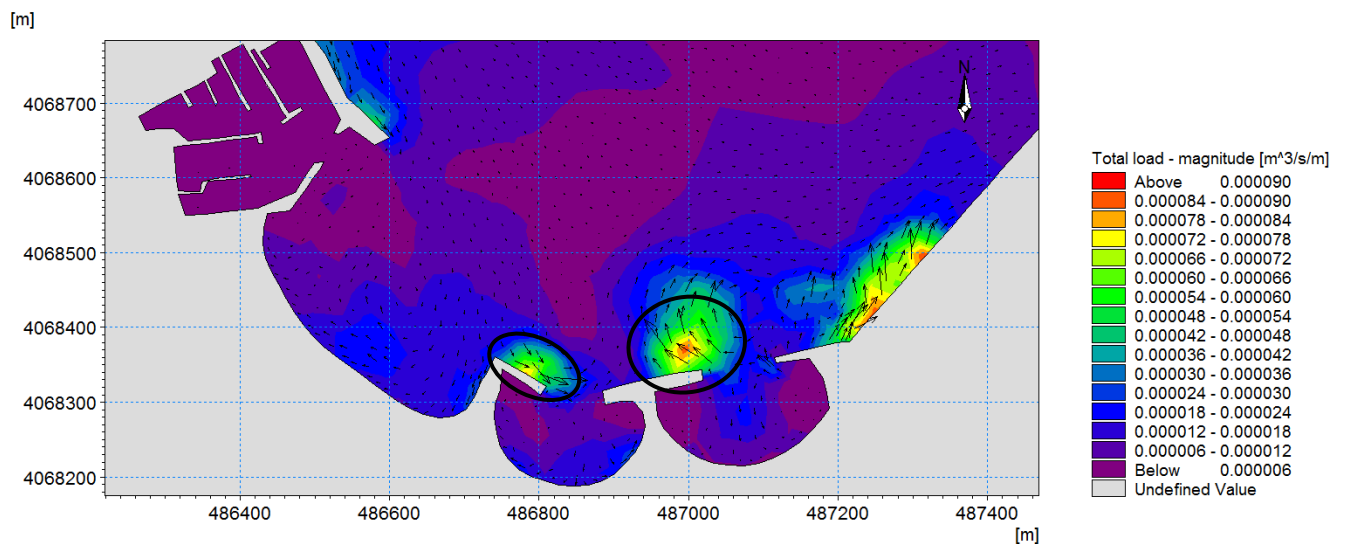


Figure IV-21 : Transport sédimentaire pour la direction N 345°

4.2.1.4.5 Conclusions

La modélisation du courant et du transport sédimentaire a permis de confirmer la présence d'affouillement au niveau des pieds des parties d'épis les plus exposées à la houle, avec des capacités de transport importantes des sédiments.

La dynamique sédimentaire à l'intérieur des plages n'est pas suffisante pour compenser les sédiments arrachés par l'affouillement.

La simulation du climat hydro-sédimentaire de la houle de la tempête du 05/02/2017 et des houles de secteurs N 345° qui sont aussi des houles de tempête a permis l'installation de l'hypothèse de la forte liaison entre la morpho-dynamique du secteur de Sidi Fredj et les évènements climatiques extrêmes.

La faisabilité physique du rechargement en sédiment de la plage El Riadh présente un risque de perte en sédiments lors des évènements extrêmes et ce, aux vues de l'importance des processus hydro-sédimentaires près de la passe d'entrée entre les ouvrages.

La proposition d'une protection en géo-tube de rétention immergée au niveau de la passe d'entrée s'avère indispensable afin d'assurer la stabilité de la plage et réduire les pertes en matériaux.

4.2.2 Etude de faisabilité technique de rechargement en sédiment de la plage El Riadh

L'objectif de cette partie est d'évaluer la possibilité d'alimentation en sable de la plage El Riadh du point de vue technique, ceci se fera par :

- La détermination des secteurs à recharger,
- L'estimation des volumes de sable à injecter pour une stabilité optimale de la plage,
- La proposition de plusieurs scénarios.

4.2.2.1 Etude sédimentologique

Cette étude aura pour finalité la détermination du diamètre moyen D_{50} des sédiments du secteur de la plage El Riadh afin de définir le diamètre et d'estimer le volume du granulat de rechargement.

L'analyse granulométrie.

La granulométrie a pour objectif la mesure de la taille des particules élémentaires ou des grains. Les méthodes qui permettent cette mesure doivent être reproductibles, c'est pourquoi elles suivent des normes strictes (Fournier et al., 2012).

Tableau IV-2 : Description des prélèvements de sédiments.

Secteur	Nature du prélèvement	Nombre d'échantillons	Engins de prélèvement	Embarcation	Espacement des radiales	Espacement des points de prélèvement
Marin	Sédiment superficiel	23	Benne (Van Veen)	Baba Aroudj	90 mètres	100 mètres
Aérien	Sédiment superficiel	17	Benne (Van Veen)	/	50 mètres	30 mètres

➤ Principe de l'étude granulométrique

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique (Ghomari et al., 2008).

4.2.2.1.1 Stratégie de prélèvement et d'échantillonnage

Prélèvement dans la partie marine

La campagne de prélèvement en mer a été menée au bord de bateau Baba Aroudj équipé d'une benne preneuse (de type Van Veen) et d'un GPS de navigation pour l'orientation vers les points de prélèvement (Tableau IV-2) 23 échantillons de sédiments superficiels (profondeur d'environ 10 cm) ont été prélevés selon des radiales orientées perpendiculairement par rapport à la ligne de rivage. La distance moyenne entre deux radiales successives est d'environ 90 m. Elle est de 100 m entre deux prélèvements.



Figure IV-22 : Localisation des points de prélèvement dans la partie marine.

Prélèvement dans la partie aérienne

A l'aide du GPS, l'étude sédimentologique a été effectuée sur 17 échantillons de sédiments superficiels prélevés sur la plage El Riadh (Figure IV-23) à l'aide d'une benne Van Veen répartie sur 07 profils.



Figure IV-23 : Localisation des points de prélèvement dans la partie aérienne.

4.2.2.1.2 Méthodes d'analyses sédimentologiques

L'ensemble des prélèvements sédimentaires a été analysé au laboratoire selon les techniques classiques de tamisage (Annexe n°11) (Weydert, 1971 ; Rivière, 1977; Chamley, 1987). La

granulométrie consiste à évaluer le pourcentage de la masse totale correspondant à chaque dimension de particule.

4.2.2.1.3 Présentation des résultats

Répartition des Médianes (Q50)

La carte des médianes (Figure IV-24) montre une répartition plutôt homogène du sédiment, de la côte vers le large, avec la dominance du sable moyen dont le diamètre varie entre 150 et 250 μm . On observe l'apparition du sable fin à partir de l'isobathe -5 m au niveau de la plage Est et -4 m pour El Riadh. Quant aux sables grossiers, ils n'apparaissent qu'au sommet de la plage aérienne de la plage El Riadh.

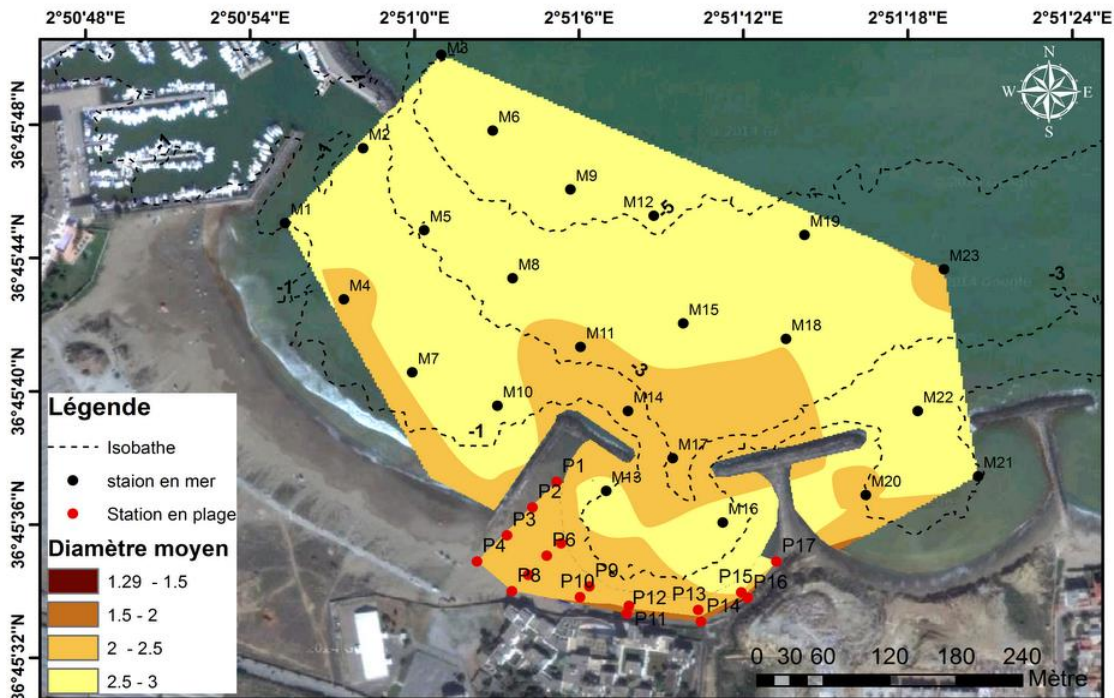


Figure IV-24 : Répartition de diamètre moyen (Mz) dans la région de Sidi Fredj

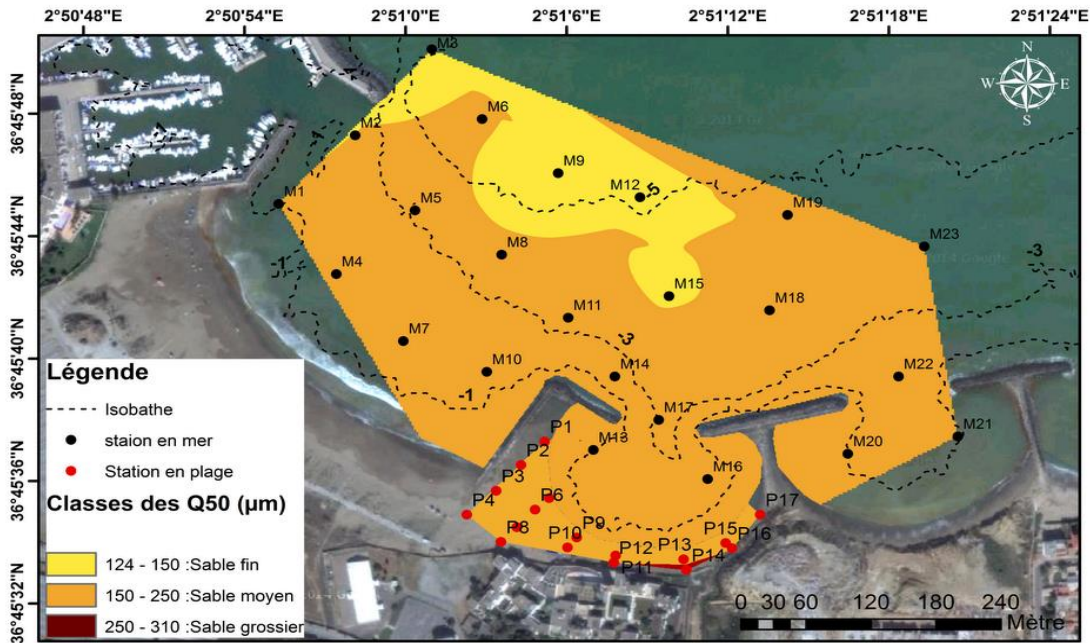


Figure IV-25 : Répartition des médianes (Q_{50}) dans la région de Sidi Fredj.

L'analyse modale

L'histogramme des fréquences des classes modales (Figure IV-26) montre l'abondance du mode 180 μm au niveau de la plage aérienne avec un pourcentage de 80% suivi par le 160 μm et le mode 125 μm pour la plage sous-marine avec 70% suivi par le 160 μm . Le facteur éolien semble intervenir sur le transport des particules fines au niveau de la plage aérienne, ce qui pourrait expliquer cette distribution modale.

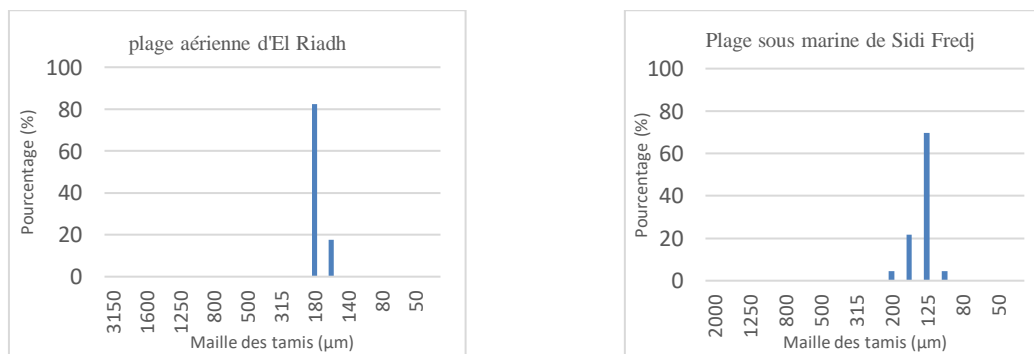


Figure IV-26 : Pourcentage des modes au niveau de la plage sous-marine du secteur de Sidi Fredj et la plage aérienne d'El Riadh.

➤ **Le tri (S_o) et l'indice d'asymétrie (Sk_i)**

Les échantillons de la zone connaissent un tri très variable entre très bon tri et mauvais tri (Annexe n°12) (Figure IV-27), ce qui implique que le sédiment est mal classé. Aussi, les valeurs de l'indice d'asymétrie des échantillons sont inférieures à 1 et majoritairement négatives (Figure IV-28). Ces valeurs révèlent une asymétrie des particules vers les fines (Annexe n°12).

Cette observation peut être expliquée par le régime variable des houles entre calme et agité (tempêtes). Ceci confirme donc les résultats des modèles hydrodynamiques du transport sédimentaire ainsi que l'hypothèse émise sur le fait que la morphodynamique du secteur de Sidi Fredj serait fortement influencée par les tempêtes.

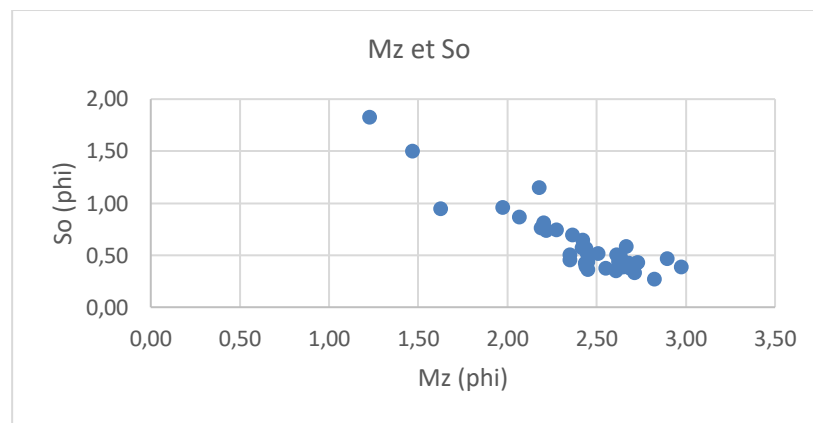


Figure IV-27 : Relation entre l'indice de classement et le diamètre moyen.

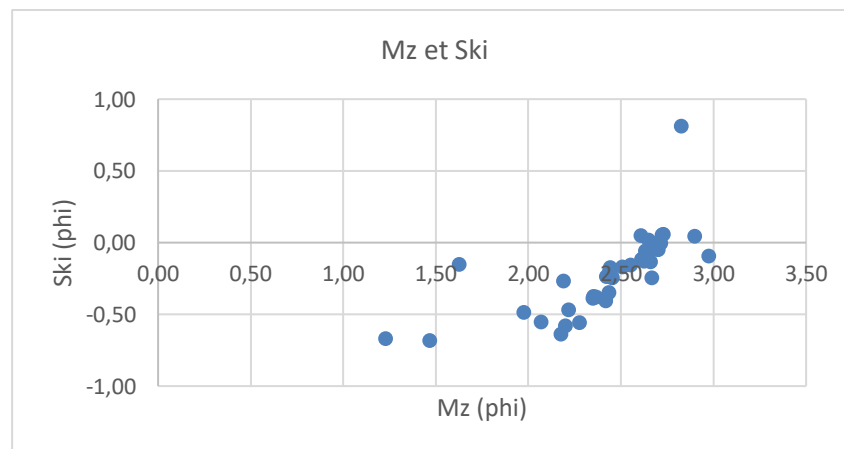


Figure IV-28 : Relation entre l'indice d'asymétrie (Sk_i) et le diamètre moyen.

Vu la faible variation du diamètre moyen M_z qui est entre 1.29 et 3 sur l'échelle Phi, le D_{50} adopté pour calculer le diamètre des grains de rechargement est la moyenne des Q_{50} de tous les échantillons de la plage aérienne et sous-marine soit 0.175 mm.

4.2.2.2 Détermination du secteur de rechargement

Le chargement propose un élargissement de la zone balnéaire (plage aérienne) au niveau de la zone érodée par la reconstitution de l'ancien trait de côte. Cela va permettre de :

- Restaurer l'ancienne plage,
- Protéger la haute plage de l'érosion,
- Augmenter la capacité d'accueil de la plage par le fait de gagner une surface de baignade de 4168 m².

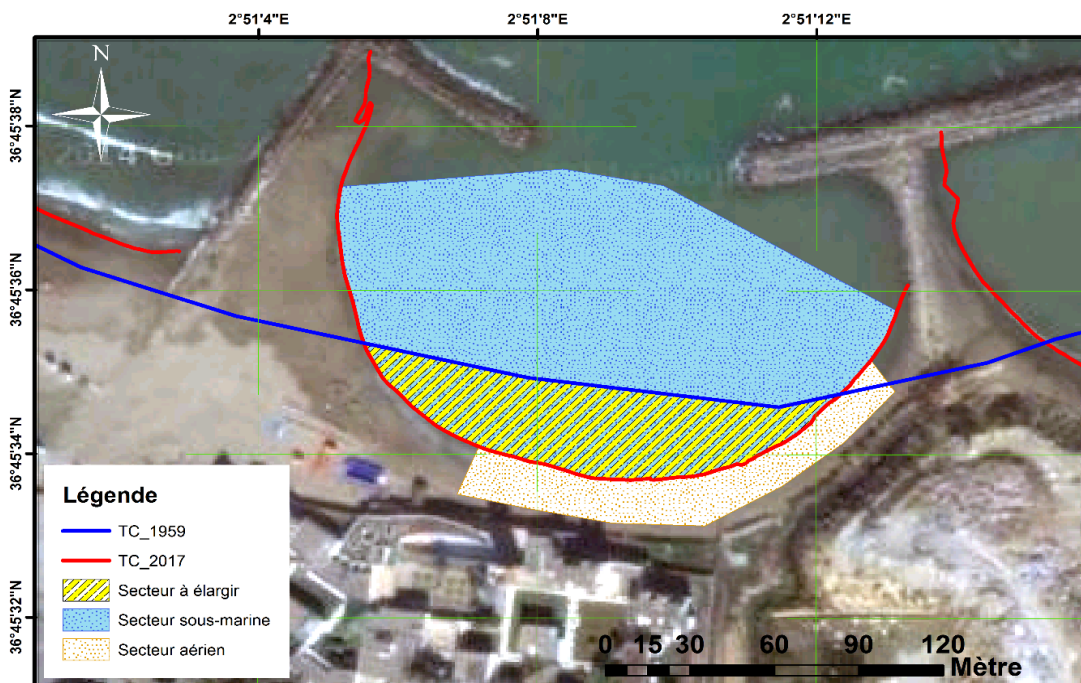


Figure IV-29 : Délimitation du secteur de rechargement

Le secteur aérien est déterminé en basant sur les niveaux des eaux les plus extrêmes, donc il se limite au niveau des unités où l'altitude du haut de plage est en dessous de ce niveau.

Le secteur sous-marin a été limité à la passe d'entrée (figure IV-29), car elle est le point de rencontre de tous les profils. D'un autre côté, il serait meilleur d'associer ce rechargement au niveau de cette dernière par des géo-tubes pour :

- Mieux retenir le sédiment de rechargement,
- Diminuer la hauteur des houles entrantes,
- Reproduire une pente faible dans la zone de baignade pour la sécurité des estivants.

4.2.2.3 Estimation des volumes de sable de rechargement

4.2.2.3.1 Estimation du volume de la plage sous-marine

- Principe d'estimation

Le principe de la méthode d'estimation du volume de rechargement du site est basé sur le calcul d'un profil volumétrique différentiel entre le profil érodé actuel et un profil objectif de rechargement à atteindre. Ce volume obtenu pour 1 mètre linéaire (1 ml) de plage est multiplié ensuite par le linéaire de plage sur lequel le rechargement est envisagé (CBNP, 1995 ; Dean, 2002 ; Haney et al., 2007 ; Tresca, 2015). Dans notre cas, la plage El Riadh n'étant pas linéaire, il serait donc incorrect de multiplier le volume obtenu pour 1 mètre linéaire par le linéaire du secteur à alimenter.

Face à cette problématique, nous avons opté pour une méthodologie où il s'agira d'effectuer un calcul volumétrique différentiel entre le modèle numérique des terrains (MNT) érodé actuel et un MNT objectif de rechargement à atteindre. Cette méthode nous semble plus précise du fait que la première méthode (du principe) a comme avantage la facilité du calcul, mais elle est basée sur plusieurs hypothèses pour déterminer le profil représentatif actuel, à savoir :

- Prendre en considération tous les profils disponibles et déterminer le profil moyen (Tresca, 2015). Ce qui risque de sous-estimer le volume nécessaire pour maintenir l'équilibre du profil et donc une vérification nous semble recommandée,
- Evaluer le volume par excès et considérer le profil le plus éloigné du trait de côte (Mezhoud, 2011) ou/et le plus pentu. Ce qui risque d'augmenter les coûts,
- Ou de choisir le profil qui se situe au centre de la zone d'étude (Tresca, 2015).

Par contre, notre méthode paraît plus compliquée du fait qu'elle prend en considération d'une part ; tous les profils mesurés disponibles pour élaborer le MNT actuel de la plage sous-marine à charger et d'autre part, elle a comme avantage le maximum de précision qui ne dépend que des levés topo-bathymétriques et de la bathymétrie ainsi que de la méthode géostatistique d'interpolation.

L'élaboration d'un MNT théorique nécessite la détermination d'un profil théorique qui représente un état moyen des profils mesurés de la plage. Pour cela, la méthode de Dean (1976) améliorée en 1991 et révisée en 2002 est utilisée. Elle est basée sur le concept de profil d'équilibre.

Modèle Numérique des Terrains (MNT) actuel

Le MNT érodé actuel de la plage a été élaboré par combinaison de trois types de données :

- Le Trait de côte de la plage acquis par le DGPS de la campagne 2017 (chapitre II).
- Six (06) profils topo-bathymétriques (Figure IV-30) découpés au trait de côte pour garder que le profil sous-marin acquis aussi par le DGPS lors de la même campagne de 2017.
- Une bathymétrie de haute résolution acquise par un échosondeur mono-faisceau d'une précision verticale centimétrique et positionné par le DGPS effectuée par l'APPL qui couvre le secteur de Sidi Fredj avec précision.

Les trois données ont été corrigées préalablement altimétriquement par rapport au 0 NGA dans le système de coordonnées WGS 84, la projection UTM Zone 31.

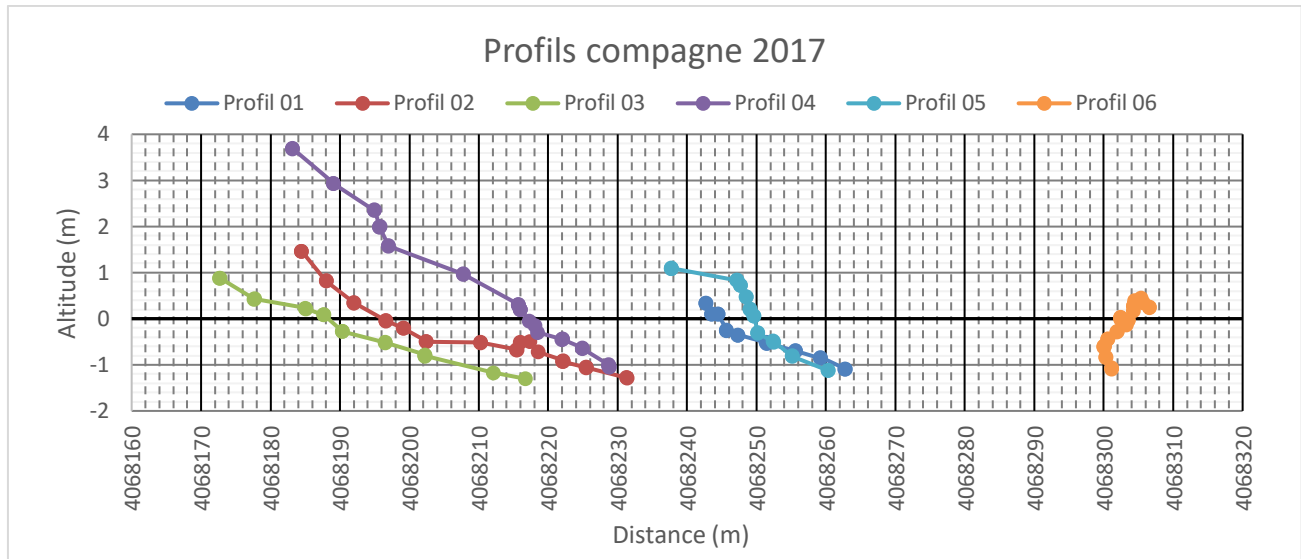


Figure IV-30 : Projection graphique des profils topo-bathymétriques de la campagne 2017.

L'ensemble des données est traité sous ArcMap et interpolé par la méthode de Krigeage (Voir chapitre II) pour obtenir le MNT de la figure IV-31. Cette figure montre la forme du bassin, une pente faible avec un fond plus au moins régulier. Une anomalie se présente environ au centre du bassin et prend la forme d'une vallée qui correspond à l'emplacement du rejet des eaux usées de l'hôtel El Riadh (figure IV-31 et IV-32)

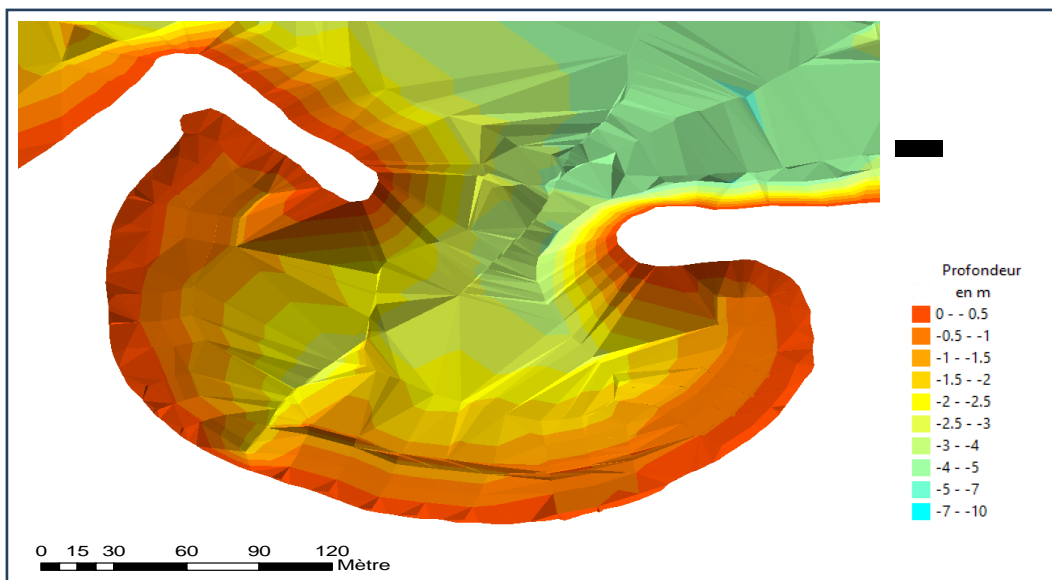


Figure IV-31 : Vue d'ensemble du modèle numérique des terrains de la plage El Riadh.



Figure IV-32 : Rejet des eaux usées de l'hôtel El Riadh.

Modèle Numérique des Terrains objectif de rechargement :

Profil d'équilibre

Le concept du profil d'équilibre intervient surtout dans les projets de rechargement des plages (Gonzalez et al., 1999). Il désigne la notion théorique d'une configuration stable vers laquelle tend une plage donnée pour des conditions hydrodynamiques et morphodynamiques relativement stables (Gonzalez et al., 1999 ; Brunel et al., 2006 ; Hamon, 2014) ou après des perturbations climatiques ou humaines (Tempêtes, rechargement) (Haney et al., 2007). La compréhension et la connaissance des profils d'équilibre d'une plage sont un outil pour la prédiction de la réponse d'une plage à un climat de houle donné (Hamon, 2014).

Dans différentes publications, Bruun et Dean ont proposé la formulation généralisée suivante et basée sur la dissipation d'énergie des vagues pour déterminer ce profil (Dean, 2002 ; Dean et al., 2004 ; Arnott, 2010) :

$$h = Ay^m \dots \dots \dots (\text{Équation 3})$$

Où :

- h : La distance au rivage en mètre (m),
- y : La profondeur en mètre (m),
- A : Paramètre empirique dépend de la granulométrie.

L'exponentielle m est généralement prise comme étant la valeur de 2/3. C'est une valeur moyenne obtenue par Bruun (1954) lors des travaux expérimentaux sur 10 plages sur les côtes d'Amérique et du Danemark et vérifiée par Dean (1977) sur 502 profils de plages des Etats Unies (Figure IV-33) (Dean, 2002 ; Dean et al., 2004).

Data Group	Profiles	Location		Characteristics of Data Group			
				ϵ^* (ft) (All Profiles)	Average Profile		
		From	To		A (ft ^{1/3})	m	ϵ (ft)
I	1-35	Montauk Point NY	Rockaway Beach NY	2.39	0.398	0.533	1.42
II	36-78	Sandy Hook NJ	Cape May NJ	2.74	0.0793	0.822	1.18
III	79-116	Fenwick Light DE	Ocean City Inlet MD	2.13	0.0945	0.762	1.54
IV	117-145	Virginia Beach VA	Ocracoke NC	2.18	0.128	0.709	1.54
V	145-159	Folly Beach SC	Tybee Island GA	1.19	0.243	0.523	0.73
VI	160-394	Nassau Sound FL	Golden Beach FL	1.89	0.255	0.594	0.36
VII	395-404	Key West FL	Key West FL	1.33	0.155	0.520	0.76
VIII	405-439	Caxambas Pass FL	Clearwater Beach FL	2.90	0.277	0.554	1.05
IX	440-477	St. Andrew Pt. FL	Rollover Fish Pass TX	1.02	0.113	0.644	0.43
X	478-504	Galveston TX	Brazos Santiago TX	0.73	0.138	0.620	0.17

* Note that ϵ represents the standard deviation of the measured from the fitted beach profiles.

Figure IV-33 : Caractéristiques des profils des plages examinés par Dean (Dean et al., 2004).

Donc l'équation 3 devient :

$$h = Ay^{2/3} \dots\dots\dots (\text{Équation 4})$$

Le paramètre A peut-être déterminé par la relation empirique de Dean (1997) (Dean, 2002 ; Arnott, 2010):

$$A = 0,067w^{0,44} \dots\dots\dots (\text{Équation 5})$$

Avec : w est la vitesse de chute des sédiments exprimée en m/s, qui est en fonction de diamètre moyen du sédiment D (Haney et al., 2007). Elle s'exprime par :

$$W = 14D^{1.1} \dots\dots\dots \text{(Équation 6)}$$

Le diamètre moyen obtenu dans l'étude sédimentologique est de **0.175 mm**, donc le diamètre des grains de rechargement (sédiment allochtone) doit être au moins égal ou favorablement plus grossier que le sédiment autochtone (local). Dans ce cas d'étude, un **$D_{50} = 0.2 \text{ mm}$** est proposé pour le sable de rechargement.

Afin de tester la représentation du profil d'équilibre obtenu, on a procédé à la comparaison de ce dernier avec le profil topo-bathymétrique le plus exposé à la houle (en face de la passe d'entrée entre les deux épis) des trois compagnes de mesures de 2014, 2015 et 2017. L'application de l'équation (6) dont l'exponentielle $m = 2/3$ a donné un profil d'équilibre (Figure IV-34) qui est au-dessus des autres profils périodiques mesurés et semble pas vraiment représentatif pour notre plage (Figure IV-35).

La recherche d'une plage avec les mêmes caractéristiques que la plage El Riadh parmi les 10 plages exemplaires de Dean (Figure IV-33) nous a permis d'identifier la plage Ocean City Inlet MD avec un A très proche à celui d'El Riadh et dont le m moyen est de 0.762. Le profil trouvé par l'application de ce m ajusté à 0.75 (Figure IV-36) semble parfaitement représentatif de l'état moyen des profils mesurés (Figure IV-37).

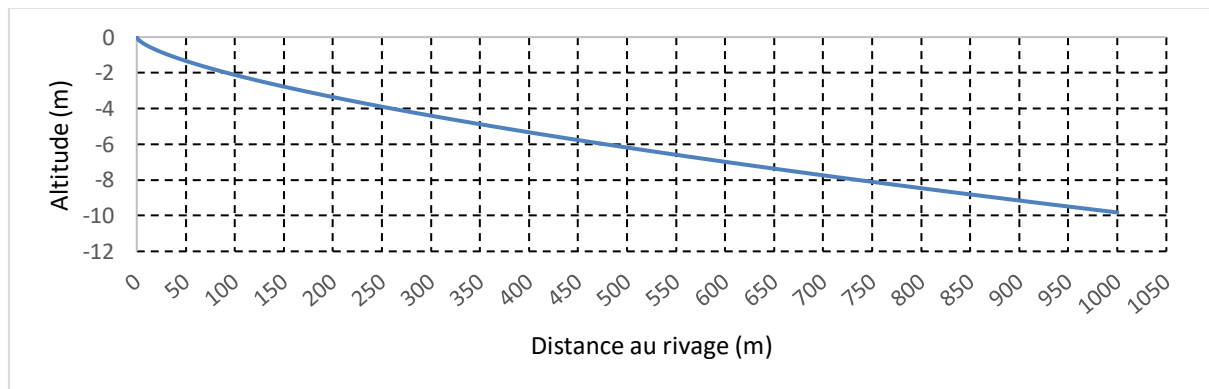


Figure IV-34 : Profil d'équilibre de la plage El Riadh avec un $m = 2/3$.

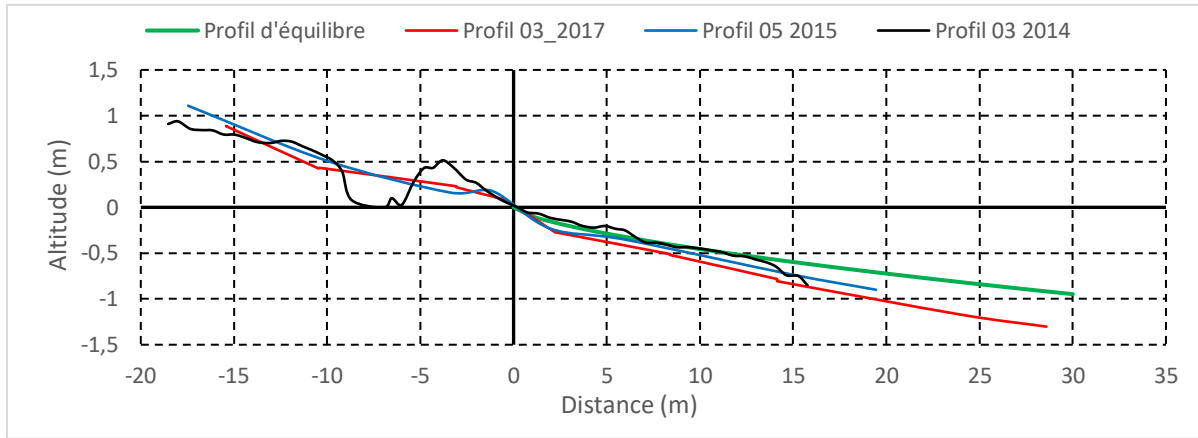


Figure IV-35 : Superposition du profil d'équilibre dont $m = 2/3$ et les profils topo-bathymétriques mesurés.

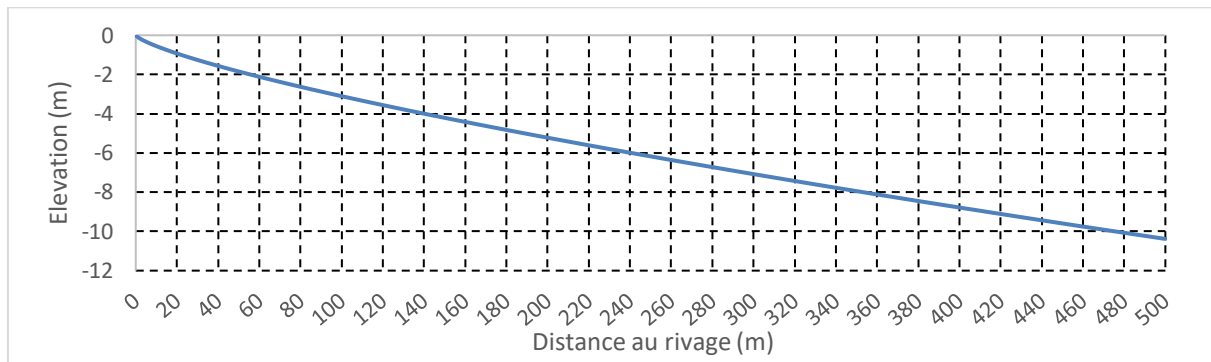


Figure IV-36 : Profil d'équilibre de la plage El Riadh avec un $m = 0.75$.

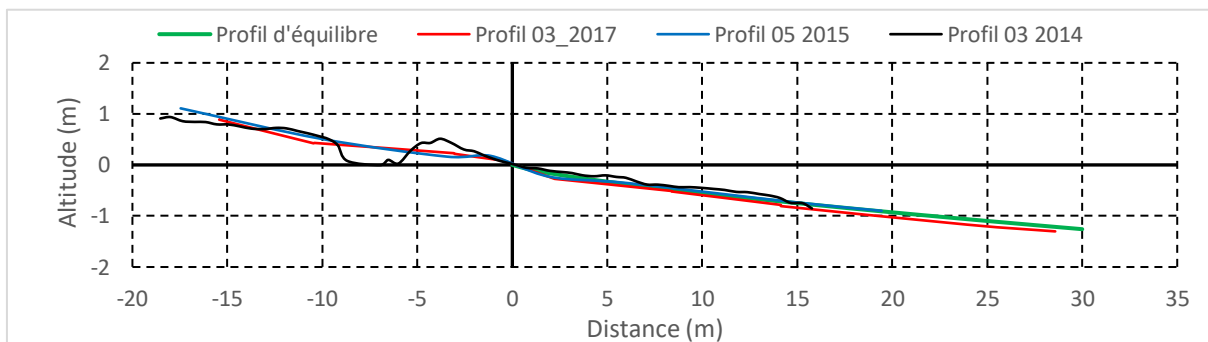


Figure IV-37 : Superposition du profil d'équilibre dont $m = 0.75$ et les profils topo-bathymétriques mesurés.

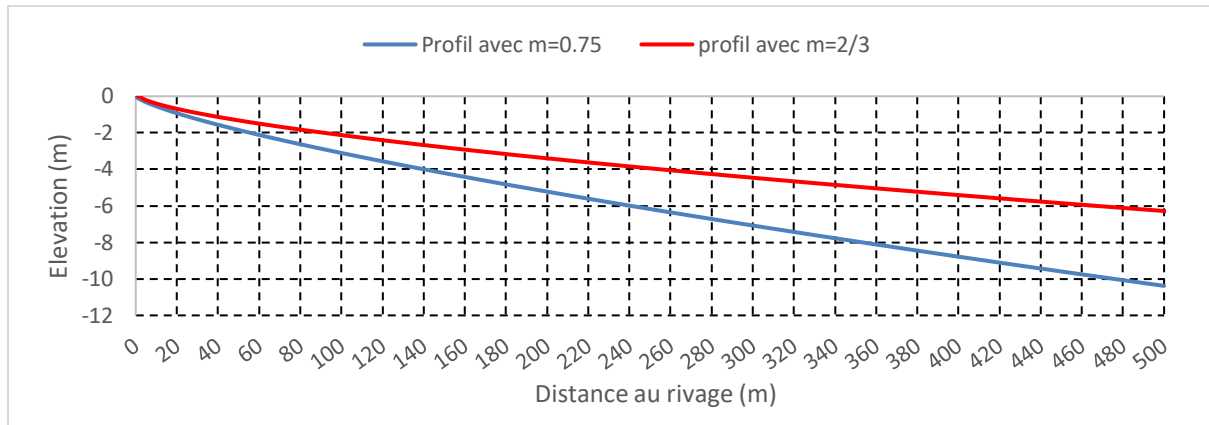


Figure IV-38 : Comparaison entre les deux profils d'équilibre proposés pour la plage El Riadh.

Le profil théorique de rechargement a été décalé perpendiculairement du trait de côte actuel (2017) vers le trait de côte à reconstituer et dont la distance maximale d'élargissement se situe au milieu du secteur à recharger (Figure IV-39).

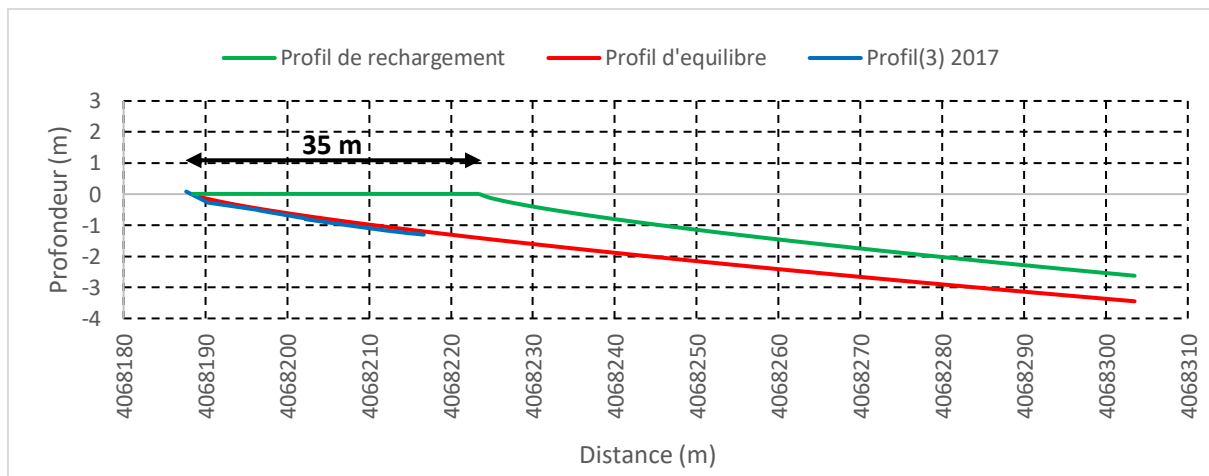


Figure IV-39 : Profil érodé et théorique actuel et profil théorique de rechargement.

Afin de projeter le profil théorique de rechargement sur tout le linéaire à alimenter, une confirmation de la représentation des profils latéraux mesurés a été effectuée préalablement, ce qui a débouché sur des résultats très satisfaisants (2, 3 et 4 Figure IV-40) (1, 5 et 6 Annexe N°13).

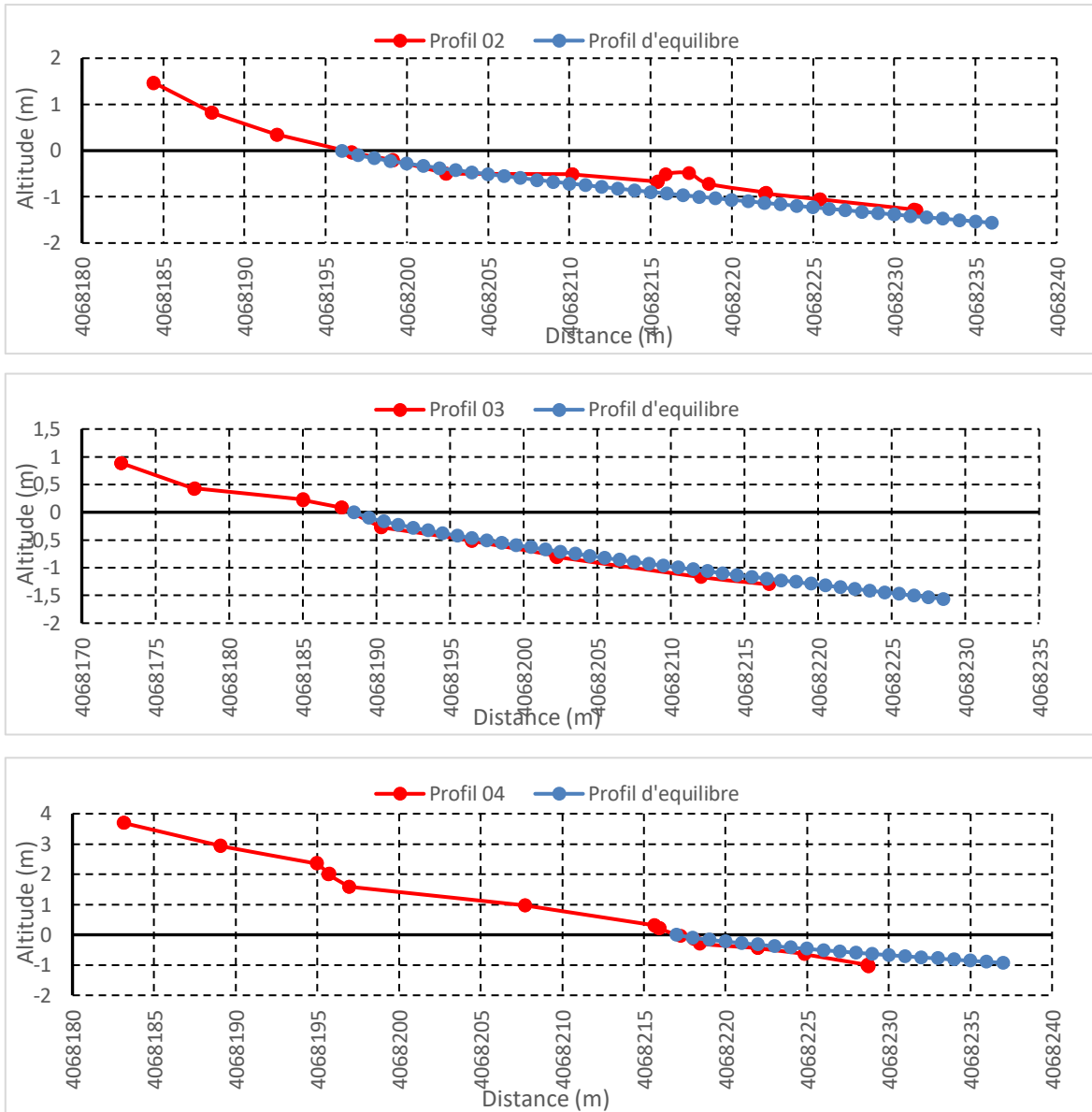


Figure IV-40 : Superposition des profils d'équilibre et les profils topo-bathymétriques (2, 3 et 4) de la campagne 2017.

Le MNT objectif de rechargement (Figure IV-41) est le résultat de l'interpolation d'un nuage des points (Figure IV-42) et y inclut :

- Le profil théorique de rechargement projeté le long du linéaire à recharger.
- Le trait de côte de 2017.
- Un nuage de points couvrant le secteur à élargir et attribuer d'une valeur 0 m.

Deux MNT ont été élaborés avec les deux profils d'équilibre proposés en admettant la nomination suivante : MNT_1 pour $m = 0,75$ et MNT_2 pour $m = 0,67$. Afin d'établir deux scénarios de rechargement et donc voir la différence entre les volumes estimés à partir de chacun.

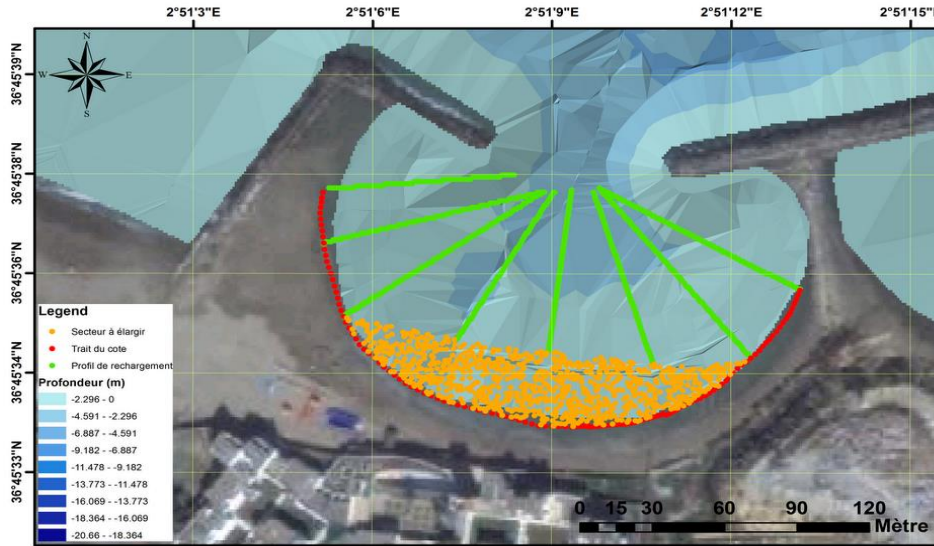


Figure IV-41: Type des données de projection des MNT objectif de rechargement.

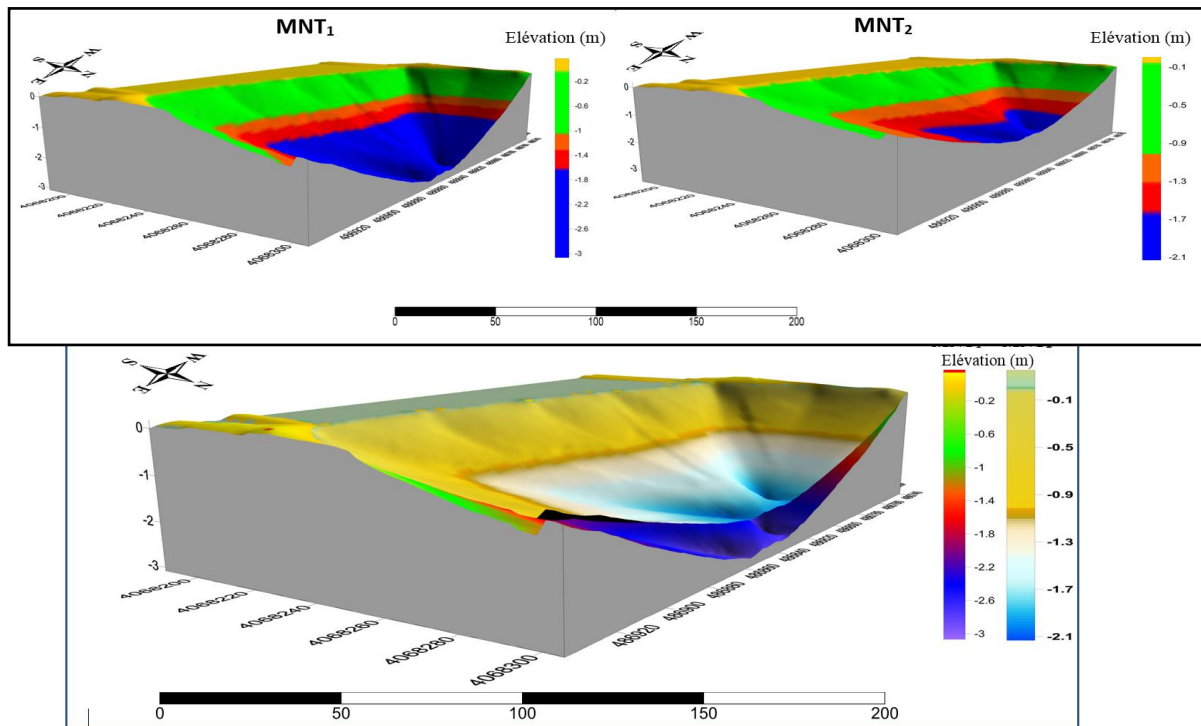


Figure IV-42 : Superposition des deux MNT 1 et 2 théoriques de rechargement.

➤ **Calcul du volume de rechargement**

Le calcul volumétrique différentiel entre les MNT est fait à l'aide de l'outil « Surface différence » d'Arc Toolbox de l'environnement ArcGIS (Annexe N°15). Les résultats obtenus pour les deux profils d'équilibre proposés se résument dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Résultats du calcul volumétrique différentiel entre le MNT ; actuel, 1 et 2.

MNT	$V_1 = MNT_1 - MNT_{actuel}$	$V_2 = MNT_2 - MNT_{actuel}$	$V_1 - V_2$
Volume en m ³	8573.15	5174	3399.15
Relation	$V_2 = 0.6 V_1$		

4.2.2.3.2 Estimation du volume de la plage aérienne

L'estimation du volume du sédiment de la plage aérienne nécessaire pour maintenir l'équilibre géomorphologique avec la plage sous-marine doit prendre en considération le niveau d'eau extrême (Fichaut et al., 2008).

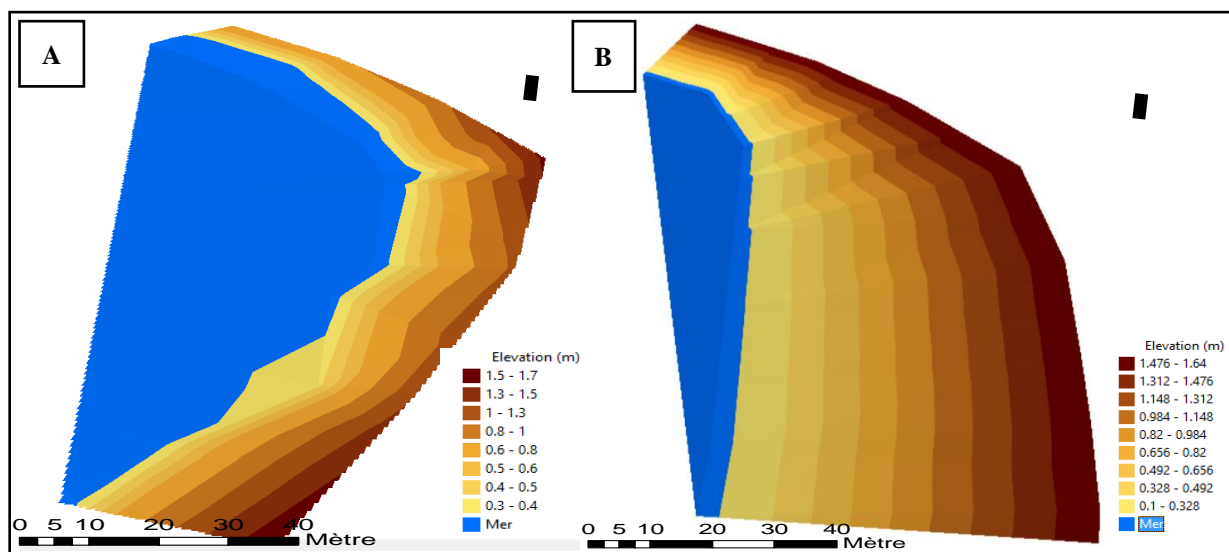
Les niveaux d'eau extrêmes : Nous ne disposons malheureusement pas de données sur les surcôtes générées par les tempêtes les plus importantes sur le littoral algérien. Ceci nous a amené à se référer aux projets qui sont réalisés sur la côte algéroise. Le tableau IV-4 représente les niveaux d'eau extrêmes obtenus lors du projet de protection de la plage de Bab el Oued. Nous avons donc retenue comme valeur extrême de côte des eaux +1.34 m NGA au lieu de +1.84, car notre plage se trouve être abritée. Le setup obtenu dans le chapitre III est de 0.1 m, cette valeur reflète le rôle des épis dans l'amortissement des houles entrantes.

Le même principe que la plage sous-marine a été adopté pour l'estimation du volume de rechargement de la plage aérienne. Ceci a été effectué par le biais d'un calcul volumétrique différentiel. La seule différence est que le MNT théorique de rechargement, qui est plus facile à déterminer, est élaboré sur la base du niveau extrême des eaux enregistré lors des tempêtes.

Tableau IV-4 : Caractéristiques des niveaux d'eau (BRGM et al., 2013).

Secteur	Surcôte (m)	Set up (m)	Niveau extrême Actuel proposé (ZH)	Différence entre le 0 ZH et le 0 NGA (m)	Niveau extrême actuel proposé (NGA)
Alger	1.5 à 2	0.48	1.98 à 2.48	0.34	+1.64 à +2.14

Ce MNT (Figure IV-43) est obtenu par interpolation entre la ligne des sommets de la plage attribué par la valeur 1.64 m du niveau extrême et le nouvel trait de côte reconstitué, tandis que le modèle numérique de terrain actuel est élaboré à partir des profils émergés de l'année 2017.

**Figure IV-43** : Modèle numérique de terrain actuel (A) et théorique de rechargement (B).

Contrairement à la plage sous-marine, ici le volume est calculé à l'aide de l'outil « Surface volume » de l'outil 3D Analyst Tools de l'environnement ArcGIS (Figure IV-44). Ceci est dû au fait que les deux MNT ne sont pas superposés et donc le volume se calcule entre la surface du MNT et le plan de référence doté de la valeur d'élévation maximale du MNT.

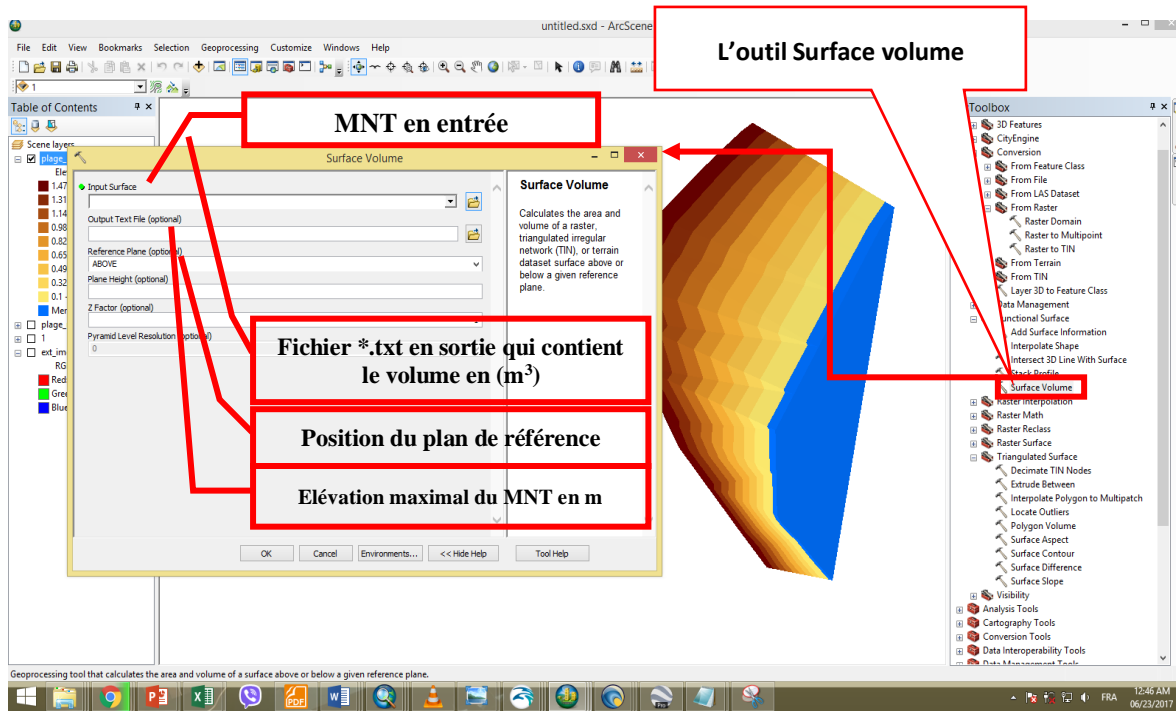


Figure IV-44 : Capture d'écran de l'interface graphique de l'outil Surface volume de ArcMap.

Les volumes obtenus du sable de rechargement nécessaire pour maintenir l'équilibre entre la plage aérienne et sous-marine est estimé à **356.67 m³** (Tableau IV-5).

Tableau IV-5 : Résumé des volumes calculés pour estimer le volume de sable nécessaire au rechargement de la plage aérienne.

Surface	MNT théorique de rechargement par rapport au 0 NGA	MNT actuel par rapport au 0 NGA	Volume de rechargement (V ₃)
Volume (m ³)	6464.41	6107.74	356.67

4.2.2.3.3 Estimation du volume total du sable de rechargement

Le volume total de sable nécessaire pour élargir la plage El Riadh est obtenu par la sommation des deux volumes estimés pour la plage aérienne V_3 et sous-marine pour les deux scénarios V_1 et V_2 (Tableau IV-6).

Pour le premier scénario, le volume de rechargement est estimé à environ **8930 m³**. Ce résultat est beaucoup plus important comparé au volume du second scénario qui se trouve être de l'ordre de **5531 m³**. La différence de volume entre les deux scénarios est de **3399.14 m³**.

Tableau IV-6 : Estimation du volume total du sable de rechargement (m³).

	Scenario 1	Scenario 2
Volume de la plage sous-marine (m ³)	$V_1 = 8573.15$	$V_2 = 5174$
Volume de la plage aérienne (m ³)	$V_3 = 356.66$	$V_3 = 356.67$
Volume total de rechargement (m ³)	$V_{T1} = 8929.81$	$V_{T2} = 5530.67$
Différence du volume entre les deux scénarios	$\Delta V = V_{T1} - V_{T2} = 3399.14 \text{ m}^3$	

4.2.2.4 Synthèse

Un rechargement en sable ne peut être efficace et durable que si le niveau du haut de plage est non atteint par les eaux, lors des tempêtes.

Le rechargement du haut de la plage El Riadh peut être arasé à plus de 2 m que la côte, ce qui excède largement le niveau extrême des eaux lors des tempêtes. Ceci, fait qu'il reste émergé même lors des plus hautes mers possibles (Figure IV-45). En termes de faisabilité, avec une hauteur de 1.64 m, l'opération semble très satisfaisante.



Figure IV-45 : Limite des eaux les plus extrêmes au niveau de la plage El Riadh.

Structure :

La présence des structures maritimes contribue à la performance des projets de rechargement artificiel des plages par le piégeage des sédiments dans les deux directions long-shore et cross-shore (CBNP, 1995 ; Dean, 2002). Les deux épis en forme de T et L de la plage El Riadh assurent :

- L'avantage d'avoir plus de stabilité pour une opération d'alimentation,
- L'augmentation de la durée de séjour des matériaux par le ralentissement des pertes en sédiments,
- Procurent éventuellement moins d'opérations d'entretien.

Déflation éolienne : le caractère abrité de la plage par rapport aux vents les plus efficaces (de secteur Ouest et Nord-Est) par les deux épis qui diminuent sensiblement leurs vitesses, ainsi que la présence du mur de l'hôtel le long du haut de la plage joue le rôle d'une barrière face au transport éolien et favorise l'accumulation de sable mobilisés.

Accessibilité : l'accès à la plage est facile, en l'occurrence par :

- a- Voie marine pour les bateaux, si la source du granulat de rechargement est de source marine voir un produit de dragage,
- b- Voie terrestre pour les engins de chantier, ce qui présente un autre avantage en termes de faisabilité.

Source du sable de rechargement : Les carrières et les sablières sont le choix le plus adéquat, en raison de la facilité d'accès à la plage et la quantité du volume de sédiments nécessaires au rechargement. Ce choix est aussi motivé par les possibilités de la sélection du diamètre optimal des grains afin d'optimiser le volume du rechargement auparavant calculé. Les produits de dragage du port de Sidi Fredj et d'El Djamila semblent aussi une intéressante source, mais après une étude de faisabilité.

Une plage peut être appréciée selon trois différents niveaux de valeur (Larid 2010- Cours d'aménagement du littoral II) (Mezhoud, 2011).

- La valeur écologique (en tant que patrimoine naturel),
- La valeur économique (en tant que fondement de l'activité touristique balnéaire),
- La valeur d'usage (en tant que réponse à un besoin de la société moderne).

La plage El Riadh répond aux deux derniers critères d'appréciation. C'est un site à vocation touristique qui répond à une demande sociale de loisirs. De ce fait, une opération d'élargissement de la plage par rechargement est recommandée.

Tous ces paramètres sont liés les uns aux autres et détermineront la capacité pour la future plage à être viable sur le long terme et non dangereuse pour la sécurité du citoyen. Par exemple, pour diminuer l'énergie, il va falloir colmater et réduire la profondeur (Scenario 2). Puisqu'il y a un lien entre l'énergie des vagues et la granulométrie, il va donc falloir choisir les sédiments en fonction de l'énergie connue à cet endroit. En effet, si le sable est trop fin, il sera absorbé par la mer et ne servira à rien (Belkessa, 2007).

4.3 Cas d'étude N°02 : Dégradation des dunes côtières algéroises entre pression de l'urbanisation et conséquences sur l'évolution de la ligne de rivage

4.3.1 Introduction

La baie d'Alger se présente comme un système côtier très diversifié et donne lieu à un conflit constant entre « pressions humaines » et « fragilité environnementale » de ces côtes. En effet, les besoins de loger les populations grandissantes d'une part et, d'autre part, la présence d'une côte vulnérable mettent en péril la fragilité du littoral. La partie Est de la baie, où se situe une multitude de plages sableuses soutenues par un système dunaire très endommagé et vulnérable, est sujette à des érosions marquées durant les dernières décennies.

Alger est une des plus grandes métropoles du Maghreb. Elle est sujette à une urbanisation intensive (plus de 6 millions d'habitants ([Population data, 2015](#))). L'occupation de son espace littoral s'est déroulée en plusieurs épisodes et s'est faite progressivement au détriment de nombreux espaces dunaires (dunes actuelles meubles et dunes anciennes consolidées). Leur disparition s'est répercutée négativement sur l'alimentation naturelle en sédiments des plages de cette zone.

Ce cas d'étude consiste à effectuer un suivi multi-temporel de l'espace côtier de la région « Alger Est ». Le but est d'établir un diagnostic des éventuels liens de cause-à-effet et des corrélations entre l'urbanisation intensive, la destruction des espaces dunaires et la disparition des plages durant la même période. Ceci permettra une meilleure compréhension du géosystème côtier algérois et une aide à la prise de décision en matière de protection côtière pour le futur dans la région.

4.3.2 Contexte général et choix de la zone d'étude :

4.3.2.1 Choix de la zone d'intérêt

La zone d'étude se localise au Nord de la wilaya d'Alger (Algérie) et constitue le secteur centre algérois (Figure IV-46). Elle est comprise d'Ouest en Est entre les deux Oueds El Harrach et El Hamiz, s'étale jusqu'à cinq kilomètres vers l'intérieur du pays et couvre dix communes dont cinq sont côtières.

Le système côtier algérois subit de nombreuses pressions liées principalement au degré d'anthropisation. En effet, sur le site d'étude la croissance démographique, l'urbanisation,

l'activité touristique incontrôlée et l'érosion côtière sont perçues comme des contraintes fortes (UICN, 2012), induisant d'importants phénomènes de dégradation (Pinot, 1998).

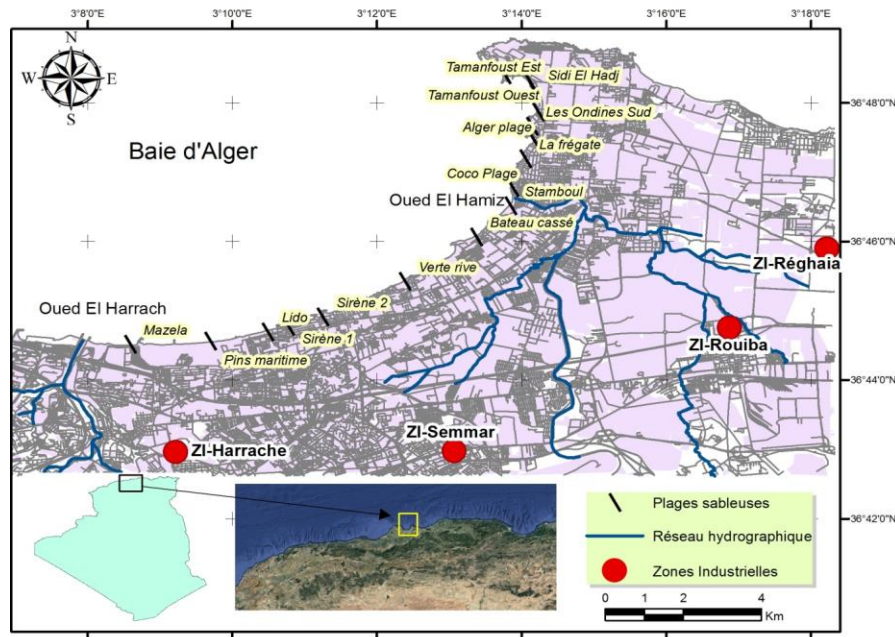


Figure IV-46 : Localisation de la zone d'étude (Partie Est de la baie d'Alger).

Le choix de la zone s'est fait en fonction de l'observation du secteur algérois sur différentes échelles temporelles. La présence des cours d'eau a permis l'existence d'un massif dunaire considérable, de par les apports continus en matériaux sédimentaires. Le développement du tissu urbain, favorisé par l'emplacement et la topographie de la zone, s'est opéré de façon particulièrement rapide et perceptible au détriment des dunes sur place.

4.3.2.2 Contexte général

L'espace côtier algérois est un espace diversifié géomorphologiquement. Son littoral est caractérisé par la présence de côtes rocheuses à l'Ouest et de plages sableuses au centre et à l'Est. Ces dernières sont sujettes à une érosion continue ces dernières années qui est due à une perturbation des échanges sédimentaires causée par des facteurs directs (vol de sédiments de plages, augmentation de l'hydrodynamisme, etc.) (Jungerius et Van der Meulen, 1988 ; Amarouche et al., 2017) ou indirects comme la dégradation des dunes côtières meubles pour des fins d'urbanisation (Łabuz, 2004).

La croissance démographique, par son besoin d'urbanisation/artificialisation, contribue à la fragilisation de la baie d'Alger (Mihoubi et al., 2014) pouvant ainsi induire une perturbation de l'équilibre sédimentaire et de la santé des écosystèmes. Ce qui accroît le niveau de risque d'érosion sur le littoral (LEM, 1998), notamment dans les zones fortement occupées.

L'objectif du présent cas d'étude s'articule autour de la mise en évidence des éventuels liens directs ou indirects entre l'action de l'artificialisation de la zone côtière, son impact sur les systèmes côtiers en fragile équilibre, ainsi que l'impact de ces deux variables sur l'évolution des rivages qui se localisent dans la zone influencée.

L'observation de la variabilité de l'expansion du tissu urbain (A) et *de facto* la réduction des espaces dunaires (B) dans une échelle multi-temporelle peut mettre en évidence l'éventuelle relation entre cette variabilité et les fluctuations de la ligne de rivage. L'intervalle de temps entre A et B correspond à un impact ressenti et peut ainsi aider les décideurs à réconcilier « respect de l'environnement et aménagement » (Maret et Cadoul, 2007).

Sur le plan hydrodynamique, les côtes algéroises se caractérisent par une hauteur moyenne de vagues faible à moyenne (entre 0.2 et 3 m d'amplitude). Malgré l'absence de données précises sur l'hydrodynamisme de la région, la hauteur maximale des vagues observées au cours des dix dernières années est de 3 m (Larara et al., 2012). Les hauteurs entre 2 et 3 m n'étant atteintes en Algérie que lors des épisodes spécifiques de haute énergie comme des tempêtes ou lors de séismes (Yelles-Chaouch et al., 2009). On retiendra une hauteur d'un mètre correspondant aux hauteurs les plus significatives dans la baie d'Alger (Hemdane et al., 2016).

La moyenne significative des marées est la différence verticale entre la marée la plus haute et la marée la plus basse. Dans le bassin algérois, la marée moyenne est de 0.16 m (Albérola et al., 1995) et est considérée comme faible.

4.3.3 Evolution des espaces dunaires

4.3.3.1 Extraction cartographique des dunes côtières à Alger

La cartographie des dunes côtières est réalisée à partir de la carte géologique de la baie (feuille d'Alger, 1 :50000, publiée en 1964, mais réalisée entre 1948 et 1962) illustrant la nature

géologique des sols, notamment les dunes côtières de sable meuble « q^{3c} » et les dunes anciennes consolidées « q^{3bD} , q^{3aD} » (Figure IV-47).

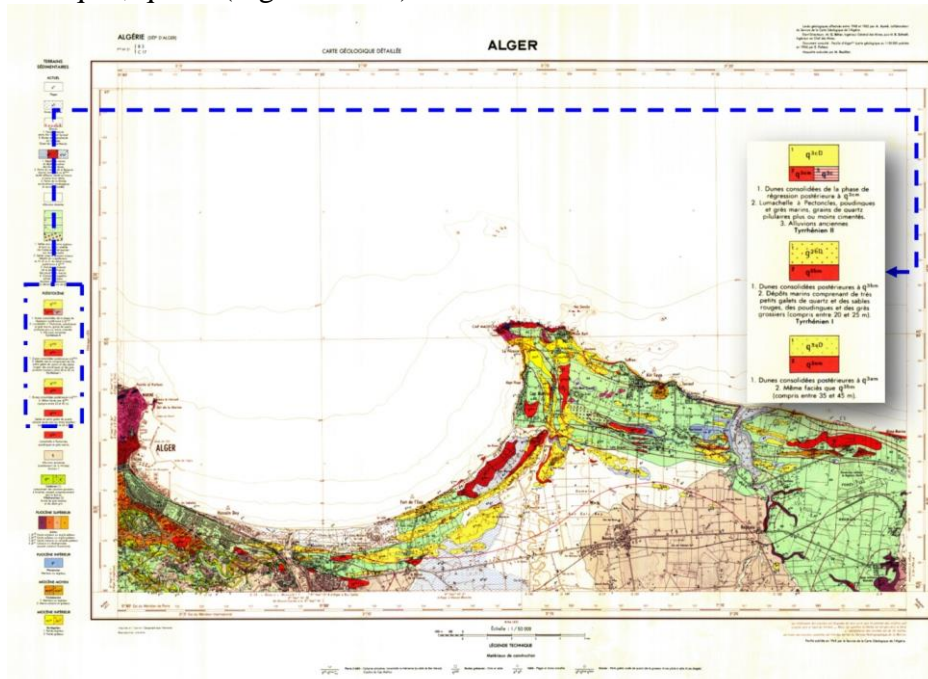


Figure IV-47 : Sol dunaire dans la carte géologique de la baie d’Alger (IGN-INC, 1948-1962).

Les contours de ces terrains ont été extraits par digitalisation dans un SIG sous un format vecteur plus flexible (mise à jour, sémiologie, superposition, etc.) et dans un système de projection UTM Zone 31N, WGS-1984. La carte permet de constater que la majorité du massif dunaire sur la baie est localisée au centre et à l’Est (Figure IV-48), secteurs de la majorité des plages sableuses de la baie, indiquant ainsi la dépendance structurelle entre la dune et la plage.



Figure IV-48 : Localisation des dunes (1960) sur la partie Est de la baie d’Alger.

La superposition de ces dunes sur une image satellitaire montre que la majorité de ces anciennes dunes sont localisées sous des zones urbanisées (signe de dégradation ou d'enfouissement sous urbanisation).

4.3.3.2 Sélection des zones urbanisées (1960-1985-2000-2015)

L'extraction des taches urbaines multi-dates s'est faite à partir d'imagerie satellitaire de moyenne résolution (Archive Landsat) pour les dates 1985, 2000, 2015 et à partir d'une photographie aérienne ancienne (1959, échelle 1 : 50 000) pour l'année 1960 (Figure IV-49).

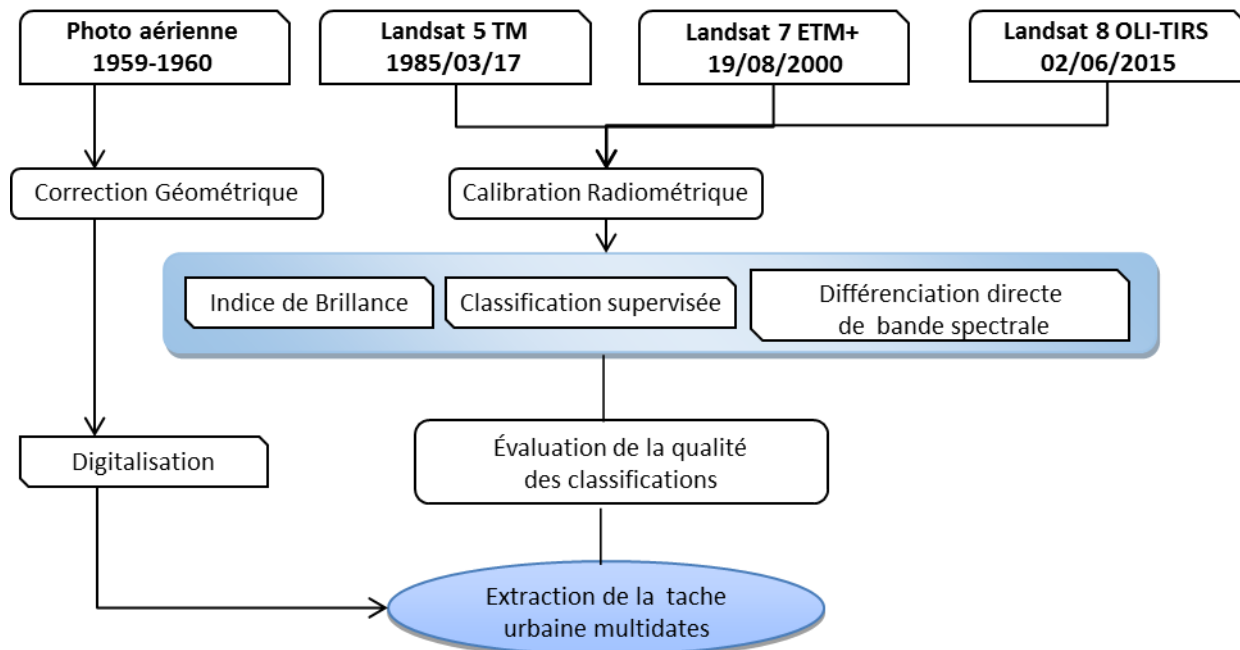


Figure IV-49 : Schéma relatif à la méthodologie de cartographie utilisée.

Tout d'abord, les trois scènes Landsat sont normalisées radiométriquement (en valeur de réflectance). La photographie aérienne, quant-à-elle, est géoréférencée dans un SIG dans le même système de projection des images satellitaires.

Pour la photographie aérienne, une simple numérisation des zones urbanisées a été réalisée sous un SIG pour l'extraction de la tache urbaine entre 1985-2000-2015 : trois méthodes de télédétection ont été testées et comparées. L'algorithme « différenciation de bande spectrale » a été retenu, une matrice de confusion basée sur 50 points GCPs (réalité terrain) a été utilisée pour évaluer la qualité (voir tableau IV-7).

Tableau IV-7 : Qualité des algorithmes de différenciation.

Algorithme de détection du changement	Matrice de confusion (Qualité en %)
Différenciation univariée directe de l'image	85,7
Classification supervisée	78,1
Indice de brillance	79,4

4.3.3.3 Différenciation directe par valeur spectrale

En observant les différentes bandes spectrales présentes sur les capteurs Landsat, trois bandes sont présentes sur les 3 capteurs (TM, ETM+, et OLI), notamment les bandes « Bleu, Vert et Rouge ».

La bande bleue est la bande la plus sensible aux zones artificialisées. En parcourant empiriquement les signatures spectrales des objets urbains sur l'image, les seuils discriminant cette classe (valeurs de réflectance) sont synthétisés (Tableau IV-8), notamment les valeurs supérieures à "0.15" (valeurs de réflectance).

Tableau IV-8 : Seuillage de la bande bleue.

	Longueur d'onde Bande bleue (μm)	Seuil spectral des objets urbains
Landsat 5 TM	B1 (0.45-0.52)	> 0.16
Landsat 7 ETM+	B1 (0.45-0.52)	>0.16
Landsat 8 OLI-TIRS	B2 (0.45-0.515)	>0.15

Sur une grille de vérité terrain (250 points) alimentée par divers supports de validation multitudes (carte topographique de 1987, images aériennes de 1999 et une image de très haute résolution de 2016), une matrice de confusion a été générée donnant un pourcentage de 89.1% d'exactitude.

4.3.3.4 Analyse de la dégradation dunaire sur les zones urbanisées

En vue de quantifier les surfaces dunaires dégradées, une superposition spatiale des cartes des dunes extraites précédemment sur les zones d'urbanisation multi-temporelle est réalisée (Figure IV-50).

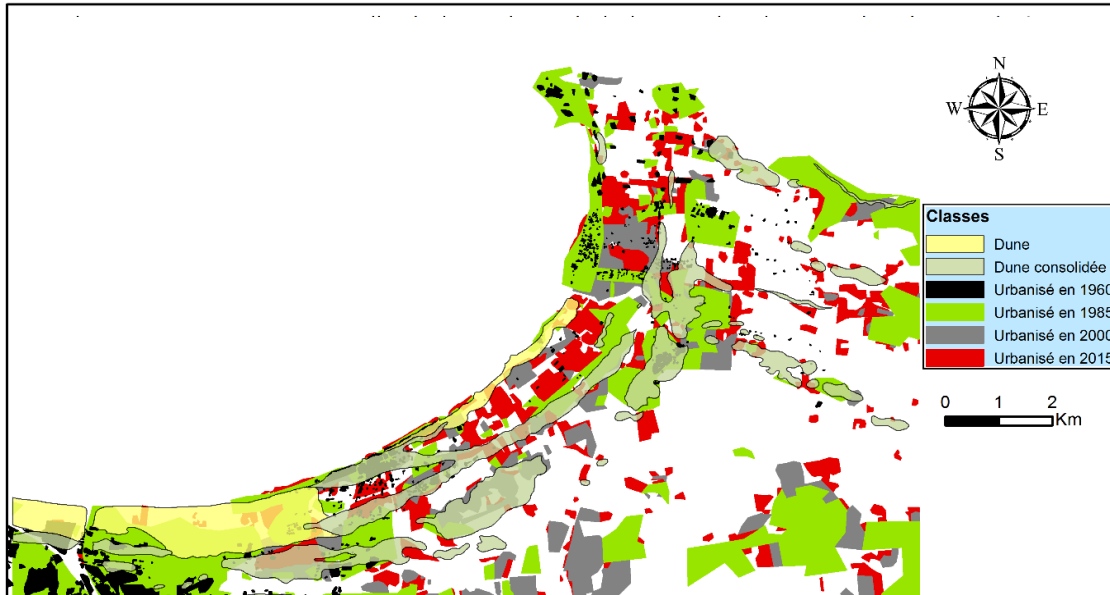


Figure IV-50 : Évolution dans le temps de l'urbanisation sur les espaces dunaires dans l'Est de la baie d'Alger.

La superposition montre globalement un étalement urbain sur la majorité des massifs dunaires (dunes meubles ou dunes consolidées). Les dunes épargnées subissent quant-à-elles un fort morcellement. Le tableau IV-9, synthétise les principales statistiques de la régression des surfaces dunaires.

L'artificialisation au détriment des zones dunaires a été continue durant ces six dernières décennies. En effet, la zone Est de la baie a perdu environ 69% de son massif dunaire (Tableau IV-9), les plus grands taux de défrichement ont été réalisés entre 1960 et 1985 (lors de l'urbanisation économique du pays « post- indépendance ») à raison de 24 Ha/an. Ce taux de défrichement, même s'il a baissé (13,4 Ha/an entre 1985 et 2000 et 13.6 Ha/an entre 2000 et 2015), demeure toujours très élevé. Ceci est dû aux pressions démographiques sur le foncier (périodes d'exode rural / habitat précaire des années 1990 ou politique étatique de logement durant les années 2000).

Tableau IV-9 : Surfaces dunaires urbanisées (ha) dans la zone d'étude de 1960 à 2015.

	Surface jusqu' à 1960	Surfaces défrichées (Ha)					Surfaces restantes	
		Urbanisation 1960	Urbanisation 1985	Urbanisation 2000	Urbanisation 2015	Total	Hectares	%
Dunes mobiles	507,70	24,96	234,06	16,50	51,50	327,02	180,68	35,59
Dunes consolidées	1089,72	78,21	387,32	185,33	153,18	804,04	285,67	26,22
Total	1597,41	103,16	621,39	201,83	204,68	1131,06	466,35	30,90

On note aussi la dégradation considérable des dunes consolidées, localisées essentiellement dans les communes intérieures de la baie (Heuraoua, Bab Ezzouar). En effet, ces anciennes dunes défrichées (ou enfouies sous 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).

Cette disparition massive des dunes côtières, dégradées sous la pression de la crise foncière et de la croissance démographique sur la capitale, se traduit par la construction d'agglomérations. Ceci semble avoir causé « indirectement » par la suite des épisodes récurrents d'érosion côtière, au centre et à l'Est de la baie d'Alger.

4.3.3.5 Résultats et commentaire (évolution des espaces dunaires)

La baie d'Alger est une zone parmi les plus convoitées du pays, ce qui fait qu'elle subit une pression anthropique due à l'attrait socio-économique de la capitale (Belhai-Benazzouz et Djelal, 2010). Son évolution en aire métropolitaine, engendre une plus forte pression socio-économique se traduisant par des impacts plus conséquents sur le milieu littoral et ses ressources environnementales.

Cette expansion urbaine a demeuré longtemps incontrôlée (Kacemi, 2011) et s'est faite lentement au détriment des espaces naturels, malgré la présence d'instruments législatifs interdisant l'urbanisation littorale dans diverses bandes de servitude (loi littorale 2002-02, Plan du PDAU, etc.) (Ghodhani, 2013).

En effet, il a été relevé trois pics d'expansion urbaine à savoir :

- Un premier, dû à l'installation des infrastructures industrielles, d'une ligne de chemin de fer (pôles industriels de Hamiz Harrach, Rouiba, Regharia et Semmar) dans la période qui précédait les années 1985. Ceci a permis l'attraction socio-économique par le biais de création d'emplois avec possibilité d'installation dans la zone périphérique.
- La seconde expansion s'est opérée durant les années 1990, essentiellement pour des raisons d'insécurité. L'exode s'est fait majoritairement de façon anarchique et relativement rapide sur la zone.
- Le dernier épisode d'urbanisation s'est développé à partir des années 2000, plus contrôlé, il se traduit essentiellement dans des projets de logements étatiques (AADL, social, etc.) (Rabehi, 2018).

La croissance démographique, bien que stabilisée dans les années 2000 par rapport aux périodes d'exode rural des années 1990, continue son allure montante. La zone connaît également un autre mouvement démographique en raison de la crise foncière. Une migration des populations a eu lieu vers les nouveaux pôles d'urbanisation (communes intérieures, dites aussi "arrière-littorales" : Baraki, Sidi Abdallah, Douira, Bab Ezzouar, Reghaia, Heraoua, Les Eucalyptus...etc.).

Les zones qui présentent des formes dunaires consolidées peuvent être considérées comme une source indirecte de matériaux sédimentaires, notamment quand les facteurs érosifs, à savoir les précipitations et le réseau hydrographique, y sont favorables (arrachement et charriage).

En effet, à l'instar des apports sédimentaires assurés par les dunes et l'hydrodynamisme, les apports des Oueds El Hamiz et El Harrach sont aussi significatifs (Larbi, 2017) et semblent pouvoir combler en partie le manque d'approvisionnement causé par la perte des dunes.

La présence du barrage d'El Hamiz (36°35' N, 3°20'E, situé à 23 km de l'embouchure, au Sud de la capitale, dans les monts de l'Atlas Blidéen « Commune de Meftah-Blida), réduit considérablement ses apports solides vers la mer (Hattabi et Kaddour, 2018).

Le tableau IV-10 issu des données collectées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) permet de constater la réduction en apports solides de ces cours d'eau, mais un manque important de données a rendu impossible la couverture de la totalité de la période d'étude.

Tableau IV-10 : Débits solides des cours d'eau dans la zone d'étude (ANRH, 2014).

	Oued El Harrach	Oued El Hamiz
Apports solides As (m ³ /an)		
1985	--	716732
1999	220688	176722
2014	107114	100226

Le défrichement et l'occupation des espaces dunaires dans la région peuvent induire dans le temps une réduction des apports. Ceci semble se répercuter sur les plages comprises entre les principaux cours d'eau et la zone adjacente à ces derniers.

La région située entre Oued El Hamiz et Oued El Harrach a connu un fort changement durant la période d'étude. Ceci s'est traduit par une forte augmentation du tissu urbain qui s'est effectué au détriment des surfaces possibles, notamment les espaces dunaires. Le tissu urbain est passé de 103 hectares en 1960 à environ 204 hectares en 2015, tandis que les espaces dunaires côtiers ou consolidés, à l'intérieur des terres, ont vu leur superficie être réduite. La perte est donc estimée à plus de 69% des espaces dunaires dans la même durée.

4.3.4 Évolution de la ligne de rivage

La compréhension et le suivi de l'évolution du trait de côte sont primordiaux dans l'aménagement du littoral (JEGO, 2003). Pour cette étude, le trait de côte tracé à base des indicateurs géomorphologiques a été retenu et la limite du trait de côte choisie est la ligne de rivage instantanée « En mer calme » (Sabatier, 2001 ; Bouakline, 2009 ; Bouabdallah et Larue, 2009).

4.3.4.1 Méthodologie d'analyse de l'évolution du trait de côte

Le choix de la méthodologie du suivi du trait de côte doit être fait en fonction des :

- Caractéristiques du milieu,
- Moyens et outils disponibles,
- Besoins en matière de précision.

Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour la méthodologie proposée par le BRGM (Bureau de la Recherche Géologique et Minière) (Mallet et Michot, 2012). L'organigramme synthétise l'application de ces différentes étapes sur notre zone d'étude (Figure IV-51).

4.3.4.2 Modes d'acquisition des levés du trait de côte (voir chapitre III)

L'acquisition des positions de la ligne de rivage pour l'analyse multi-temporelle s'est faite à travers deux modes de hautes précisions, la photographie aérienne et le GPS différentiel (DGPS). Les images satellitaires, quant à elles, ont été écartées pour ne pas altérer la qualité des résultats vu leur marge d'erreur qui reste assez importante par rapport aux deux précédents modes.

Tableau IV-11 : Sources, années et échelles des data du trait de côte.

Type	Année de la campagne	Échelle	Résolution
Photos ariennes	1959	1 :25 000	Métrique
Photos ariennes	1980	1 :10 000	Métrique
Photos ariennes	1999	1 :10 000	Métrique
Levés DGPS	2015	/	Centimétrique

4.3.4.3 Traitement des données

L'évaluation de la cinématique du trait de côte a été faite par l'application de l'extension DSAS sur l'environnement ArcGIS 10.2. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir des différents traits de côte (Mallet et Michot, 2012).

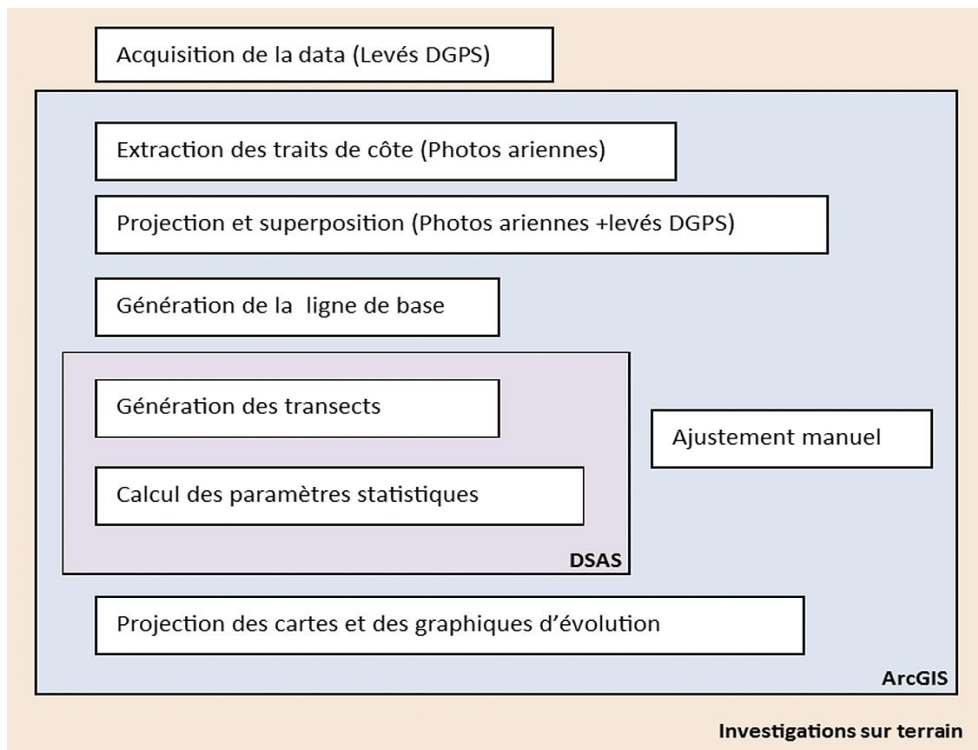


Figure IV-51 : Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.

4.3.4.4 Résultats et commentaire (évolution de la ligne de rivage)

Les calculs des variations de la ligne de rivage ont été effectués le long des 683 transects, répartis le long des dix plages de la partie orientale de la baie d'Alger à l'exception des secteurs des Pins Maritimes (Commune de Mohammedia) inaccessibles en 2015 (zone militaire).

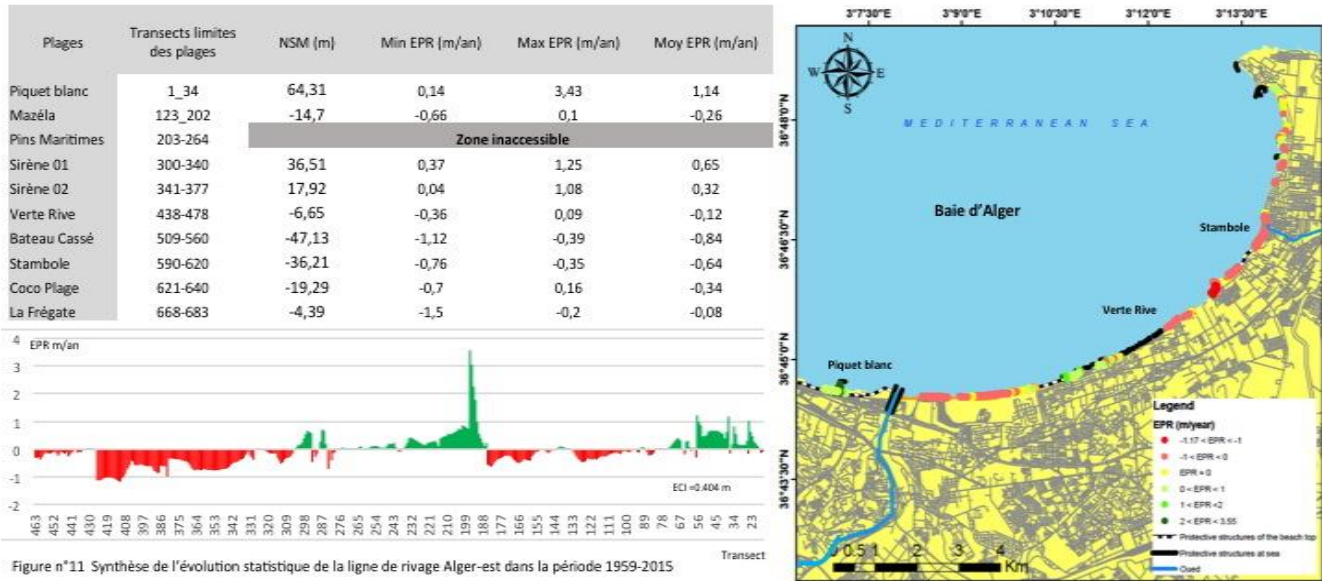


Figure n°11 Synthèse de l'évolution statistique de la ligne de rivage Alger-est dans la période 1959-2015

Figure IV-52 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1980-2003.

Une analyse diachronique du trait de côte a été effectuée sur trois périodes distinctes 1959-1980, 1980-2003 et 2003-2015. Les dates ont été sélectionnées afin de rendre l'impact du défrichement dunaire plus visible.

Lors de la période allant de 1959 à 1980, la zone présente une forte accrétion qui dépasse parfois le +1 mètre/an, mais qui reste non généralisée (EPR + 0.72 m/an et NSM 15.18 m). Les plages qui se localisent dans le secteur adjacent des Oueds semblent subir une érosion considérable due à la dynamique naturelle des embouchures. L'état positif de l'évolution qualifié de naturel, peut être expliqué par :

- La nature texturale de la zone, plus particulièrement la lithologie relativement fragile (grés) (Bouhamadouche, 1993) permettant un apport sédimentaire régulier,
- L'absence d'ouvrages ou de formes de protection consistantes pouvant induire un changement de la dynamique sédimentaire de ce secteur.

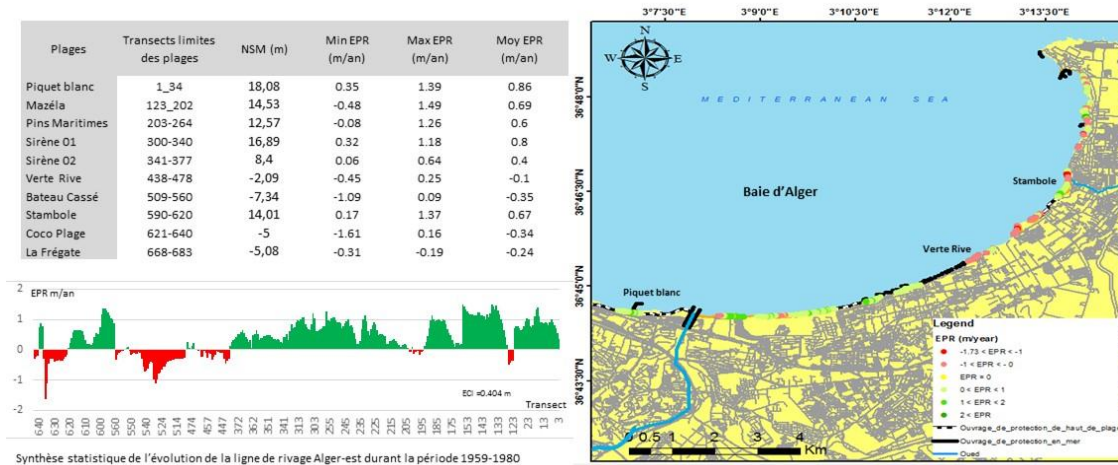


Figure IV-53 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1959-1980.

Durant la période allant de 1980 à 2003, la zone connaît une érosion alarmante (L'EPR -0.54 m/an, NSM -6.5 m). Seules quelques plages sont épargnées par ce phénomène d'érosion. Les plages de la commune de Fort-de-l'eau (Bordj El Kiffan) semblent être les plus affectées.

Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de l'attaque frontale de la mer et la dégradation des dunes durant cette période. Ceci semble être les principales causes de ce phénomène, traduisant ainsi la forte vulnérabilité et la tendance à l'érosion à laquelle la zone fait face.

Par ailleurs, les enregistrements de l'ONM (Office Nationale de la Météorologie) au niveau de ces stations (région Alger-Est) ont permis de détecter un nombre important de tempêtes qui ont fortement influencé l'évolution de la zone. La diminution des apports solides des cours d'eau (tableau IV-10) ainsi que la comparaison avec les résultats de Bouakline (2009), renforcent ce constat.

Nous observons durant la période allant de 2003 à 2015 une rapide évolution négative pour la zone (EPR -1.32 m/an et NSM 1.8 m). En effet, l'expansion de l'urbanisation a induit l'augmentation des effets et avec cela, le besoin de protéger les biens installés sur la zone côtière, comme cela a été le cas suite aux épisodes de tempêtes de 2007 (Figure IV-54).

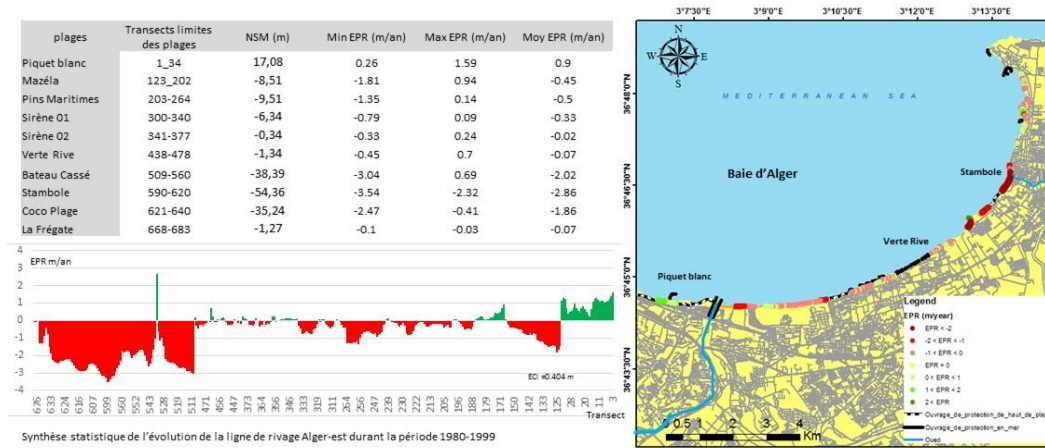


Figure IV-54 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie Est de la baie d'Alger durant la période 1980-2003.

Les ouvrages lourds de défense installés depuis 2008 ont eu un fort impact sur le transit du sédiment (Figure IV-55). Impliquant ainsi, la formation de surfaces d'accumulation, ces ouvrages ont entraîné un déficit dans le budget sédimentaire en accentuant l'érosion dans certaines parties des zones adjacentes (Otmani et al., 2014).

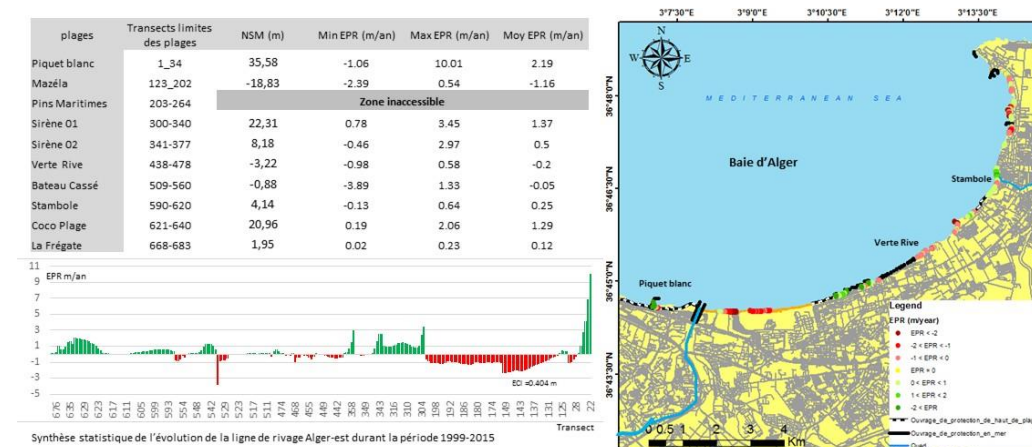


Figure IV-55 : Synthèse statistique de l'évolution de la ligne de rivage de la partie est de la baie d'Alger durant la période 2003-2015.

4.3.5 Corrélation entre les différentes variables étudiées

La majorité des dunes défrichées en 1960 se situent à proximité du rivage (principalement des dunes côtières). Les dunes consolidées, situées plus à l'intérieur (arrière-côte), sont défrichées régulièrement entre 1985 et 2015 (Figure IV-56).

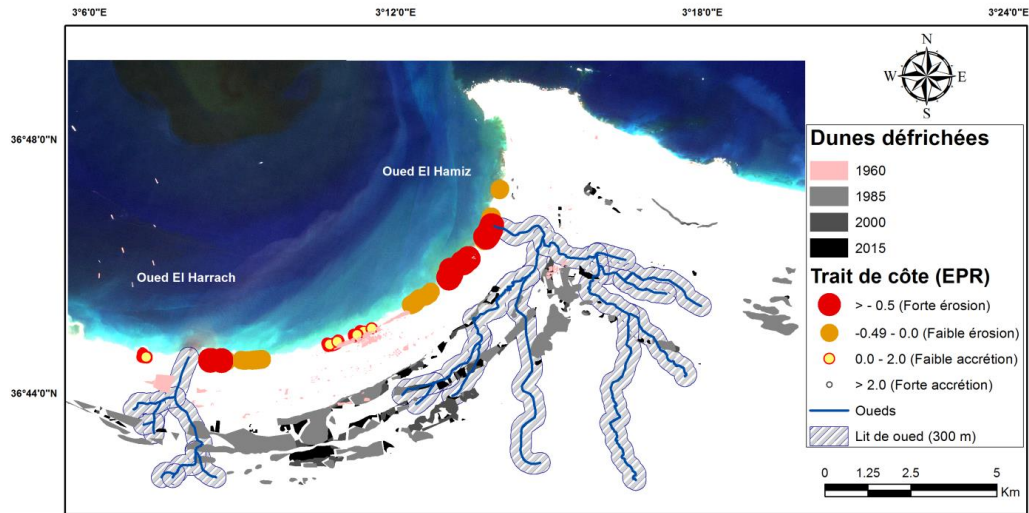


Figure IV-56 : Synthèse de la dynamique du trait de côte et de la disparition des massifs dunaires dans la partie Est de la baie d’Alger.

Les lits des 2 principaux Oueds (Figure IV-56) montrent une nette liaison géomorphologique entre les dunes arrières-littorales (consolidées), les dunes et la plage et les deux Oueds « Hamiz / Harrach ». Leurs affluents jouent un rôle de transporteur (de la dune vers la plage), la disparition – défrichement de ces sources précieuses de sédiment crée un déséquilibre visible (Figure IV-82b). Le tableau IV-12 présente une matrice de corrélation entre les différentes combinaisons possibles. Dans cette étude, nous avons opté pour un coefficient de corrélation linéaire type simple, dit de Bravais-Pearson (ou de Pearson), qui représente une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables ; selon l’équation suivante :

$$R_{xy} = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x \times \sigma_y}$$

Tableau IV-12 : Corrélation entre urbanisation - dunes - trait de côte.

	<i>Urbanisation totale</i>	<i>Dune meubles</i>	<i>Dunes consolidées</i>	<i>Surface TC perdue (m²)</i>	<i>Surface TC gagnée (m²)</i>
Urbanisation totale	1				
Dunes mbl urbanisées	0,961030293	1			
Dunes-cons défrichées	0,995460991	0,9486945	1		
Surface perdue (m²)	-0,052968617	0,174133597	-0,128663885	1	
Surface gagnée (m²)	0,336585713	0,578745309	0,29170333	0,840512267	1

4.3.5.1 Discussion

On constate une forte corrélation entre l'urbanisation totale et les dunes défrichées (0,96 et 0,99). Cela traduit l'aspect de l'urbanisation algéroise qui s'est implantée au détriment des surfaces dunaires. La corrélation est plus élevée avec les dunes consolidées car elles ont connu les plus grandes surfaces de défrichement.

Les surfaces perdues du trait de côte sont liées (0,17) au défrichement des dunes côtières (proches des plages). Le fait que ce lien soit faible est probablement dû à la présence d'autres facteurs pouvant alimenter la plage et compenser l'érosion (apport des courants de dérive (Figure IV-57-e2), apport des Oueds depuis l'intérieur du pays...etc.).

Les surfaces gagnées (accrétion) sont également positivement liées à l'urbanisation et au défrichement des dunes/dunes consolidées (0,57 et 0,29) de manière « hypothétiquement improbable ». Ceci est dû au fait que souvent, l'urbanisation côtière s'est vue accompagnée de « recharge artificielle de plage et d'implantation d'ouvrages de protection » (Figure IV-57-c, d3, e2), ce qui a contribué à l'augmentation du bilan sédimentaire des plages / trait de côte. En effet, afin de pallier aux soudaines érosions marines, les ouvrages de protection ne semblent pas suffisants. La complémentarité des sédiments d'emprunt est souvent préconisée.

Dans notre matrice, l'urbanisation est très faiblement liée aux surfaces perdues du TC (trait de côte) car deux variables dans la même période temporelle sont comparées, or le rapport de cause à effet est souvent reporté dans le temps (l'érosion du trait de côte n'a lieu que des années plus tard).

Le rapport est faible entre « dune consolidée » et « surface perdue des plages » (-0,12), étant donné que les dunes consolidées sont structurellement moins meubles et moins aptes au transport sédimentaire que les dunes littorales de proximité. Parfois, elles sont enfouies et fixées par l'urbanisation ou des formes de végétation (arbustes).

Dans certains cas aussi, le défrichement des dunes consolidées près des Oueds peut intensifier ce rapport négatif par le biais des sables rejetés dans les Oueds et en alimentant les plages par la suite (Figure IV-57.a). Il est à noter que certaines des faibles corrélations sont dues à la complexité des processus naturels s'opérant au sein du système côtier.

La faible corrélation entre quelques combinaisons des variables abordées peut être reliée à la perte d'une certaine quantité d'informations lors du passage de la 3D à la 2D. Il s'agit notamment des dunes sableuses et des profils de plages. Ceci représente d'ailleurs une des limites de cette étude qui doit être reprise dans le futur (avec une mise à disposition de fonds nécessaires et une volonté des acteurs locaux).

Rabehi (2008) avance l'hypothèse que les plages ayant un lien direct avec ces anciennes dunes se trouvent dépourvues de sources d'alimentation en sédiment. Il faut noter que d'autres facteurs intervenant et influant sur les processus de transport sont à prendre en considération (hydrodynamisme et apports solides des cours d'eau) (Figure IV-57.b).

4.3.6 Conclusion

La présente étude avait pour objectif d'évaluer le degré d'influence de l'expansion urbaine sur le fonctionnement des systèmes côtiers. La disparition systématique des espaces dunaires et les fluctuations engendrées au niveau des plages ont eu un impact sur l'expansion du tissu urbain.

L'analyse temporelle a montré une tendance à l'occupation des dunes, phénomène déjà remarqué en 2015 (70% déjà urbanisées). Un plan d'occupation adapté et des systèmes de surveillance seraient indispensables à développer et à déployer pour accompagner l'évolution et pérennité de ce processus.

L'évolution des variables abordées durant la période allant de 1959 jusqu'à 2015 a montré une forme de lien cause-à-effet assez complexe entre les processus côtiers opérant dans l'Est algérois. Elle démontre que le bilan surfacique global concernant les plages semble rester stable. Cette stabilité a été acquise grâce à la mise en place des ouvrages de protection (Brise lames). Il faut noter que la pénurie sédimentaire engendrée par le défrichement des dunes reste omniprésente entraînant un impact ressenti sur le terrain.

L'hypothèse conceptuelle au départ de ce travail « une dégradation supposée directe des plages après dégradation des dunes nurseries » a été contredite par des taux de corrélations faibles. Il existe une multitude de variables à prendre en compte « rechargement artificiel des plages, digues de protection etc. » ou encore d'autres informations historiques émanant du terrain, tels certains cas de rejets sédimentaires de dunes défrichées dans les Oueds.

Cette contribution a permis ainsi de mettre en exergue, pour la première fois à l'échelle nationale, une quantification surfacique de l'ampleur de disparition des dunes côtières, notamment à travers le couplage des techniques géo-spatiales, en l'occurrence, l'utilisation des SIG/Télédétection.

Ce monitoring spatial de l'artificialisation de la côte couplé à des outils de calculs géostatistiques a donné des résultats satisfaisants en matière de tendance globale (Urbanisation/défrichement/érosion/accrétion). Afin d'avoir un diagnostic plus approfondi et de maîtriser l'ensemble des facteurs intervenant dans les processus sédimentaires, il est nécessaire de combiner les données in-situ et de fournir un support statistique pour la prise de décision en matière de gestion intégrée des littoraux algérois.



Figure IV-57 : Galerie de photos. (a) Rejet des matériaux sédimentaires dans l'Oued El Harrach, (b) Urbanisation des rives de l'Oued El Hamiz (Photo de Yann A.B) (c) travaux de rechargement plage Sirène 2016 (Photo de Djerrai N.E) (d1) La plage Sirène 1958 (d2) La plage Sirène 2019 (Recul du trait de côte) (d3) La plage Sirène 2019 (ouvrage de protection et travaux d'aménagement) (e1) La plage Verte Rive 1958 (e2) La plage Verte Rive 2016 installation des ouvrages de protection (Photo de Djerrai N.E) (e3) La plage Verte Rive 2019 (Stabilisation de la ligne de rivage)

4.4 Cas d'étude N°03 : **Erosion des falaises marines de** **Zerzouria (Ex suffran) à Ain Taya**

4.4.1 Introduction

Le littoral algérois présente des unités géomorphologiques hétérogènes. De nombreuses études sont portées sur la morphodynamique des côtes sableuses, alors qu'il a été noté qu'il y a une insuffisance bibliographique concernant les côtes rocheuses. Ce cas d'étude est réalisé dans ce sens, il s'intéresse aux falaises, en particulier celles qui subissent continuellement une évolution morphodynamique remarquable.

L'occupation ancienne et anarchique sur ce type de côtes traduit une forte pression anthropique. Les zones à falaises représentent plus de 50% du linéaire côtier de la zone algéroise. Ce travail s'inscrit comme étant l'un des premiers portants à faire un diagnostic sur l'évolution des falaises au niveau du secteur algérois. En plus des facteurs internes (lithologie et pente), de nombreux facteurs externes sont responsables de la dynamique de ces unités géophysiques, notamment, la nature des fonds, la bathymétrie, l'hydrodynamisme, les conditions climatologiques ainsi que les facteurs biotiques et abiotiques.

4.4.2 Localisation de la zone d'intérêt

Le diagnostic morphologique sur terrain ainsi que la consultation iconographique du linéaire côtier sur la wilaya d'Alger ont permis d'identifier les emplacements des falaises (voir chapitre I) essentiellement dans deux zones différentes. La première à l'Est (secteur A) entre Réghaïa et Cap Matifou (commune d'El Marsa). Aussi, à l'Ouest (secteur B) entre Bab El Oued et Ain Benian. A noter que le cap de Sidi Fredj est une zone à falaise aussi.

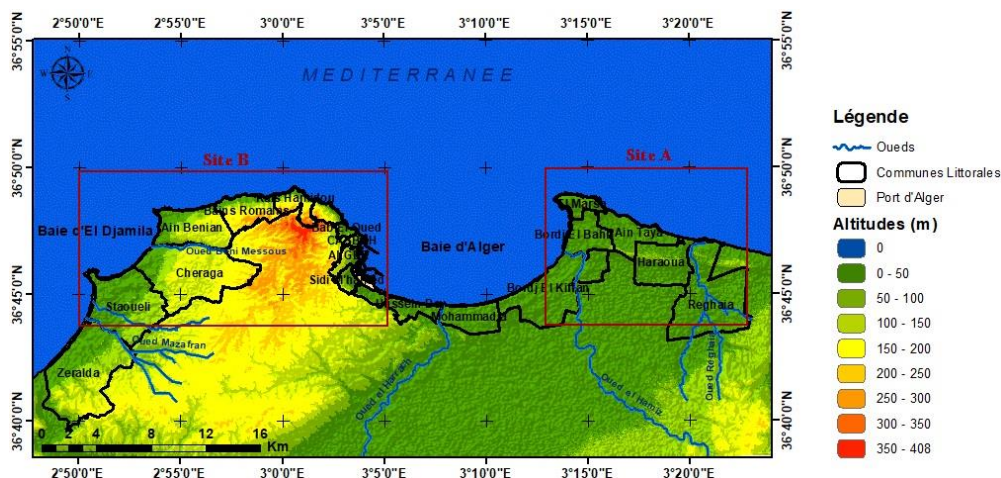


Figure IV-58 : Localisation géographique des grands ensembles de falaises dans la zone d'étude.

L'osculation de la lithologie des secteurs A et B a montré des faciès très variables entre les deux secteurs. En effet, hormis les hautes falaises dures de la commune d'El Marsa (granitiques), le secteur « A » présente une roche fragile à tendre dans le reste de son linéaire. Une superposition d'ardoise et de grès est observée au niveau des falaises de Zerzouria (commune de AinTaya). Pour le reste du secteur, les falaises sont de lithologie tendre (argileuses) avec présence de sources d'eau et ce à cause de la présence d'un substratum marneux du Plaisancien qui fait office de couches imperméables et permettant ainsi la présence de nombreuses sources. Les falaises évoluent ainsi par solifluxion ce qui accroît fortement leur fragilité. Ces falaises ont été fortement touchées lors du séisme de Boumerdes (2003). Les tremblements de terre ont permis la remontée d'une grande quantité des eaux vers la partie supérieure des falaises meubles qui se sont donc éboulées vers le bas par liquéfaction.

Le secteur « B » présente une lithologie rigide (roches magmatiques), notamment les falaises des communes de Hammamet jusqu'à Bab El Oued (essentiellement basaltiques). Un faciès métamorphique commence dans les affleurements des deux caps de la baie d'El Djamila à savoir gneiss ocellé dans le cap de Sidi Fredj (commune de Staoueli) et de gneiss schisteux (commune de Ain El Banien).

4.4.3 Géologie de détails

Les formations tertiaires

Des formations du Burdigalien situées entre El Marsa et Ain Beida sont représentées par une épaisse série argilo-marneuse grise à bleue-grise. Ces dernières, montrent des feuilles très minces dans un matériau friable. Des bancs de grès décimétriques à métriques s'intercalent dans les niveaux argileux marneux. Le grano-classement décroissant de la base au sommet des couches, est fréquent dans ces grès dont la couleur varie du gris au beige.

Les formations quaternaires

Dans les formations Quaternaires, on distingue les formations calabriennes et villafranchiens à matériels dunaires et caillouteux et des formations tyrrhéniennes réparties en terrasses marines à lithologie dominée par le quartz « pilulaire ».

Les affleurements sont concentrés essentiellement dans le bourrelet sahélien, compris entre Bordj El Bahri et Boudouaou El Bahri. La largeur de ces terrasses marines est variable et peut atteindre 10m et plus, comme dans le cas de AinTaya. Ces terrasses marines sont discordantes sur les formations les plus anciennes et les contacts sont soulignés par des ravinements fréquents.

4.4.4 Mise en contexte et sélection de la zone d'intérêt

Les falaises de Zerzouria ont été choisies pour ce cas d'étude et ce, pour les raisons suivantes :

- La configuration géomorphologique favorable à la diffusion du signal DGPS (secteur ouvert) rendant possible la récolte de données topographiques, contrairement au secteur A,
- L'évolution en recul chronologique très perceptible, ce qui illustre la forte vulnérabilité,
- L'accessibilité comparée aux autres secteurs : falaises vives à El Marsa, ou occupées par l'urbanisation sur le secteur B et avec une très faible évolution dans le temps, idem pour le cap de Sidi Fredj.

La récolte des données a démontré que les falaises du secteur B sont plus résistantes et consistantes. Néanmoins, cela n'indique pas qu'elles ne sont pas vulnérables vis-à-vis d'autres facteurs, notamment, la pression urbaine et les rejets domestiques intenses Figure IV-59.



Figure IV-59 : a : falaises vives, urbanisées, b : difficulté d'investigation sur terrain, c et d : plateforme d'abrasion de la falaise de Zerouria (2018).

4.4.5 Diagnostic

Les études menées dans le cadre de cette thèse ont permis d'extraire un diagnostic précis des différents aspects et domaines pouvant influencer le site d'intérêt. Ce cas d'étude s'est appuyé sur une synthèse effectuée à partir des précédents chapitres réalisés dans le cadre de ce travail.

- Pour le cadre climatique, deux périodes pluviométriques se distinguent : Une, très pluvieuse s'étalant du mois de septembre jusqu'au mois de mai, et une autre plutôt sèche allant du mois de juin au mois d'août. La moyenne annuelle des données de précipitation couvrant la période étudiée est de l'ordre de 459.26 mm/an.

- L'étude anémométrique indique que les vents soufflent environ 32.12 % du temps dans la région. Cependant, la direction la plus importante (secteur Nord-Est) ne représente que 6.5 % du temps (voir chapitre II).

- Le cadre géologique du site révèle que le Quaternaire est la principale formation géologique qui domine dans le littoral de ce site. Une mixtiture entre des roches sédimentaires peu résistantes (grés) et des roches métamorphiques fragiles indique que la lithologie de cette zone est peu résistante aux attaques marines (voir chapitre I).

- Les résultats de modélisation hydro-sédimentaire ont permis, à travers l'auscultation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques (vagues/houles), l'identification des zones côtières à forte exposition par rapport à l'énergie hydrodynamique (Figure IV-60), notamment dans les zones à intérêt (voir chapitre II).

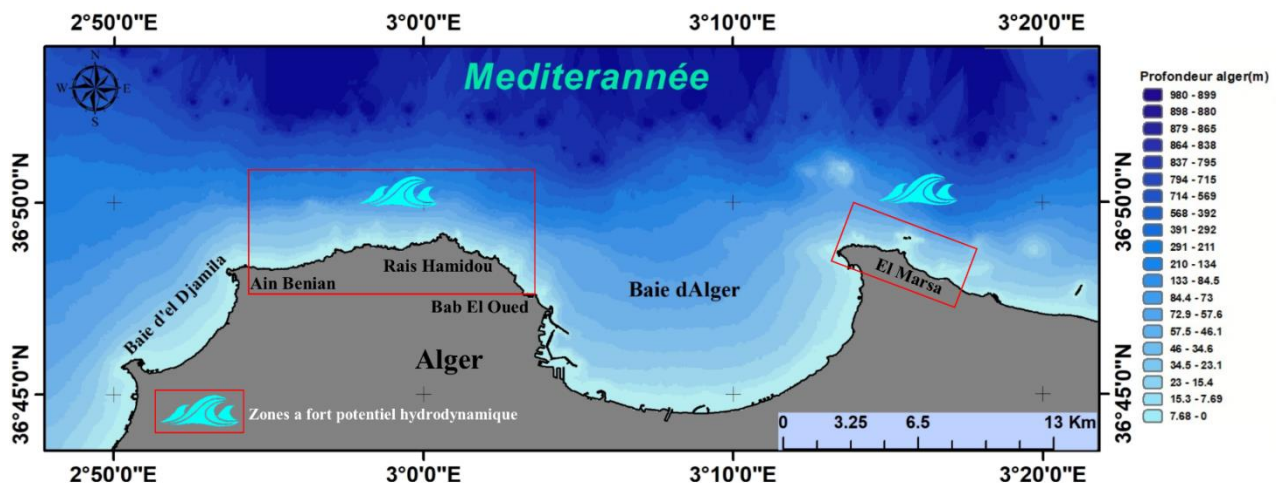


Figure IV-60 : Identification des zones à forte exposition à l'énergie hydrodynamique.

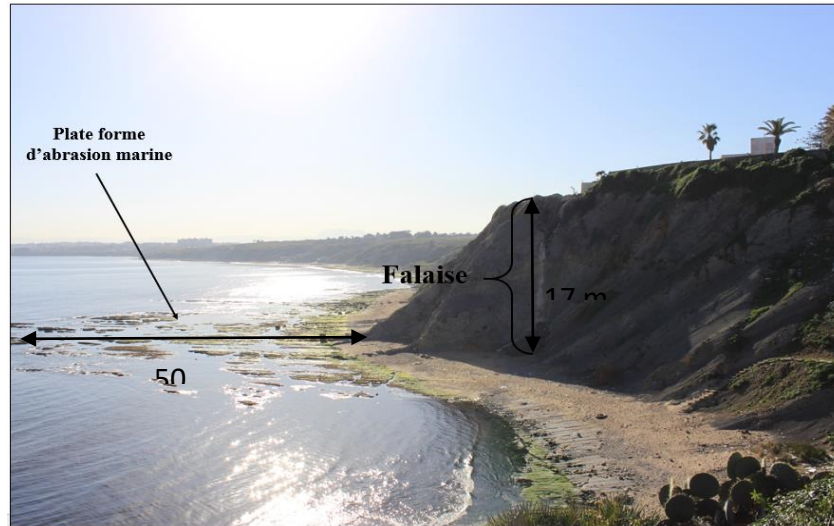


Figure IV-61 : Présentation des falaises de la zone d'intérêt (janvier 2018).

4.4.6 Méthodologie

De manière générale, on définit le trait de côte sur les falaises comme étant la séparation entre la falaise et l'estran (figure IV-61). Ce qui correspond selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou à l'autre des indicateurs suivants (figure IV-62) :

- Le sommet de falaise rocheuse,
- Le pied de falaise rocheuse,
- La rupture de pente,
- L'encoche basale,
- La limite inférieure de végétation terrestre (Aubié et al., 2011).



Figure IV-62 : a et b : Encoches basales sur la paroi des falaises de Zerzouria (2018).

4.4.6.1 Méthodes de détection des limites inférieures et supérieures des falaises

Sur les falaises, les méthodes de détection du trait de côte sont multiples. Pour cet objectif d'étude, la méthode du DGPS (auto-topo) est la plus adéquate. Elle a été sélectionnée vu sa précision élevée (centimétrique) et la rapidité d'acquisition des données.

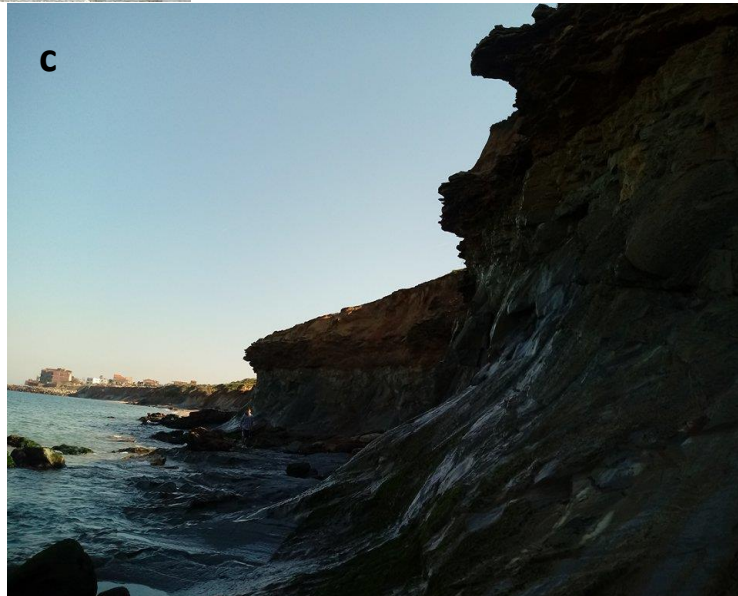
Des investigations sur terrain, en collaboration avec l'Agence pour la Promotion et la Protection du Littoral (APPL) de la wilaya d'Alger, ont été effectuées en tenant compte de la météorologie marine de la région pour les raisons suivantes :

- S'assurer que la mer est calme pour acquérir des points de la position réelle du trait de côte (voir chapitre III) ;
- Réduire les risques liés aux investigations (Figure IV-63).



Figure IV-63 : a et b : Traces d'effondrement des parois de la falaise de Zerouria (2018),

c : Risque en investigation sur terrain à Zerouria (Ex Suffran) 2018.



La prise des points se fait le long du trait de côte, mais aussi, par le parcours des limites inférieures et supérieures de la falaise en gardant la position de la station mobile à la verticale (figure IV-64). Tout projet est enregistré et exporté dès arrêt de la prise de points topographiques.



Figure IV-64 : Acquisition des données lors des investigations de terrain (2018).

4.4.6.2 Traitement des données

Une fois les sorties sur terrain effectuées, les traits de côte obtenus sont traités en portant sur l'évaluation de la cinématique, sur l'extension DSAS et sur ArcGIS 10.2. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir des différents levés (Thieler et al., 2009 ; Mellet et al., 2012).

Les résultats ont été établis sur 335 transects (longueur 300 m, espacement 25 m) perpendiculaires à une ligne de base générée (Figure IV-65). La représentation des résultats s'est faite conformément à la méthodologie indiquée en chapitre III.



Figure IV-65. Visualisation des transects générés dans la zone d'intérêt.

4.4.6.3 Cas des falaises du secteur Ouest « secteur B »

Pour un souci de précision, l'étude du secteur B a été écartée de cette partie du travail, et ce pour les considérations suivantes :

- **Configuration géomorphologique défavorable**

En raison de leur configuration géomorphologique, les falaises du secteur B (hautes et escarpées) constituent une barrière naturelle pour la diffusion du signal DGPS, rendant tout levé très difficile (voire impossible) à effectuer. Dans ce cas de figure, les données issues des images satellitaires peuvent être utilisées comme substitution.

- **Manque de données multi-dates**

Afin de remédier à cette contrainte, un extrait d'images acquis gratuitement depuis la plateforme Google Eartha permis de réaliser une étude diachronique de la dynamique du trait de côte. Google Earth fournit non seulement des images de bonne résolution, mais aussi des archives à des échelles de temps antécédentes. Ce cas d'étude a été jugé non concluant pour les raisons suivantes :

- La perte de la résolution lors du téléchargement des images à petite échelle,
- Les images téléchargées sont en format *JPG, non géoréférencées, leur calage peut entraîner des erreurs spatiales,
- Le passage des satellites est une source d'un décalage de scènes : deux images de la même parcelle, au même zoom et en même position, se décalent l'une de l'autre si un changement de la période et/ou l'année de l'image est effectuée ([Agabi et Benbrahem, 2018](#)),
- L'angle de prise de vue dusatellite diffère d'une zone à une autre et d'une période à une autre, ce qui provoque des déformations (distorsions spatiales) dans l'image. Ceci induit à la considération d'une marge d'erreur lors du traitement de ces données qui est de +/- 5 mètres ([Kermani, 2016](#)).
- **Autres considérations sur terrain**

De plus, une vérification du terrain du profil de la falaise reste indispensable lors de la considération de la limite supérieure ou inférieure comme indicateur de trait de côte. En effet, dans le cas des profils inversés : *projection verticale de la limite supérieure devance celle de la limite inférieure*, fréquemment observée lors du processus d'érosion des falaises. Une prise

de vue verticale du satellite peut induire l'opérateur en erreur lors du tracé de la ligne de rivage.

Enfin, l'existence de plages en poche, dont la présence est surtout saisonnière et qui définissent par moments des zones d'accrétions considérées lors de l'étude, peuvent aussi représenter une source d'erreur sur le constat d'évolution des falaises, notamment dans les représentations graphiques des statistiques calculées.

4.4.7 Résultats et discussion

Le linéaire côtier de la zone de Zerzouria (Ain Taya) est une zone à falaises décrite par (Bouakline, 2009) comme une côte dont le caractère morphodynamique est réflectif.

Une analyse diachronique de l'évolution du trait de côte a été effectuée sur trois périodes distinctes 1959-1980, 1980-2003 et 2003-2017.

4.4.7.1 Période allant de 1959 à 2018

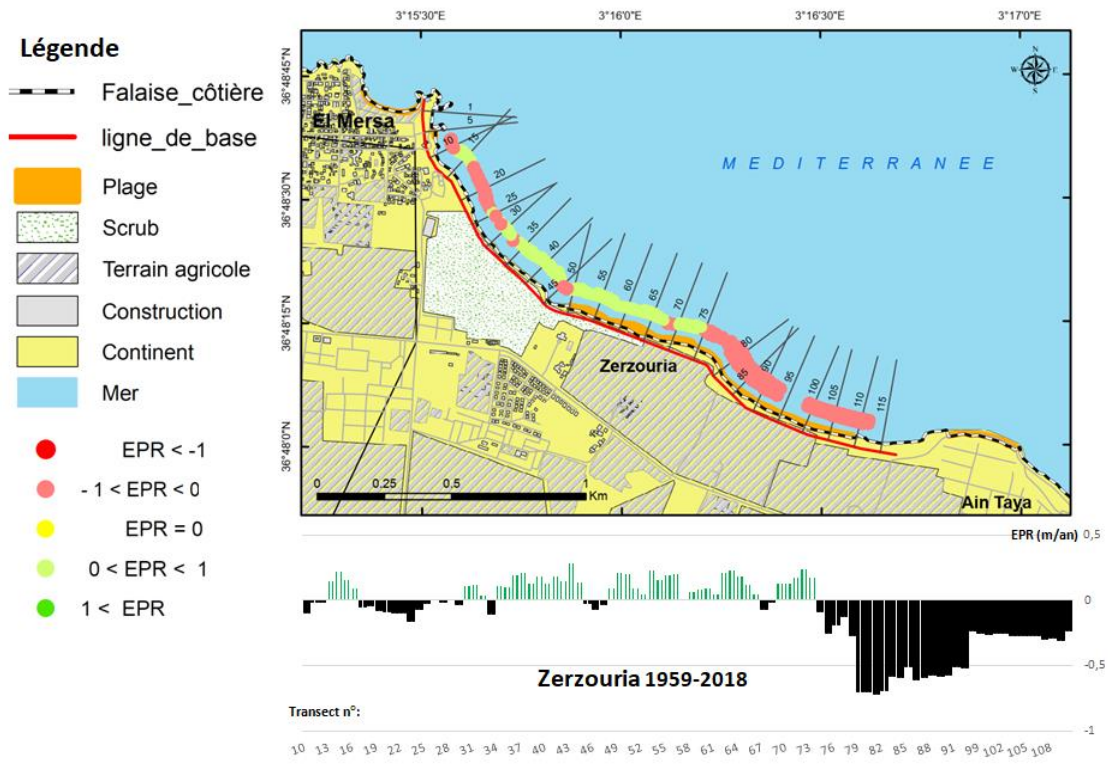


Figure IV-66 : Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-2018 sur les falaises de Zerzouria.

Pour cette période l'EPR global est de - 0.08 m/an. Cette valeur montre que la zone suit le schéma classique d'évolution des falaises (forme vouée au recul). Toutefois, l'observation sur les transects (75 à 106) indique qu'une érosion très importante est en train de se produire sur cette partie (Figure IV-65). L'investigation sur terrain a confirmé cette observation qui semble être amplifiée par la lithologie très fragile.

La zone a beaucoup perdu de ses terres sur la période globale. Approximativement 42m (NSM_{max}) ont été érodés avec une vitesse (EPR_{max}) qui avoisinait parfois 0.71 m/an.

Le facteur hydrodynamique semble jouer un rôle très important à travers les attaques marines notamment en période de tempêtes, où souvent l'orientation des falaises est pénalisante.

4.4.7.2 Période allant de 1959 à 1980

Pour cette période, l'EPR moyen est de + 0.03 m/an et le NSM global de + 0.67 m. En cette zone présente une évolution stabilisée par la présence de plages en poches qui confèrent un échange sédimentaire avec la dynamique de la zone sans avoir recours à l'érosion des parois des falaises (Figure IV-67). Ceci n'exclut pas des formes d'érosion marquantes (5 mètres perdus au niveau des transects 90-95).

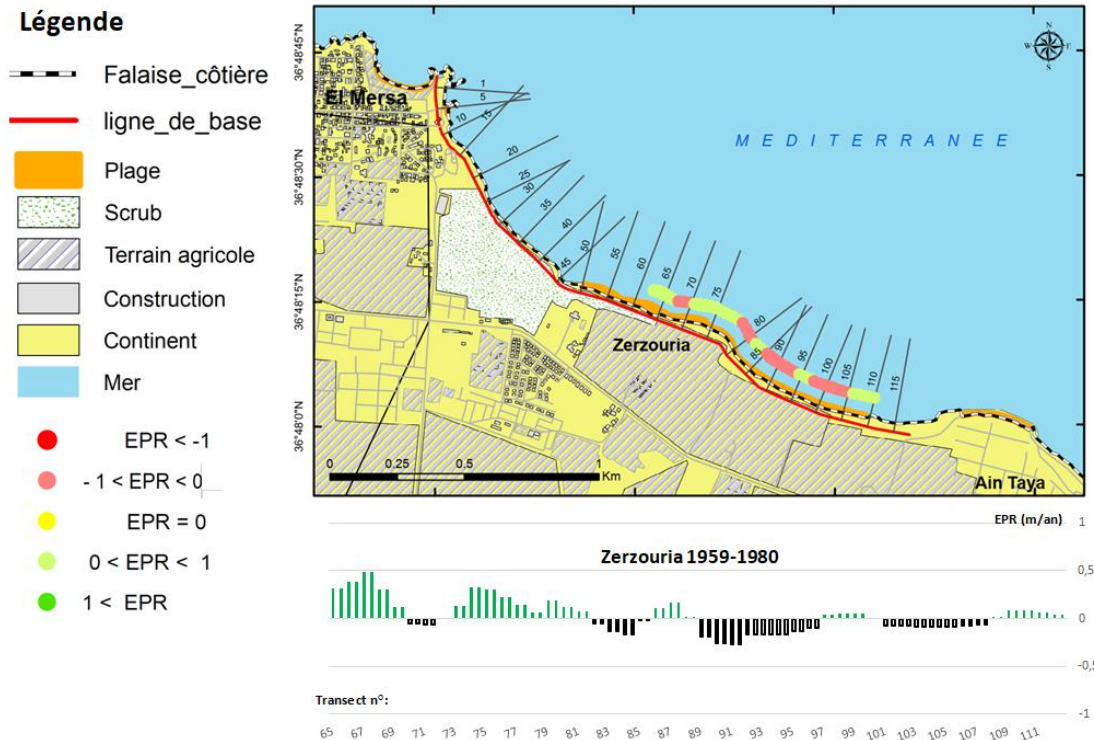


Figure IV-67 : Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1959-1980 sur les falaises de Zerzouria..

4.4.7.3 Période allant de 1980 à 2003

Globalement, l'EPR et le NSM sont positifs (respectivement + 0.25 m/an et + 5.86 m), ces valeurs témoignent de la forte accrétion que la zone connaît en cette période (Figure IV-68). Parallèlement et durant la même période, les zones adjacentes à Zerzouria (Surcouf, Tarfaia et El Kadousse) connaissent une très forte érosion. L'hypothèse de l'intervention de la dérive littorale dans le transport de sédiment de ces secteurs vers Zerzouria n'est pas exclue.

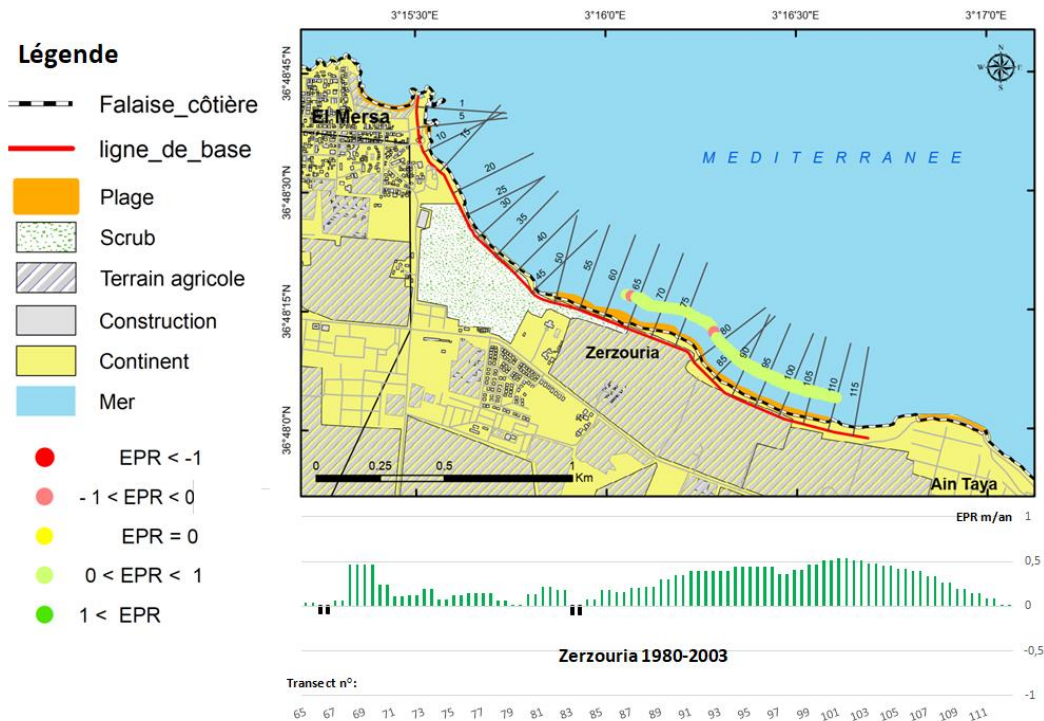


Figure IV-68 : Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 1980-2003 sur les falaises de Zerzouria.

4.4.7.4 Période allant de 2003 à 2017

L'EPR moyen pour cette période affiche une valeur de -0.81 m/an et le NSM est de -11.61 m. Cette évolution négative, très rapide, semble être installée dès la mise en place des ouvrages de protection au niveau de Surcouf (Figure IV-69). L'expansion de l'urbanisation a induit l'augmentation des enjeux et avec cela, le besoin de protéger les biens installés sur la zone côtière, comme cela a été le cas, suite aux épisodes de tempêtes de 2007.

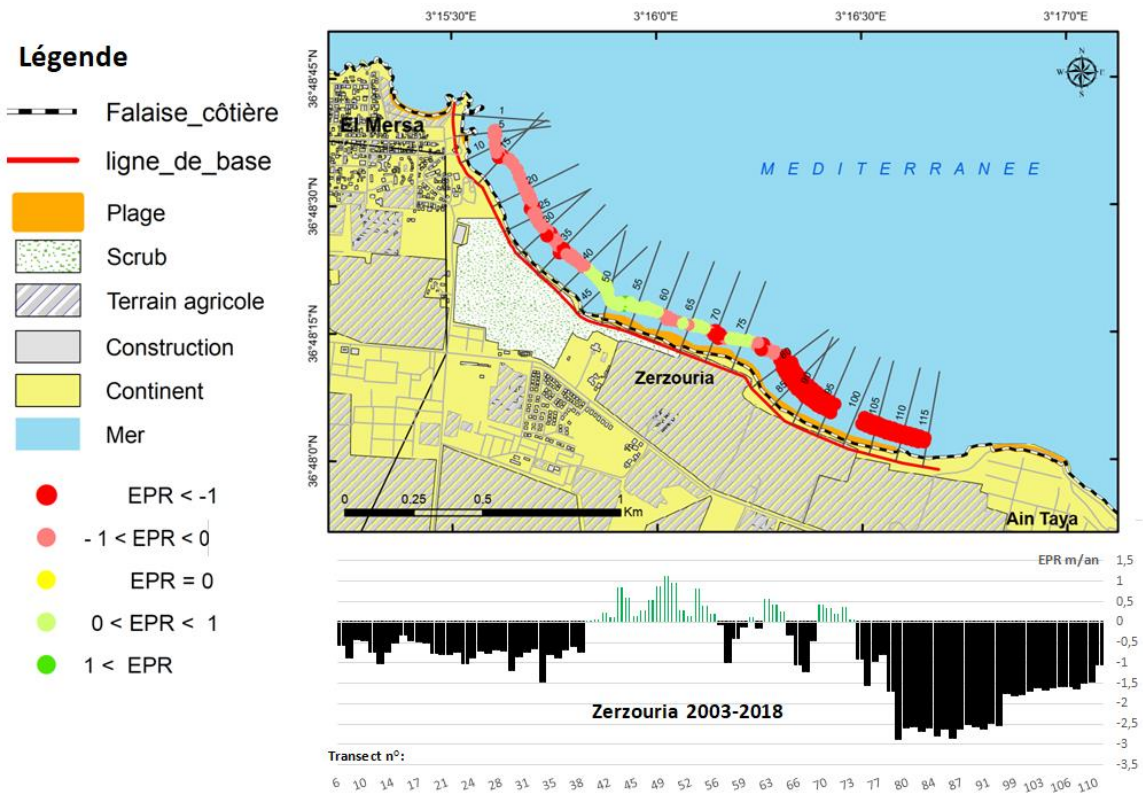


Figure IV-69 : Cinématique du trait de côte et cartographie de l'érosion côtière dans la période de 2003-2017 sur les falaises de Zerzouria.

4.4.7.5 Discussion des résultats

L'analyse de l'évolution des falaises de Zerzouria a permis de constater une forte liaison entre leur dynamique et celle de la région de façon générale. En effet, la tendance évolutive du littoral est en récession pour la période d'étude, ceci se traduit par les pertes énormes des terrains comme le montre le tableau IV-13.

Tableau IV-13 : Bilan surfacique des surfaces perdues au niveau des falaises de Zerzouria.

					Bilan surfacique		
Zerzouria		Min	Moy	Max	Gain	Perde	Bilan
1959-1980	EPR	-0,27	0,03	0,49	995	-1016,6	-21,6
	NSM	-5,61	0,67	10,38			
1980-2003	EPR	-0,09	0,25	0,54	5693,2	-77,4	5615,8
	NSM	-2,13	5,85	12,46			
2003-2018	EPR	-2,85	-0,81	1,14	2996,2	-25989,4	-22993,2
	NSM	-10,74	-11,61	16,36			
1959-2018	EPR	-0,71	-0,08	0,28	7027,2	-16076,4	-9049,2
	NSM	-41,32	-4,71	16,4			

Les falaises de Zerzouria semblent présenter une évolution stable dans le passé. Conformément au schéma classique de la dynamique sédimentaire, la formation des plages aux pieds des falaises marines représente une forme naturelle de protection. Toutefois, la rapidité du phénomène érosif des falaises, indique l'existence de facteurs déterminants. Les investigations sur le terrain ont permis de confirmer certains d'entre eux ;

- Sur le plan naturel, l'activité hydrodynamique est très active et se manifeste par de violentes attaques marines, particulièrement en période de tempêtes, comme l'indiquent les enregistrements de l'ONM.
- La configuration géomorphologique de la zone, où se combinent à la fois un caractère morphologique réfléchive dû à la bathymétrie accidentée, une orientation pénalisante qui expose les falaises aux vagues les plus énergétiques.
- Une lithologie peu résistante (quaternaire), qui encore, est plus fragilisée par la présence de sources d'eau naturelles.
- L'activité anthropique agit sur le bilan sédimentaire et les échanges entre Zerzouria et les plages adjacentes. En effet, l'absence d'ouvrages ou de formes de protection consistantes a longtemps permis d'éviter toute perturbation dans la dynamique sédimentaire de ce secteur. L'installation des ouvrages de Surcouf a eu un sérieux impact sur le secteur de façon générale et sur les falaises de Zerzouria de façon très particulière. La réduction des apports de l'Oued Réghaia à travers les aménagements au point de contact lac-oued et le

décalage de son embouchure semblent aussi avoir un impact sur ces falaises, même s'il reste indirect.

4.4.8 Conclusion

Ce travail a permis l'identification et l'élaboration d'un diagnostic du système côtier « falaises » de la zone algéroise, il a permis de comprendre que leur évolution est régie non seulement par le forçage hydrodynamique mais aussi par la perturbation des flux sédimentaires engendrée par les interventions anthropiques dans la zone.

La comparaison, sous un volet de vulnérabilité, de la composition géologique et configuration géomorphologique des zones à falaises dans la région d'Alger ; a pu apporter des explications sur la variation de la ligne rivage. La méthodologie du DGPS bien que très précise ne semble pas la plus adéquate pour les investigations dans ce genre de systèmes, l'imagerie satellitaire, le lidar et même les drones semblent être de meilleures options pour les falaises hautes ou vives.

Les résultats de ce travail ouvrent des perspectives pour mener des recherches poussées sur les falaises de la zone algéroise. L'atteinte de cet objectif passe par l'actualisation des données du réseau du suivi de trait de côte avec des outils précis. Une orientation vers un contexte d'études de GIZC (Gestion Intégrée des Zones Côtières), s'avère indispensable, l'exemple de l'occupation anarchique des falaises d'Alger ou même la perte de terre à Ain Taya peut être économiquement évaluée. L'arrière-pays de la zone de Zerzouria est essentiellement à vocation agricole à rentabilité annuelle, le bilan des pertes économiques est donc actualisable.

4.5 Cas d'étude N°04 : Evaluation de la vulnérabilité côtière de la région Est d'Alger

4.5.1 Introduction

La zone côtière est un espace complexe de par ses composantes et les facteurs qui régissent son évolution.

La conjugaison des forts aléas littoraux et des enjeux naturels et socio-économiques concentrés sur un espace réduit crée une grande vulnérabilité. Ceci constitue un sérieux déficit de gestion pour le milieu côtier, ses ressources et les activités qui s'y pratiquent.

En effet, la vulnérabilité est spécifique à un emplacement, à un secteur ou à un groupe donné et dépend de ses caractéristiques physiques et socio-économiques (Hinkel et Klein, 2007). Elle est dynamique car l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation varient selon le temps par stimulus et dépendent de plusieurs aspects (écologiques, socio-économiques, politiques et technologiques) (ETC-ACC, 2010b). Dans cette perspective, les évaluations nécessitent divers outils à différentes échelles spatio-temporelles, dans différentes régions et pour différents objectifs politiques (ETC-ACC, 2010b in ETC-ACC, 2011).

4.5.2 Définitions du concept de la vulnérabilité

La vulnérabilité est une fonction de facteurs conjoncturels (aléas) et structurels déterminés par les contextes socio-économiques, culturels, fonctionnels et institutionnels d'un lieu et d'une époque. Elle peut alors être appréhendée selon quatre composantes principales : les aléas (érosion, submersion), les enjeux (valeur humaine, économique ou environnementale), les politiques et mesures de gestion (prise en charge) et la perception du risque par les sociétés exposées (Dauphiné, 2001).

4.5.2.1 Les aléas

L'aléa est défini par un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité donnée (CETMEF, 2009). Il peut être naturel mais aussi d'origine humaine. Comme il doit être défini par une intensité, une occurrence spatiale et temporelle.

4.5.2.2 Les risques

Événement dommageable doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa survenant dans un milieu vulnérable (Bourrelier, 1997).

On peut définir un risque par l'équation suivante : $\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Enjeux}$ (Dreal, 2010 in Heurtefeux et al., 2012).

4.5.2.3 Les enjeux

Les enjeux sont les « personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. » susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (MEDDTL, 2010 ; Safege secrotrap, 2009 in Heurtefeux et al., 2012).

4.5.2.4 Exposition, Résistance et Résilience d'un système côtier

- La **résistance** est la capacité à résister face à un événement non souhaité
- L'**exposition** est la probabilité de subir des pertes dues à un risque.
- La **résilience** est la capacité à récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un événement non souhaité (Dauphiné, 2001).

La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (Bougherira et Kliel, 2016).

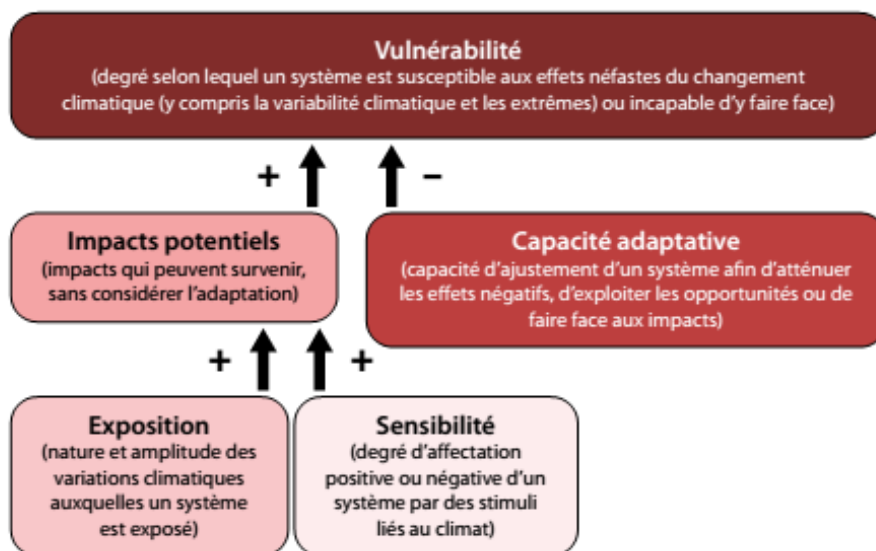


Figure IV-70 : Composantes de la vulnérabilité suivant les définitions du GIEC. Les signes sous les flèches signifient qu'une forte exposition, une forte sensibilité et une faible capacité adaptative induisent une forte vulnérabilité (McCarthy et al., 2001 in CIFOR, 2013).

La vulnérabilité est considérée comme une fonction dont les variables sont : l'exposition (E), la sensibilité (S) et la capacité adaptative (CA) (Figure IV-70). Cette définition, qui s'applique aussi bien à la vulnérabilité biophysique que sociale, sert aussi à analyser les indices représentant la vulnérabilité des sociétés, parfois en lien avec celles des écosystèmes.

4.5.3 Méthode d'évaluation de la vulnérabilité côtière

L'évaluation de la vulnérabilité est un processus d'estimation, pour une zone donnée, de la probabilité d'occurrence d'un phénomène potentiellement désastreux d'une amplitude et d'une période donnée (Marc, 2016). La sélection d'une échelle de travail adaptée et la disponibilité de la donnée sont des étapes déterminantes pour l'analyse. Diverses méthodologies ont été élaborées pour évaluer la vulnérabilité des zones côtières aux risques environnementaux. La plupart de ces méthodes reconnaissent la nécessité d'intégrer les aspects humains (Siva Sankaria et al., 2015), mais peu ont été en mesure de le faire (McLaughlin et al., 2002 ; McLaughlin et Cooper, 2010). Pour cartographier la vulnérabilité, plusieurs approches existent au niveau international, soit à l'aide d'indices simples ou bien d'approches intégrées au niveau local / régional tout en essayant d'incorporer l'aspect socio-économique. (Rabehi et al., 2018) a élaboré une synthèse des différentes approches existantes (Tableau IV-14).

Tableau IV-14 : Comparaison entre indices de vulnérabilité côtière.

Indice de vulnérabilité	Échelle	Critiques
CVI selon Gornitz	Local-national	Ne tient pas compte de l'aspect socio-économique (Mukhopadhyay et al., 2012)
CVI selon McLaughlin and Cooper	Local-national	La pondération des paramètres socio-économiques varie en fonction du niveau d'expertise locale (Baron, 2011)
CM (Common methodology)	National International	Difficulté de se procurer certaines données (Capacité budgétaire de réaction à la vulnérabilité par exemple (Klein et Nicholls, 1999).
CSoVI (coastal social vulnerability index)	National	Données socio-économiques pointues (pauvreté, ethnie, développement...) (Boruff et al., 2005).
SURVAS (Synthesis and Upscaling of Sea-level Rise)	National International	Créé pour des grandes échelles (Nicholls et De la Vega-Leinert, 2000)

Indice de vulnérabilité	Échelle	Critiques
Vulnerability assessment study.		
DIVA	Local National, International	Vulnérabilité au niveau de segment, nécessité de données très fines (Vafeidis et al., 2004)
CCHZ	Local	Modèle probabiliste nécessité de données géo-climatiques pointues ; récurrence de tempête, Bilan sédimentaire par plage...etc. (Baron, 2011)

4.5.3.1 L'indice de vulnérabilité côtière (IVC)

L'indice de vulnérabilité côtière (IVC) est une base de données constituée de plusieurs variables. Il vise à présenter l'information dans une forme simple, utile et compréhensible pour les gestionnaires. Cet indice a été développé à l'origine par Gornitz (1990-1994) pour évaluer les risques d'élévation du niveau de la mer dans la côte Est des Etats-Unis (Gornitzi et al., 1991). Cet indice a été amélioré (ajout des facteurs socio-économiques) et adapté aux caractéristiques des zones étudiées et à la disponibilité des données sur les paramètres impliqués dans la vulnérabilité. Plusieurs améliorations (Figure IV-71) de l'indice de vulnérabilité côtière ont été réalisées (McLaughlin et al., 2002 ; Hammar-Klose et al., 2003 ; Toro et al., 2012 ; Mani Murali et al., 2013).

L'évaluation de la vulnérabilité côtière à l'aide de l'IVC est rare, principalement en raison de l'absence de données de base composant cet indice. La principale application académique de l'IVC en Algérie était une approche physique appliquée à Alger en 2014 par (Mihoubi et al., 2014), qui ont produit un IVC selon la formule de Gornitz et White (Gornitz et al., 1994). Cet IVC ne prend malheureusement pas en compte les paramètres socio-économiques. L'application de la formule selon (McLaughlin et Cooper, 2010) en 2018 par (Rabehi et al., 2018) est venue compléter la première application et démontre que l'IVC peut évoluer dans le temps ou varier en fonction des facteurs de calcul et surtout la qualité de la donnée employée.

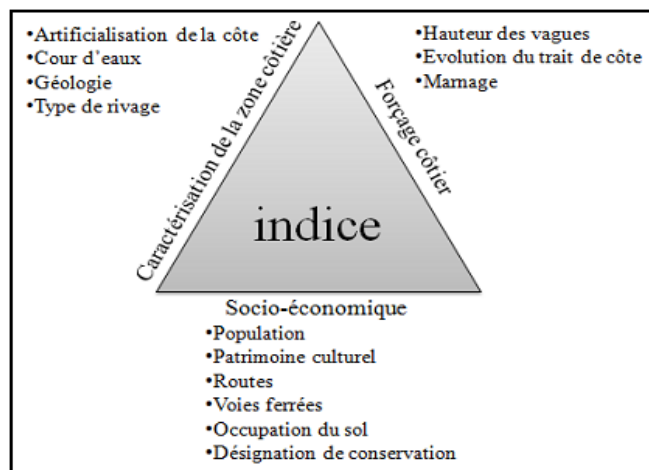


Figure IV-71 : Présentation schématique de la méthode de IVC élaborée par (McLaughlin et Cooper 2001).

Ce cas d'étude traite de l'état de la vulnérabilité de la région Est algéroise par rapport aux facteurs physiques, puis socioéconomiques. Le choix de l'évaluation séparée, émane de la comparaison de la qualité des données physiques générées lors de cette thèse et jugée plus précise que celles disponibles pour les facteurs de calcul de l'IVC socioéconomique.

Après sélection des indicateurs, une évaluation statistique du degré de fragilité par rapport à chaque variable est établie. Par la suite, des représentations graphiques (cartes de synthèse) qui après élaboration sont injectées dans une base de données SIG afin de permettre le calcul des indices de vulnérabilité (IVC) physiques et socioéconomiques.

4.5.4 Présentation de la zone d'intérêt

La côte étudiée s'étend sur une longueur de 16.2 km, dont une partie Ouest rocheuse et une partie Est sablonneuse (avec alternance des faciès). Cette zone a été sectionnée en raison de :

- Ses potentialités naturelles et variabilité du paysage côtier,
- Risque généré par les facteurs naturels et anthropiques,
- Disponibilité de la donnée requise pour l'évaluation.

4.5.5 Approche méthodologique

4.5.5.1 L'indice de vulnérabilité physique

La méthodologie est basée sur une évaluation de la vulnérabilité à partir du calcul des indices attribués à des variables physiques développées par Gornitz en 1991 et améliorée par

Hammar-Klose et Thieler (2001). Ce choix de méthode est formulé selon la thématique traitée qui s'articule autour du volet « forçage hydrodynamique » et les facteurs physiques qui rendent (ou non) la zone Est d'Alger vulnérable.

Selon (Hammar-Klose et Thieler 2001), préalablement à tout calcul et analyse statistique, une présentation graphique des cellules de calcul est nécessaire accompagné d'un choix optimal de dimensions de ces entités virtuelles.

Les dimensions de la cellule reviennent au choix de l'étude, l'auteur n'impose pas de dimension précise. Cependant, (Mclaughlin et Cooper, 2010) imposent des dimensions en fonction de l'échelle d'étude :

- A l'échelle nationale 500*500m
- A l'échelle régionale 25*25m
- A l'échelle locale 1*1m

Suivant la méthode de (Hammar-Klose et Thieler 2001), le choix de la dimension des cellules est de 200* 200 m (81 cellules), et ce, afin de mieux illustrer la vulnérabilité de notre zone d'étude par rapport aux facteurs physiques.

4.5.5.2 Choix des variables pour le CVI_{physique}

Afin de développer une base de données pour une évaluation, à petite échelle, de la vulnérabilité côtière, des données pertinentes ont été recueillies auprès des fournisseurs des informations géographiques locales et internationales.

Les variables physiques retenues pour le calcul d'indice de vulnérabilité pour ce cas d'étude sont représentées dans le tableau IV-15. Chaque variable est affectée à une valeur de risque relatif en fonction de l'ampleur potentielle de sa contribution à des changements physiques sur la côte.

Tableau IV-15 : Présentation des variables retenues pour le calcul de l'IVC_{physique}.

Variable	Catégorie				
	1	2	3	4	5
	Très faible	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Géomorphologie	Côte rocheuse à falaise haute	Côte à falaise moyenne	Côte à falaise basse	Lagune	côtes deltaïques, marais, cordon
Trait de côte (m/an)	> 2.0	1.0 - 2.0	-1.0 – 1	-2.0 – -1.0	< -2.0
La pente (%)	12	12 - 9	9 – 6	6 - 3	< 3
Le niveau de la mer (mm/an)	< 1.8	1.8 – 2.5	2.5 – 3.0	3.0 – 3.4	> 3.4
Hauteur des vagues (mm)	< 0.55	0.55 – 0.8	0.85 – 1.05	1.05 – 1.25	> 1.25
Le marnage (m)	> 6.0	4.0 – 6.0	2.0 – 4.0	1.0 – 2.0	< 1.0

4.5.5.2.1 Variable géomorphologie

La donnée employée pour l'analyse du degré de vulnérabilité par rapport à la variable « géomorphologie » est issue de la combinaison de plusieurs sources :

- Exploration des images satellitaires de Google Earth (aperçu géomorphologique),
 - Sorties d'observation et de validation sur terrain,
 - Exploitation d'un MNT de la zone d'étude (échelle 1/30000) extrait de la base de données en ligne de l'USGS, ce qui a permis l'élaboration d'une carte topo (Figure IV-72).
- **Secteur 1** : C'est la partie Ouest, elle s'étend de cap Matifou jusqu'à la limite Ouest de Ain Taya. Caractérisée par une géomorphologie de type « falaises » dont la hauteur varie de 10 à 20 m, cette parcelle de la côte est considérée « rocheuse » sur la totalité de son étendu. Ce qui lui procure un caractère très peu vulnérable.

- **Secteur 2** : Il comprend la partie centrale et couvre toute la commune de Ain Taya jusqu'à Surcouf. La topographie est caractérisée par la présence de falaises basses (moins de 10 m de hauteurs), des nappes phréatiques et sources d'eaux naturelles fragilisant ainsi les talus. Ce qui lui procure une vulnérabilité de degré moyen.
- **Secteur 3** : S'étale de la partie centre jusqu'à la limite Est. Il est le plus vulnérable du point de vue géomorphologique, caractérisé par les accumulations dunaires d'El Kadousse (commune de Heraoua) et de plages rectilignes. La topographie est assez basse (0 à 5 m) due à la zone humide de Reghaia, ce qui lui affecte un degré de vulnérabilité très fort.

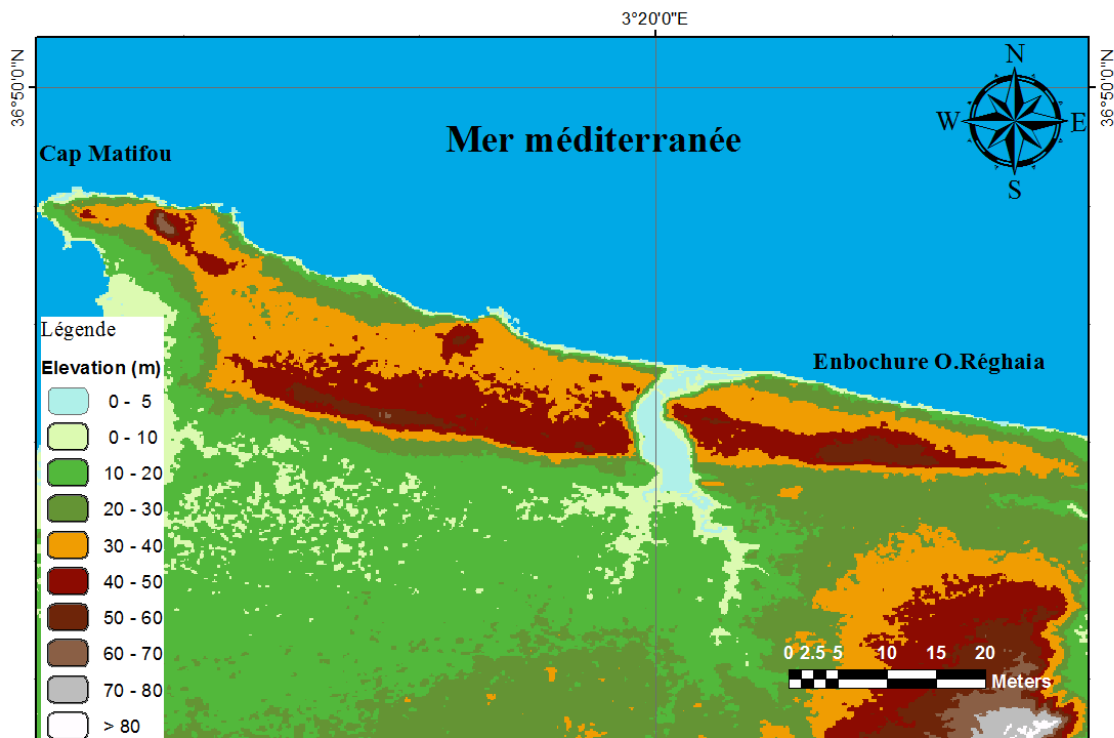


Figure IV-72 Carte topographique de la zone d'étude (USGS, 2016).

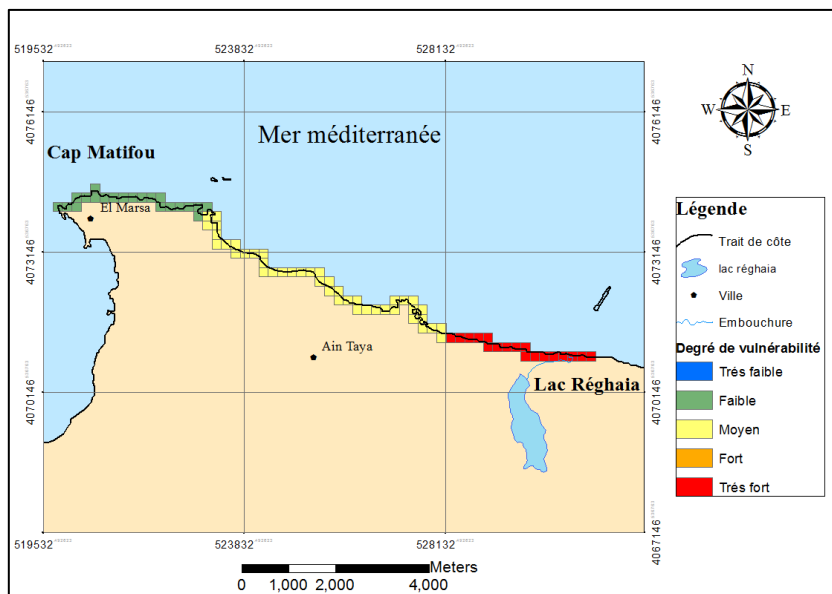


Figure IV-73 : Présentation des degrés de vulnérabilité par rapport à la variable géomorphologie.

4.5.5.2.2 La variable trait de côte

L'analyse et le suivi du trait de côte élaborés lors du chapitre III ont permis le calcul des taux d'érosion et/ou accrétion à travers la mesure de variation de la ligne de rivage durant une période de 59 ans.

Les résultats graphiques illustrés dans la Figure IV-74 montrent que selon les classes élaborées par Hammar-Klose et Thieler (2001), la zone présente une vulnérabilité moyenne par rapport à l'érosion (taux nets compris entre 1 et -1 m/an) avec quelques exceptions à fort degré de vulnérabilité, notamment la plage Surcouf, ou bien des zones à faible degré de vulnérabilité à savoir les plages El Kadouss et Réghaia.

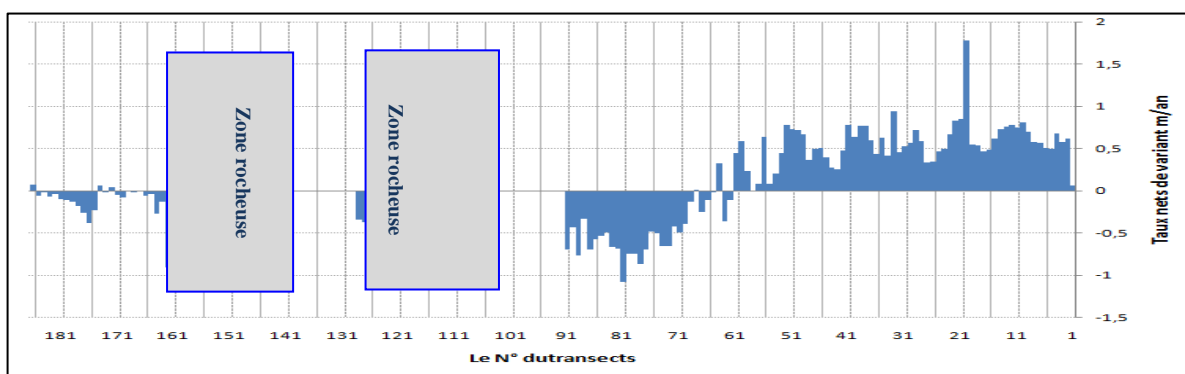


Figure IV-74 : Taux nets de variation du trait de côte de la zone d'étude.

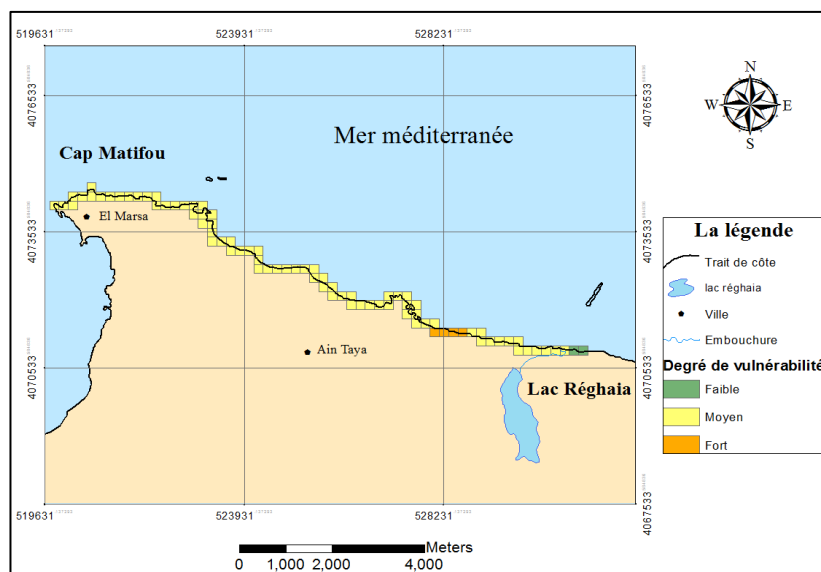


Figure IV-75 : Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable trait de côte.

4.5.5.2.3 La variable pente

La pente permet une évaluation du risque relatif d'inondation ainsi que la régression des rivages. Selon (Pilkey et al., 2014), la pente est inversement liée à la vitesse de recul. Pour la zone d'intérêt, la pente a été calculée via la combinaison de plusieurs sources complémentaires de données (Figure IV-76), à savoir :

- Grille d'élévations topographiques, issues du traitement du MNT (USGS) de la zone,
- Grille bathymétrique (chapitre II).

La représentation du degré de vulnérabilité en rapport avec la variable pente (Figure IV-77) concorde avec celle de la variable géomorphologie. Trois secteurs sont repartis pareillement :

- **Le secteur 1** : Les hautes falaises permettent un dénivellement important de la pente (entre 9 et 12%), un faible degré de vulnérabilité lui est donc affecté.
- **Le secteur 2** : il est caractérisé par un dénivellement maximal de 8.6% sur les pentes locales, ce qui procure un degré de vulnérabilité moyen à ce secteur.
- **Le secteur 3** : Le degré de vulnérabilité est fort, avec des pentes de 0 à 3% notamment dans la partie de la zone humide.

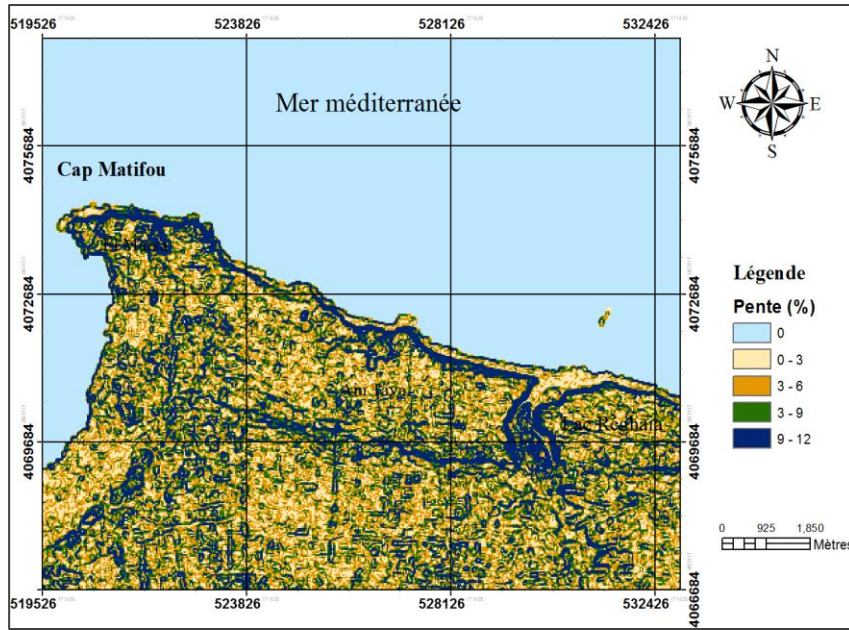


Figure IV-76 : Dénivellation des pentes (%) dans la zone d'étude.

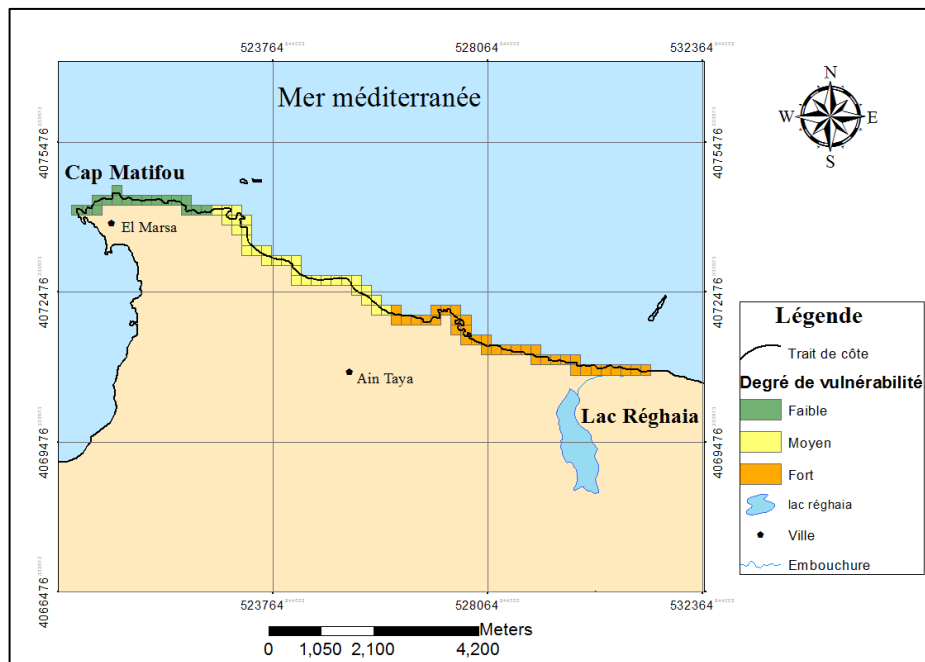


Figure IV-77 : Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable pente.

4.5.5.2.4 La variable niveau de la mer

La Méditerranée connaît une élévation du niveau de ses eaux estimée de 7 à 12 cm (Gualdi et al., 2013). Selon la (GIEC, 2015), des hausses plus importantes sont prévues en Méditerranée d'ici 2050, particulièrement sur les côtes Est et Sud. Des données marégraphiques issues de stations installées le long de la côte méditerranéenne indiquent un taux d'élévation actuel d'environ $1,5 \pm 0,4$ mm/an selon l'étude de (Jouzel et al., 2012). Cette valeur correspond à une vulnérabilité très faible pour la variable niveau de la mer (selon les intervalles de Hammar et al., 2012) (Figure IV-78).

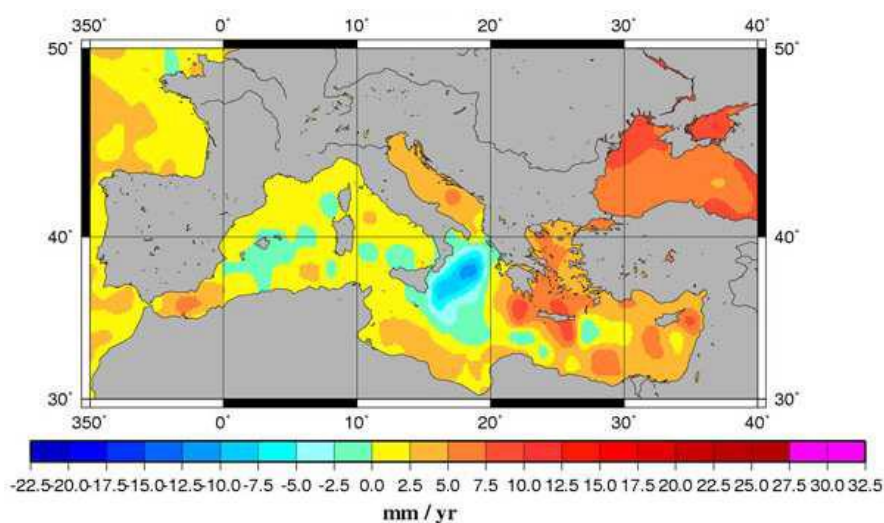


Figure IV-77 : Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2011, (Planton et al., 2012).

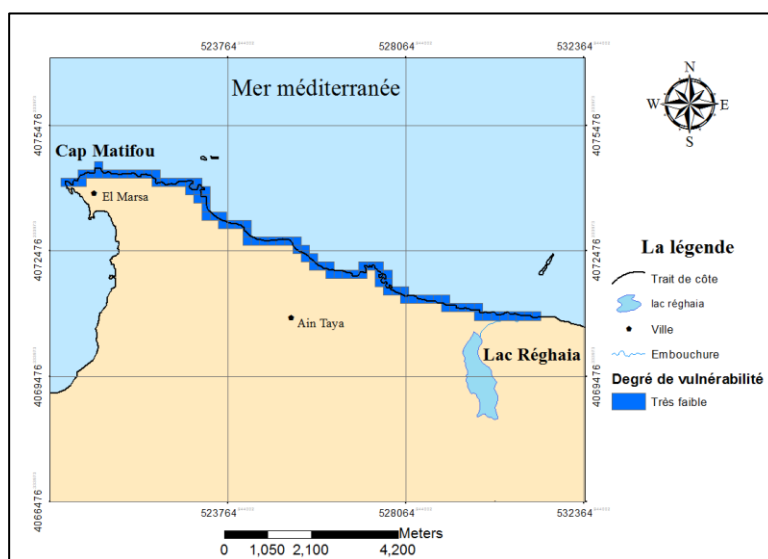


Figure IV-78 : Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable élévation du niveau de la mer.

4.5.5.2.5 Variable hauteur significative des vagues à la côte (Hs)

Les valeurs de simulations de la direction N 45° (la plus défavorable à la zone d'intérêt), effectuées lors du chapitre II, ont été projetées et comparées à la grille de cotation élaborée par Hammar-Klose et Thieler (2001) (Figure IV-79). Ceci a pour objectif de parvenir à une classification du degré de vulnérabilité par rapport à la variable « hauteurs significatives ».

La figure IV-78 révèle des différentes classes de degré de vulnérabilité lié à la variable Hs à la côte. Il est constaté que :

- Le secteur 1 (El Marsa – Les Flots bleus) est caractérisé par des plages réfléchives (Bouakline, 2009), le degré de vulnérabilité retenu est donc très fort ;
- Les secteurs abrités, naturellement ou artificiellement (promontoires ou ouvrages de protection), sont marqués par un très faible degré de vulnérabilité ;
- Le secteur 3 présente un degré de vulnérabilité variable très faible à moyen au niveau des plages El Kadouss et Réghaia dû à leur caractère dissipatif.

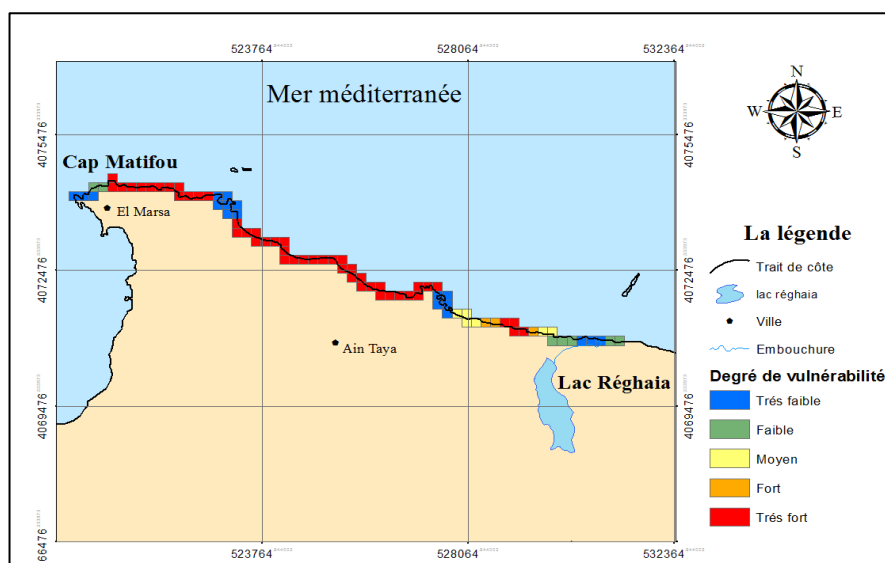


Figure IV-79 : Hauteurs significatives des houles de provenance N45°.

4.5.5.2.6 La variable marnage

Les côtes microtidales sont les plus vulnérables (voir chapitre I- partie 1). Les estrans étroits sont sujets à de fortes érosions et une submersion lors des importantes agitations marines dans le cas des régimes à faibles marées. Tandis que les côtes macrotidales sont souvent associées à un large estran où l'énergie des vagues peut être dissipée (Gornitz, 1991). La zone d'intérêt

pour ce cas d'étude, comprise dans la côte algéroise classée « microtidale », est placée dans la catégorie très vulnérable par rapport à la variable marnage (Figure IV-80).

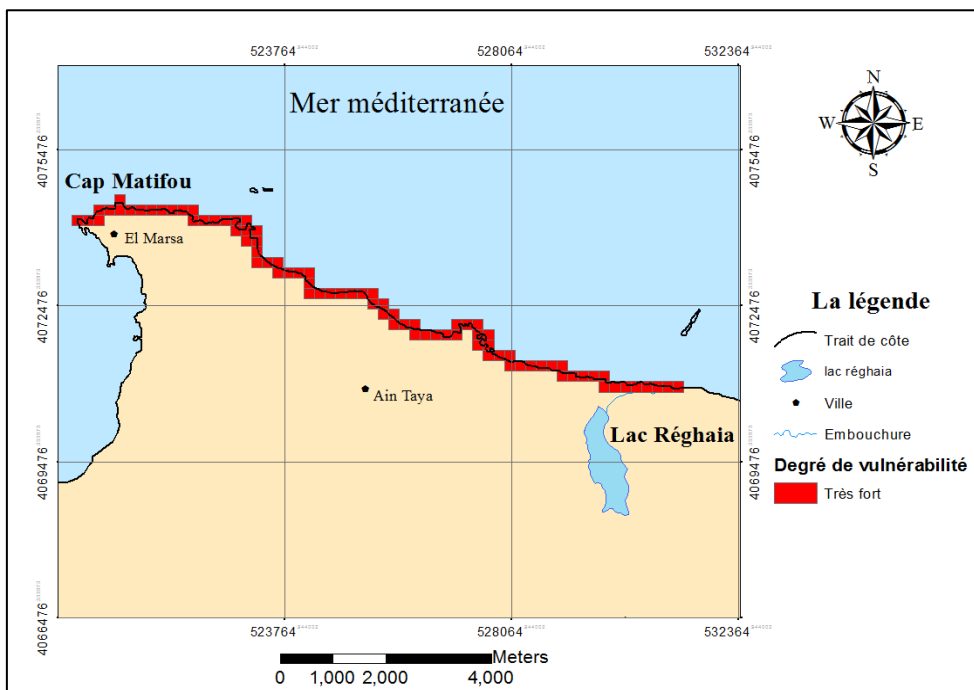


Figure IV-80 : Degrés de vulnérabilité par rapport à la variable marnage.

4.5.5.3 Calcul d'indice de vulnérabilité côtière CVI physique

L'affectation des cotations permet d'évaluer quantitativement la vulnérabilité pour les 6 variables physiques pour chaque cellule. La formule de Gornitz est employée pour calculer l'indice de vulnérabilité côtière des sections en fonction de toutes les variables (Marc, 2016) :

$$IVC = CVI = \sqrt[2]{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

- a = géomorphologie;
- b = Taux de changement de la côte;
- c = pente
- d = élévation relative du niveau de la mer ;
- e = hauteur moyenne des vagues;
- f = moyenne de la marée

Les IVC calculés sont classés dans des intervalles égaux afin de leurs donner des niveaux de vulnérabilité. Le tableau IV-16 montre les différentes classes d'IVC issues du traitement statistique, leurs intensités de vulnérabilité ainsi que leurs étendues en linéaire côtier (m).

Tableau IV-16 : Résultats du traitement statistique du IVC physique.

IVC	Intensité de la vulnérabilité	Nombre des cellules	Equivalent en linéaire côtier (m)	Pourcentage de la côte (%)
0 - 7	Faible	16	3200	19.75
7 – 11	Modérée	48	9600	59.25
11- 15	Forte	11	2200	13.58
15 - 19	Très forte	6	1200	07.40

La carte de synthèse de la vulnérabilité côtière de la zone étudiée (Figure IV-81) révèle que 60% du linéaire est caractérisé par une vulnérabilité modérée. Un faible IVC est enregistré sur 20% du linéaire, Les secteurs correspondants sont les falaises d'El Marsa à l'Ouest de la zone, les larges plages de Réghaia ainsi que la partie protégée des Flots-bleus.

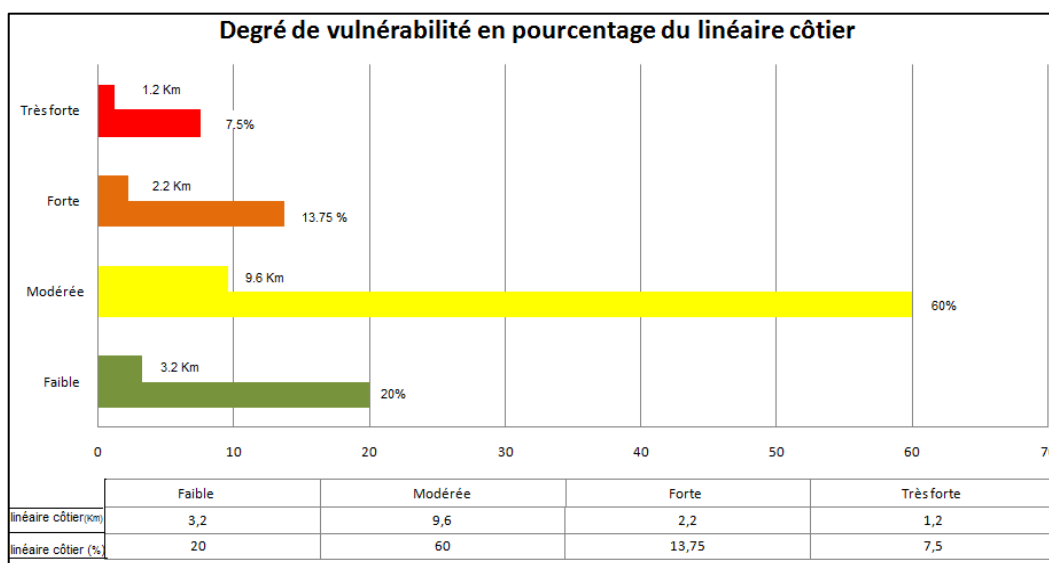


Figure IV-81 : Degré de vulnérabilité en termes de pourcentage du linéaire côtier.

Par ailleurs, 7.5 % du linéaire côtier présente un très fort degré de vulnérabilité, ce qui concorde avec les observations de terrain. En effet, la plage Hay Echouhada, à qui cette partie de la côte correspond, a connu une très forte érosion récente.

Un fort degré de vulnérabilité est enregistré sur 13.57% de la côte étudiée. Le secteur correspond aux plages de la commune de Ain Taya, une zone balnéaire fortement urbanisée et d'importance touristique.

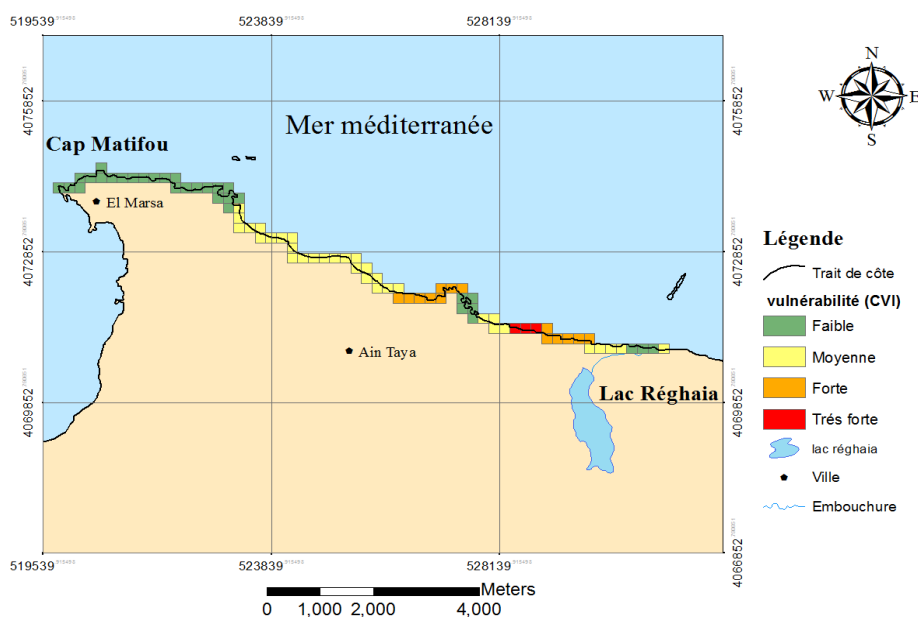


Figure IV-82 : Carte de synthèse représentant le IVC de la zone Est algéroise.

4.5.5.4 Indice de vulnérabilité socio-économique

Les méthodes proposées par McLaughlin et Cooper (2010) consistent à intégrer dans l'indice de vulnérabilité établis par Gornitz (1991) d'autres variables liées aux facteurs socio-économiques. Cet indice impose trois échelles de calcul d'où sa qualification de « multi-échelles ».

L'échelle nationale a été adoptée pour ce cas d'étude avec des cellules (dimensions de secteurs) de taille 500*500 m. Ce choix est fonction de la disponibilité des données et des besoins de l'étude.

4.5.5.5 Choix des variables pour le CVI socio-économique

Une codification des variables retenues (de 1 à 5) est appliquée (Tableau IV-17) afin de définir le degré de vulnérabilité par un système d'addition.

Tableau IV-17 : Variables retenues pour le calcul de l'IVC socio-économique

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

4.5.5.5.1 La variable agglomération

La population algéroise a connu un rythme de croissance très rapide dans la période récente. Selon les différents recensements de la population, la wilaya d'Alger connaît une hausse de la densité de la population due à la croissance démographique accélérée ainsi qu'à la politique d'occupation des sols sur les 57 communes (découpage de 1997) (ACC, 2013).

La zone d'étude comprend quatre entités administratives qui sont : El Marsa, Ain Taya, Heraoua et Réghaia, (Figure IV-83). La croissance et le développement démographique leur procure un statut d'agglomération (Tableau IV-18) selon la loi n° 06-06, portant sur la loi d'orientation de la ville.

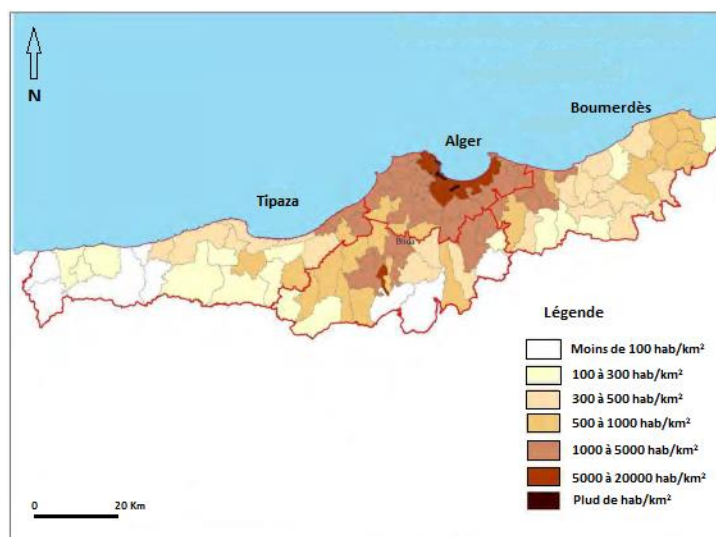


Figure IV-83 : Densités de population des communes de l'aire métropolitaine d'Algier (SDAAM Alger, 2008).

Tableau IV-18 : Population des trois communes dans la zone d'étude (MATE, 2008).

Commune	Population	Densité (Habitant/m ²)
El Marsa	11939.89	3063.12
Ain Taya	33581.53	3462.01
Heraoua	10537.66	2952.34
Réghaia	23550.26	3022.36

Les normes qui régulent l'aménagement du territoire, appliquées à l'échelle nationale, sont adoptées pour classer ces agglomérations. Un degré de 5 a été attribué aux communes objets, correspondant à un niveau très fort de vulnérabilité.

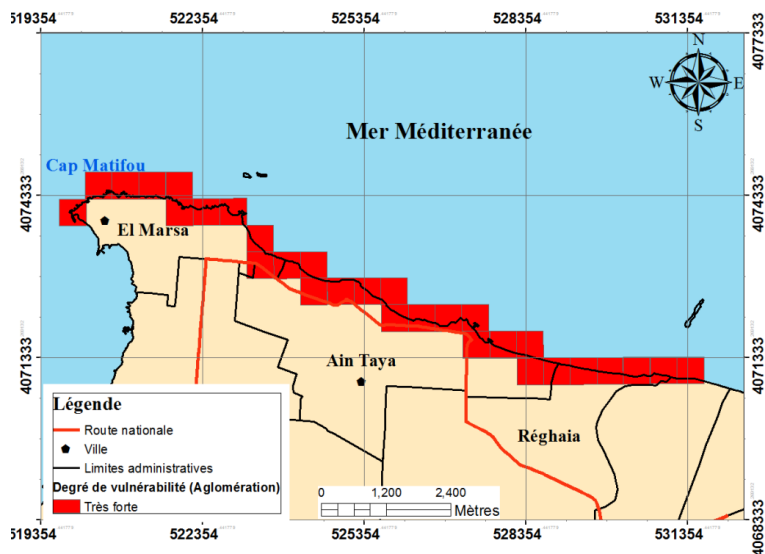


Figure IV-84 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, agglomération.

4.5.5.2 Variables réseau routier et chemin de fer

Le réseau routier ainsi que le réseau de chemin de fer ont été extrait de la base de données géo-spatiale Open Street Map. Pour la première variable, le niveau de densité du réseau routier donne un degré de vulnérabilité moyen (Figure IV-85). Par ailleurs, l'absence d'un chemin de fer dans notre zone d'intérêt lui confère un degré de vulnérabilité très faible pour cette variable (Figure IV-86).

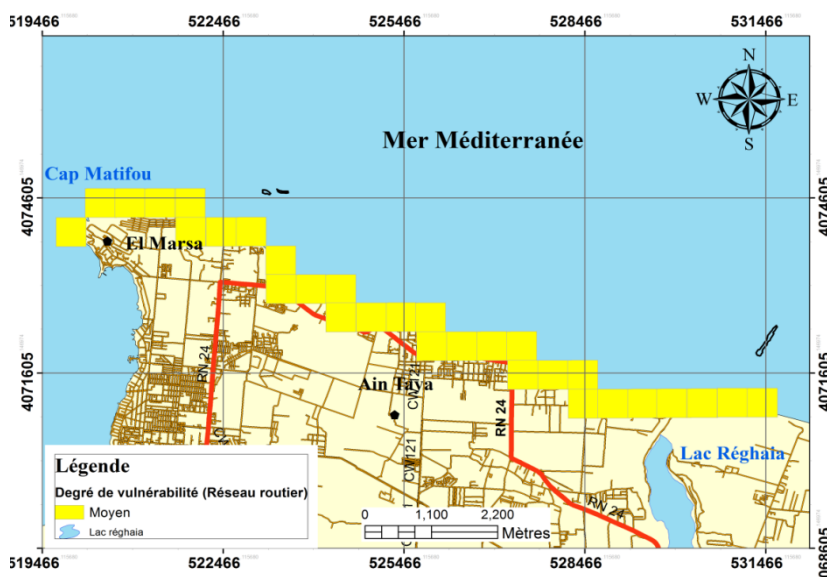


Figure IV-85 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, chemin de fer.

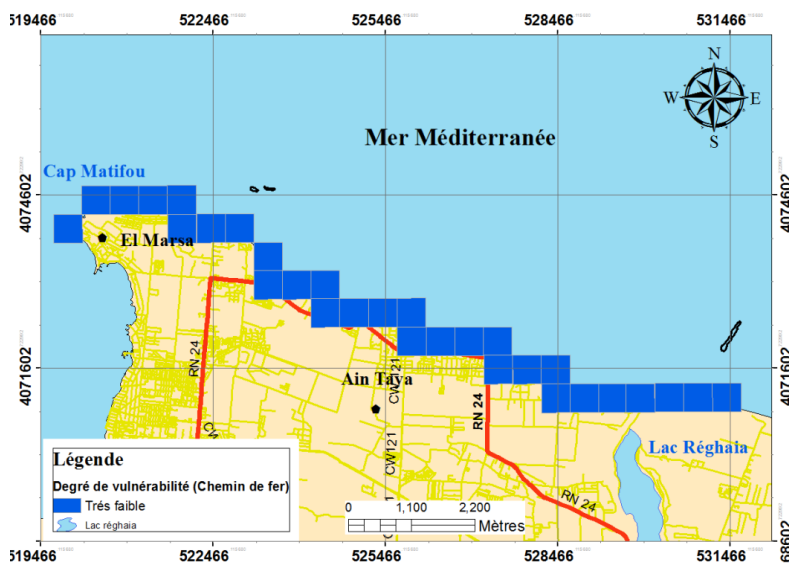


Figure IV-86 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, réseau routier.

4.5.5.3 Variable occupation du sol

La pression démographique soumet la zone à une artificialisation importante des espaces. Afin de cerner cette occupation, les analyses suivantes ont été effectuées :

- Traitement et analyse d'une image satellitaire Landsat (USGS) sur le logiciel ENVI® pour faire sortir le degré d'artificialisation des sols (Figure IV-87),
- Une analyse des informations géo-spatiales issues de la base de données en ligne Open Street Map (Figure IV-88).

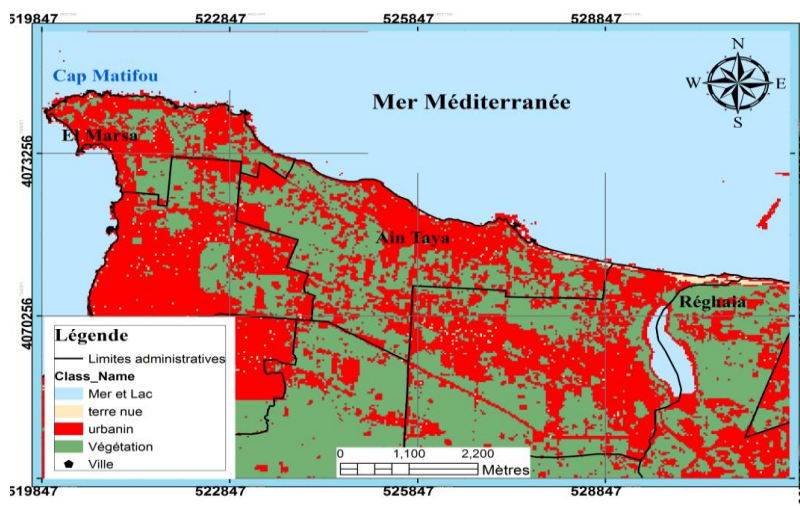


Figure IV-87 : Occupation du sol à partir d'un traitement d'une image satellitaire.

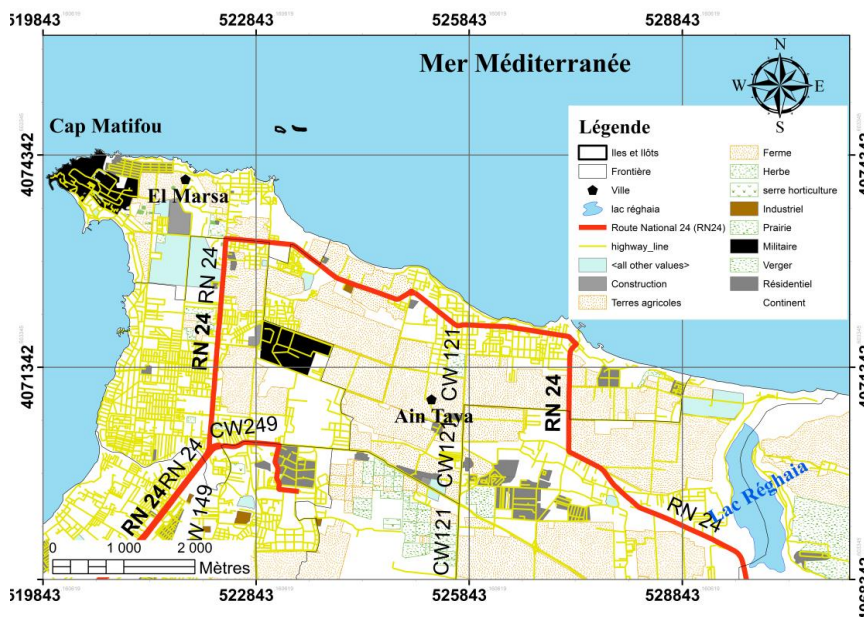


Figure IV-88 : Cadastre et le type d'occupation des sols de la zone d'étude.

La forte urbanisation au niveau des communes d'El Marsa et Ain Taya permet d'attribuer à la zone d'intérêt un degré de vulnérabilité très fort. Bien que, Réghaia et Héraoua soient des communes à vocation agricole.

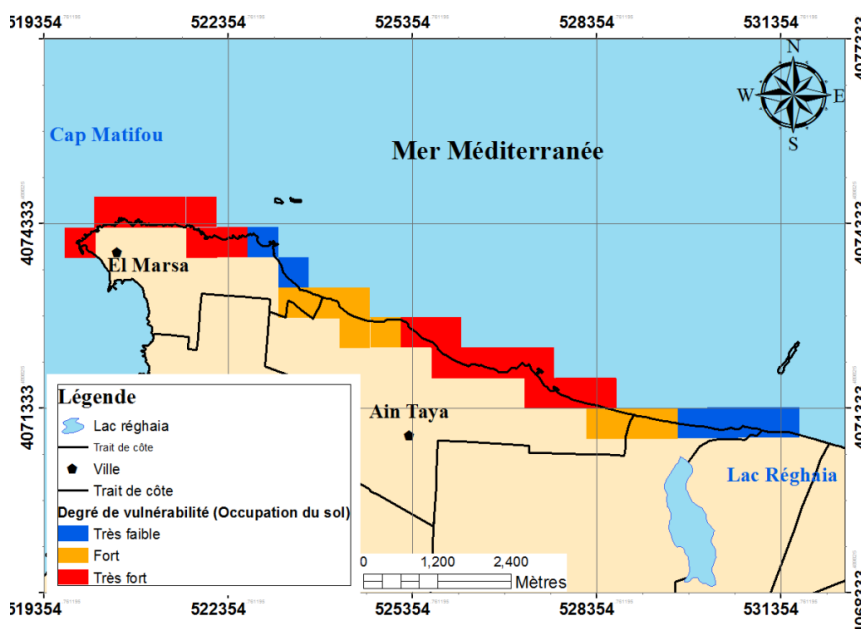


Figure IV-89 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, occupation du sol.

4.5.5.5.4 Héritage culturel

Toute la zone est considérée comme étant vulnérablement faible par rapport à cette variable (Figure IV-89). À l'exception de la partie Ouest, qualifiée de « très vulnérable » (avec un degré de 5) en raison de la présence du "Fort de Tamentfoust" (XVII^e siècle) ainsi que la basilique chrétienne (IV^e siècle) (Figure IV-90).

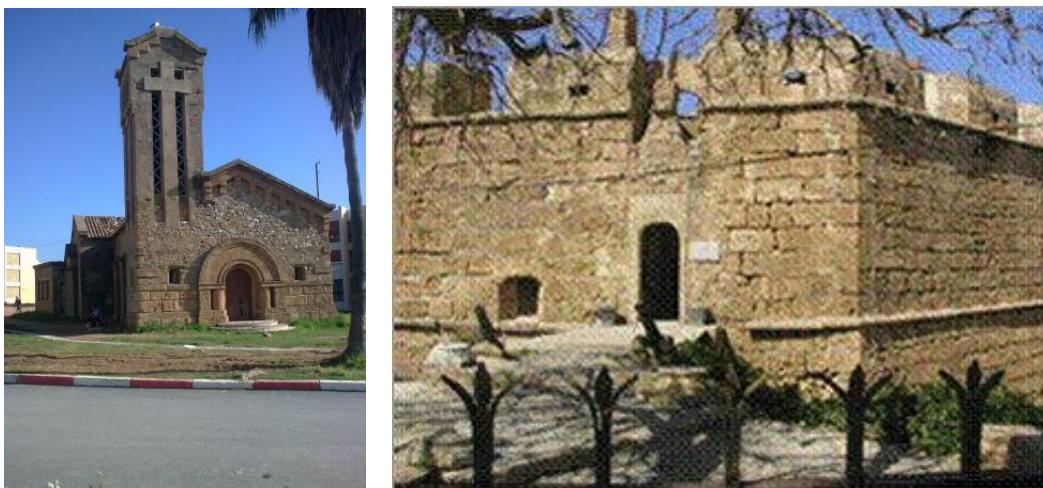


Figure IV-90 : Illustration de l'héritage culturel au niveau de la zone.

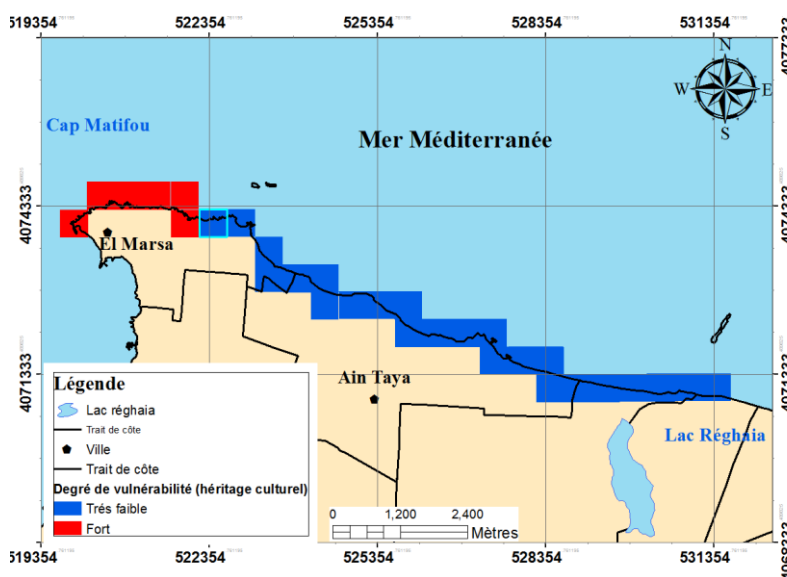


Figure IV-91 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, patrimoine culturel.

4.5.5.5 Statut de protection

La zone humide du lac de Réghaia est classée RAMSAR (Larid, 2008) avec son potentiel écologique international. Le PCR (plan côtier de Réghaia) est élaboré afin de conserver le site menacé par des aménagements défavorables à son fonctionnement naturel. Il vise aussi à conserver les espaces dunaires, les herbiers de l'île Bounettah et la biodiversité qui les occupent et procure à la partie Est de la zone un degré de vulnérabilité moyen (Figure IV-92).

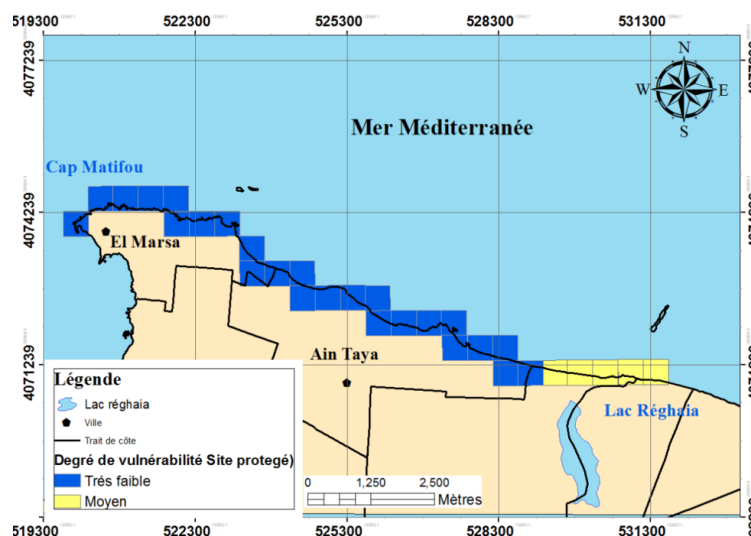


Figure IV-92 : Degré de la vulnérabilité liée à la variable, statut de protection.

4.5.5.6 Calcul de l'indice de vulnérabilité CVI socio-économique

L'IVC socio-économique développé par McLaughlin et Cooper a permis de classer et de qualifier la vulnérabilité côtière de notre zone. La représentation graphique (Figure IV-93) ainsi que la cartographie (Figure IV-94) montrent que plus de 43% de la zone d'intérêt est caractérisée par une faible vulnérabilité liée aux facteurs socio-économiques (Tableau IV-19).

Tableau IV-19 : Présentation des résultats du traitement statistique du IVC socio-économique.

IVC	Intensité	Nombre des cellules	Linéaire de côte (m)	% du linéaire
0 - 2	Faible	14	7000	43.20
2 - 4	Moyen	9	4500	27.77
4 - 6	Fort	0	00	0
6 - 8	Très fort	9	4500	27.77

Une très forte vulnérabilité caractérise la partie Ouest (El Marsa et Surcouf) où la densité de la population et l'occupation des sols fragilisent le secteur. Par ailleurs, une vulnérabilité moyenne est enregistrée sur environ 30% de la côte située essentiellement dans la partie centrale.

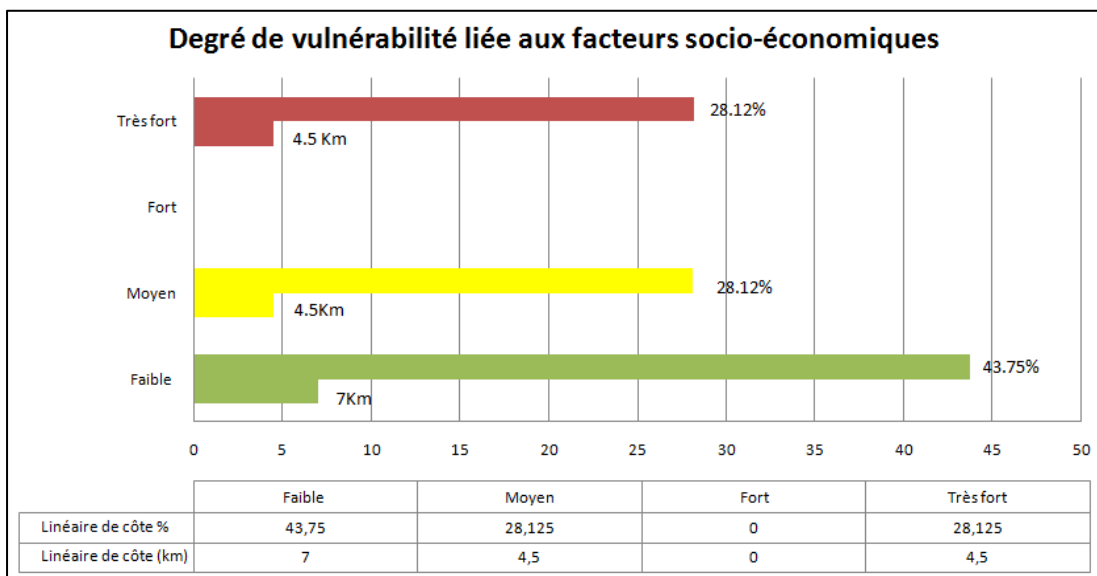


Figure IV-93 : Niveau de vulnérabilité en termes de pourcentage du linéaire côtier.

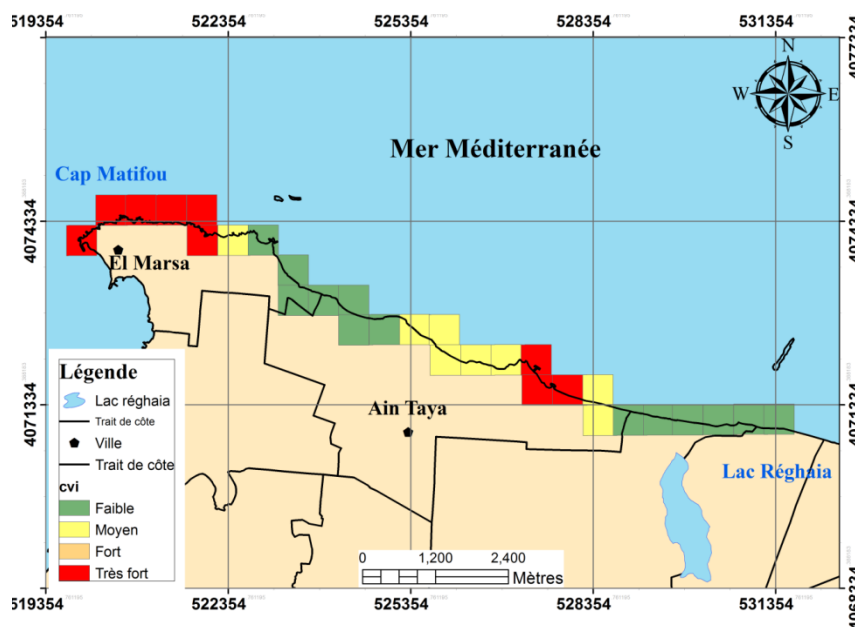


Figure IV-94 : Synthèse représentant le IVC socio-économique de la zone Est-algéroise.

4.5.6 Conclusions

La cartographie de la vulnérabilité via l'application de l'IVC est un processus simple et aisément reproductible à différentes échelles géographiques (Mukhopadhyay et al., 2012).

L'évaluation de l'état de notre zone d'étude à travers le calcul de l'indice de vulnérabilité côtière a révélé une pression généralisée sur l'ensemble de la côte objet. L'IVC _{physique} semble plus adéquat pour notre étude, le degré de précision des données générées a fortement influencé ce résultat. Cependant, l'aspect socio-économique doit être considéré, non seulement comme l'une des cibles, mais aussi comme un facteur d'évaluation très important qui influence la vulnérabilité côtière elle-même.

Le manque de données de base sur la zone algéroise peut être comblé, en partie, par les données de télédétection (urbanisation, réseau routier, Etc.) Ces résultats peuvent encore être améliorés. L'intégration de la composante socioéconomique influence de manière significative le score global de l'indice IVC, le rendant ainsi plus pertinent et plus proche de la vérité de terrain.

Le calcul de l'indice IVC peut faire l'objet d'un outil d'aide à la gestion de la zone côtière algéroise, à travers une meilleure compréhension des mécanismes de réponse des systèmes côtiers face aux différentes influences naturelles et anthropiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude a pour objectif d'évaluer le degré de vulnérabilité de la côte algéroise sur différents aspects spatiaux et temporels, et ceci à travers la mise en place et l'exploitation d'un réseau de surveillance. Les résultats ont permis, à travers l'osculation des indicateurs topographiques, morphologiques, hydrodynamiques et sociétaux, l'identification des zones côtières à forte vulnérabilité, notamment dans les zones à intérêt.

La reproduction des événements météo-marins extrêmes à l'aide des SIG et des modèles numériques donne comme avantage la rapidité et la facilité de détection des zones les plus sensibles faces à l'attaque de la mer. Les orientations de houles Ouest et Nord-Est semblent les plus pénalisantes toute fois la morphologie sous-marine locale dans certains des secteurs implique une propagation particulière dans quelques sites d'intérêt.

L'étude de l'évolution des fonds, par l'exploitation des données bathymétriques historiques, a permis de détecter les variations de la morphologie des fonds, de simuler la propagation hydrodynamique et de distinguer les pentes favorisant la perte sédimentaire. L'étude des pentes a aussi permis de classer les plages rocheuses comme géomorphologiquement défavorables pour le rechargement artificiel.

L'étude des variations de la ligne de rivage sur une échelle de 60 ans a révélé des taux nets d'évolution fluctuant d'un site à un autre et présente une tendance à l'érosion. Des vitesses de recul alarmantes ont été enregistrées sur certains des secteurs (- 42 m à Ain Taya). L'érosion étant définie comme un concept volumétrique plutôt que surfacique, des taux de recul peu importants, peuvent refléter un risque côtier majeur. Le rajout de la modélisation numérique de l'hydrodynamique sédimentaire lors de l'étude de cas de rechargement, a apporté des réponses très satisfaisantes tant pour la compréhension de la dynamique de la ligne de rivage, mais aussi en termes de faisabilité de cette opération au niveau de quelques plages notamment la plage El Riadh.

Lors de cette étude, l'exposition par rapport à l'énergie hydrodynamique a été une ressource d'appuis pour la discussion des résultats d'évolution. Cependant, le développement des parties courantologie et hydrosédimentaire, pour l'ensemble de la zone d'étude, aurait été un complément très précieux pour conforter cette étude dans la compréhension des tendances évolutives. La reprise scientifique de ces parties dans le futur se présente donc comme une nécessité qui ne peut être contournée.

Conclusion générale

Le diagnostic de l'évolution des falaises a laissé place à beaucoup d'interrogations sur les modalités d'occupation et de planification spatiale de ce type d'espace côtier. Pareillement, l'influence de l'expansion urbaine sur le fonctionnement des systèmes côtiers engendre la disparition systématique des espaces dunaires. Cependant les analyses de corrélation statistique en vue de cerner le lien cause à effet entre variables « Dégradation des dunes côtières – Erosion des plages » montre que ces liens hypothétiques ne sont pas toujours « directs et évidents » l'effet est parfois reporté dans le temps, mais aussi couplé à d'autres facteurs locaux modifiant le bilan sédimentaire (aménagement des rives des oueds, rechargement artificiel des plages, etc.). Les opérations de protections menées ne semblent pas être considérées et n'arrivent pas à résoudre les fluctuations engendrées au niveau des plages adjacentes.

Ce travail a aussi montré que le couplage des techniques géo-spatiales telles que les photographies aériennes et les données issues du DGPS dans des logiciels SIG, peut fournir des informations fiables et précieuses sur l'évolution des côtes. Aussi, l'utilisation de l'outil de calculs géostatistiques DSAS, a donné des résultats satisfaisants, très cohérents avec les observations et la réalité terrain. Il est à noter que l'outil DGPS malgré sa précision est parfois non adapté à certains systèmes côtiers notamment les zones à falaises.

Lors de ce travail, un manque de données de base sur la zone algéroise a été dénoté. Ce manque peut être comblé en partie par les données de télédétection (urbanisation, réseau routier, Etc.). Ces résultats peuvent encore être améliorés par l'intégration de la composante socio-économique qui influence de manière significative le score global de l'indice IVC, le rendant ainsi plus pertinent et plus proche de la vérité sur le terrain. Il est à noter que la base de données générée durant cette thèse n'a pu être totalement exploitée. Les parties concernant les profils et les modèles numériques de terrain générés sur les plages et les cordons dunaires, demeurent brutes et devront faire l'objet de futurs travaux.

Nombreuses sont les études, élaborées par la communauté scientifique, sur les systèmes côtiers, les mécanismes de leur évolution demeurent toujours complexes et difficile à définir entièrement, du fait qu'ils soient régis par des facteurs internes propre aux cellules sédimentaires.

Ce travail a permis de soulever le besoin d'associer nombreuses disciplines pour établir un diagnostic fiable et complet d'une part, mais aussi pour discuter les résultats avec des éléments de réponses aussi bien réels que logiques d'autre part. Il s'est avéré que le contexte

Conclusion générale

géomorphologique dans lequel a démarré cette thèse était insuffisant pour répondre à la problématique posée au départ, l'association des outils statistiques et informatiques à travers la télédétection et la modélisation, les investigations sur terrain pour identifier les formes et formations lithologiques ; ont été indispensables pour rapprocher le diagnostic de la pertinence souhaitée.

Il est de rigueur de signaler ces recommandations pour les futurs travaux complémentaires :

- L'installation d'un réseau de surveillance opérationnel des systèmes côtiers.
- La considération des aménagements, notamment les ouvrages de protection, dans l'évolution des systèmes côtiers à moyen et à long termes.
- Une cartographie normalisée, adaptée à toute éventuelle étude comparative.
- La mise à jour de la cartographie des faciès lithologiques, notamment après les épisodes d'érosion qu'a subi le système côtier algérois.
- L'association de la composante socioéconomique sur différentes échelles permettra de mieux cerner le problème lié à l'érosion mais aussi, de mieux gérer face ce risque côtier.
- L'insertion des études d'impacts sur l'environnement de l'ensemble des activités anthropiques sur les systèmes côtiers d'Alger, en particulier les opérations de rechargement artificiel.

L'évaluation de la vulnérabilité côtière semble être au final un outil de qualité, pour l'aide à la gestion de la zone côtière algéroise à travers une meilleure compréhension des mécanismes de réponse des systèmes côtiers face aux différentes influences naturelles et anthropiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aedla, R., Dwarakish, G. S., & Reddy, D. V. (2015). Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-GurpurRivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. *Aquatic Procedia*, 4, 563-570. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.073>
- Aernouts, D., & Héquette, A. (2006). L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 12(vol. 12-n° 1), 49-64. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.477>
- Agabi, Z., Benbraham, M., & Otmani, H. (2018). *Diagnostic et étude de l'évolution des falaises de la région algéroise* [Master]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Alberola, C., Rousseau, S., Millot, C., Astraldi, M., Font, J., Garcialafuente, J., Gasparini, G., Send, U., & Vangriesheim, A. (1995). Tidal currents in the western mediterranean-sea. *Oceanologica Acta*, 18(2), 273-284. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00097/20777/>
- Alexandrakis, G., & Ghionis, G. (2003). *An assessment of the vulnerability to erosion of the coastal zone due to a potential rise of sea level: The case of the Hellenic Aegean coast*. 14. <http://www.eolss.net/sample-chapters/c09/e4-20-05-03.pdf>
- Alquini, F., Bertoni, D., & Sarti, G. (2016). Extreme erosion of a dune crest within a short timespan (January-September 2016): The recent case in the Migliarino - San Rossore - Massaciucoli Regional Park (Tuscany, Italy). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali Residente in Pisa Memorie serie A*, 123, 5-16. <https://doi.org/10.2424/ASTSN.M.2016.15>
- Amarouche, K., Bachari, N. I., Houma, F., & Boughrira, A. (2015). *Development of a numerical code to simulate the*. 12.
- Amarouche, Khalid, Bachari, N.-E.-I., & Houma, F. (2018). Simulation of Hydrodynamic Behavior Using Data from Coastal Weather Stations at the Bejaia Bay, Algeria. In A. Kallel, M. Ksibi, H. Ben Dhia, & N. Khélifi (Éd.), *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions* (p. 1595-1598). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_463
- AMIS. (2008). *Caractérisation de la zone côtière* (p. 167). CIRSA.
- Anders, F. J. (s. d.). *Accuracy of Shoreline Change Rates as Determined from Maps and Aerial Photographs*. 11.
- ANRH. (2014). *Agence Nationale des Ressources Hydriques*.
- Antoine, M. (2014). *Elaboration of the assessment method of the conservation status of the habitat of community interest « Coastal dunes with Juniperus spp. » (2250)*.
- Arnott, R. D. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press.
- Arun, P. V. (2013). A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(2), 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001>
- Aubié, S. (2011). *Caractérisation de l'aléas érosion (2020-2040) de la côte aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte* (p. 100). BRGM; observatoire de la côte aquitaine. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59095-FR.pdf>

Références bibliographiques

- Bachari Houma, F. (2009). *Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire* [Thesis, Paris Est]. <http://www.theses.fr/2009PEST0065>
- Baron, H. M. (2011). *Coastal hazards and community exposure in a changing climate: The development of probabilistic coastal change hazard zones*.
- Bartolini, S., Mecocci, A., Pozzebon, A., Zoppetti, C., Bertoni, D., Sarti, G., Caiti, A., Costanzi, R., Catani, F., Ciampalini, A., & Moretti, S. (2018). Augmented Virtuality for Coastal Management: A Holistic Use of In Situ and Remote Sensing for Large Scale Definition of Coastal Dynamics. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 92. <https://doi.org/10.3390/ijgi7030092>
- Beaujeu-Garnier, J. (1955). Guilcher (André). Morphologie littorale et sous- marine, 1954. *L'Information Géographique*, 19(3), 125-126.
- Belkessa, R. (2007). Une différence de granulé peut tout changer. *El Watan*. <https://www.elwatan.com/pages-hebdo/magazine/belkessa-rabah-docteur-en-geomorphologie-04-07-2007>
- Belkherroubi, Z., & Belguerguid, A. (2017). *Evaluation du risque d'érosion de la plage Est de Sidi Fredj (Alger)* [Master]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Benazzouz-Belhai, A., & Djelal, N. (2010). Le foncier vecteur de l'étalement urbain algérois. *Symposium : Identity and territorial competitiveness*, 20–22.
- Bensaleh, A. (2016). *Etude de l'évolution des côtes dans la zone de Douaouda marine* [Master]. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Berre, I. L., Hénaff, A., Devogèle, T., Mascret, A., & Wenzel, F. (2005). SPOT5 : Un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ? *Norois. Environnement, aménagement, société*, 196, 23-35. <https://doi.org/10.4000/norois.378>
- Berre, I. L., Quemmerais, F., & Fichaut, B. (2008). Révision de l'atlas Polmar-Terre du Département de la Manche : Vers un SIG opérationnel interservices. *Cybergeog : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.18082>
- Bird, E. C. F. (2008). *Coastal geomorphology : An introduction* (2nd ed). Wiley.
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Boori, M. S. (2010). *Coastal vulnerability, adaptation and risk assessment due to environmental change in ApodiMossoro estuary, Northeast Brazil*. 1(3), 19.
- Boruff, B. J., Emrich, C., & Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *Journal of Coastal Research*, 215, 932-942. <https://doi.org/10.2112/04-0172.1>
- Bouabdallah, M., & Larue, J.-P. (2009). Évolution du littoral de la baie de Saïdia : Dynamique naturelle et impact des aménagements (Maroc oriental). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement, Volume 3*, 113-130. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.878>
- Bouakline, salim. (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* [Magister]. USTHB.

Références bibliographiques

- Bougherara, H. (2011). *Caractérisation géologique et géotechnique de la partie occidentale de la baie d'Alger* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Bouhmadouche, B. (2012). *Contribution à l'étude géologique et sédimentologique de la grande baie de Zemmouri (Cap-Matifou Cap-Djinet)* (USTHB) [Doctorat]. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Bouhmadouche, M. (1993). *Sédimentologie du plateau continentale Est algérois (Boumerdes-Boudouaou et Bahri) "morphologie, minéralogie, mécanisme hydrosédimentaire, érosion et protection du littoral* (USTHB) [Magister]. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Boukhediche, W. (2017). *Etude de faisabilité de rechargement artificiel des plages de la côte Ouest-algéroise* [Master]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Bounoua, N., Kaci, S., Khelil, N., & Otmani, H. (2017). *Etude des écosystèmes dunaires algérois : Étude comparative entre les deux ensembles dunaires du Mazafran et d'El Kadous* [Master]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Bourrelier, P.-H., Deneufbourg, G., Frankreich, & Frankreich (Éd.). (1997). *La prévention des risques naturels : Rapport de l'instance d'évaluation présidée par Paul-Henri Bourrelier*. Documentation Française.
- Bourti, A., & Henda, m. (2014). *Evolution et dynamique de la falaise est de boumerdes et proposition des solutions* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Boutiba, M., & Bouakline, S. (2011). Monitoring shoreline changes using digital aerial photographs, quick-bird image and dgps topographic survey: Case of the east coast of Algiers, Algeria. *European Journal of Scientific Research*, 48, 361-369.
- BRGM, EGIS-EAU, & IAU-IDF. (2013). *Etude sur la vulnérabilité et l'adaptation de la Wilaya d'Alger au changement climatique et aux risques naturels*. Issuu. https://issuu.com/pnowb/docs/acc_alger_phase_1_final_part1_0
- Brière, C. (2005). *Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : L'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet* [Thesis, Pau]. <http://www.theses.fr/2005PAUU3007>
- Brooks, S. M., & Spencer, T. (2010). Temporal and spatial variations in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK. *Geomorphology*, 124(1-2), 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.005>
- Brunel, C., & Sabatier, F. (2009). Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, 107(1-2), 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.024>
- Bruun, Per. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. U.S. Beach Erosion Board. <https://catalog.hathitrust.org/Record/101737975>
- Budetta, P., Santo, A., & Vivenzio, F. (2008). Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology*, 94(3-4), 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.034>

Références bibliographiques

- Budetta, Paolo. (2011). Stability of an undercut sea-cliff along a Cilento coastal stretch (Campania, Southern Italy). *Natural Hazards*, 56(1), 233-250. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9565-y>
- Bulteau, T., & Garcin, M. (2011). *Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte* (p. 156). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59396-FR.pdf>
- Camenen, B. (2002). *Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse* [Thesis, Grenoble 1]. <http://www.theses.fr/2002GRE10043>
- Camenen, B., Pedreros, R., Dupuis, H., Howa, H., & Larroude, P. (2000). Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse. *VIèmes Journées, Caen*. https://www.academia.edu/3153904/Mod%C3%A9lisation_num%C3%A9rique_du_transport_s%C3%A9dimentaire_sur_une_plage_sableuse
- Caplain, B. (2011). *Etude expérimentale de l'érosion d'un massif de sable cohésif par une houle monochromatique* [Phd]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001732/>
- Capobianco, M., Hanson, H., Larson, M., Steetzel, H., Stive, M. J. F., Chatelus, Y., Aarninkhof, S., & Karambas, T. (2002). Nourishment design and evaluation: Applicability of model concepts. *Coastal Engineering*, 47(2), 113-135. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00123-0)
- CAR/ASP - PNUE/PAM. (2015). *53_plan_de_gestion_reghaia_algerie.pdf* (p. 120). http://www.rac-spa.org/sites/default/files/doc_medmpanet/final_docs_algeria/53_plan_de_gestion_reghaia_algerie.pdf
- Carter, B., Woodroffe, C. D., & IGCP Project 274 (Éd.). (1994). *Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press.
- Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., & Paredes, C. (2012). A new process–response coastal recession model of soft rock cliffs. *Geomorphology*, 177-178, 128-143. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.020>
- CETMEF, & Perherin, C. (2009). *Vulnérabilité du territoire National aux risques littoraux. France métropolitaine*. 163.
- Chaïbi, M., & Sabatier, F. (2010). Budget sédimentaire du littoral de la baie d'El Jadida (Maroc). Méthodes d'études et implications pour la gestion des côtes. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*, 115, 116-124. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.5225>
- Chamley, H. (1987). *Sédimentologie*. Dunod.
- CNERU GROUPE. (2004). *Cadastre Littoral Wilaya d'Alger*. MATE.
- Cohen, A., Nevo, Y., & Nelson, N. (2003). The first external loop of the metal ion transporter DCT1 is involved in metal ion binding and specificity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(19), 10694-10699. <https://doi.org/10.1073/pnas.1934572100>
- Colantoni, P., Mencucci, D., & Nesci, O. (2004). Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (northern Adriatic Sea): A case history. *Geomorphology*, 62(3-4), 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.003>
- Collins, B. D., & Sitar, N. (2008). Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. *Geomorphology*, 97(3), 483-501. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.004>

Références bibliographiques

- Costa, S. (1999). Sédimentologie des plages de galets des côtes françaises de la Manche : Application à la défense contre la mer / The sedimentology of shingle beaches on the French Channel coasts : its application to sea defence. *Géocarrefour*, 74(1), 35-43. <https://doi.org/10.3406/geoca.1999.4927>
- Costa, S., Letortu, P., Bensaid, A., Cadot, J.-M., & Quénot, H. (2014). Vitesses et modalités de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France) : Méthodologie et variabilité du recul. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20(vol. 20-n° 2), 133-144. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10588>
- Costa, S., Maquaire, O., Letortu, P., Lissak, C., & Davidson, R. (2011, novembre). Suivi des falaises et versants littoraux en Normandie. *Journées des Observatoires du Trait de Côte*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01150357>
- Crowell, M., Leatherman, S. P., & Buckley, M. K. (1991). Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 839-852. JSTOR.
- Daigneault, M. (2001). *Processus d'altération/érosion à l'interface océan/continent/atmosphère : Aspects quantitatifs et semi-quantitatifs, exemple des falaises de l'Est du Canada (Gaspésie)*. École nationale supérieure des mines.
- Dang Van To, & Pham Thi Phuong Thao. (s. d.). *A Shoreline Analysis using DSAS in Nam Dinh Coastal Area* / *IJG:International Journal of Geoinformatics*. Consulté 19 février 2020, à l'adresse <https://creativitycity.gscc.osaka-cu.ac.jp/IJG/article/view/607>
- Dauphiné. (2001). *Risques et catastrophes : Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Colin.
- De la Torre, Y., Belon, R., Balouin, Y., & Stepanian, A. (2014). *Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse—Littoral Corse*. BRGM. <http://www.littoral-corse.fr/Invetaire-et-analyse-des-solutions-douces-de-gestion-de-l>
- Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts*. Dept. of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53-84. JSTOR.
- Dean, R. G. (2002). *Beach nourishment: Theory and practice*. World Scientific. <https://www.bookdepository.com/Beach-Nourishment-Theory-Practice-Robert-G-Dean/9789810215484>
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754500>
- Denis, L. (2000). *GPS Dgps Made Easy: 2000 EDITION* / *Global Positioning System / Navigation* (p. 28). Coast Guard; Fisheries and Oceans Canada. <https://www.scribd.com/document/397040443/dgps-guide-eng-pdf>
- Derruau, M. (1972). *Précis de géomorphologie*. Masson et Cie, 1972. <http://www.sudoc.fr/156337517>
- DHI, M. (2014). *User guide. MIKE 21/3 COUPLED MODEL FM. 52*.
- Dilley, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. World Bank Publications.
- Djouder, F., & Boutiba, M. (2017). Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: Case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(14), 299. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3062-5>

Références bibliographiques

- Dolan, R., Fenster, M. S., & Holme, S. J. (1992). Spatial Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, 8(2), 263-285. JSTOR.
- Dolan, R., Hayden, B., & Heywood, J. (1978). A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2, 21-39. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(78\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0378-3839(78)90003-0)
- Dong, P., & Guzzetti, F. (2005). Frequency-Size Statistics of Coastal Soft-Cliff Erosion. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(1), 37-42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:1(37))
- Dornbusch, U. (2008). Sediment transport through rock groynes on mixed beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 161(2), 53-59. <https://doi.org/10.1680/maen.2008.161.2.53>
- Drouin, A., & Saint-Laurent, D. (2010). Comparison of interpolation methods to produce high precision digital elevation models (DEM) for the representation of floodplain micro-topography. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 526-539. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.481088>
- Durand, P. (1998). Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France)/Kinematics of a sandy shoreline deduced from the analysis of aerial photographs and topographic maps. Example of the beach extending from Argelès-Plage to Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4(2), 155-166. <https://doi.org/10.3406/morfo.1998.952>
- Duriyapong, F., Nakhapakorn, K., & Pathom, N. (2011). Coastal vulnerability assessment: A case study of Samut Sakhon coastal zone. *Warasan Songkhla Nakharin (Chabap Witthayasat Lae Technology)*, 8.
- DUT. (2006). *SWAN user manual* (p. 149). Delft University of Technology. <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/>
- El Abdellaoui, J. E., & Ozer, A. (2007). Etude dichronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). *Télétection : Revue de Recherche et d'Application en Télétection*, 7(n° 1-2-3-4). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/173495>
- Erikson, L. H., Larson, M., & Hanson, H. (2007). Laboratory investigation of beach scarp and dune recession due to notching and subsequent failure. *Marine Geology*, 245(1-4), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.04.006>
- Faye, I. (2010). *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes* [Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00472200>
- Faye, I., Giraudet, E., Gourmelon, F., & Henaff, A. (2010). *Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte*. 12.
- Fichaut, B., & Suanez, S. S. (2008). *Étude de faisabilité du rechargement en sable de la plage de la Cantine (commune du Relecq-Kerhuon)* (p. 24 p.) [Research Report]. LETG-Brest UMR 6554 CNRS ; Université de Bretagne Occidentale (UBO). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00342780>

Références bibliographiques

- Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F., & Platevoet, B. (2014). *Dictionnaire de Géologie - 8e éd. - Tout en couleur - 5000 définitions - Français/Anglais : Tout en couleur - 5000 définitions - Français/Anglais* (8e édition). Dunod.
- Fournier, J., Bonnot-Courtois, C., Paris, R., & Vot, M. (2012). *Analyses granulométriques. Principes et méthodes*.
- Frihy, O. E., Nasr, S. M., El Hattab, M. M., & El Raey, M. (1994). Remote sensing of beach erosion along the Rosetta promontary, northwestern Nile delta, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 15(8), 1649-1660. <https://doi.org/10.1080/01431169408954197>
- Ghodbani, T., & Berrahi-Midoun, F. (2013). La littoralisation dans l'Ouest algérien : Analyse multiscalaire des interactions hommes-espaces-écosystèmes. *Espace populations sociétés. Space populations societies*, 2013/1-2, 231-243. <https://doi.org/10.4000/eps.5488>
- Ghomari, F., & Bendi-Ouis, A. (2008). *Analyse Granulométrique | Granulat de construction | Masse* (p. 8). <https://fr.scribd.com/document/82325089/Analyse-Granulometrique>
- Giraudet, E., Pennober, G., Giraudet, J., Madec-cuq, V., Gourmelon, F., da Silva, A. S., & Campredon, P. (2005). Planification côtière en Afrique de l'Ouest. Retour d'expérience SIG en Guinée-Bissau. *Norois*, 196. <https://doi.org/10.4000/norois.1866>
- Giuliano, J. (2015). *Érosion des falaises de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : Évolution et origine de la morphologie côtière en Méditerranée : télédétection, géochronologie, géomorphologie* [Thesis, Nice]. <http://www.theses.fr/2015NICE4126>
- González, M., Medina, R., & Losada, M. A. (1999). Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Coastal Engineering*, 36(4), 343-357. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00018-6)
- Gornitz, V. (National A. and S. A., White, T. W., & Cushman, R. M. (Oak R. N. L. (1991). *Vulnerability of the US to future sea level rise* (CONF-910780-1). Oak Ridge National Lab., TN (USA). <https://www.osti.gov/biblio/5875484>
- Gornitz, V., Rosenzweig, C., & Hillel, D. (1994). Is sea level rising or falling? *Nature*, 371(6497), 481-481. <https://doi.org/10.1038/371481a0>
- Gouriou, T., Sénéchal, N., Castelle, B., Parisot, J.-P., Capo, S., Bujan, S., & Howa, H. (2009). Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long-term data set. *Geomorphology*, 107(3-4), 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.016>
- Grasso, F. (2009). *Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages*. 18. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00432041/document>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (2015). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC.
- Hall, T. M., Haine, T. W. N., & Waugh, D. W. (2002). Inferring the concentration of anthropogenic carbon in the ocean from tracers: OCEAN CARBON FROM TRACERS. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 78-1-78-15. <https://doi.org/10.1029/2001GB001835>
- Hamon, K. (2014). *Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale* [Doctorat, Laboratoire Domaines Océaniques]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01020013>

Références bibliographiques

- Haney, R. (2007). *Beach Nourishment: MassDEP's Guide to Best Management Practices for Projects in Massachusetts*. Massachusetts Department of Environmental Protection.
- Hapke, C. J., Adams, P. N., Allan, J., Ashton, A., Griggs, G. B., Hampton, M. A., Kelly, J., & Young, A. P. (2014). Chapter 9 The rock coast of the USA. *Geological Society, London, Memoirs*, 40(1), 137-154. <https://doi.org/10.1144/M40.9>
- Hellequin, A.-P., Flanquart, H., Meur-Ferec, C., & Rulleau, B. (2013). Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : Contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière. *Natures Sciences Sociétés*, 21(4), 385-399. <https://doi.org/10.1051/nss/2014002>
- Hemdane, Y., Bouhmadouche, M., & Atroune, F. (2016). Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sous-marine et hydrodynamique. *Revue des Energies Renouvelables*, 19(4), 10.
- Herbert, V., Deboudt, P., Meur-Férec, C., & Morel, V. (2006). Contribution aux recherches en géographie littorale sur la Côte d'Opale. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, 1, 54-67. <https://doi.org/10.4000/tem.147>
- Heurtefeux, H., Grosset, S., & Valantin, P.-Y. (2007). Une approche alternative de la gestion des risques côtiers, l'exemple de la petite Camargue. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, 1, 3-13. <https://doi.org/10.4000/tem.491>
- Heurtefeux, H., & Sauboua, P. (2012). Evaluation de la vulnérabilité du littoral de l'Hérault à la submersion marine. *XIIèmes Journées, Cherbourg*, 925-932. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2012.101-H>
- Himmelstoss, E. A., FitzGerald, D. M., Rosen, P. S., & Allen, J. R. (2006). Bluff Evolution along Coastal Drumlins: Boston Harbor Islands, Massachusetts. *Journal of Coastal Research*, 22(5), 1230-1240. <https://doi.org/10.2112/06A-0005.1>
- Hinkel, J., & Klein, R. J. T. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise : The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19(3), 384-395. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.03.002>
- Jaud, M. (2011). *Techniques d'observation et de mesure haute résolution des transferts sédimentaires dans la frange littorale* [Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650953>
- Jego, R. (2003). *Evolution du trait de côte : Du suivi des érosions côtières à la gestion intégrée du littoral (Décembre 2003)*. 46.
- Jungerius, P. D., & van der Meulen, F. (1988). Erosion processes in a dune landscape along the Dutch coast. *CATENA*, 15(3), 217-228. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90046-X)
- Kacemi, M. (2013). Protection et valorisation du littoral en Algérie : Législation et instruments : Le cas des communes littorales d'Oran. *Études caribéennes*, 20. <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.5959>
- Kaddour, H., & Hattabi, M. A. (2017). *Impact de l'élévation de niveau de la mer et des tempêtes sur l'évolution morpho dynamique de la région Est de la baie d'Alger : Simulation numérique des processus hydro-sédimentaires* [Master]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

Références bibliographiques

- Kadri, I. (2017). *Impacts de l'implantation des ouvrages de protection sur la frange côtière de Bordj El Kiffan* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Kara, M. (2009). *Réseau de capteurs sans fil : Étude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût* [Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00724810/document>
- Kennedy, D. M., Stephenson, W. J., & Naylor, L. A. (2014). *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis*. Geological Society of London.
- Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M. S., & Khelfani, D. (2016). Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean & Coastal Management*, 132, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.010>
- Khalfani, D. (2014). *Etude hydro-sédimentaire à l'avant côte de Cap Djinet* [Magister]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Khouakhi, A., Snoussi, M., Niazi, S., & Raji, O. (2013). Vulnerability assessment of Al Hoceima bay (Moroccan Mediterranean coast): A coastal management tool to reduce potential impacts of sea-level rise and storm surges. *Journal of Coastal Research*, 65, 968-973. <https://doi.org/10.2112/SI65-164.1>
- Klein, R. T. J., & Nicholls, R. J. (1999). Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio*, 28(2), 182-187.
- Kraus, N. C., & Rosati, J. D. (1997). *Interpretation of Shoreline-Position Data for Coastal Engineering Analysis* (CERC-CETN-II-39). COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER VICKSBURG MS. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA591274>
- Kuhn, D., & Prüfer, S. (2014). Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning : A case study of Rügen, Germany. *Geomorphology*, 213, 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.005>
- Labuz, T. (2004). Coastal dune development under natural and human influence on Swina Gate Barrier (Polish coast of Pomeranian Bay). *Coastline Reports*, 2.
- Larara, M., Nedjari, A., Maouche, S., Benhamouche, A., & Meghraoui, M. (2012). Littoral algérien et risques de Tsunamis. *Bulletin du service géologique national*, 23(3), 241-251.
- Larbi, N. (2017). *Etude de protection et d'aménagement de la zone de Verte Rive-Bordj EL Kiffan, Recours à la modélisation physique et numérique (MIKE21, LITPACK)* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Larid, M. (2008). La zone côtière humide de Réghaia dans le littoral Est Algérois (Algérie) : Contribution méthodologique à son plan de gestion. *Cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.18852>
- Latteux, B. (2008). *Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral* (1^{re} éd.). Editions QUAE GIE.
- Le Berre, I., David, L., Le Tixerant, M., Defenouillère, J., & Nogues, L. (2013). Infrastructure de données géographiques et gestion intégrée de la zone côtière. Les enseignements de l'expérience MIMEL. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26032>
- Leatherman, S. P. (2003). Shoreline Change Mapping and Management Along the U.S. East Coast. *Journal of Coastal Research*, 5-13. JSTOR.

Références bibliographiques

- Leclaire, L. (1972). *La sédimentation holocène sur le versant méridional du Bassin Algéro-Baléares (Précontinent algérien)* —Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Muséum national d'Histoire naturelle. <http://sciencepress.mnhn.fr/fr/collections/memoires-du-museum-national-d-histoire-naturelle-ser-c-sciences-de-la-terre-1950-1992/la-sedimentation-holocene-sur-le-versant-meridional-du-bassin-algero-baleares-precontinent-algerien>
- Lee, E. M. (2008). Coastal cliff behaviour: Observations on the relationship between beach levels and recession rates. *Geomorphology*, 101(4), 558-571. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.010>
- LEM- Laboratoire Des Etudes Maritimes. (1998). *Etude de délimitation d'une zone d'extraction de Sable sur la baie d'Alger*.
- Levoy, F., Graszak, E., Toulemont, M., & Garry, G. (1997). *Plans de prévention des risques littoraux (PPR) : Guide méthodologique*.
- Ley de la Vega de Seoane, C., Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, & Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales. (2012). *Conservation des dunes côtières : Restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale*. Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN.
- Louati, M., & Zargouni, F. (2009). Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-Est de la Tunisie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7686>
- Lupino, P., Riccardi, C., Bellacico, S., Scaloni, piergiorgio, & Di Cosimo, M. (2007). *La gestion strategique de la défense des littoraux pour un développement soutenable des zones côtières de la méditerranée* (p. 144). POSIDUNE. <http://www.beachmed.eu/Beachmede/SousProjets/POSIDUNE/tabid/99/Default.aspx>
- Mallet, c, & Michot, A. (2012). *Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte* (p. 162). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60616-FR.pdf>
- Mani Murali, R., Ankita, M., Amrita, S., & Vethamony, P. (2013). Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3291-3311. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3291-2013>
- Maquaire, O., Afchain, P., Launay, A., Costa, S., Lissak, C., Fressard, M., Letortu, P., Davidson, R., & Thiery, Y. (2013). Evolution à long terme des falaises des 'Vaches Noires' et occurrence des glissements (Calvados, Basse-Normandie, France). *Journées 'Aléa Gravitaire'*, 7 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108782>
- Maquaire, Olivier, Roulland, T., Costa, S., Compain, V., Davidson, R., & Medjkane, M. (2019). Dynamique des falaises des Vaches Noires : Analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 25(vol. 25 – n° 1), 37-55. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12989>
- Marc, R. (2016). Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique. *Annales de géographie*, 111(627), 471-502. <https://doi.org/10.3406/geo.2002.21625>
- Maret, I., & Cadoul, T. (2007). Peut-on concilier risques côtiers et planification viable ? Le cas de la Nouvelle-Orléans. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, 1, 83-95. <https://doi.org/10.4000/tem.584>

Références bibliographiques

- Marques, F. (2006). A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementary Issues*, 144, 39.
- MATEV. (2014). *Plan_de_gestion_reghaia_algerie.pdf*. Ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de la ville.
- Mc-carthy, J., Canziani, O., Leary, N., Dokken, D., & White, K. (2001). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 19.
- McLaughlin, S., & Cooper, J. A. G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index : A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 9(3), 233-248. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2010.0052>
- McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. a. g. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices : Constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, 487-497. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.487>
- MEDDTL. (2010). *La gestion du trait de côte*. Éditions Quae. <http://site.ebrary.com/id/10688593>
- Messaoud, N. (1987). *Hydrogéologie et pollution des eaux : Exemple du bassin versant du Mazafran, Mitidja (Algérie)* [Doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00783549>
- Meur-Ferec, C. (2006). *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe* [Thesis, Université de Nantes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00167784>
- Meur-Férec, C., & Morel, V. (2004). L'érosion sur la frange côtière : Un exemple de gestion des risques. *Natures Sciences Societes*, Vol. 12(3), 263-273.
- Mezhoud, A. (2011). *Contribution à l'analyse de durabilité du domaine littoral (loi 02-02) inclus dans le Projet de la Zone d'Expansion Touristique de Ain Chorb—Willaya d'Alger* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Mihoubi, M. K., Belkessa, R., & Latreche, M. A. (2014). Study of the Vulnerability of Coastal Areas of the Algerian Basin with the GIS. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(6), 5. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.538>
- Ministère des ressources naturelles et de la faune. (2012). *Instructions relatives à l'établissement de réseaux géodésiques* (p. 50). Instruction relative à l'établissement de réseaux géodésiques ; www.mrnf.gouv.qc.ca. https://mem.gouv.qc.ca/documents/territoire/instructions_etablissement_reseaux_geod.pdf
- Miossec, A. (1999). Pinot (Jean Pierre). *La gestion du littoral*. *Noroi*, 182(2), 372-375.
- Miossec, J.-M., & Bourgou, M. (2010). *Les littoraux. Enjeux et dynamiques* (1^{re} éd.). Presses Universitaires de France - PUF.
- Mohamad, M. F., & Samion, M. K. H. (2014). Coastal Vulnerability Assessment towards Sustainable Management of Peninsular Malaysia Coastline. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(6), 533-538. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.540>
- Moore, L. J. (2000). Shoreline Mapping Techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 111-124. JSTOR.
- Moore, L. J., & Griggs, G. B. (2002). Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181(1-3), 265-283. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00271-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00271-7)

Références bibliographiques

- Morton, R. A., Miller, T., & Moore, L. (2005). Historical Shoreline Changes along the US Gulf of Mexico: A Summary of Recent Shoreline Comparisons and Analyses. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 704-709. JSTOR.
- Moureau, M., & Brace, G. (1993). *Comprehensive dictionary of petroleum science and technology*. Editions TECHNIP.
- Murthy, R. C., Sinha, P. C., & Rao, Y. R. (2009). *Modelling and Monitoring of Coastal Marine Processes*. Springer Science & Business Media.
- Nadir, M. (2016). *Modélisation numérique de la morphodynamique d'une côte sableuse soumise à l'effet des vagues et des houles cas : Plage Est de Sidi Fredj* [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- National Research Council (U.S.) (Éd.). (1995). *Beach nourishment and protection*. National Academy Press.
- Naylor, L. A., & Stephenson, W. J. (2010). On the role of discontinuities in mediating shore platform erosion. *Geomorphology*, 114(1-2), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.024>
- Nezhad, M. K. (2004). *Plages en équilibre morphologique et hydrodynamique associée* [Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011587>
- Nicholls, R. J., & de la Vega-Leinert, A. C. (2008). Implications of Sea-Level Rise for Europe's Coasts: An Introduction. *Journal of Coastal Research*, 24(2), 285-287. <https://doi.org/10.2112/07A-0002.1>
- Nunes, M., Ferreira, Ó., Schaefer, M., Clifton, J., Baily, B., Moura, D., & Loureiro, C. (2009). Hazard assessment in rock cliffs at Central Algarve (Portugal) : A tool for coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 52(10), 506-515. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.08.004>
- ONF. (2014). *Plan de prévention des risques littoraux : Guide méthodologique* (p. 169). http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/ACCIDR/doc/IFD/IFD_REFDOC_0520781/plan-de-prevention-des-risques-littoraux-guide-methodologique
- Otmani, H. (2014). *Impact des infrastructures maritimes sur le littoral : Cas du port de Cap Djinet* [Magister]. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Otmani, H., Belkessa, R., Bengoufa, S., Boukhediche, W., Djerrai, N., & Abbad, K. (2020). Assessment of shoreline dynamics on the Eastern Coast of Algiers (Algeria) : A spatiotemporal analysis using in situ measurements and geospatial tools. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 124. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5069-6>
- Otmani, H., Belkessa, R., Rabehi, W., Guerfi, M., & Boukhediche, W. (2020). Dégradation des Dunes côtières algéroises entre pression de l'urbanisation et conséquences sur l'évolution de la ligne de rivage. *Geo-Eco-Marina*, 25, 131-145. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3609777>
- Oukadr, M., Chagdali, M., & Mordane, S. (2016). Analyse de l'impact physique d'une souille de dragage sur la stabilité du littoral. *XIVèmes Journées, Toulon*, 81-88. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2016.010>
- Palmer, B. J., Van der Elst, R., Mackay, F., Mather, A. A., Smith, A. M., Bundy, S. C., Thackeray, Z., Leuci, R., & Parak, O. (2011). Preliminary coastal vulnerability assessment for KwaZulu-Natal, South Africa. *Journal of Coastal Research*, 1390-1395. JSTOR.

Références bibliographiques

- Paskoff, R. (1992). Les dunes littorales. *Annales de géographie*, 101(563), 97-99.
- Paskoff, R. (2003). Clus-Auby C., La gestion de l'érosion des côtes : L'exemple aquitain. *Annales de géographie*, 112(632), 442-442.
- Paskoff, R. (2004). Les littoraux sableux et dunaires : De l'abondance à la pénurie en sédiments (Sandy shorelines and coastal dunes : from plenty to scarcity of sediments). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 81(3), 373-382. <https://doi.org/10.3406/bagf.2004.2401>
- Pilkey, O. H., & Hume, T. (1993). *The shoreline erosion problem : Lessons from the past*. 2.
- Pinot, J.-P. (1998). *La gestion du littoral* (Vol. 1-2). Institut océanographique. <https://livre.fnac.com/a290027/Pinot-La-gestion-du-littoral>
- Pirazzoli, P. A., & Dionne, J.-C. (1993). Les littoraux (Leur évolution). Collection Université, Éditions Nathan, Paris, 191 p. *Géographie physique et Quaternaire*, 49(2), 321. <https://doi.org/10.7202/033050ar>
- Population data world. (2015). *Base de données en ligne*. PopulationData.net. <https://www.populationdata.net/>
- Rabehi, W., Guerfi, M., & Mahi, H. (2018). Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger. Approche socio-économique et physique de la côte. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*. <http://journals.openedition.org/mediterranee/8625>
- Rasuly, A., Naghdifar, R., & Rasoli, M. (2010). Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 416-426. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.046>
- Rigoni, M. (2003). *Erosion du littoral de la mer Méditerranée : Les conséquences pour le tourisme*. <http://www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/X2H-Xref-ViewHTML.asp?FileID=10340&lang=fr>
- Rihouey, D., & Dubranna, J. (2008). Modèle empirique 3D. Application à la gestion des activités de dragage à l'embouchure de l'Adour. *European Journal of Environmental and Civil Engineering - EUR J ENVIRON CIV ENG*, 12, 133-146. <https://doi.org/10.3166/ejece.12.133-146>
- Rivière, A. (1977). *Méthodes granulométriques : Techniques et interprétations*. Masson.
- Robin, N., & Levoy, F. (2007). Etapes et rythmes de formation d'une flèche sédimentaire à crochets multiples en environnement mégatidal. *Annales de Géomorphologie / Annals of Geomorphology / Zeitschrift für Geomorphologie*, 51, 337-360.
- Robin, Nicolas, & Levoy, F. (2007). Stage and rate of formation of a complex spit in a megatidal environment. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 51(3), 337-360. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2007/0051-0337>
- Romine, B. M., Fletcher, C. H., Frazer, L. N., Genz, A. S., Barbee, M. M., & Lim, S.-C. (2009). Historical Shoreline Change, Southeast Oahu, Hawaii; Applying Polynomial Models to Calculate Shoreline Change Rates. *Journal of Coastal Research*, 256, 1236-1253. <https://doi.org/10.2112/08-1070.1>
- Rosser, N. J., Brain, M. J., Petley, D. N., Lim, M., & Norman, E. C. (2013). Coastline retreat via progressive failure of rocky coastal cliffs. *Geology*, 41(8), 939-942. <https://doi.org/10.1130/G34371.1>
- Sabatier, F. (2001). *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône* [Thesis, Aix-Marseille 3]. <http://www.theses.fr/2001AIX30103>

Références bibliographiques

- Sallenger, A. H., Doran, K. S., & Howd, P. A. (2012). Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic coast of North America. *Nature Climate Change*, 2(12), 884-888. <https://doi.org/10.1038/nclimate1597>
- Salomon, J.-N. (2009). *Géomorphologie sous-marine et littorale*. Presses Universitaires de Bordeaux.
- Sankari, T. S., Chandramouli, A. R., Gokul, K., Surya, S. S. M., & Saravanavel, J. (2015). Coastal Vulnerability Mapping Using Geospatial Technologies in Cuddalore-Pichavaram Coastal Tract, Tamil Nadu, India. *Aquatic Procedia*, 4, 412-418. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.055>
- Sekkal, R. (1986). *Hydrologie de la nappe de la Mitidja (Algérie) : Étude hydrodynamique des champs captants de la ville d'Alger* [Phdthesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00785616>
- Sheik, M., & Chandrasekar. (2011). A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system. *Geo-Spatial Information Science*, 14(4), 282-293. <https://doi.org/10.1007/s11806-011-0551-7>
- Shoshany, M., & Degani, A. (1992). Shoreline Detection by Digital Image Processing of Aerial Photography. *Journal of Coastal Research*, 8(1), 29-34. JSTOR.
- Sogreah Algérie. (s. d.). *Etudes hydrauliques—Etudes,expertises et engineering—Etudes,engineering et services financiers—Annuaire des Entreprises Algériennes El Mouchir*. Consulté 18 février 2020, à l'adresse <http://elmouchir.caci.dz/sogreah-algerie-9011.html>
- Stafford, D. B., & Langfelder, J. (1971). Air Photo Survey Of Coastal Erosion. *Photogrammetric Engineering*. <https://trid.trb.org/view/93643>
- Stépanian, A. (2002). *Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie)*. 284.
- Suanez, S. (2008). Paskoff (R.), Clus-Auby (C.) – L'érosion des plages : Les causes, les remèdes. Paris/Monaco, Institut Océanographique, coll. «Propos», 2007, 184 p. *Norois. Environnement, aménagement, société*, 208, 93-94.
- Suanez, S., & Bruzzi, C. (1999). Shoreline management and its implications for coastal processes in the eastern part of the Rhône delta. *Journal of Coastal Conservation*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/BF02802734>
- Suanez, S., & Provansal, M. (1993). Étude des modifications morphosédimentaires du littoral à l'embouchure du Rhône : Plages de Piémanson et Napoléon. *Méditerranée*, 78, 43-56. <https://doi.org/10.3406/medit.1993.2834>
- Suanez, S. S. (1997). *Current and recent sedimentary dynamics of the eastern littoral fringe of the Rhône delta* [Theses, Université d'Aix-Marseille I]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01715661>
- Suanez, S. S., & Simon, B. (1997). Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral du delta du Rhône (France, Sud-Est). *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, 35(3-4), 147-158.
- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of rocky coasts*. J. Wiley.
- Thibault, M., Bouazouni, O., Kaddour, B. H., & Moali, A. (2006). Plan de Gestion de la Réserve Naturelle du Lac de Réghaïa (Algérie). *MedWet*, 84. Direction Générale des Forêts du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.

Références bibliographiques

- Thieler, E. R., & Danforth, W. W. (1994). Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 549-563. JSTOR.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (s. d.). *USGS OFR 2008-1278: The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0, an ArcGIS Extension for Calculating Historic Shoreline Change*, Title Page. Consulté 14 février 2020, à l'adresse <https://cmgds.marine.usgs.gov/publications/DSAS/of2008-1278/>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change* (USGS Numbered Series N° 2008-1278; Open-File Report). U.S. Geological Survey. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Miller, T. L. (2005). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0, an ArcGIS extension for calculating historic shoreline change* (USGS Numbered Series N° 2005-1304; Open-File Report). U.S. Geological Survey. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20051304>
- Tinh, N. A., & Hens, L. (2017). A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014. *VIETNAM JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 39(1), 87-96. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/39/1/9231>
- Tissot, C., Le Tixerant, M., Rouan, M., & Cuq, F. (2005). Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.3570>
- To, D. V., & Thao, P. T. P. (2008). A shoreline analysis using DSAS in Nam Dinh coastal area. *International Journal of Geoinformatics*, 4, 37-42.
- Toro, J., Duarte, O., Requena, I., & Zamorano, M. (2012). Determining Vulnerability Importance in Environmental Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.005>
- Trenhaile, A. S. (2002). Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 48(1-3), 7-22. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00173-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00173-3)
- Tresca, A. (2015). *Etude de faisabilité d'un aménagement de stabilisation à court terme de la dune d'Aval* (p.93). <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Etude-de-faisabilite-d-un-Aménagement-de-stabilisation-a-court-terme-de-la-dune-d-aval-a-Wissant>
- Vafeidis, A., Nicholls, R., McFadden, L., & Hinkel, J. (2004). *Developing a global database for coastal vulnerability analysis: Design issues and challenges*. 35, 10.
- Virdis, S. G. P., Oggiano, G., & Disperati, L. (2012). A Geomatics Approach to Multitemporal Shoreline Analysis in Western Mediterranean: The Case of Platamona-Maritza Beach (Northwest Sardinia, Italy). *Journal of Coastal Research*, 28(3), 624-640. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00078.1>
- Weydert, P., & Weydert, O. (1982). Etude sédimentologique de l'embouchure de l'estuaire du Gabon. *Marine Geology*, 49(1-2), 1-22. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90026-3)
- Woodroffe, C., & Abuodha, P. (2006). Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. *Faculty of Science - Papers (Archive)*. <https://ro.uow.edu.au/scipapers/161>

Références bibliographiques

- Wright, L. D., & Thom, B. G. (1977). Coastal depositional landforms: A morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 3. <http://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=124672&printversion=1&dropIMISitle=1>
- Yelles Chaouche, A., Roger, J., Déverchère, J., Bracène, R., Domzig, A., Hébert, H., & Kherroubi, A. (2009). The 1856 Tsunami of Djidjelli (Eastern Algeria): Seismotectonics, Modelling and Hazard Implications for the Algerian Coast. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 283-300. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0433-6>
- Young, A. P., Flick, R. E., Gutierrez, R., & Guza, R. T. (2009). Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California. *Geomorphology*, 112(3), 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.018>

Annexes

Tableau 1 : Les indicateurs (ou descripteurs) de la typologie des dunes (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 halo-microphiles	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 spamo-philes	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 beau temps
Dune perchée	Au sommet d'un escarpement sableux	Déca à hectométrique	Faible, plus forte si démantèlement de la falaise	Forte, entrainement 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

Annexes

Type	Indicateurs						
	Position	Dimension	Action de la mer	Action du vent	Couvert végétal	Interférence humaine	Dynamique évolutive
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'installe	Moyenne, fermeture possible avec assèchement

Annexes

Annexe N° 02 :

Tableau 2 : Liste des plages de la côte algéroise.

Nom des plages	Caractéristiques	Communes
Oued Mazafran		
Kheloufi 1	1800m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Kheloufi 2	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Familiale	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Champ de tire 1	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Complexe touristique	800m de longueur ; 20m de largeur, sable fin.	Zéralda
Sable d'or	800m de longueur ; 40m de largeur, sable fin.	Zéralda
Azur Plage	A l'Ouest de Zéralda, 550 m de long, 50 m de largeur, sédiments moyens.	Staoueli
Palm Beach	Est de l'oued Mazafran, longueur de 150 m, largeur moyenne de 50 m, sable fin à moyen.	Staoueli
Sidi Fredj Ouest	250m de longueur ; 20m de largeur, sable sur la partie Ouest de la presqu'île de Sidi Fredj, a quasiment disparu. Quelques taches de sables fins à moyens persistent du côté Est.	Staoueli
Thalassothérapie	Ouest de la presqu'île, continuité de la plage Ouest, Située entre les promontoires rocheux à l'Est et un épi à l'Ouest. Aucun sédiment ne lui parvient naturellement. Sa longueur est de 300 m.	Staoueli
Sidi-Fredj Est	Est de l'hôtel Riadh. Sa longueur est de 250m, sa largeur de 40 m à sable fin.	Staoueli
El-Riadh	120m de longueur, 10m de largeur, sédiments fins à Moyens	Staoueli
El-Menzeh	Plage de Riadh - plage El Menzeh proximité des ouvrages de protection. Sa longueur est de 200 m, sa largeur est de 20m, sable fin	Staoueli
Moretti	A l'Est de la plage Menzah d'une longueur de 800m et une largeur de 45m à sable fin	Staoueli
Sahel	700m de longueur ; 30m de largeur ; sable fin	Staoueli
les Dauphins	400m de longueur, 30m de largeur, sédiments moyens à grossier, plage dégradée	Chéraga
Club des Pins	420m de longueur, 40m de largeur, sable fin	Chéraga
les Dunes	150m de longueur, 40m de largeur, sédiments moyens à grossiers. Erosion et pollution	Chéraga
Oued Beni Messous		
El Bahdja	1200m de longueur, 30m de largeur, sable moyen et érosion	Ain Benian
Jeunesse	200m de longueur, 30m de largeur, sable moyen	Ain Benian
Méditerranée	400m de longueur ; 20m de largeur ; sable moyen, érosion	Ain Benian
El Djemila	200m de longueur ; 20m de largeur ; sable moyen ; érosion	Ain Benian
Ain Benian	150m de longueur ; 30m de largeur ; sable moyen, érosion	Ain Benian

Annexes

L'îlot	300m de longueur ; 20m de largeur ; galets, présence de gravats, à l'Est du port d'El Djamila	Ain Benian
Grand rocher	300m de longueur ; 20m de largeur ; granulométrie galets, présence de gravats	Ain Benian
La fontaine	250m de longueur ; 20m de largeur ; sable grossier et galets, présence de gravats	Ain Benian
Martin	1200m de longueur ; 130m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets, de gravats	Hammamet
Tirs aux pigeons	200m de longueur ; 40m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets, de gravats, recul du trait de côte.	Hammamet
La Fayette	200 m longueur ; 40m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets	Hammamet
Campino	60m de longueur ; 5m de largeur, Sable moyen. Présence de macro déchets, érosion.	Hammamet
Belvédère	20m de longueur ; 1m de largeur, sable moyen. Risque d'affaissement des habitations macro déchets	Hammamet
Les Jumelles	70m de longueur ; 15m de largeur, sable grossier. Constructions illicites /risque d'effondrement	Hammamet
Le Phare	100m de longueur ; 15 m de largeur, sable grossier. Risque d'affaissement des habitations macro déchets	Hammamet
La Grande	150m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Bar	80m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Chellou	20 m de longueur, 30m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
La Vigie	120 m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Sport Nautique	200 m de longueur, 30 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
La Réserve	50m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen, présence de gravats et de macro déchets	Rais Hamidou
La Rascasse	120m de longueur, 40m de largeur, sable grossier	Rais Hamidou
La Crique	120m de longueur, 100 m de largeur, sable hétérogène	Rais Hamidou
Franco	Près du port de Rais Hamidou, 150 m de long, 10 m de large, sable grossier et moyen	Rais Hamidou
Miramar	120m de longueur, 10m de largeur, sable moyen, présence de déchets	Rais Hamidou
Oliviers	200 m de longueur ; 20 m de largeur, sable moyen	Bologhine
Poudrière	60 m longueur ; 7 m de largeur, sable moyen, pollution.	Bologhine
Deux Chameaux	Contrebas du boulevard front de mer de Bologhine, 80 m de long, 20m de large, sable grossier à moyen.	Bologhine
Petit bassin	Crique en contrebas du boulevard front de mer de Bologhine, longueur de 50 m, largeur de 10 m	Bologhine
Eden	Bologhine Est, longueur de 100 m, largeur de 15 m, sables grossiers à très grossiers.	Bologhine
R'Mila	Contrebas du stade Ferhani	Bab El Oued

Annexes

Kettani	Plage en chantier	Bab El Oued
Ka'aessour	Sous le siège du musée du Bastion 23 à la place des martyres	Casbah
Sablettes	1200 m de longueur, larguer : de 5 m, plage polluée	Belouezdad
Piquet Blanc	Prolongement Est des Sablettes longueur de 400 m, restreinte en largeur (EPR prévoit une rapide augmentation de la largeur)	Hussein Dey
Oued El Harrach		
Mazela	600m de longueur ; 20 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Lido	1200m de longueur ; 10 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Pins Maritimes	1160m de longueur ; 15 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Sirène 1-2	100 m de longueur ; 30 m de largeur, sable grossier. Erosion	Bordj El Kiffan
Verte Rive	1200 m de long, 15 m de large, sable moyen, constructions, érosion	Bordj El Kiffan
Bateau Cassé	1000m de longueur ; 150 m de largeur ; sable moyen. Présence d'un collecteur entre Bateau Cassé et Stamboul où le déversement s'effectue directement vers la mer	Bordj El Kiffan
Stamboul	1200m de longueur ; largeur : 40 m, sable grossier. Disparition de la plage, érosion élevée. Protection par des blocs naturels. Présence de déchets et de gravats	Bordj El Kiffan
Oued el Hamiz		
Alger plage	450m de longueur ; 30 m de largeur, sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Ondines sud	450m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Ondines nord	3000m de longueur ; 25 m de largeur, sable moyen. Déchets et pollution	Bordj El Bahri
Frégate	40m de longueur ; 10 m de largeur ; sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Tamenfoust Ouest	650 m de longueur ; 50 m de largeur ; sable grossier, érosion et pollution	El Marsa
Tamenfoust Est	50 m de longueur, 50 m de largeur, sable grossier, érosion	El Marsa
Marsa centre	150 m de longueur ; 10 m de largeur, sable moyen. Recul du trait de côte	El Marsa
Jean bar	240 m de longueur ; 50 m de largeur, sable moyen, pollution	El Marsa
Zerzouria	800 m de longueur ; 30 m de largeur, sédiments galets	Ain Taya
Tamaris	760 m de longueur ; 40m de largeur, sable moyen, glissement de terrains et rejet important	Ain Taya
Kef El Arar	60 m de longueur ; 10 m de largeur, sable fin, érosion, importante et pollution	Ain Taya
Ain El Beida	800 m de longueur ; 8m de largeur, sable moyen, érosion et présence de déchets.	Ain Taya
Surcouf (Les Flots bleus)	600 m de longueur ; 40m de largeur, sable moyen, érosion et présence de déchets.	Ain Taya
Déca plage	1500 m de longueur ; 65m de largeur, sable grossier, présence de déchets	Ain Taya
Tarfaya (Les	700 m de longueur ; 65m de largeur, sable grossier.	Ain Taya

Annexes

Canadiennes)		
Kaddous	2000 m de longueur ; 150m de largeur, sable fin. A l'Ouest de Deca plage et au Sud du lac de Reghaïa.	Heraoua
Oued Réghaïa		
Réghaïa	1500 m de longueur ; 140 m de largeur, sable fin. Déchets, glissement de terrains, pillage de sable.	Réghaïa
Nom des plages	Caractéristiques	Communes
Oued Mazafran		
Kheloufi 1	1800m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Kheloufi 2	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Familiale	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Champ de tire 1	1000m de longueur ; 150m de largeur, sable fin.	Zéralda
Complexe touristique	800m de longueur ; 20m de largeur, sable fin.	Zéralda
Sable d'or	800m de longueur ; 40m de largeur, sable fin.	Zéralda
Azur Plage	A l'Ouest de Zéralda, 550 m de long, 50 m de largeur, sédiments moyens.	Staoueli
Palm Beach	Est de l'oued Mazafran, longueur de 150 m, largeur moyenne de 50 m, sable fin à moyen.	Staoueli
Sidi Fredj Ouest	250m de longueur ; 20m de largeur, sable sur la partie Ouest de la presqu'île de Sidi Fredj, a quasiment disparu. Quelques taches de sables fins à moyens persistent du côté Est.	Staoueli
Thalassothérapie	Ouest de la presqu'île, continuité de la plage Ouest, Située entre les promontoires rocheux à l'Est et un épi à l'Ouest. Aucun sédiment ne lui parvient naturellement. Sa longueur est de 300 m.	Staoueli
Sidi-Fredj Est	Est de l'hôtel Riadh. Sa longueur est de 250m, sa largeur de 40 m à sable fin.	Staoueli
El-Riadh	120m de longueur, 10m de largeur, sédiments fins à Moyens	Staoueli
El-Menzeh	Plage de Riadh - plage El Menzeh proximité des ouvrages de protection. Sa longueur est de 200 m, sa largeur est de 20m, sable fin	Staoueli
Moretti	A l'Est de la plage Menzah d'une longueur de 800m et une largeur de 45m à sable fin	Staoueli
Sahel	700m de longueur ; 30m de largeur ; sable fin	Staoueli
les Dauphins	400m de longueur, 30m de largeur, sédiments moyens à grossier, plage dégradée	Chéraga
Club des Pins	420m de longueur, 40m de largeur, sable fin	Chéraga
les Dunes	150m de longueur, 40m de largeur, sédiments moyens à grossiers. Erosion et pollution	Chéraga
Oued Ben Messous		
El Bahdja	1200m de longueur, 30m de largeur, sable moyen et érosion	Ain Benian

Annexes

Jeunesse	200m de longueur, 30m de largeur, sable moyen	Ain Benian
Méditerranée	400m de longueur ; 20m de largeur ; sable moyen, érosion	Ain Benian
El Djemila	200m de longueur ; 20m de largeur ; sable moyen ; érosion	Ain Benian
Ain Benian	150m de longueur ; 30m de largeur ; sable moyen, érosion	Ain Benian
L'îlot	300m de longueur ; 20m de largeur ; galets, présence de gravats, à l'Est du port d'El Djamila	Ain Benian
Grand rocher	300m de longueur ; 20m de largeur ; granulométrie galets, présence de gravats	Ain Benian
La fontaine	250m de longueur ; 20m de largeur ; sable grossier et galets, présence de gravats	Ain Benian
Martin	1200m de longueur ; 130m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets, de gravats	Hammamet
Tirs aux pigeons	200m de longueur ; 40m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets, de gravats, recul du trait de côte.	Hammamet
La Fayette	200 m longueur ; 40m de largeur ; Sable moyen. Présence de macro déchets	Hammamet
Campino	60m de longueur ; 5m de largeur, Sable moyen. Présence de macro déchets, érosion.	Hammamet
Belvédère	20m de longueur ; 1m de largeur, sable moyen. Risque d'affaissement des habitations macro déchets	Hammamet
Les Jumelles	70m de longueur ; 15m de largeur, sable grossier. Constructions illicites /risque d'effondrement	Hammamet
Le Phare	100m de longueur ; 15 m de largeur, sable grossier. Risque d'affaissement des habitations macro déchets	Hammamet
La Grande	150m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Bar	80m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Chellou	20 m de longueur, 30m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
La Vigie	120 m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
Sport Nautique	200 m de longueur, 30 m de largeur, sable moyen	Rais Hamidou
La Réserve	50m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen, présence de gravats et de macro déchets	Rais Hamidou
La Rascasse	120m de longueur, 40m de largeur, sable grossier	Rais Hamidou
La Crique	120m de longueur, 100 m de largeur, sable hétérogène	Rais Hamidou
Franco	Près du port de Rais Hamidou, 150 m de long, 10 m de large, sable grossier et moyen	Rais Hamidou
Miramar	120m de longueur, 10m de largeur, sable moyen, présence de déchets	Rais Hamidou
Oliviers	200 m de longueur ; 20 m de largeur, sable moyen	Bologhine
Poudrière	60 m longueur ; 7 m de largeur, sable moyen, pollution.	Bologhine
Deux Chameaux	Contrebas du boulevard front de mer de Bologhine, 80 m de long, 20m de large, sable	Bologhine

Annexes

	grossier à moyen.	
Petit bassin	Crique en contrebas du boulevard front de mer de Bologhine, longueur de 50 m, largeur de 10 m	Bologhine
Eden	Bologhine Est, longueur de 100 m, largeur de 15 m, sables grossiers à très grossiers.	Bologhine
R'Mila	Contrebas du stade Ferhani	Bab El Oued
Kettani	Plage en chantier	Bab El Oued
Ka'aessour	Sous le siège du musée du Bastion 23 à la place des martyres	Casbah
Sablettes	1200 m de longueur, largeur : de 5 m, plage polluée	Belouezdad
Piquet Blanc	Prolongement Est des Sablettes longueur de 400 m, restreinte en largeur (EPR prévoit une rapide augmentation de la largeur)	Hussein Dey
Oued El Harrach		
Mazela	600m de longueur ; 20 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Lido	1200m de longueur ; 10 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Pins Maritimes	1160m de longueur ; 15 m de largeur, sable fin, présence de déchets	Mohammadia
Sirène 1-2	100 m de longueur ; 30 m de largeur, sable grossier. Erosion	Bordj El Kiffan
Verte Rive	1200 m de long, 15 m de large, sable moyen, constructions, érosion	Bordj El Kiffan
Bateau Cassé	1000m de longueur ; 150 m de largeur ; sable moyen. Présence d'un collecteur entre Bateau Cassé et Stamboul où le déversement s'effectue directement vers la mer	Bordj El Kiffan
Stamboul	1200m de longueur ; largeur : 40 m, sable grossier. Disparition de la plage, érosion élevée. Protection par des blocs naturels. Présence de déchets et de gravats	Bordj El Kiffan
Oued el Hamiz		
Alger plage	450m de longueur ; 30 m de largeur, sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Ondines sud	450m de longueur, 10 m de largeur, sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Ondines nord	3000m de longueur ; 25 m de largeur, sable moyen. Déchets et pollution	Bordj El Bahri
Frégate	40m de longueur ; 10 m de largeur ; sable moyen, érosion	Bordj El Bahri
Tamenfoust Ouest	650 m de longueur ; 50 m de largeur ; sable grossier, érosion et pollution	El Marsa
Tamenfoust Est	50 m de longueur, 50 m de largeur, sable grossier, érosion	El Marsa
Marsa centre	150 m de longueur ; 10 m de largeur, sable moyen. Recul du trait de côte	El Marsa
Jean bar	240 m de longueur ; 50 m de largeur, sable moyen, pollution	El Marsa
Zerzouria	800 m de longueur ; 30 m de largeur, sédiments galets	Ain Taya
Tamaris	760 m de longueur ; 40m de largeur, sable moyen, glissement de terrains et rejet important	Ain Taya
Kef El Arar	60 m de longueur ; 10 m de largeur, sable fin, érosion, importante et pollution	Ain Taya

Annexes

Ain El Beida	800 m de longueur ; 8m de largeur, sable moyen, érosion et présence de déchets.	Ain Taya
Surcouf (Les Flots bleus)	600 m de longueur ; 40m de largeur, sable moyen, érosion et présence de déchets.	Ain Taya
Déca plage	1500 m de longueur ; 65m de largeur, sable grossier, présence de déchets	Ain Taya
Tarfaya (Les Canadiennes)	700 m de longueur ; 65m de largeur, sable grossier.	Ain Taya
Kaddous	2000 m de longueur ; 150m de largeur, sable fin. A l'Ouest de Deca plage et au Sud du lac de Reghaïa.	Heraoua
Oued Réghaïa		
Réghaïa	1500 m de longueur ; 140 m de largeur, sable fin. Déchets, glissement de terrains, pillage de sable.	Réghaïa

Annexe N° 03 :

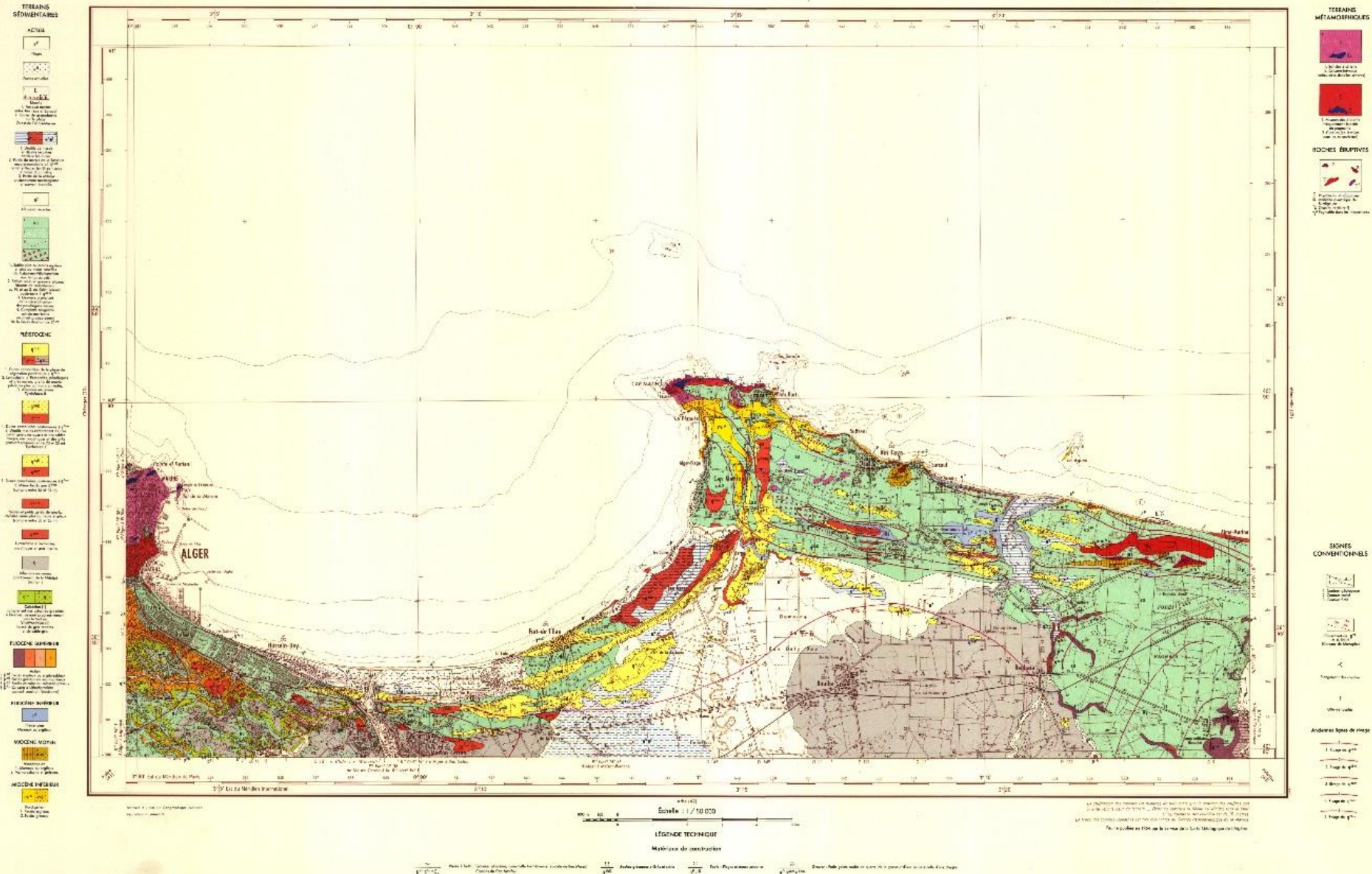
Tableau 3 : Liste des falaises de la côte algéroise (rapport de cadastre d'Alger 2004).

Nom de la falaise	Extension/ caractéristique
Falaises de Bab el Oued	El Kettani - QaâEssour
Falaises de Bologhine	Rais City - Rais Hamidou, Eden, Petit Bassin, Deux Chameaux, Poudrière
Falaises de Rais Hamidou	À l'Est de la plage Réserve
Falaises de Ain Benian	À l'Est du port d'El Djamila
Falaises de Hammamet	Presque toute la côte de la commune de Hammamet
Falaises de Staoueli	Cap de Sidi Fredj
Falaises de Mohammedia	À l'Est de l'Oued El Harrach
Falaises de El Marsa	À l'Est et à l'Ouest de la plage El-Djerf (ex Jean bar) et à l'Ouest de Sidi-El Hadj
Falaises de AinTaya	À l'Ouest de la plage Tamaris et à l'Ouest de la plage Ain Chorb, lithologie très fragile
Falaises de Heuraoua	À l'Ouest d'Oued Réghaïa, présence d'eau de source
Falaises de Réghaïa	Réghaïa, falaise morte, fragile, riches en infiltration hydrique

Annexe N° 04:

Figure 1 : Cartes géologiques de la zone d'étude (Glangeaud, 1963).

ALGER 21



ALGÉRIE (DÉP. D'ALGER)

FIG. N° 70 | B 3
C 4

CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE

CHÉRAGAS

Les cartes géologiques ont été effectuées de 1913 à 1940 par
M. L. ROYER, M. MAISON, G. M. APPEL et A. APPEL, Collaborateurs du Service de la
Carte Géologique de l'Algérie.
Les cartes concernent les Terrains métamorphiques ainsi que L. ROYER pour
le Rognon d'Alger et de M. MAISON pour l'ensemble du Massif ancien (1948 à 1953).
Les cartes du Rognon et de Chéragas ont été faites de 1948 à 1952
par J.-M. APPEL et A. APPEL, complétées et publiées par le Service pour les Terrains
actuels de 1952 à 1953.
Chef Directeur M. G. BÉGIN, Ingénieur général des Mines à Alger.
Maquette exécutée par M. BOUTIER.

TERRAINS SÉDIMENTAIRES

ACTUEL



1. Argiles molles
E. Sables, argiles de sable
et de cailloux, de grès
à cimentation argileuse
avec éboulis de terrain (E)
à l'état de sable et de cailloux
pour les zones (E)
à l'état de cailloux
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

2. Mâcles argileux dans les zones (E)
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
(à l'exception des zones (E))

MÉSOZOÏQUE



1. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

2. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

3. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

4. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

5. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

6. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

7. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

8. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

9. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

10. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

11. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

12. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

13. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

14. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

15. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

16. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

17. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

18. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

19. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

20. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

21. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

22. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

23. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

24. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

25. Zones comprises de la partie de
Mésozoïque supérieure à 200 m
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

FLUOÏCHE SUPÉRIEURE

1. Argiles
2. Sables, argiles de sable
et de cailloux, de grès
à cimentation argileuse
avec éboulis de terrain (E)
à l'état de sable et de cailloux
pour les zones (E)
à l'état de cailloux
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

FLUOÏCHE INFÉRIEURE

1. Argiles
2. Sables, argiles de sable
et de cailloux, de grès
à cimentation argileuse
avec éboulis de terrain (E)
à l'état de sable et de cailloux
pour les zones (E)
à l'état de cailloux
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

MOCÏNE SUPÉRIEURE

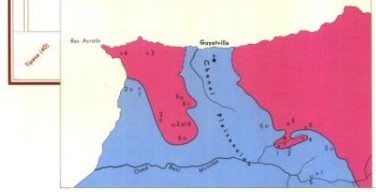
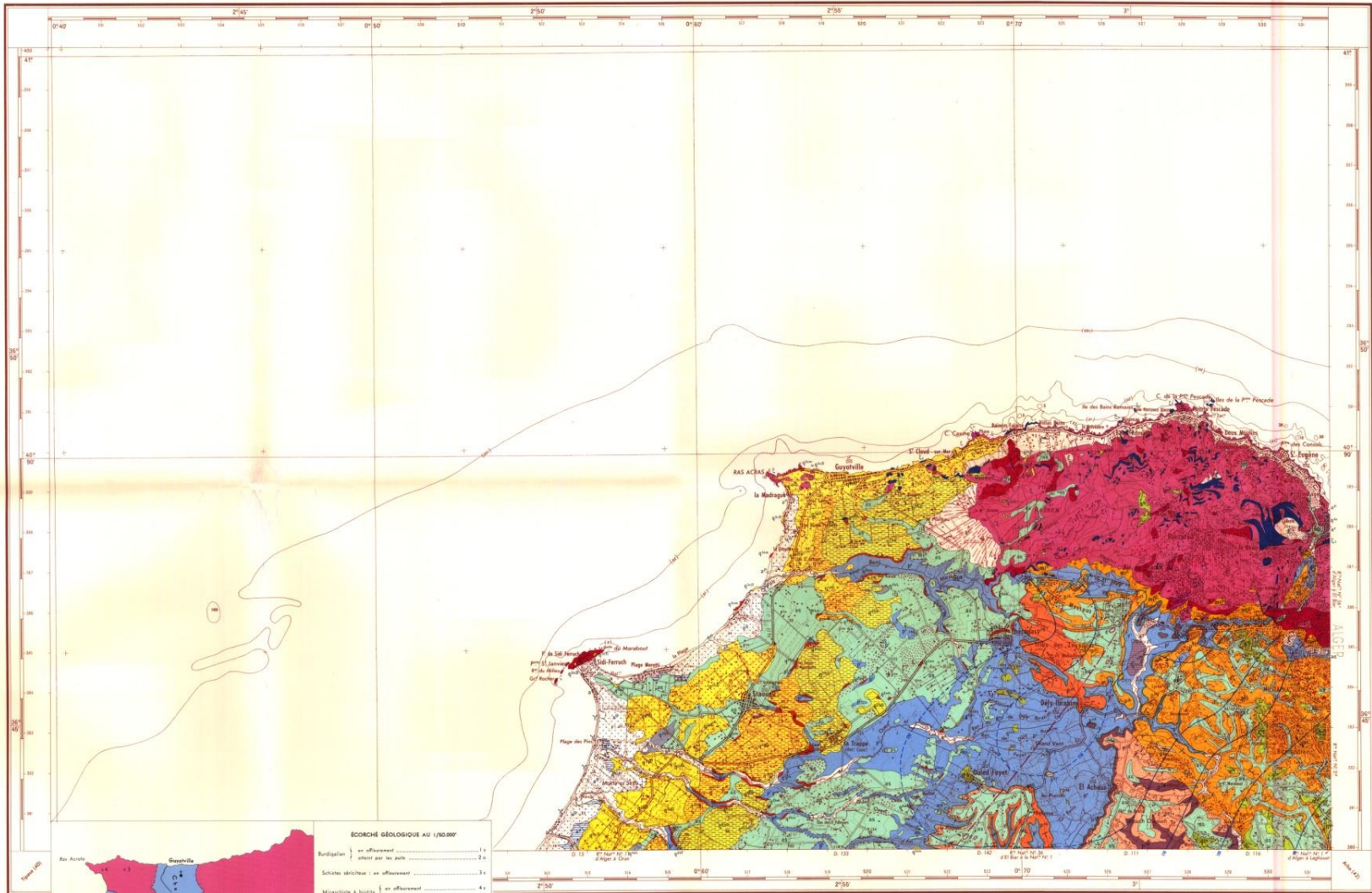
1. Argiles
2. Sables, argiles de sable
et de cailloux, de grès
à cimentation argileuse
avec éboulis de terrain (E)
à l'état de sable et de cailloux
pour les zones (E)
à l'état de cailloux
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

MOCÏNE INFÉRIEURE

1. Argiles
2. Sables, argiles de sable
et de cailloux, de grès
à cimentation argileuse
avec éboulis de terrain (E)
à l'état de sable et de cailloux
pour les zones (E)
à l'état de cailloux
à l'état de cailloux de
Plateau de Guelma

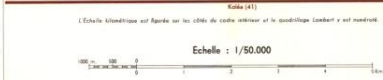
Basaltes

1. Basaltes
2. Basaltes
3. Basaltes
4. Basaltes
5. Basaltes
6. Basaltes
7. Basaltes
8. Basaltes
9. Basaltes
10. Basaltes
11. Basaltes
12. Basaltes
13. Basaltes
14. Basaltes
15. Basaltes
16. Basaltes
17. Basaltes
18. Basaltes
19. Basaltes
20. Basaltes
21. Basaltes
22. Basaltes
23. Basaltes
24. Basaltes
25. Basaltes



ÉCHÈRE GÉOLOGIQUE AU 1/50.000

Burdigale	en affaissement	1x
Schistes schisteux	en affaissement	2x
Misachite à biches	en affaissement	4x
Craie	en affaissement	8x
Leslyvite	stratifié par un banc	7x
Graie verte	stratifié par un banc	8x
Chert Paléozoïque (Mans)		



Substances utiles

§ Source d'eau (Fras Vallon).
§ Quartz (Massif de Bouzarka) (x = 120.000 ; y = 30.000).
§ Sables à argile, kaolin, marne, et autres.

La carte des courbes est dressée de telle sorte que le dénivelé des courbes est
constant sur le bord de la carte... Elle est conçue de telle sorte que le bord
de la carte des courbes soit parallèle au bord de la carte.
Le tracé des courbes isolées est fait au Centre du Service Géographique de la Marine.

Facile publiée en 1961 par le Service de la Carte Géologique de l'Algérie
M. G. BÉGIN, Ingénieur général des Mines, chef Directeur.
M. L. ROYER, Ingénieur général des Mines, chef Directeur.
R. LAFITE, Ingénieur des Mines, chef de Service.
P. DUBOIS, Ingénieur des Mines, chef de Service.

TERRAINS MÉTAMORPHIQUES



SIGNES CONVENTIONNELS



Annexes

Annexe N° 05 : Etude des vents

Station : Alger Port (01-01-2011 et 31-12 2017)

Latitude :36,77°N /longitude : 3,10°E /altitude : 8 m

Tableau 04 : Fréquence mensuelle des vitesses du vent en pourcentage (%) station Alger Port (entre 01-01-

Champ de vitesse des vents (m/s)	1,6 - 3,3	3,4 - 5,4	5,5 - 7,9	8 - 10,7	10,8 - 13,8	13,9 - 17,1	> 17,1
Janvier	22,89	33,81	23,26	10,91	6,47	2,06	0,60
Février	16,07	31,62	26,39	15,88	6,81	3,25	0,00
Mars	16,72	30,21	30,50	15,25	5,57	0,88	0,88
Avril	11,21	40,61	33,94	11,52	2,42	0,30	0,00
Mai	10,26	41,35	36,07	10,85	1,47	0,00	0,00
Juin	5,15	49,39	33,64	10,61	1,21	0,00	0,00
Juillet	5,28	49,85	35,78	8,21	0,59	0,29	0,00
Août	5,28	51,03	35,19	7,92	0,59	0,00	0,00
Septembre	10,30	48,18	33,94	7,27	0,30	0,00	0,00
Octobre	20,53	48,97	25,81	3,52	0,59	0,59	0,00
Novembre	22,73	33,94	22,12	13,03	7,27	0,91	0,00
Décembre	27,12	31,76	23,25	11,57	5,15	0,85	0,29

2011 et 31-12 2017)

Tableau 05 : Fréquence mensuelle des secteurs d'apparition des vents en pourcentage (%) station port d'Alger

(entre 01-01-2011 et 31-12 2017)

Direction	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Calme
Janvier	2,5	2,8	4,9	1,9	1	0,6	1,1	2,9	7,4	8,1	7,5	6,4	7,3	3,6	1,6	2,9	37,2
Février	4,2	4,6	6,6	1,1	1,3	0,2	1	2,8	8,1	9,3	5,5	5,4	9,8	5,8	1,6	3,1	29,7
Mars	7,9	5	9	1,7	1	0,7	1,3	2,7	5,1	7,2	3,1	4,4	8,7	4,7	1,8	4	31,7
Avril	7,4	8,4	11,3	2,2	0,8	0,7	0,8	2	4,5	3	2,8	3	6,6	4,2	1,1	4,6	36,5
Mai	8,4	9	13,8	3,5	0,3	0,7	0,8	1,1	2,9	3,5	2,6	2,9	5,1	3,4	0,8	3,7	37,4
Juin	10,8	10,4	17	3,2	1,8	0,4	0,5	1	1,1	1,7	1,2	2,1	4	2,4	1,3	6,4	34,6
Juillet	14	12	16,1	2,3	0,8	0,3	0,3	1	0,6	1,2	0,8	1,2	1,7	1,4	1,3	6	39
Août	11,7	15	18,4	2,4	1,3	0,3	0,4	0,8	1,9	1,3	0,6	1,3	1,9	1,6	1,5	6,7	32,7
Septembre	6,2	10,1	21,5	3,1	1,6	0,8	0,9	1,4	2,3	3,4	0,8	1,4	3,9	2,2	1	4,4	35,1
Octobre	4	6,5	9	2,6	4,2	1,2	0,7	2	5	4,9	2,2	2,1	6	2,9	0,7	3,6	42,3
Novembre	3,3	3,4	6,4	1,6	0,8	0,9	1,2	3,6	8,2	8,5	5,6	5,2	6,3	2,1	1,4	2,4	39
Décembre	3,7	3,8	5	0,7	1,1	0,6	0,6	2,1	5,9	7,7	5,9	3,8	6,8	4,2	1,3	3,3	43,8

Annexe N° 06 : Profils Bathymétriques

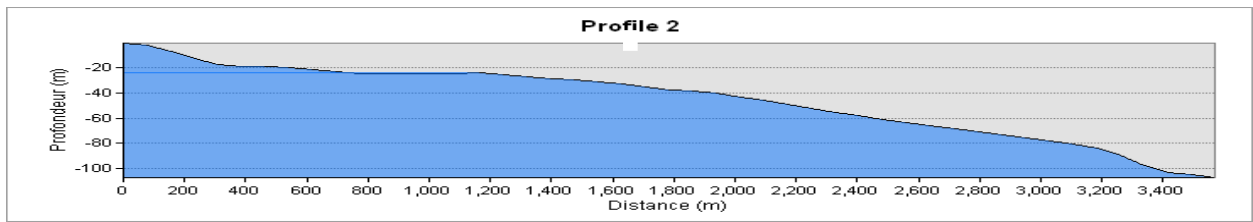


Figure 02 : Profil bathymétrique n°2.

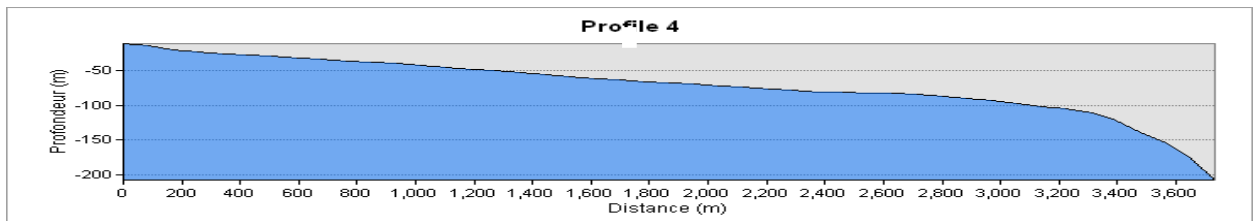


Figure 03 : Profil bathymétrique n°4.

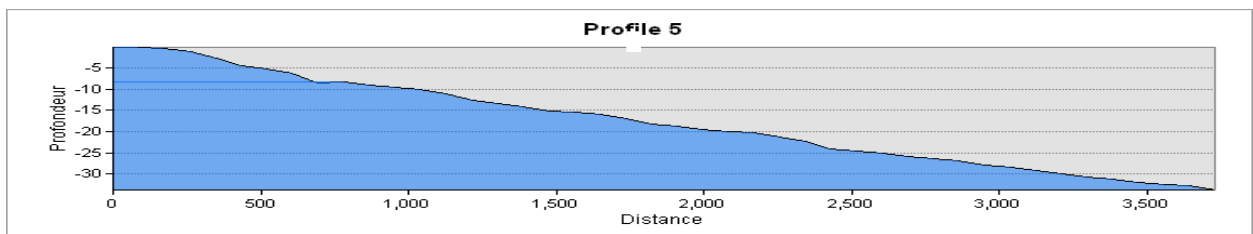


Figure 04 : Profil bathymétrique n°5.

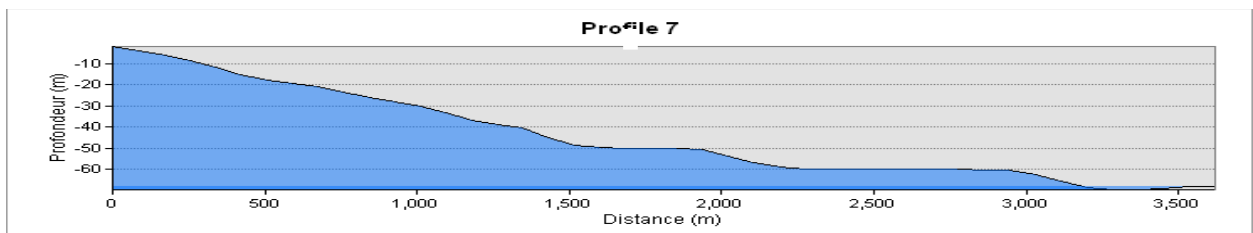


Figure 05 : Profil bathymétrique n°7.

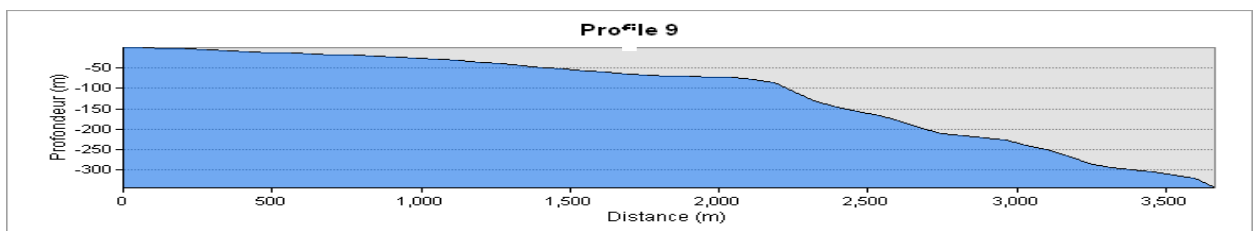


Figure 06 : Profil bathymétrique n°9.

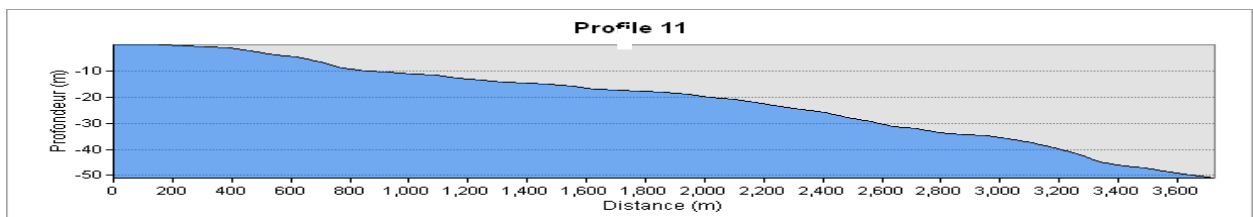


Figure 07: Profil bathymétrique n°11.

Annexe N° 07 :

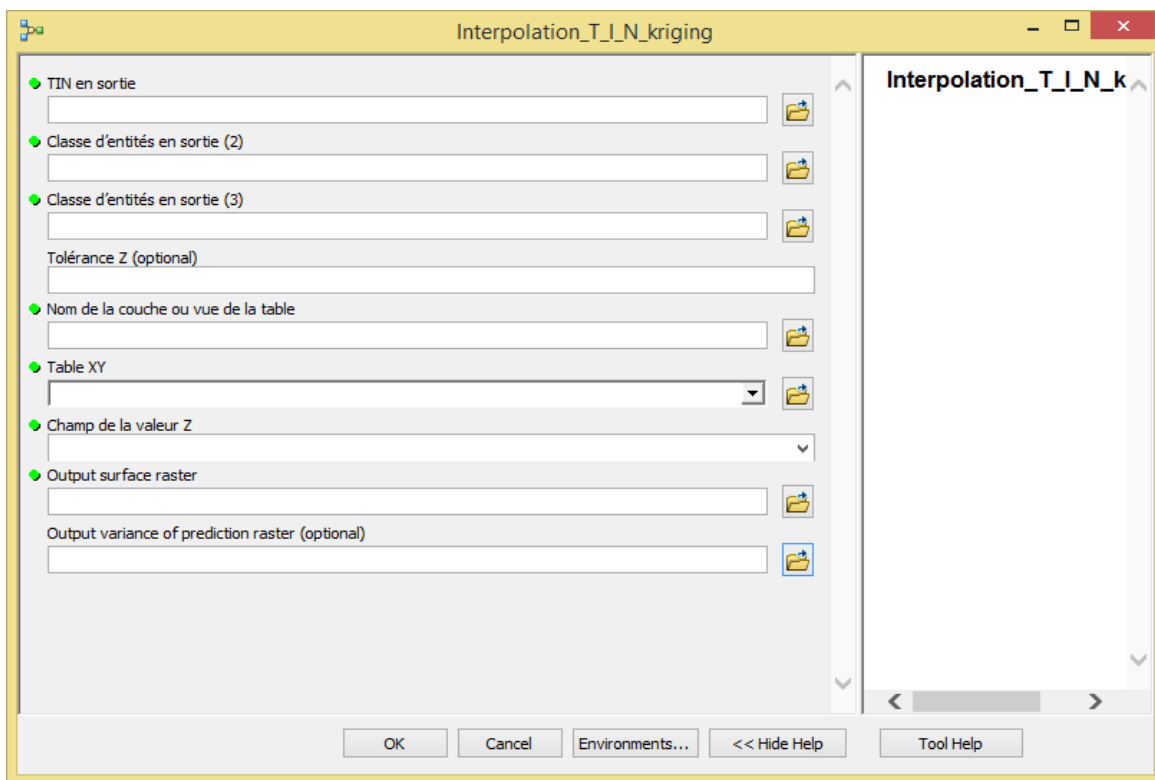


Figure 08 : Interface graphique des paramètres d'entrées de l'extension Interpolation_TIN

Annexe N° 08 : Statistiques et Roses des houles annuelles et saisonnières au large de la côte algéroise (AMIS, 2004) (EGIS EAU, IAU-IDF, BRGM, 2013).

Tableau : des fréquences des hauteurs de la houle pour tous les directions (station Port d'Alger, Wiziku)					Tableau : des fréquences des hauteurs de la houle pour le secteur Nord-Est (station Port d'Alger, Wiziku)				
Mois	0-1 m	1-2 m	2-3 m	3+ m	Mois	0-1 m	1-2 m	2-3 m	3+ m
Janvier	19,8	8	1,6	1,6	Janvier	1,8	0,2	0	0
Février	14,2	9	3	2,2	Février	3,2	0,6	0	0
Mars	21	7,2	2,8	0	Mars	8	0,4	0	0
Avril	25,2	4,2	0,6	0	Avril	8,8	0,2	0,4	0
Mai	26,8	3,6	0,6	0	Mai	16,2	0	0	0
Juin	28,8	1	0,2	0	Juin	16,4	0,2	0	0
Juillet	29,6	1,4	0	0	Juillet	23,2	0,6	0	0
Août	29	2	0	0	Août	21	0,4	0	0
Septembre	29	1	0	0	Septembre	15,2	0	0	0
Octobre	27,8	2,5	0,8	0	Octobre	8,8	0	0	0
Novembre	20	7	1,5	0,5	Novembre	5,8	0	0	0
Décembre	23,3	6,5	0,8	0,5	Décembre	4,8	0	0	0

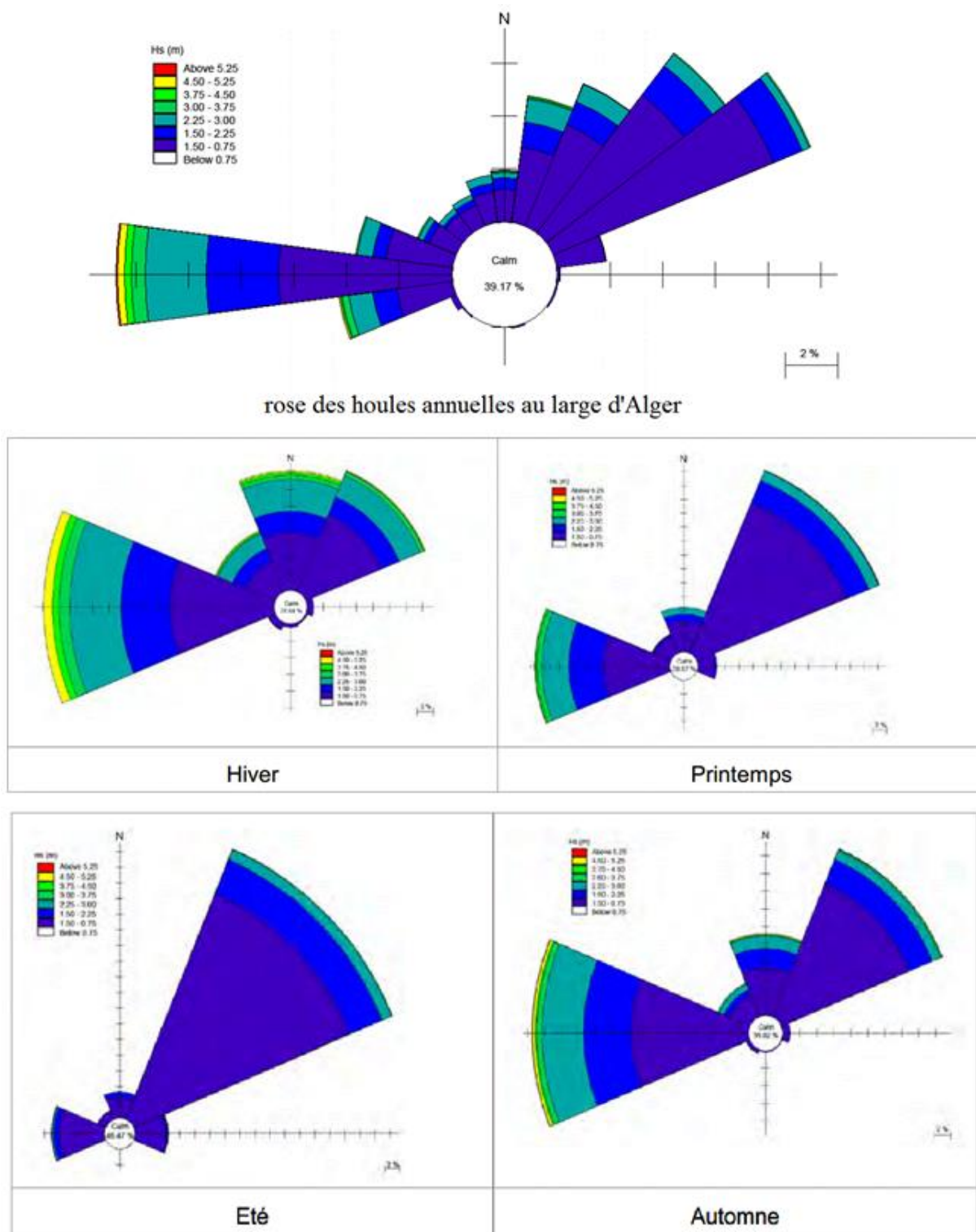


Figure 9 : Rose des houles annuelles et saisonnières au large de la côte algéroise (AMIS, 2004). (EGIS EAU, IAU-IDF, BRGM, 2013)

Annexe N° 09 :

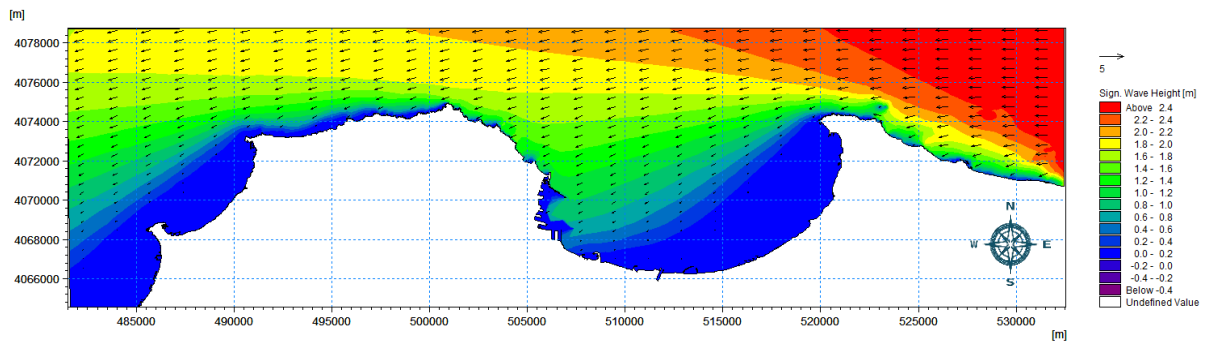


Figure 10 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise. Vagues du secteur E. $H_s = 2.53$ m. $T = 8$ s.

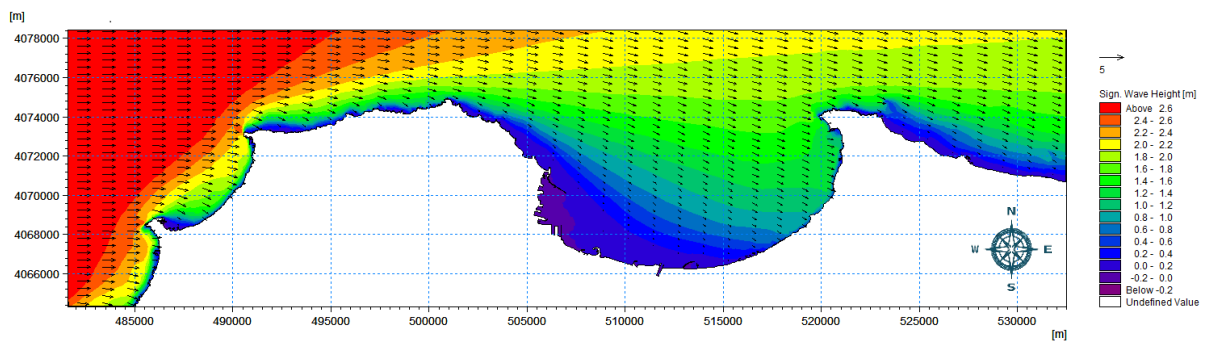


Figure 11 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise. Vagues du secteur O. $H_s = 2.67$ m. $T = 8$ s.

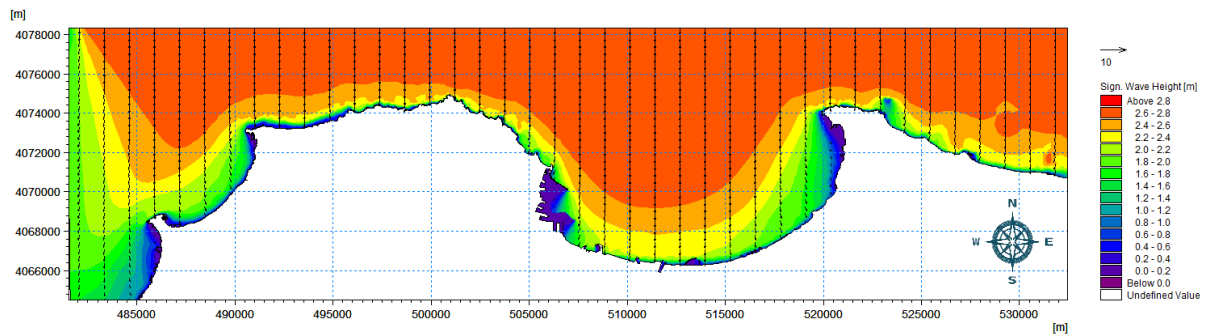


Figure 12 : Estimation du forçage induit par les vagues à la côte Algéroise. Vagues du secteur N. $H_s = 2.67$ m. $T = 8$ s.

Annexe N°10 : Fiche descriptive de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System)

Le système d'analyse de la ligne de bord numérique (DSAS) 4.3 est une extension de logiciel pour ESRI Arc GIS v.10.2, qui permet à un utilisateur de calculer les statistiques du taux de changement du trait de côte à partir de plusieurs positions historiques de rivage. Une interface conviviale de boutons et de menus simples, guide l'utilisateur à travers les étapes principales de l'analyse des changements de rivage.

Les composants de l'extension et du guide de l'utilisateur

- Des instructions sur la manière appropriée de définir une ligne de référence pour les mesures ;
- La génération automatisée et manuelle des transects et des métadonnées de mesure en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur ;
- La sortie du calcul des taux de changement de littoral et d'autres informations statistiques.

Les méthodes de calculs du taux de changement




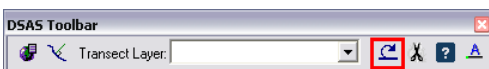

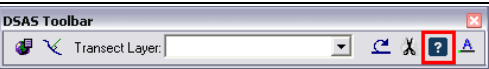
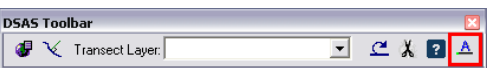
- Taux d'extrémité ;
- Régression linéaire simple ;
- Régression linéaire pondérée ;
- Moins médiane des carrés ;
- L'erreur standard, le coefficient de corrélation et l'intervalle de confiance.

Les résultats de tous les calculs de débit sont affichés dans une table qui peut être liée au fichier transect par un champ d'attribut commun.

Barre d'outils DSAS

Cette section fournit une référence rapide et une explication pour chaque bouton de l'interface de la barre d'outils DSAS.

Tableau 8 : Représentation de la barre d'outils DSAS

	<p>Définir / Modifier les paramètres par défaut spécifie les noms de fichier pour les entrées de ligne de base et de rivage et d'autres paramètres, tels que l'espacement des transects.</p>
	<p>Créer les transects génère une nouvelle classe d'entités de transect (ou écrase une existante) en fonction des paramètres par défaut spécifiés par l'utilisateur.</p>
	<p>Le menu déroulant répertorie tous les fichiers de transects reconnus ajoutés au projet ArcMap actif.</p>
	<p>Calculer les statistiques lance une boîte de dialogue remplie d'une liste de statistiques de taux de change sélectionnables à calculer.</p>
	<p>Couper les transects vers SCE lancent une boîte de dialogue permettant aux utilisateurs de générer une copie du fichier de transect spécifié qui est découpé dans l'enveloppe de modification de la ligne de rivage (SCE) ou la distance maximale entre tous les rivages.</p>
	<p>Lancer la fonction d'aide DSAS.</p>
	<p>À propos de DSAS fournit des informations sur le logiciel, y compris le numéro de version.</p>

Annexe N°11 : Méthodes d'analyses sédimentologiques

Phase technique expérimentale au laboratoire

Cette phase conduit à l'évaluation en pourcentage de chaque dimension de particule à la masse totale du sédiment. Pour chaque échantillon, on procède de la manière suivante (voir figure) :

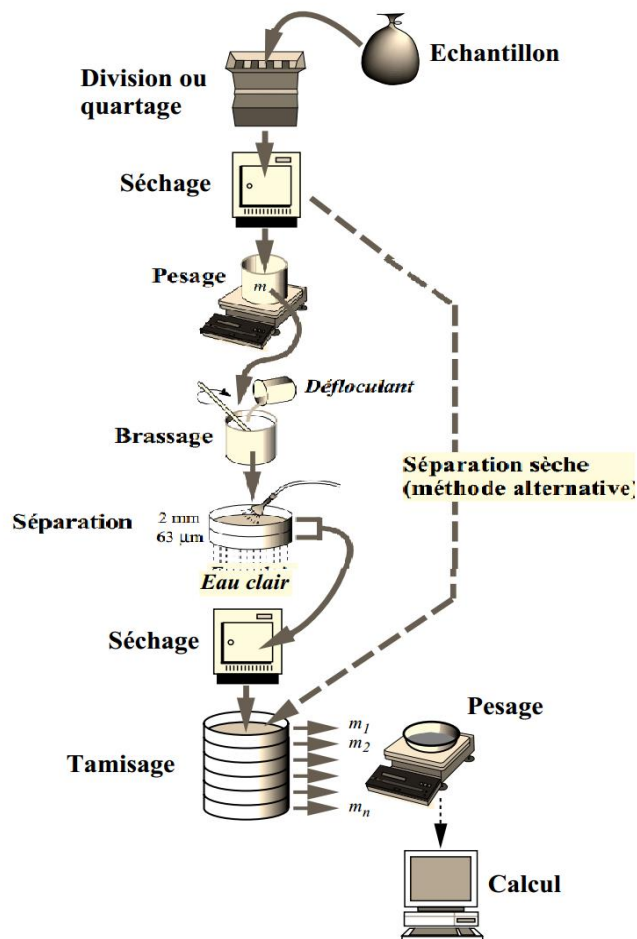


Figure 13 : Techniques classiques et alternative de tamisage.

Calcul des paramètres granulométriques

L'analyse des paramètres granulométriques fournit des informations importantes sur la provenance, l'historique du déplacement et les conditions de dépôt des particules sédimentaires (Friedman, 1979 ; Bui et al., 1990). Les trois paramètres granulométriques usuels utilisés en sédimentologie sont :

- Les paramètres de position
- L'indice de tri (SO),
- L'indice de symétrie de la distribution (Ski).

Paramètres de position

Les paramètres de position sont déduits à partir de la courbe cumulative en faisant une projection sur l'axe des pourcentages et ainsi déterminer le diamètre de tamis qui lui correspond. Ces paramètres vont servir à calculer les différents indices granulométriques et à classer les grains du sable (tableau 7).

Annexes

- Les quartiles

- Q25 : diamètre du grain à l'ordonnée 25%, c'est le premier quartile.
- Q50 : diamètre du grain à l'ordonnée 50%, c'est la médiane.
- Q75 : diamètre du grain à l'ordonnée 75%, c'est le second quartile.

- Les déciles

- D10 : diamètre du grain à l'ordonnée 10%, premier décile.
- D90 : diamètre du grain à l'ordonnée 90%, second décile.

- Le mode granulométrique

Le mode granulométrique (Mo) correspond à la dimension la plus significative de la distribution granulométrique, c'est-à-dire à la dimension la plus représentative des grains d'un sédiment.

Indice de symétrie de la distribution (Ski)

L'indice d'Asymétrie de Trask (Sk) exprime l'asymétrie de la courbe des fréquences simples par rapport à la médiane (Md = Q2 : est la valeur d'un diamètre tel que 50% de l'effectif total se place de part et d'autre). Trois cas se présentent (BELLAHBIB, 2015):

- Sk = 1 : le mode coïncide avec la médiane (Q2), et la courbe de fréquence simple est symétrique.
- Sk > 1 : le classement est maximal du côté des grossiers, alors que la fraction fine est étalée.
- Sk < 1 : le classement est maximum du côté des fins, la fraction grossière est très étalée.

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \dots\dots\dots(\text{Équation 7})$$

Indice de tri (S0)

Contrairement aux autres indices, celui-ci fait intervenir les extrémités de la courbe dans la définition du classement donc donne une idée sur l'étalement de la courbe au tour de son grain moyen et il nous renseigne sur la croissance du tri lors du transport et de la sédimentation (Durafour, 2014 in ()).

$$S_0 = \left[\frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} \right] + \left[\frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6,6} \right] \dots\dots\dots(\text{Équation 8})$$

Les différents cas du tri utilisés par FOLK (1954) sont les suivantes :

- | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------|------------------------|
| TRI < 0.35 | : très bien trié | 1 < TRI < 2 | : mal trié |
| 0.4 < TRI < 0.5 | : bien trié | 2 < TRI < 4 | : très mal trié |
| 0.5 < TRI < 0.7 | : modérément bien trié | 4 < TRI | : extrêmement mal trié |
| 0.7 < TRI < 1 | : modérément trié | | |

Tableau 0-1: Classification des grains de sable (FOLK, et al., 1957)

Diamètre du grain μm	Classification
< 110	Sable très fin
110-150	Sable fin
150-250	Sable moyen
250-500	Sable grossier
>500	Sable très grossier

Annexes

Annexe N°12 : Tableau 10: Résultats de calcul des paramètres granulométriques

Station	Mz	So	Ski	D. moyen	Tri	Asymétrie
M1	2.62	0.43	-0.12	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M2	2.70	0.39	-0.05	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M3	2.90	0.46	0.05	Sable fin	Bien trié	Asymetrievers les fins
M4	2.42	0.64	-0.23	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
M5	2.63	0.48	-0.05	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M6	2.68	0.42	-0.01	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M7	2.63	0.44	-0.13	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M8	2.61	0.50	-0.12	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M9	2.97	0.38	-0.09	Sable fin	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M10	2.72	0.42	0.06	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M11	2.37	0.69	-0.38	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
M12	2.67	0.58	-0.24	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
M13	2.61	0.35	0.05	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M14	2.19	0.76	-0.26	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
M15	2.82	0.27	0.81	Sable fin	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M16	2.69	0.38	-0.04	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M17	1.97	0.95	-0.48	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
M18	2.51	0.52	-0.17	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
M19	2.73	0.43	0.06	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M20	2.45	0.52	-0.18	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
M21	2.71	0.33	0.00	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
M22	2.66	0.40	-0.13	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
M23	2.44	0.56	-0.17	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
P1	2.44	0.42	-0.35	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
P2	2.07	0.86	-0.55	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
P3	2.20	0.81	-0.58	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
P4	2.18	1.15	-0.64	Sable moyen	Mal trié	Asymetrievers les fins
P5	2.45	0.43	-0.24	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
P6	2.45	0.36	-0.24	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
P7	2.22	0.74	-0.46	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
P8	2.28	0.74	-0.56	Sable moyen	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
P9	2.35	0.45	-0.37	Sable moyen	Bien trié	Asymetrievers les fins
P10	2.42	0.57	-0.40	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
P11	2.35	0.50	-0.39	Sable moyen	Modérementbientrié	Asymetrievers les fins
P12	1.47	1.50	-0.68	Sable moyen	Mal trié	Asymetrievers les fins
P13	2.44	0.39	-0.20	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
P14	1.63	0.95	-0.15	Sable grossier	Modérementtrié	Asymetrievers les fins
P15	2.55	0.37	-0.15	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins
P16	1.23	1.82	-0.67	Sable moyen	Mal trié	Asymetrievers les fins
P17	2.65	0.38	0.02	Sable moyen	Trèsbientrié	Asymetrievers les fins

Annexe N°13 : Superposition de profil d'équilibre et les profils topo-bathymétrique (1, 5 et 6) de la campagne 25/05/2017

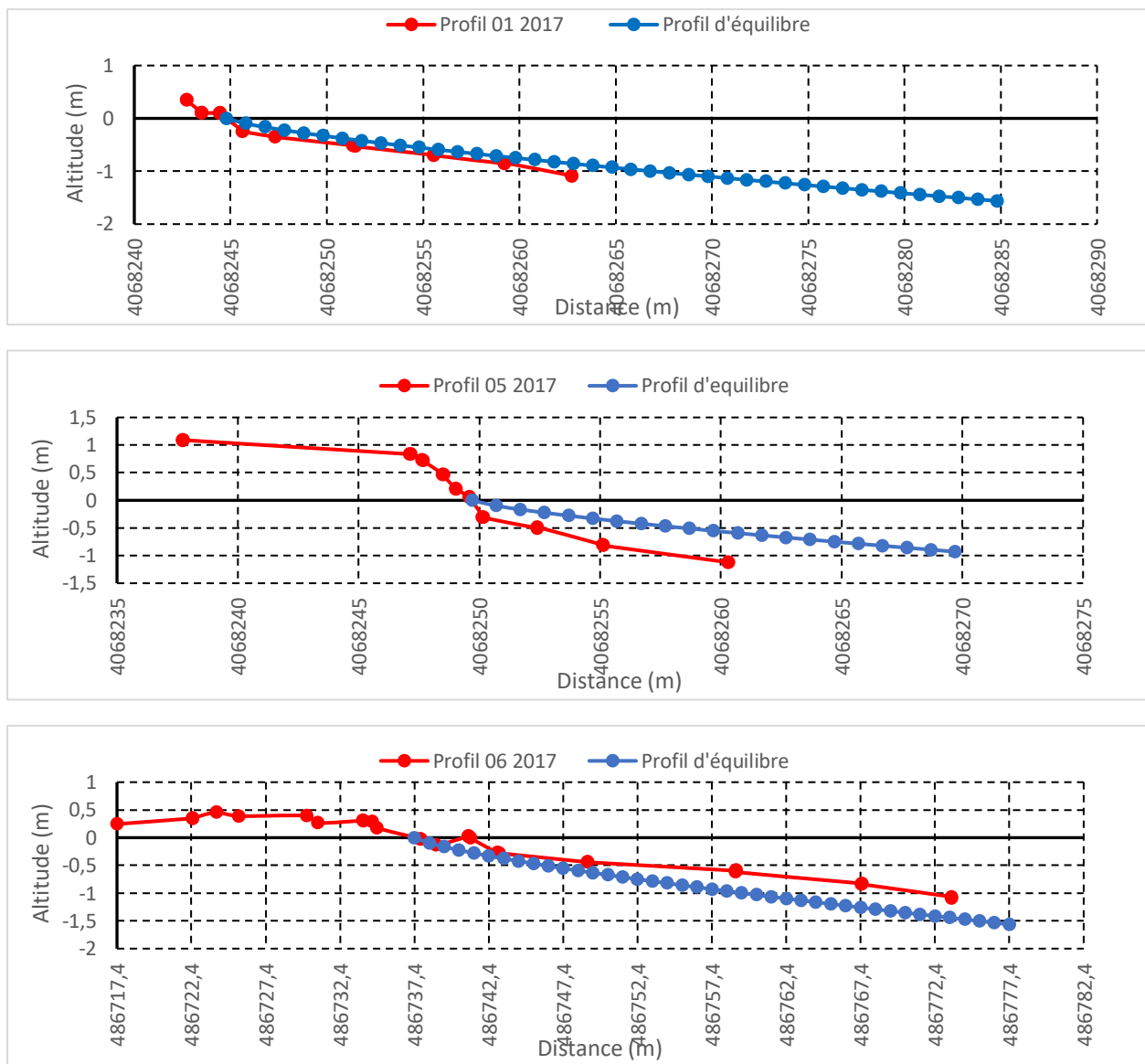


Figure 13 : Superposition de profil d'équilibre et les profils topo-bathymétrique (1, 5 et 6) de la campagne 25/05/2017

Annexe N°14 :

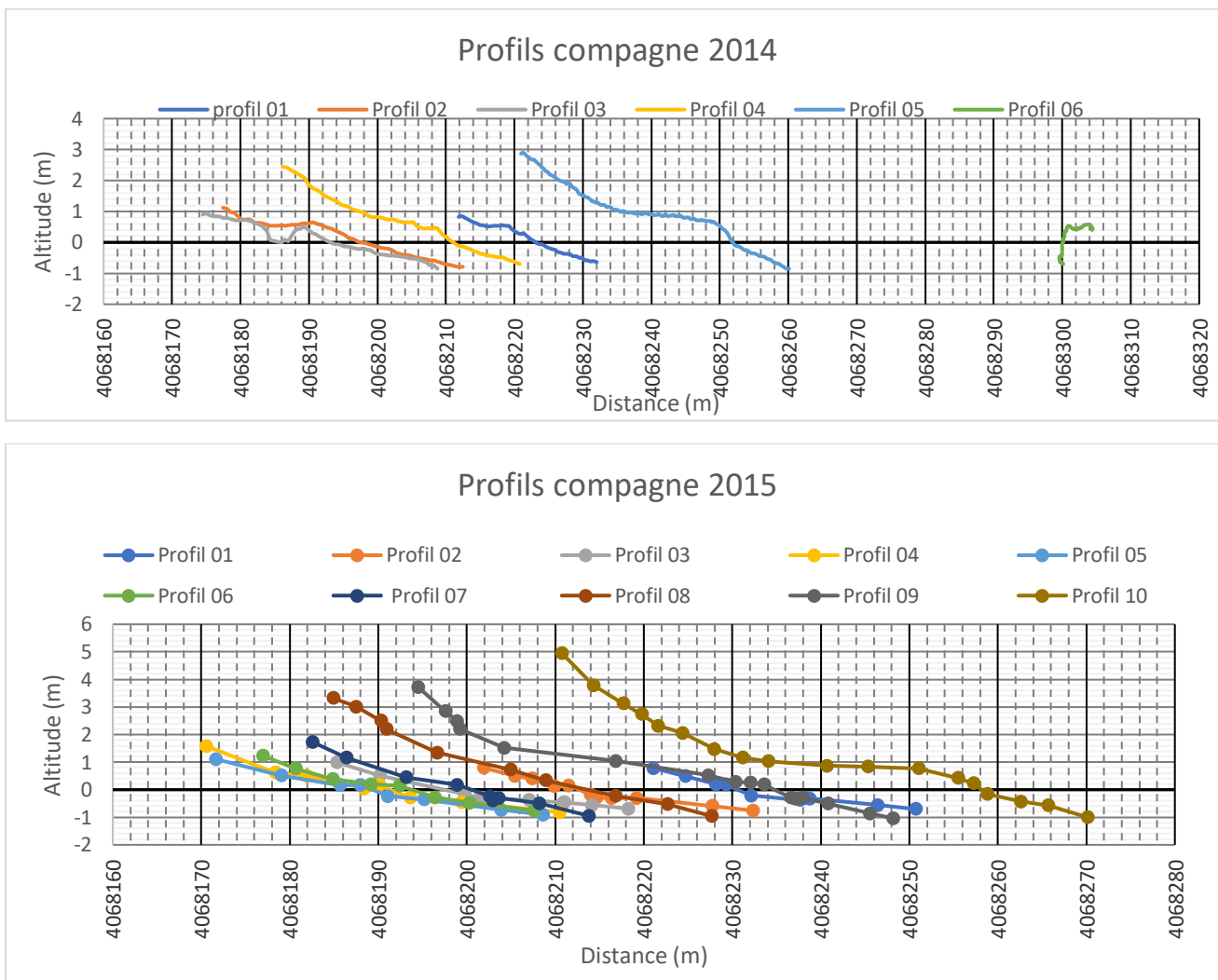


Figure 14 : Projection graphique des Profils topo-bathymétriques des campagnes 2014, 2015.

Annexe N°15 :

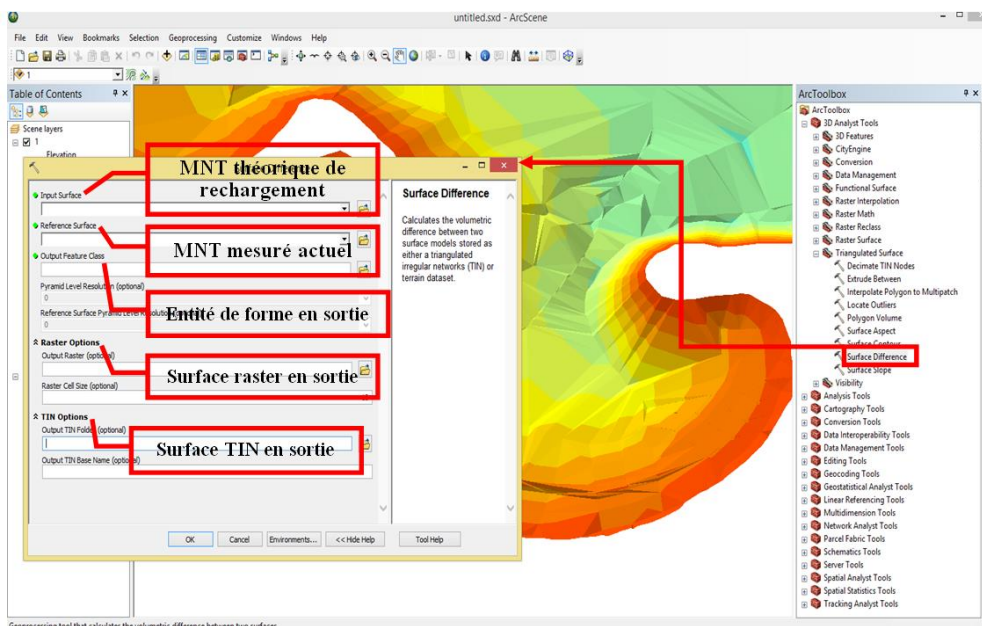


Figure 15 : L’outil « Surface difference » de Arc Toolbox de l’environnement ArcGIS

Résumé

La côte d'Alger, qui s'étend sur 87 km, connaît actuellement un développement socio-économique et urbain très intense provoquant de graves perturbations de l'environnement côtier. L'enjeu principal de cette étude est de comprendre les tendances évolutives de ce système et d'évaluer son état de vulnérabilité face au phénomène d'érosion. Ce problème d'érosion émane de la conjugaison entre phénomènes naturels et anthropiques. La pénurie sédimentaire causée entre autre, par la construction de barrages, l'hydrodynamique particulièrement pénalisant ainsi que la lithologie fragile pour certains des secteurs dans la zone, font que l'impact anthropique soit plus ressenti sur l'ensemble de la côte algéroise.

L'occupation de l'espace littoral de la zone s'est déroulée en plusieurs épisodes et s'est faite progressivement au détriment de nombreux espaces dunaires qui ont été dégradés (dunes actuelles meubles et dunes anciennes consolidées) et représentant environ 70% des espaces dunaires. Leur disparition s'est répercutée négativement sur l'alimentation naturelle en sédiments des plages dans cette zone. Semblablement, les plages et les falaises de la région algéroise subissent de nombreuses pressions. En effet, la perte des terres est très considérable (pas moins de 10 hectares seulement dans la région Est), menaçant parfois les biens et les infrastructures.

En effet, le besoin de loger les populations grandissantes d'une part, et, d'autre part la présence d'une côte vulnérable mettent en péril la fragilité du littoral. La mise en place d'un réseau de surveillance a permis un suivi multi-temporel de l'espace côtier de la région algéroise et ainsi, d'établir un diagnostic des éventuels liens de cause-à-effet et des corrélations entre les différents phénomènes observés sur le système côtier algérois. Cette compréhension permettra une meilleure aide à la prise de décision en matière de protection côtière pour le futur dans la région.

Abstract

The coast of Algiers, which stretches over 87 km, is currently experiencing a very intense socio-economic and urban development causing serious disturbances to the coastal environment. The main aim of this study is to understand the evolutionary trends of this system and to assess its state of vulnerability toward the phenomenon of erosion. This erosion problem stems from the combination of natural and anthropogenic phenomena. The sediment shortage caused by dams construction, a particularly penalizing hydrodynamic, as well as the fragile lithology of some of sectors in the area, make the anthropic impact more felt on the whole of Algiers coast.

The occupation of the coastal area occurred within several episodes and was done gradually at the expense of many dunes area (bordering dunes and consolidated old ones), approximately 70% of the dunes area has been degraded. Their disappearance has had a negative impact on the natural sediment supply of beaches in this area. Similarly, the beaches and cliffs of the Algiers region are undergoing many pressures. Indeed, the land loss is very significant (more than 10 hectares in the Eastern region), and sometimes threatens properties and infrastructures

The need to accommodate the growing population on the one hand, and the presence of a vulnerable coast in the other hand, endanger the area. The setting of a coastline monitoring network has enabled multi-temporal overseeing of the coastal area of the Algerian region which allows the establishing of a diagnosis of the possible cause-effect relationship between the various phenomena observed on the Algiers coastal system. The understanding of the coastal geosystem of Algiers will provide a better support for future decision-making for an optimal coastal protection of this sensitive area.

المخلص

يشهد ساحل الجزائر ، الذي يمتد على طول 87 كم ، تنمية اجتماعية واقتصادية شديدة الكثافة حالياً ، مما يسبب اضطرابات خطيرة في البيئة الساحلية. يكمن التحدي الرئيسي لهذه الدراسة في فهم الاتجاهات التطورية لهذا النظام وتقييم حالة تعرضه لظاهرة التآكل.

فعليا ، مشكلة التآكل التي يعيشها ساحل الجزائر ناجمة عن مزيج من العوامل الطبيعية والبشرية: إن النقص في الرسوبيات الناجم عن بناء السدود ، الهيدروديناميكا العنيفة والموجهة بشكل غير ملائم على الساحل ، وكذلك الخصائص الصخرية الهشة ، في بعض أجزاء المنطقة ، تجعل التأثير البشري أكبر على جميع أنحاء الساحل الجزائري.

لقد تم إعمار ساحل المنطقة تدريجياً على عدة حلقات و على حساب العديد من مناطق الكثبان الرملية التي تدهورت (الكثبان الساحلية الحالية والكثبان القديمة المتصلبة) : هذا التدهور يتراوح في حوالي 70% من مناطق الكثبان الرملية. وكان لاختفاء هذه الكثبان تأثير سلبي على الإمداد بالرواسب الطبيعية للشواطئ في هذه المنطقة. بالمثل ، تعاني الشواطئ والمنحدرات في منطقة الجزائر من العديد من الضغوط حيث يعد مقدار خسارة الأراضي كبير جداً (ما لا يقل عن 10 هكتارات في المنطقة الشرقية فقط) ، مما يهدد الممتلكات والبنية التحتية في اغلب الحالات.

إن الحاجة المتنامية إلى إسكان المواطنين جهة، و وجود خط ساحلي هش من جهة أخرى، يعرض الساحل لخطر تفاقم الهشاشة. لقد أتاح إنشاء شبكة الرصد لمراقبة الساحل لمنطقة الجزائر العاصمة، تشخيص الروابط المحتملة بين السبب والنتيجة والعلاقات بين مختلف الظواهر الملحوظة على النظام الساحلي الجزائري. هذا الفهم سيسمح بدعم أفضل لصناع القرار في المنطقة لحماية المناطق الساحلية في المستقبل.