الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Mer et de l'Aquaculture

Laboratoire Protection & Valorisation des Ressources Marines Littorales,
et Systématique Moléculaire, Univ. de Mostaganem

Laboratoire Espace Géographique et Aménagement du Territoire (EGEAT), Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

Spécialité : Valorisation et Gestion des Ressources Marines et Littorales

Option : Valorisation et Exploitation des Espaces naturels côtiers et des Géo-ressources marines et littorales

Présentée par

SENOUCI Rachida

Thème

Evolution spatio-temporelle du littoral de Mostaganem : morphologie, occupation du sol et identification des sites à géo-risques côtiers

Soutenue le 2 Juin 2022 devant le jury composé de :

Président	Pr. BACHIR BOUIADJRA Benabdellah	Université de Mostaganem
Directeur de thèse	Pr. TAIBI Nasr-Eddine	Université de Mostaganem
Co-directeur de thèse	Pr. MANSOUR Hamidi	Université Oran 2
Examinateur	Pr. GUERFI Mokhtar	USTHB, Alger
Examinateur	Pr. LARID Mohammed	Université de Mostaganem
Invitée	Pr. TEODORO Ana Claudia	Université de Porto/Portugal
Invitée	Pr. DUARTE Lia	Université de Porto/Portugal

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Toute ma gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à ALLAH tout Puissant qui m'a donné le courage, la force, la patience et la volonté afin de mener à ce travail de thèse.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon directeur de thèse le Professeur Taibi Nasr-Eddine pour sa disponibilité, sa patience et ses précieux conseils. Je le remercie surtout pour l'intérêt qu'il apporté durant la formation doctorale, l'attention avec laquelle il a suivi ma formation et mon travail de thèse, sa contribution et son aide dans les travaux de terrain, je ne saurais le remercier assez.

Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse le Professeur Mansour Hamidi de l'université Oran 2 pour ses conseils. Je tiens à remercier le professeur Bachir Bouiadjra Benabdellah, de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury, je lui en suis très reconnaissante. Je tiens à remercier le Professeur Guerfi Mokhtar de l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (USTHB), de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail de thèse et pour les notions de base du Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection qu'il m'a enseignées à l'ENSSMAL. Mes sincères remerciements vont à monsieur le Professeur Larid Mohammed, du département d'Agronomie de l'Université de Mostaganem, d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit de thèse.

Je tiens aussi à remercier le professeur Ana Claudia Teodoro et le professeur Lia Duarte pour l'accueil chaleureux au département du Géoscience, Environnement et Aménagement du Territoire de la faculté des Sciences de l'université de Porto dans le cadre de la formation résidentielle Erasmus MOBILE UNLIMITED Project (2018/2019 02ème semestre ; 2019/2020 1er semestre). Mes sincères remerciements vont également au professeur Ghodbani Tarik (directeur du laboratoire EGEAT, Université Oran 2) pour l'accueil et l'intégration à son équipe de recherche n° 4, pour ses orientations pertinentes et les opportunités de participer aux travaux de terrain.

Je remercie également le corps administratif du Commissariat National du Littoral, la Direction des Travaux Publics de la wilaya de Mostaganem et monsieur Boukhaloua (ex. responsable de la cartothèque de l'université Oran 2) de m'avoir fourni les données nécessaires pour achever ce travail de thèse. Ma gratitude va également aux membres du laboratoire Protection, Valorisation et Gestion des Ressources Marines et Littorales & Systématique Moléculaire et aux membres du laboratoire Espace Géographique et Aménagement du Territoire (EGEAT). Le meilleur étant pour la fin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à toute ma famille et mes amies pour leur soutien illimité, pour leurs encouragements, et leur énorme contribution à la réalisation de ce projet de thèse.

Résumé

Durant les trois dernières décennies (1987-2017), le littoral de Mostaganem a subi une transformation en terme de constructions pour satisfaire les besoins en logements, commerces, industrie et structures d'accueil et de récréation pour les touristes. Les terres cultivées n'ont également pas été épargnées par la littoralisation qui s'est produite principalement sur des terrains fragiles. L'intense utilisation de ce milieu a entrainé une multiplication des risques côtiers tels que l'érosion, le glissement, l'affaissement et les inondations. L'objectif de ce travail est d'établir une cartographie détaillée sur les changements spatiotemporels de l'occupation du sol durant la période 1987-2017. L'identification et l'analyse des sites susceptibles et présentant un risque aux glissements de terrain ont aussi été considérées dans ce travail. La méthodologie qui a permis d'atteindre ces objectifs consiste en l'évaluation des changements de l'occupation du sol intégrant le traitement des images satellitaires *Landsat* TM, ETM et OLI pour les années 1987, 2000 et 2017. L'analyse en composante principale (ACP) combinée avec l'algorithme *Maximum likelihood* a été appliquée aux images satellitaires. L'analyse de la susceptibilité au glissement de terrain à Mostaganem intègre l'utilisation de la géomatique. Neufs paramètres à savoir la lithologie, la pente, l'occupation du sol, l'aspect de pente, le plan de courbure, les précipitations, la distance aux cours d'eau, la distance aux réseaux routiers et la distance aux failles ont été pondérés selon deux méthodes la Combinaison de Carte d'Index (CCI) et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). En appliquant les outils du SIG, ces paramètres ont été combinés afin de produire des cartes de susceptibilité. L'analyse du risque au glissement de terrain a été réalisée en combinant la susceptibilité avec la vulnérabilité ; l'estimation de la vulnérabilité a considéré l'aspect physique, environnemental et social. L'analyse des changements de l'occupation du sol a montré que les classes « surface bâtie » et « sites de constructions » ont enregistré un gain estimé respectivement à 68.29% et 31.25%. Cette intense urbanisation du littoral s'est accompagnée d'une forte dégradation de la classe « plage, dunes, plaines formées de sable » et de la classe « dunes à dense végétation ». La régression de la surface de ces deux classes est estimée respectivement à 83.64% et 60.97%. La lithologie du littoral de Mostaganem, la densité de ses cours d'eau et la pente de ses terrains favorisent l'occurrence des glissements de terrain. L'analyse de la susceptibilité au glissement de terrain du littoral de Mostaganem montre que les sites les plus susceptibles se situent au niveau du noyau urbain près de la route nationale RN11. Quant à l'analyse du risque de glissement, il est à noter que le domaine littoral de Mostaganem présente un degré élevé de risque. Ce fait est justifié par l'importance des enjeux socioéconomiques existants et ceux projetés sur des terrains fragiles. Cette étude pourrait être utile pour les décideurs locaux du littoral de Mostaganem.

Mots clés : Géomatique, image satellitaire, susceptibilité, glissement de terrain, Mostaganem.

Abstract

During the last three decades (1987-2017), Mostaganem coast has undergone a transformation in terms of construction to meet the needs of housing, trade, industry and structures of reception and recreation for tourists. The agricultural land has also not been spared by the littoralization that has occurred mainly on fragile land. The intense use of this environment has led to an increase of coastal hazards such as erosion, landslides, subsidence and flooding. The objective of this work is to establish a detailed mapping of spatiotemporal changes in land cover during the period 1987-2017. The identification and analysis of susceptible and risky sites to landslides were also considered in this work. The methodology followed consists in the evaluation of land cover changes by processing of *Landsat* TM, ETM and OLI satellite images for the years 1987, 2000 and 2017. Principal Component Analysis (PCA) combined with the *Maximum likelihood* algorithm was applied on satellite images. The analysis of landslide susceptibility in Mostaganem incorporates Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) techniques. Nine parameters namely lithology, slope, land use, slope aspect, curvature plane, rainfall, distance to stream, distance to road networks and distance to faults were weighted according to two methods namely Combination Index Map (CCI) and Analytical Hierarchy process (AHP). By applying GIS tools, these parameters were combined to produce susceptibility maps. The landslide risk analysis was realized by combining susceptibility and vulnerability maps. The analysis of vulnerability considered physical, environmental and social aspects. The analysis of land cover changes showed that the classes "built-up area" and "construction sites" recorded a considerable gain of 68.29% and 31.25% respectively. This intense urbanization of the coast was accompanied by a strong degradation of the class "beach, dunes, sand plains" and the class "densely vegetated dunes". The regression of the two classes area is estimated at 83.64% and 60.97% respectively. The lithology of Mostaganem coast, streams density and the slope of its land has led to landslide occurrence. The analysis of the susceptibility to landslides of Mostaganem coast shows that the most susceptible sites are located in the urban nucleus and near the national road RN11. The analysis of landslide risk showed that the Mostaganem coast presents a high degree of risk. This fact is justified by the importance of existing and projected socio-economic issues on fragile land. This study could be useful for local decision makers of the Mostaganem coast.

Keywords: Geomatics, satellite image, landslide, susceptibility, Mostaganem

الملخص:

شهد ساحل مستغانم خلال العقود الثلاثة الأخيرة (1987-2017م) تحولا كبيرا في الشريط الساحلي من أجل تلبية الاحتياجات من حيث: بناء المساكن، الصناعات، مرافق التسلية والسياحة.

إن الاستغلال المفرط لساحل مستغانم في الأراضي الهشة أدى الى تضاعف المخاطر الساحلية من انجراف للتربة، انهيارات وفيضانات، كما أن ذلك الاستعمال المفرط لم تسلم منه حتى الأراضي الفلاحية.

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة التغيرات المكانية التي طرأت على ساحل مستغانم خلال العقود الثلاثة (1987-2017)، وقابلية ساحل مستغانم للانزلاقات الأرضية؛ كما تهدف أيضا الى تحديد مواقع الانزلاقات الأرضية وخطرها.

هذه الدراسة تستلزم استخدام صور "القمر الصناعي لاندسات" للسنوات التالية 1987،2000،2017م ومعالجتها من خلال جمع وتحليل العنصر الرئيسي (ACP) وخوارزمية تقدير تسلسل الاحتمالية القصوى (MLC) لمعرفة تغيرات ساحل مستغانم.

ولدراسة قابلية ساحل مستغانم للانزلاقات الأرضية تم استخدام "نظم المعلوماتية الجغرافية"(SIG)حيث تم دمج تسع عوامل هي: نوعية الصخور، المنحدر، الغطاء الأرضي، جانب المنحدر، التساقطات، الحد الأدنى، المسافة إلى المجاري المائية، المسافة إلى الطرقات، المسافة إلى الانكسارات؛ كما تم تقييم وزن هذه العوامل حسب طريقة التحليل الهرمي(AHP) وجمع مؤشر الخرائط(CCI).

بتطبيق تقنيات "النظم المعلوماتية الجغرافية"(SIG)تم جمع مختلف العوامل من أجل إنشاء "خريطة الأماكن القابلة للانزلاقات"، كماقمنا بدراسة تحديد مناطق خطر الانزلاقات في ساحل مستغانم حيث تم دراسة الهشاشة من عدة جوانب هي: الاجتماعية، العمرانية والبيئية.

لقد أظهرت دراسة التغيرات المكانية لساحل مستغانم فيما يخص النسيج العمراني ومناطق البناء اللذان شهدا نموا من حيث المساحة حيث تقدر زيادة هذين القسمينخلال الفترة الممتدة بين 1987 و2017 بـ 68.29٪ و32.25٪.

إن التطور العمراني بمستغانم رافقه انخفاض في مساحة "الشواطئ والكثبان والسهول الرملية" و"الكثبان المتماسكة" حيث قدرت نسبة انخفاض المساحة بـــ 83.64 ٪ و60.97٪ على التوالي؛كما أن حدوث الانهيارات كان بسبب: نوعية الصخور وكثافة المجاري المائية والمنحدر؛ أثبتت دراسة قابلية الانزلاقات في ساحل مستغانم بأن المناطق القابلة للانزلاقات تتواجد على مستوى مركز النسيج العمراني وبجانب شبكة الطرقات.

أما بالنسبة لتحديد مناطق خطر الانزلاقات فقد أظهرت النتائج أن ساحل بلدية مستغانم يظهر درجة عالية من الخطورة نظرا لكثافة المرافق الاجتماعية والاقتصادية المتواجدة بهذه البلدية؛ ويمكن أن تكون هذه الدراسة مفيدة لصانعي القرار المحليين على مستوى ساحل مستغانم.

الكلمات المفتاحية : الجيوماتيك، صور القمر الصناعي، الانهيارات الأرضية، القابلية، مستغانم.

Table des Matières

Table des matières

Remerciements

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Introduction générale 18

Introduction 18

Problématique du littoral de Mostaganem et choix de site d'étude 20

Objectifs 21

Méthodologie et structure de la thèse 21

Structure du manuscrit 21

Apport de la géomatique pour l'analyse spatiale de l'occupation du sol et l'indentification des sites à risque de glissement de terrain 22

Méthodologie de travail 23

Chapitre 1 : Mouvements de terrain : notions, classification et méthodes d'analyse

Introduction 25

1.1. Aperçu sur la classification des mouvements de terrain 25

1.1.1. Affaissement ou tassement 27

1.1.2. Gonflement et retrait 27

1.1.3. Glissements de terrain 27

1.1.4. Effondrements 28

1.1.5. Eboulements 28

1.1.6. Coulées de boues 28

1.2. Notions de susceptibilité/aléa 29

1.3. Méthodes et techniques d'évaluation de la susceptibilité et/ou l'aléa de glissement de terrain. 29

1.3.1. Méthodes qualitatives 30

1.3.1.1. Inventaire des glissements de terrain 30

1.3.1.2. Méthodes directes « géomorphologiques » 31

1.3.1.3. Méthodes indirectes 31

Logique des floues (LF) 32

Méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI) 32

Systèmes multicritères 32

1.3.2. Méthodes quantitatives 32

1.3.2.1. Approche statistique 32
Analyse bivariée 33
1.3.2.1. Approche déterministe 36
Modèle de pente infinie 36
1.4. Aperçu sur la notion de risque et la vulnérabilité 37
1.4.1. Risque 37
1.4.2. Vulnérabilité 37
1.4.2.1. Composantes de la vulnérabilité 38
1.4.2.2. Méthodes d'analyse de la vulnérabilité 38
Conclusion 39
Chapitre 2 : Littoral de Mostaganem : contexte législatif, géographique, géologique et climatique
Introduction 41
2.1. Généralités sur la notion du littoral 41
2.2. Littoralisation (facteur anthropique déclenchant de nombreux problèmes environnementaux) 42
2.3. Protection et délimitaton juridique du littoral algérien 44
2.4. Présentation de la wilaya de Mostaganem 46
2.5. Cadre géomorphologique de la wilaya de Mostaganem 47
2.6. Littoral de Mostaganem 48
2.7. Zone d'étude 49
2.7.1. Localisation géographique 49
2.7.2. Cadre géologique de la zone d'étude 51
2.7.3. Ressources hydriques 53
2.7.3.1. Réseau hydrographique 53
2.7.3.2. Potentialités des eaux souterraines 53
2.7.4. Cadre climatique 54
2.7.4.1. Précipitations 55
2.7.4.2. Température 56
Conclusion 59
Chapitre 3 : Dynamique de l'occupation du sol dans le littoral de Mostaganem
Introduction 61
3.1. Méthodologie 61
3.1.1. Acquisition des données satellitaires 63
3.1.2. Prétraitement des données satellitaires 64
3.1.2.1. Correction atmosphérique 64
3.1.2.2. Analyse en composante principale (ACP) 66
3.1.3. Acquisition des données non satellitaires 67

3.1.4. Classification et comparaison des images 68
3.1.5. Evaluation de la performance des classifications 69
3.1.5.1. Précision globale 69
3.1.5.2. Coefficient de concordance 70
3.2. Résultats et discussions 71
3.2.1. Plage, dunes et plaines formées de sable 75
3.2.2. Dunes à dense végétation 84
3.2.3. Activité agricole 85
3.2.4. Zones à dense végétation 87
3.2.5. Développement du tissu urbain 88
3.2.5.1. Historique du développement des noyaux urbains à Mostaganem 88
3.2.5.2. Evolution de l'urbanisation durant la période 1975 et 1986 89
3.2.5.3. Evolution de la surface bâtie durant la période 1987-2017. 90
3.2.6. Oued Cheliff 91
3. 3. Impact de la croissance démographique sur les changements de l'occupation du sol 92
Conclusion 93

Chapitre 4 : Analyse spatiale et cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

Introduction 95
4.1. Glissements de terrain en Algérie 95
4.2. Méthodologie 95
4.2.1. Conception de l'inventaire du glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem 96
4.2.2. Description des paramètres contrôlant l'occurrence des glissements 98
4.2.3. Evaluation de la susceptibilité aux glissements 110
4.2.3.1. Combinaison de Carte d'Index (CCI) 110
4.2.3.2. Analyse par Processus Hiérarchique (Analyse multicritères) 110
a. L'évaluation de la cohérence des jugements 112
a. Méthode de superposition pondérée (WOM) 113
b. Normalisation 113
4.3. Résultats et discussions 114
4.3.1. Combinaison de Carte d'Index (CCI) 114
4.3.2. Pondérations par processus d'analyse hiérarchique 114
4.3.3. Cartographie de la susceptibilité au glissement de terrain 117
4.3.4. Validation des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain 127
Conclusion 129

Chapitre 5 : Impact du changement de l'occupation du sol sur la zonation du susceptibilité et évaluation du risque de glissement dans le littoral de Mostaganem

Introduction 132

5.1. Impact des changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem sur la susceptibilité au glissement de terrain 132

5.2. Analyse de risque de glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem 141

5.2.1 Méthodologie de travail 141

5.2.1.2. Cartographie de la vulnérabilité aux glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem 142

5.2.1.3. Détermination du poids des paramètres 150

5.2.1.4. Cartographie et analyse du risque de glissement 151

5.2.2. Résultats et discussions 152

5.2.2.1 Cartographie de la susceptibilité au glissement de terrain 152

5.2.2.2. Cartographie de la vulnérabilité 152

5.2.2.3. Evaluation du risque de glissement de terrain 154

Conclusion 161

Conclusion générale

Conclusion générale 163

Références bibliographiques

Références bibliographiques 169

References 169

Textes juridiques 193

Site web 194

Annexes

Annexe1: Analyse en composante Principale 196

Annexe 2 : Matrices de Confusion 197

Annexe 3: Evolution de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem 199

Annexe 4 : Production scientifique 203

Liste des figures

Figure 1 :Différents types de mouvement de terrain (https://www.heritage.nf.ca). 26
Figure 2 :a. Glissement translationnel ; b. Glissement rotationnel (www.irma-grenoble.com) 28
Figure 3 :Méthodes d'analyse de la susceptibilité et/ou l'aléa selon (Thierry, 2019 ; Pardeshi et al., 2013) 30
Figure 4: Cellule hydrosédimentaire (http://obscat.fr/glossaire) 43
Figure 5 : Délimitation du domaine littoral en Algérie (PAC, 2005) 46
Figure 6: Localisation de la wilaya de Mostaganem (www.mediafire.com) 46
Figure 7 : Morphologie de la wilaya de Mostaganem (Caîd et al., 2019) 48
Figure 8 : Limites administratives du littoral de Mostaganem (PAC, 2005) 49
Figure 9 : Zone d'étude « littoral de Mostaganem » 50
Figure 10 : Géologie du littoral de Mostaganem (Carte géologique 1/200 000) 52
Figure 11 : Réseau hydrographique du littoral de Mostaganem (Carte topographique 1/50 000) 54
Figure 12 : Etage bioclimatique de l'Ouest d'Algérie (Fekir,2021) 55
Figure 13 : Variation mensuelles des précipitations au niveau des stations de Mostaganem et Cap Ivi (1976-2007) 56
Figure 14 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles de la station de Mostaganem et Cap Ivi (1976-2007) 57
Figure 15 : Diagramme ombrothermique enregsitré de la Station de Mostaganem (1976-2007) 58
Figure 16 : Diagramme ombrothermique enregsitré de la station de Cap Ivi (1976-2007) 58
Figure 17 : Méthodologie de travail 62
Figure 18 : Principe de la réflectance du rayonnement électromagnétique (www.sigterritoires.fr.) 64
Figure 19 : Principe de la correction atmosphérique (DOS) in *QGIS* 3.4.0 65
Figure 20 : a. Avant la correction ; b : Après la correction 66
Figure 21 : Fausse composition colorée de l'image satellitaire Landsat TM 1987 (RGB : 241). 67
Figure 22a : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 1987 72
Figure 22b : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 2000 73
Figure 22c : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 2017 74
Figure 23a : Déclin du vignoble algérien durant la période (1958-1983) (Caîd et al., 2019) .. 76
Figure 23b : Déclin du vignoble à Mostaganem durant la période (1983-2017) (Caîd et al., 2019) 76
Figure 24 : Déclin de la classe plage, dunes et plaines formées de sable (2000 -2017) 78
Figure 25 : Les Zones d'Expansion Touristiques à Mostaganem (ANAT, 2005) 81
Figure 26 : ZEST de Benabdelmalek Ramdane (ANDT, 2005a) 82
Figure 27 : ZEST de Chéliff plage : a. La plage en 2009 ; b. la plage en 2010 (Google Earth Pro, 2021). 83
Figure 28 : Aménagement de la ZEST de Chéliff plage : c. Plage en 2012 ; d. Plage en 2017 (*Google Earth Pro*, 2021) 83

Figure 29 :Evolution du système dunaire côtier Kharrouba entre 1989-2016 (Senouci et Taibi, 2019)..... 85
Figure 30 : Principaux sites et réseaux routiers de Mostaganem durant la période coloniale (Péchoux, 1975)..... 89
Figure 31 :Exploitation du milieu naturel côtier (a. Kharrouba (Photographie : N. TAIBI2019), b. Plage Chéliff (Photographie : SENOUCI2018) 91
Figure 32 : Croissance démographique durant la période 1987-2016..... 92
Figure 33 : Méthodologie de travail appliquée pour la zone d'étude..... 96
Figure 34 : Carte d'inventaire des glissements de terrain (littoral de Mostaganem) 97
Figure 35 : Glissements de terrain et affaissements dans le littoral de Mostaganem (a. Falaise de Sidi El Mejdoub ; b. Parking du Site V de l'Université de Mostaganem ; c. Route à Hai Salam ; d. Route Nationale RN11 (Sonactère)..... 98
Figure 36 : Carte de la lithologie du littoral de Mostaganem..... 99
Figure 37 : Carte de la pente du littoral de Mostaganem 100
Figure 38 : Carte de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem 102
Figure 39 : Carte d'exposition du littoral de Mostaganem..... 103
Figure 40 : Carte de plan de courbure du littoral de Mostaganem 104
Figure 41 : Carte des précipitations du littoral de Mostaganem..... 106
Figure 42 : Carte de la distance aux cours d'eau dans le littoral de Mostaganem 107
Figure 43 : Carte de la distance au réseau routier dans le littoral de Mostaganem 108
Figure 44 : Carte de la distance aux failles dans le littoral de Mostaganem 109
Figure 45 A: Carte de degré de susceptibilité au glissement de terrain dans la zone d'étude produite selon la méthode CCI / avant la normalisation 117
Figure 45 B: Carte de degré de susceptibilité au glissement de terrain dans la zone d'étude produite selon la méthode AHP combiné au WOM)/avant la normalisation) 118
Figure 46 : Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par « Equal interval classification » (littoral de Mostaganem)..... 119
Figure 47 : Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par « Standard deviation classification » (littoral de Mostaganem) 120
Figure 48: Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par la méthode « Natural Breaks classification » (littoral de Mostaganem)..... 121
Figure 49 A: Reclassification des cartes de degré de susceptibilité au glissement de terrain après la normalisation (produite selon la méthode CCI) 122
Figure 49 B : Reclassification des cartes de degré de susceptibilité au glissement de terrain après la normalisation (produite selon la méthode AHP combiné au WOM)..... 123
Figure 50 : Densité de glissements dans les classes (occupation du sol dans le littoral de Mostaganem)..... 125
Figure 51 : Densité de glissements de terrain (distance aux routes dans le littoral de Mostaganem)..... 125
Figure 52 : Courbe AUC-ROC (CCI et AHP combinés avec WOM) pour le littoral de Mostaganem 129
Figure 53 : Degré de susceptibilité au glissement de terrain pour l'année 1987 (littoral de Mostaganem)..... 135

Figure 54: Degré de susceptibilité au glissement pour l'année 2000 (littoral de Mostaganem) 136
Figure 55: Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité aux glissements dans le littoral de Kharrouba, littoral de Mostaganem (a.1 Degré de susceptibilité pour l'an 1987 ; a.2.Degré de susceptibilité en 2000 ; b.1. Occupation du sol en 1987 ; b.2. occuption du sol en 2000 138
Figure 56: Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité au glissement durant la période 1987-2000, site direction Sud-Est du littoral de Mostaganem (a.1. Degré de susceptibilité en 1987 ; b.2.Degré de susceptibilité 2000 ; b.2. Occupation du sol 2000 139
Figure 57: Degré de susceptibilité au glissement de terrain pour l'année 2017 (littoral de Mostaganem) 140
Figure 58: Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité au glissement durant ma période 2000-2017 à Kharrouba. (a.1. Degré de susceptibilité en 2000 ; a.2. Degré de susceptibilité en 2017 ; b.1. Occupation du sol en 2000 ; b.2. Occupation du sol en 2017 141
Figure 59: Méthodologie de travail 142
Figure 60: Construction d'habitations dans le littoral de Mostaganem (2017) 144
Figure 61: Densité du réseau routier du domaine littoral de Mostaganem et Benabdelmalek Ramadane 145
Figure 62: Densité des ressources naturelles du littoral de Mostaganem 147
Figure 63A :Densité de la population (littoral de Mostaganem) 148
Figure 63B :Densité de la population (littoral de Mostaganem) 149
Figure 64:Matrice de la combinaison de la susceptibilité et la vulnérabilité 151
Figure 65:Vulnérabilité au glissement de terrain (littoral de Mostaganem, 2019) 153
Figure 66 A:Carte de risque du littoral de Mostaganem produite selon la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) 155
Figure 66 B:Carte de risque du littoral de Mostaganem a. produite selon la méthode AHP combinée avec la WOM 156
Figure 67: Degré d'aléa de glissement de terrain à Mostaganem et à Mazagran(2017) 159
Figure 68:Vulnérabilité des communes littorales de Mostaganem et Mazagran (2017) 160
Figure 69:Risque de glissement dans les communes de Mostaganem et Mazagran(2017) ... 161

Liste des tableaux

Tab.1: Caractéristique des images satellitaires 63
Tab.2: Composantes principales de l'image satellitaire de 1987 67
Tab.3: Nature juridique des terres exploitées (Source DSA / PDAU 2006) 87
Tab.4: Echelle de Saaty (Saaty, 1977) 112
Tab.5: Indice aléatoire de la cohérence (Saaty, 1977) 112
Tab. 6: Poids et rang des différents paramètres selon l'approche CCI et l'AHP 115
Tab.7 : Classes de susceptibilité 124
Tab.8: Distribution des degrés de susceptibilité au glissement 126
Tab. 9: Attribution de l'échelle numérique 127
Tab.10: Emplacement des cas de glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem 128
Tab.11: Degré de susceptibilité au glissement de terrain de l'année 1987, 2000 et 2017 137
Tab.12: Densité des éléments de vulnérabilité 149
Tab. 13:Description de degré de vulnérabilité selon Malet et *al*., (2006) 151
Tab.14: Degré de risque de glissement de terrain (Malet et *al.,* 2006) 152
Tab.15:Degré de risque dans le littoral de Mostaganem 157
Tab.16: Superficie des degrés d'aléa 160

Liste des abréviations

ACOLITE : Atmospheric Correction for OLI ‘lite’

OA : Overall Accuracy

AHP :Analytical Hierarchy Proccess

ANDT : Agence Nationale du Développement du Tourisme

BSQ : Band Sequential

CCI : Combinaison de Carte d’Index

CENEAP : Centre National d’Etudes et d’Analyse pour la Population

CNL : Commissariat National du Littoral

CR : Cohérence du ratio

DL : Deep Learning

DOS : Dark Object Subtraction

DTA : Direction du tourisme et de l’artisanat

DTP : Direction des Travaux Publics

DUCH : Direction d’Urbanisme, de Construction et d’Habitat

ETM : Enhanced Thematic Mapper

FLAASH : Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

FR : Frequency Ration

GNSS : Système Global de Navigation par Satellite

HLM : Habitations à Loyer Modéré

IV : Information Value

LCS : Land Cover Science

LEM : Laboratoire des Etudes Maritimes

LR : Logistic Regression

LF : Logique des floues

L8SR : Provisional Landsat-8 Surface Reflectance Algorithm

LULCC : Land Use / Land Cover Change

MATE : Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire

MATTA : Ministère de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de l'Artisanat

MLC : Maximum Likelihood Classifier

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSS : Multi Spectral Scanner

OLI : Operational Land Image

ONS : Office National des Statistiques

OVEF : l'Office Fédéral de l'Environnement

PAC : Plan d'Aménagement Côtier

PCA : Principal Component Analysis

PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme

POS : Plan d'Occupation du Sol

PPR : Plan de Prévention du Risque

PUD : Plan d'Aménagement Urbain

QUAC : Quick Atmospheric Correction

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

ROI : Regions Of Interest

SCP : Semi-automatic Classification Plugin

TM : Thematic Mapper

USGS : United States Geological Survey

Introduction Générale

Introduction générale

Introduction

Le littoral est la zone de transition entre l'environnement marin et terrestre (Wang *et al.,* 2017 ; Baztan *et al.,* 2015). Ces milieux sont des régions à haute production biologique. Ils sont largement reconnus comme une composante importante de la biosphère (Crossland *et al.,* 2005). Du point de vue écologique, ces zones sont riches en espèces et d'habitat génétiquement diversifié. Du point de vue climatique, le milieu littoral constitue une source, un puit d'oxygène et de carbone. Il joue un rôle de tampon dans la régulation du climat du globe (Kies et Kerfouf, 2014 ; Calvão *et al.,*2013 ; Nemani et Running, 1996 ; Yagoub et Kolan, 2006). Depuis l'antiquité, le milieu littoral a été toujours convoité par l'être humain. Avec le développement des sociétés, l'occupation du sol des milieux littoraux a été modifiée considérablement. De nombreux enjeux en termes d'urbanisme, loisirs, tourisme balnéaire, industrie et culture y se sont installées. Les secteurs de la pêche et de l'aquaculture par exemple se sont multipliés sur les zones côtières (MEEDDM, 2010 ; Postacchini et Romano, 2019 ; Rizzo et Anfuso , 2020). Ces zones sont devenues fortement plus urbanisées que celles de l'arrière-pays (Ferreira *et al.,* 2021 ; Rizzo et Anfuso, 2020) ; elles abritent environ 40 % de la population mondiale (Pasquali et Marucci, 2021). De nombreuses études ont estimé que approximativement 600 millions de personnes vivent en zone côtière ce qui représente 10 % de la population mondiale (McGranahan *et al.,* 2016). Neumann *et al.* (2015) ont montré que cette tendance devrait s'accentuer dans l'avenir selon différents scénarios économiques et de développement établis pour les années 2030 et 2060.L'étude a également prédit que dans le scénario tendanciel « des pires conditions » caractérisé par une faible gouvernance politique, une forte croissance économique mondiale et une augmentation de la population (Neumann *et al.*, 2015),la frange côtière mondiale comptait 625 millions d'habitants en l'an 2000. Pour les horizons 2030 et 2060, la population en zone côtière serait respectivement 949 et 1388,2 millions de personnes. La demande très élevée et la pression croissante sur les milieux littoraux peuvent créer des conséquences imprévues. De nombreux conflits et problèmes peuvent se multiplier. Par exemple, la forte densité des populations, la pollution, l'exploitation abusive des ressources naturelles et les variations du trait de côte (Guneroglu, 2015).

L'Algérie, à l'instar des autres pays méditerranéens, dispose d'un patrimone naturel côtier important (Fekir, 2021). Le littoral algérien s'étend sur un linéaire côtier de 1622 km (Hemdane *et al.,* 2016). Il revêtit un inérêt important par son ouverture sur la Mer Méditerranée

qui est un lieu d'échanges commerciaux. Depuis les années 70, le littoral algérien a subi une pression intense en terme d'utilisation et d'occupation du sol dues à l'accroissement de la population. La densification de la population de la zone côtière s'est accentuée durant la période 1990-2000 suite à l'exode rurale due au climat d'insécurité (Haffad, 2004 ; Ghodbani, 2009 ; Rabehi, 2018), un phénomène qualifié haliotropisme. Selon Grimes (2015), 37% de la population algérienne habite dans la frange littorale qui constitue 1,9% de la superficie de l'Algérie. Ce sont les grands métropoles, telles que Alger, Oran et Annaba, qui ont expérimenté une forte littoralisation. Selon Kacemi (2008), l'accroissement démographique a entrainé une urbanisation intensive de l'espace côtier passant de 26% en 1962 à 59,4% en 1998. Cette situation a engendré un changement drastique de la morphologie littorale et une intensification des problèmes environnementaux (érosion côtière, pollution et submersion marine).

Depuis les années 2000, l'Algérie a assisté à une montée des préoccupations face à la question de la dégradation de l'environnement côtier, et une demande accrue en matière d'outils et de lois de protection de ce milieu. Suite à un constat de la dégradation du littoral algérien, une loi relative à la protection et à la valorisation du littoral a été promulguée en 2002. La loi 02-02 du 05 février 2002 montre les dispositions de protection et la valorisation du littoral algérien. Le Plan d'Aménagement Côtier (PAC), un des outils de la loi 02-02 qui définit et délimite l'espace littoral.

Selon Kacemi (2008), les décrets d'application de cette loi tardent à venir. La centralisation des décisions environnenmentales telles que les études des Plans d'Aménagement Côtier ont été initiées et financées par le Ministère de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de l'Artisanat (MATTA) et puis présentées aux autorités des wilayas littorales. Également, le manque de la concertation, l'intégration et la participation entre les différents secteurs chargés de l'application de cette loi, à savoir le secteur de l'environnement, secteur de l'urbanisme , secteur du tourisme et de l'artisanat, secteur des travaux publics, secteur de l'hydraulique, secteur de la santé. La non disponibilité des données et le manque de moyens au niveau des directions a mis en difficulté l'application de la loi 02-02. Ce type de gestion bureaucratique a induit une dégradation continue de l'environnement côtier. Cette situation est illustrée par le cas du littoral de Mostaganem, objet de ce travail de thèse.

Problématique du littoral de Mostaganem et choix de site d'étude

Le littoral de Mostaganem, localisé dans l'Ouest algérien, s'étend sur une superficie de 21230 ha et un linéaire côtier de 124 km présentant différents habitats (côtes sableuses, côtes rocheuses, zone humide et zones à dense végétation) (ANAT, 2005). Oued Chéliff sépare le littoral mostaganémois en deux parties. La côte Est présente des plages avec systèmes dunaires, et plaines de sédiments importantes. Les forêts y couvrent plus de 50% de la superficie. En comparaison, la côte Ouest est fortement urbanisée. Notre site d'étude couvre le domaine littoral de la commune de Mostaganem et Benabdelmalek Ramadane et une partie de la commune de Sayada. Ce domaine occupe une superficie de 5252 ha et s'étend sur un linéaire côtier de 36,28 km. Durant les trois dernières décennies (1987-2017), le littoral de Mostaganem a expérimenté une forte transaformation de l'occupation du sol afin de satisfaire les besoins socioéconomiques de la population locale (Senouci et Taibi, 2019). Selon Achankeng (2003), la transformation de l'occupation du sol des milieux côtiers est un phénomène socioéconomique universel. À Mostaganem, les changements de l'occupation/utilisation du sol ont passé par trois période principales : la période coloniale (1910-1959), Mostaganem connut l'édification de quelques quartiers appelés actuellement « Bled : ancienne ville ». Durant la période 1987 – 2000, Mostaganem a expériementé une urbanisation intensive en raison de l'accroissement démographique (Senouci et Taibi, 2019). À partir des années 2000, le développement économique de Mostaganem a pris de l'ampleur. De nombreux projets d'industrie, d'installation portuaire et d'infrastructures touristiques ont été lancés. L'intense utilisation du milieu côtier s'est produite sur des sites à faible résilience telque les dunes consolidées et les plages. Cette situation est observée à Sablettes, Salamandre,Kharrouba, Plage de Sonactère et Cap Ivi. Les terres agricoles n'ont également pas été épargnées par les projets de construction. Selon Taibi (2016), différents projets de construction ont été réalisés en dépit de la loi littoral 02-02 du 05 février 2002 et la loi n° 83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement. L'étude d'impact sur l'environnement côtier où ces projets ont été concrétisés était insuffisante. Les changements dramatiques et l'altération du payasage côtier de Mostaganem ont induit une intensification des risques d'érosion, de glissement et d'affaissement (Senouci *et al.,* 2021 ; Bengoufa *et al.,* 2021). Le choix de la commune de Mostaganem et celle de Benabdelmalek Ramadane n'est pas anodin, il est justifié par rapport à leurs caractéristiques géomorphologiques ainsi que la pression anthropique qu'ils subissent. À l'heure actuelle, la majorité des études réalisées sur la côte de Mostaganem se sont intéressés à la géographie physique (Ghodbani *et al.,* 2016 ; Taibi, 2016 ; Caïd *et al.,* 2019). En contraste,

l'étude des risques côtiers dans cette wilaya sont sporadiques ; à cet égard, Bengoufa *et al.* (2021) ont identifié des sites à risques d'érosion côtière.

Objectifs

Le littoral de Mostaganem a suscité un attrait croissant à partir les années 1987. Sur cette frange, se sont installées des communautés occupant l'environnement littoral (Yamani et Trache, 2020). Actuellement, le littoral mostaganémois est devenu un milieu à risque. Des aléas de glissement et d'affaissement liés aux changement de l'occupation du sol se sont multipliés. (Senouci *et al.,* 2020 ; Meur-Férec et Morel, 2004). De ce fait, les objectifs suivants ont été ciblés :

- Élaboration d'une cartographie détaillée sur la dynamique de l'occupation du sol dans le littoral de Mostaganem, un espace jugé très attractif et à très faible résilience.

- Identification des sites susceptibles aux glissements de terrain ;

- Evaluation et appréhension des effets de l'évolution de l'occupation du sol sur le zonage de la susceptibilité au glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem ;

- Identification des sites à risque de glissement dans le littoral de Mostaganem ;

Méthodologie et structure de la thèse

Structure du manuscrit

Le manuscrit est subdivisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre consiste en la description des différents types de mouvements de terrain en mettant l'accent sur les glissements de terrain, et la définition des notions de base se rapportant au risque. Ce chapitre s'achève avec une présentation détaillée des méthodes d'analyse de l'aléa et/ou la susceptibilité au glissement de terrain, ainsi que la vulnérabilité et le risque.

- Le deuxième chapitre se rapporte à la définition des différentes notions du littoral et aux caractéristiques physiques, géologiques, hydrologiques et climatologiques du littoral de Mostaganem.

- Le troisième chapitre se centre sur le suivi et la quantification des changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem durant la période 1987-2017.

- Le quatrième chapitre se focalise sur l'identification des sites susceptibles aux glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem.

- Le cinquième chapitre : porte sur l'évaluation de l'impact des changements de l'occupation du sol sur la susceptibilité aux glissements de terrain. La vulnérabilité est également estimée à l'échelle communale afin d'élaborer une carte du risque aux glissements de terrain.

À la fin, une conclusion générale est formulée sur l'essentiel des résultats et leur interprétation. Afin de prévenir les éventuels impacts émanant des risques de glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem, des recommandations ont été faites.

Apport de la géomatique pour l'analyse spatiale de l'occupation du sol et l'indentification des sites à risque de glissement de terrain

La présente étude s'est basée essentiellement sur l'utilisation de la géomatique. Cette dernière est un ensemble d'outils et de techniques permettant de collecter, traiter, analyser et interpréter les données géographiques. L'objectif principal de l'utilisation des techniques de la géomatique est de faire une représentation spatiale des données traitées. Elle est appliquée dans différentes disciplines tels que l'aménagement du territoire, la gestion des milieux naturels, la prévention des aléas et des risques. La géomatique englobe la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG), les systèmes de positionnement global (GPS) et la cartographie.

La télédétection est un ensemble de techniques permettant d'observer la surface de la terre via des plateforme spatiales « capteurs ». Dans le chapitre 3, la définition de la télédétection est détaillée. L'image satellitaire est la prise de la surface terrestre à l'aide de ces satellites. La détection des changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem s'est basée sur le traitement de l'imagerie satellite du capteur Landsat. L'importance de la surface de la zone d'étude ainsi que les modes occupant le littoral de Mostaganem, l'acquisition gratuite ainsi que la résolution spatiale et temporelle de ces images ont favorisé le choix de ces images pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol (Samaali, 2011 ; Baghdadi, 2017).

Le système d'information géographique (SIG) est un outil permettant, entre autre, de produire une base de données (*geodatabase)* nécessaire pour la représentation et l'analyse des changements de l'occupation du sol et l'identification des sites à risque côtier dans une région déterminée.

Méthodologie de travail

Afin d'atteindre les objectifs de cette thèse, nous avons réalisé plusieurs taches :

- Recherche bibliographique sur les caractéristiques de la zone d'étude.

- Collecte de données de différentes sources pour l'utilisation du SIG. Dans ce sens, du matériel numérique, telles que les images satellitaires *Landsat,* le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et les cartes topographiques ont été utilisées. Ces ressources ont été complétées par des plans d'aménagements et des photographies aériennes (format papier).

- Harmonisation des images satellitaires (correction atmosphérique) dans un premier temps afin de quantifier le changement spatiotemporel du littoral mostaganémois. Ultérieurement, une analyse en composante principale a été effectuée et à la fin une classification supervisée avec l'algorithme maximum vraisemblance a été appliquée.

- Sorties de terrain durant la période 2017-2019 ont été effectuées pour vérifier la vérité de terrain et de valider les cas de glissement de terrain.

- Analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain en se basant sur la combinaison de plusieurs paramètres géo environnementaux en utilisant un SIG.

- Évaluation de l'impact des changements de l'occupation du sol pour la période 1987-2017.

- Identification des sites à risque de glissements de terrain nécessite une évaluation de la vulnérabilité des enjeux socio-économiques dans la zone d'étude. Le risque est déduit en combinant la carte de la vulnérabilité avec celle de la susceptibilité.

Chapitre 1

Mouvements de terrain : notions, classification et méthodes d'analyse

Introduction

L'évaluation de l'aléa et/ou la susceptibilité au mouvement de terrain est une étape primordiale vers la gestion des territoires. Durant les dernières décennies, de nombreuses approches ont été développées. Cependant, aucune méthode n'est universellement acceptée pour une évaluation parfaite de l'aléa de mouvements de terrain. Ces méthodes impliquent plusieurs disciplines : la géomorphologie, la géologie, l'hydrogéologie, la géotechnique, la physique, les mathématiques et les statistiques (Corominas *et al.,* 2014 ; Thiery et Terrier, 2019). Elles ont été appliquées afin de trouver la méthode la plus adaptée. Ce chapitre présente une synthèse sur les notions et la classification des mouvements de terrain ainsi que les différentes méthodes utilisées pour l'évaluation de l'aléa et/ou la susceptibilité aux mouvements de terrain.

1.1. Aperçu sur la classification des mouvements de terrain

Les mouvements de terrain sont des phénomènes complexes affectant tous les types de matériaux (meuble, rocheux). Ils se caractérisent par une grande diversité (Amod Sagar Dhakal *et al.,* 2000 ; Galli *et al.,* 2008 ; Léone, 1996). Ces mouvements peuvent être superficiels ou profonds, lents ou rapides d'origine naturelle ou anthropique (Varnes et Practice, 1958). De nombreuses classifications de mouvements de terrain ont été établies par des géologues, géomorphologues et des géotechniciens. Chaque classification se base sur des critères différents :

- La classification de Colin, (1846) se base sur la forme et la dimension du matériau déplacé (Ghennani, 2003).
- La classification de Terzaghi (1925) implique la mécanique des sols pour le classement de différents types de mouvements. Elle distingue deux principaux mouvements : un mouvement à l'état sec et un autre à l'état plastique.
- La classification de Sharpe (1938) se base sur le type de mouvement, la teneur en eau et le type de matériau.
- Bombard (1968) propose une classification de différents types de mouvement de terrain, elle est basée principalement sur les critères suivants :

  - Le type de mouvement ;
  - Le type du matériau ;

- Les dimensions du matériau déplacé ;
- La vitesse du mouvement.

- Varnes, (1978) propose une classification largement utilisée en Amérique et de nombreux autres continents. Elle se base sur deux principaux critères qui sont :

  - Le type de matériaux (roche consolidée ou meuble) ;
  - Le type du mouvement (écoulement, glissement ou complexe, c'est-à-dire combinaison des deux mouvements)

Cruden et Varnes (1996) ont apporté de nouvelles modifications sur la classification de Varnes (1978). Cette dernière s'appuie sur plusieurs types de mouvements de terrain selon la vitesse de leur déplacement. Hungr *et al.* (2013), apportent de nouvelles compréhensions sur le phénomène de mouvement de terrain dont les déplacements varient de quelques millimètres par jour à plusieurs mètres par seconde dans le cas des éboulements rocheux (Highland et Bobrowsky, 2008) (figure 1).

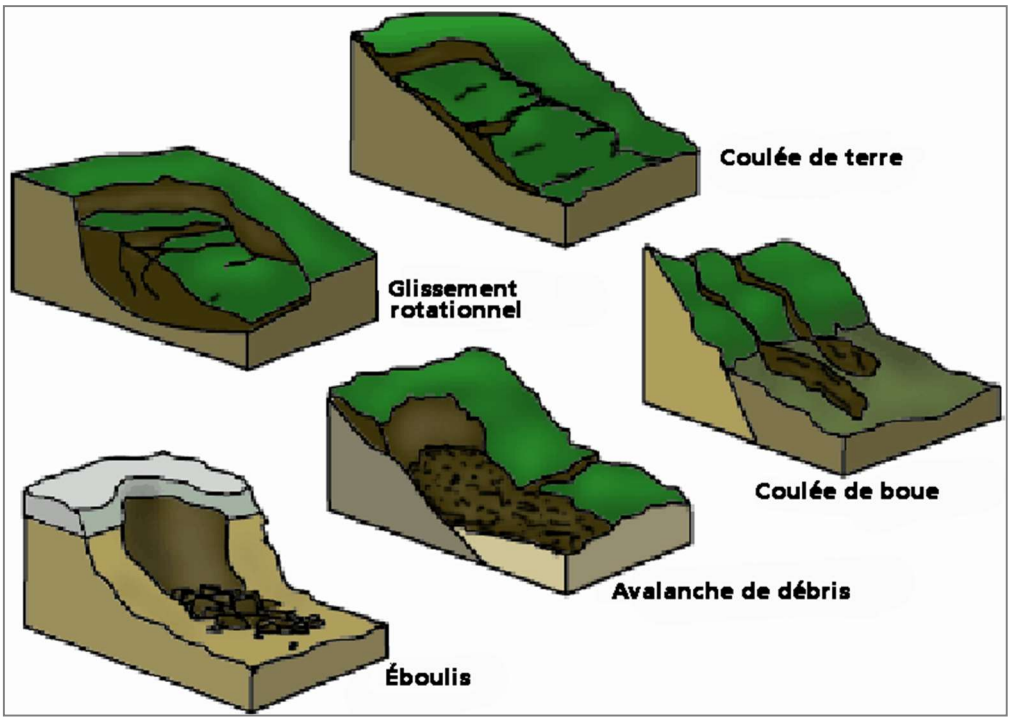


Figure 1 : Les différents types de mouvement de terrain (https://www.heritage.nf.ca).

1.1.1. Affaissement ou tassement

Les terrains susceptibles à l'affaissement sont des terrains faiblement riches en eau et présentent une structure lâche et poreuse constituée essentiellement de gros grains (Bakir, 2017).

1.1.2. Gonflement et retrait

Le phénomène de gonflement peut se produire suite à l'imbibition du sol ou la diminution des contraintes en place après une excavation. Le gonflement se produit principalement dans les sols argileux. Le phénomène de retrait s'oppose au gonflement, le séchage du sol s'accompagne avec une éventuelle fragmentation de la couche superficielle du sol (Serratrice et Soyez, 1996 ; Nowamooz, 2007)

1.1.3. Glissements de terrain

C'est un déplacement lent d'une masse le long d'une surface de rupture. Ce sont des mouvements qui affectent le talus. Ils se produisent généralement dans une situation en eau. Selon l'Office Fédéral de l'Environnement, trois types de glissement de terrain sont distingués (figure 2).

Glissements translationnels

Lors d'un glissement translationnel, un ensemble de couches se déplace selon une surface de glissement plus ou moins plane (figure 2a). Ce type de mouvement s'étend sur une superficie très variable ; le volume des masses déplacées est généralement important et leur épaisseur peut atteindre une dizaine de mètre (Zhao *et al.,* 2014 ; Saba *et al.,* 2010).

Glissements circulaires ou rotationnels

Au cours d'un glissement rotationnel, le matériau se déplace vers l'aval le long d'un plan circulaire (figure 2b). Dans ce type de glissement, les masses déplacées sont moins importantes. Les glissements rotationnels se produisent généralement dans des terrains homogènes et surtout argileux ; la saturation en eau leur est favorable (Pourghasemi *et al*., 2012).

Glissements quelconques ou composites

Il s'agit ici de glissements ou glissements superficiels dont la profondeur peut aller de quelques décimètres à quelques mètres (Turconi *et al.,* 2019).

Nous pouvons rencontrer les glissements dans les milieux littoraux au niveau des falaises suite à l'action des vagues et dans certains cas l'action anthropique (Dickson et Perry, 2016 ; Hobbs *et al.,* 2002).

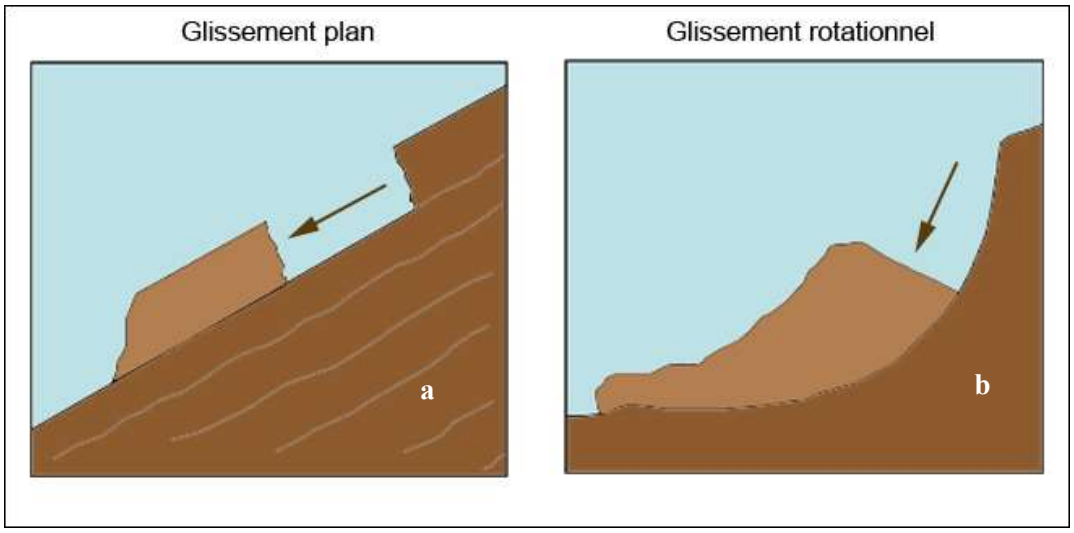


Figure 2: a. glissement translationnel ; b. Glissement rotationnel (www.irma-grenoble.com)

1.1.4. Effondrements

L'éffondrement d'un terrain se produit brutalement. Il est, par exemple, le résultat de la rupture du toit d'une cavité souterraine laissant une excavation dans le sol. Les dimensions de cette excavation dépendent essentiellement des conditions géologiques du terrain. L'effondrement peut être ponctuel en couvrant quelques mètres ou généralisé en affectant plusieurs hectares. (Sekkak, 2014).

1.1.5. Eboulements

Les éboulements sont le résultat d'une rupture brutale d'un compartiment rocheux selon des surfaces de discontinuités existantes. Ces blocs peuvent chuter, rebondir, rouler ou même glisser. Ils peuvent détruire gravement les routes, les voies ferrées, et empêchent certaines fois l'activité de services essentiels. Il existe deux types classiques d'éboulement (rupture de falaise et glissement plan) (Yahiaoui, 2008).

1.1.6. Coulées de boues

Sont des mouvements rapides des matériaux sous forme plus ou moins fluide. Ils se produisent sur des pentes. La dégénérescence des glissements avec des afflux de l'eau accentuent les coulées boueuses (Laigle, *et al.,* 2003 ; Elie, 2015).

1.2. Notions de susceptibilité/aléa

Les glissements sont des phénomènes géomorphologiques très complexes. Ils sont l'une des menaces majeures pour la vie humaine, environnementale et économique (Amod Sagar Dhakal *et al.,* 2000 ; Galli *et al.,* 2008 ; Shanmugam et Wang, 2015). Les tremblements de terre et l'érosion côtière peuvent contribuer au déclenchement de glissements de terrain. Les fortes pluies augmentent la quantité d'eau interstitielle dans les roches, cela induit une modification de la pression de l'eau interstitielle qui résulte une instabilité des pentes et par la suite des glissements de terrain. Au-delà des conditions naturelles, les activités humaines liées à la construction, à l'exploitation minière et à la déforestation peuvent également contribuer aux glissements de terrain (Shanmugam et Wang, 2015 ; Pham *et al.,* 2019 ; Calcaterra et Parise, 2005 ; Froude et Petley, 2018 ; Ali *et al.,* 2019 ; Hidalgo *et al.,* 2018 ; Prakash *et al.,* 2020). La connaissance et la gestion de ce risque s'avèrent primordiales pour l'aménagement du territoire. Les termes et les concepts qui servent de base doivent être définis :

Susceptibilité

La susceptibilité est la prédisposition d'un site à être affecté par certains phénomènes dangereux en un temps indéterminé et une zone connue. La susceptibilité est évaluée à partir des critères de prédisposition à ce phénomène sans tenir en compte la période de retour ou la possibilité de son reproduction. La susceptibilité est la composante spatiale de l'aléa (Hadji *et al.,* 2018).

Aléa

« *Hazard* » est le terme anglophone, très utilisé dans les ouvrages ; il correspond à l'aléa en français. Il se définit par la probabilité de l'occurrence d'un phénomène (probablement capable de provoquer des dommages) dans une zone et une période de temps déterminées. Autrement, l'aléa est la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle d'un évènement à une intensité donnée (Ramos *et al.,* 2014).

1.3. Méthodes et techniques d'évaluation de la susceptibilité et/ou l'aléa de glissement de terrain.

L'évaluation de la susceptibilité et/ou l'aléa est une étape incontournable pour la gestion du risque du glissement de terrain. De nombreuses méthodes ont été développées afin d'atteindre cet objectif. Deux principales méthodes sont distinguées : méthodes quantitatives et

qualitatives. Les méthodes qualitatives sont des approches heuristiques (empirique). Les méthodes quantitatives incluent une approche probabiliste et déterministe. La figure 3 montre les différentes méthodes existant pour la cartographie de la susceptibilité et/ou l'aléa de glissement. (Pardeshi *et al.,* 2013 ; Thiery et Terrier, 2019).

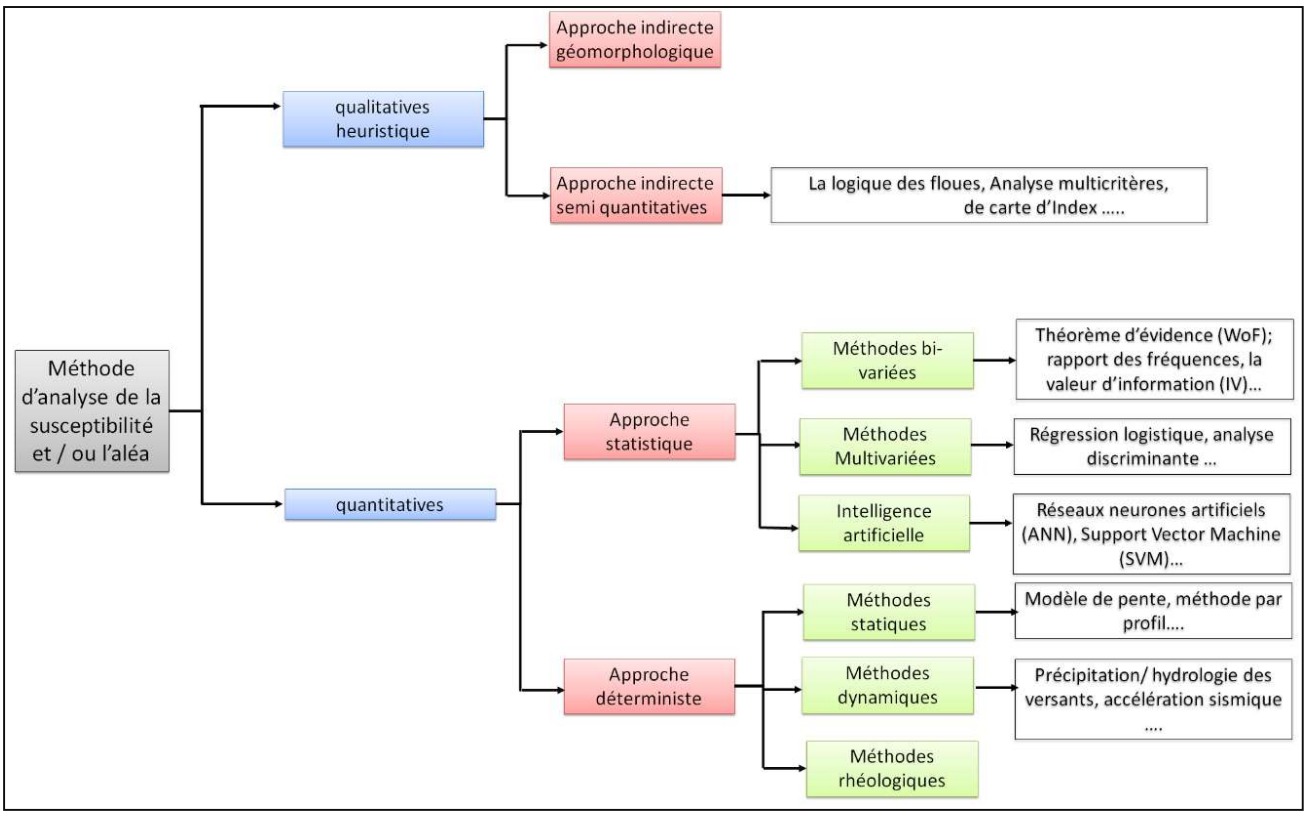


Figure 3 : Méthodes d'analyse de la susceptibilité et/ou l'aléa selon (Thierry et Terrier, 2019 ; Pardeshi et al., 2013)

1.3.1. Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives ou heuristiques peuvent être regroupées en deux approches : approches directes « géomorphologiques » et approches indirectes. L'utilisation de l'inventaire des glissements est une méthode qualitative et classique. Elle sert à déterminer les sites susceptibles aux glissements de terrain dans le futur à la base des anciens évènements, (Pourghasemi *et al.,* 2012).

1.3.1.1. Inventaire des glissements de terrain

L'utilisation des inventaires du glissement de terrain est l'une des méthodes les plus simples pour l'identification des sites susceptibles aux glissements de terrain. Cruden (1991) considère l'inventaire la forme la plus simple car elle comprend la date, le lieu d'occurrence

des évènements, son type et même ses traces. La conception d'un inventaire de glissement peut se faire par la collection des données historiques des évènements, ou par l'utilisation de l'imagerie satellite à haute résolution, les photographies aériennes et les travaux sur terrain en utilisant un GPS (*Global Positioning System*) (Akgun *et al.,* 2012 ; Galli *et al.,* 2008 ; Guzzetti *et al.,* 2012). L'inventaire des glissements de terrain est nécessaire pour l'étude de la relation entre les anciens évènements et les facteurs de prédisposition. Il constitue l'étape primordiale pour la zonation de la susceptibilité, l'aléa et le risque de glissement (Cardinali *et al.,* 2002 ; Bălteanu *et al.,* 2010).

1.3.1.2. Méthodes directes « géomorphologiques »

La méthode géomorphologique est une méthode directe. Elle se base sur l'avis des experts pour l'identification des sites susceptibles aux glissements. Cette méthode est très rapide et donne une indication sur les zones les plus susceptibles aux glissements de terrain. Par contre, elle présente un inconvénient qui est la difficulté de reproduire les mêmes règles d'estimation de degré de susceptibilité par les autres experts. Les méthodes qualitatives sont subjectives car elles reposent sur les jugements des experts qui sont variables d'une expertise à une autre. Les cartes produites par des experts du même secteur peuvent être différentes entre-elles. Les outils des systèmes d'informations géographiques (SIG) sont utilisés pour élaborer la carte du degré de susceptibilité aux glissements de terrain (Aleotti, 1999 ; Bourenane *et al*., 2017 ; Van Westen *et al.,* 2003).

1.3.1.3. Méthodes indirectes

Contrairement aux méthodes directes qui se basent sur les observations des experts pour estimer le degré de susceptibilité d'un site quelconque. L'approche indirecte consiste en plusieurs étapes :

- Conception d'un inventaire des glissements.
- Identification des facteurs géo environnementaux.
- Pondération de ces facteurs selon leur contribution pour le déclenchement d'un glissement,
- Combinaison de ces paramètres afin de produire une carte de degré de susceptibilité ou/et aléa.

Cette approche est appelée également la méthode semi-quantitative. On distingue :

Logique des floues (LF)

L'utilisation de la méthode de logique des floues pour le zonation de l'aléa et/ou la susceptibilité au glissement de terrain est basée sur une analyse à deux variables. Dans la logique des floues (FL), chaque variable explicative du glissement est représentée par une valeur entre 0 et 1 selon son influence sur l'occurrence du glissement de terrain (Champatiray, 2000). Ces valeurs sont ensuite intégrées en utilisant l'opérateur Fuzzy gama ou Fuzzy Algebric Sum pour produire une carte de zonage de susceptibilité et/ou glissement de terrain.

Méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI)

L'estimation du degré de susceptibilité et/ou aléa par la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) a été proposée par Anbalagan *et al.,* 1992. Cette approche est suivie pour le cas du littoral de Mostaganem (chapitre 4).

Systèmes multicritères

L'analyse par Processus Hiérarchique ou *Analytical Hierarchy Proccess* (AHP) est une méthode d'analyse multicritère développée par Saaty en 1977 (Bourenane *et al.,* 2016). Cette méthode est appliquée dans le chapitre 4 où elle est détaillée dans la partie méthodologie.

1.3.2. Méthodes quantitatives

Contrairement aux méthodes qualitatives qui sont subjectives et descriptives. Les méthodes quantitatives sont plus objectives. Elles impliquent les facteurs qui ont une importance pour l'occurrence du glissement de terrain afin de produire une carte de susceptibilité et/ou d'aléa. En appliquant ce type de méthode, les mêmes facteurs dans la même zone produisent le même résultat. On distingue deux types de méthodes quantitatives : approche statistique (probabiliste) et une approche déterministe (Guzzetti *et al.,* 2006 ; Reichenbach *et al.,* 2018 ; van Westen *et al.,* 2003 ; Gupta *et al.,* 2018 ; Saaty, 1980 ; Vakhshoori *et al*., 2019).

1.3.2.1. Approche statistique

Cette approche a pour but de trouver une relation entre les facteurs qui contrôlent l'instabilité du terrain et les évènements du passé. Les poids sont attribués aux facteurs de prédisposition en fonction de leurs importances pour la genèse des glissements et la distribution

spatiale des évènements de glissements. La production finale de la carte d'aléa ou susceptibilité se fait par les opérations d'algèbre cartographique (Mastere, 2011 ; Pardeshi *et al.,* 2013). Deux types d'analyse statistique sont distingués :

Analyse bivariée

Elle se base sur la comparaison de chaque facteur avec la distribution spatiale des évènements liés au glissement. L'analyse bivariée comporte les étapes suivantes :

- Détermination des paramètres contrôlant l'instabilité du talus ;
- Elaboration d'un inventaire des glissements de terrain ;
- Superposition de l'inventaire des glissements avec leurs paramètres ;
- Estimation du poids de chaque paramètre ;
- Production d'une carte de susceptibilité au glissement de terrain ;

Il existe plusieurs méthodes statistiques d'analyses bivariées telles que :

Théorème d'évidence (WoE: Weight Of Evidence)

En 1990, cette méthode a été utilisée pour la première fois pour cartographier la susceptibilité (ou/et l'aléa) au glissement de terrain (Blahut *et al.,* 2010). Le calcul des poids du paramètre se base sur la distribution des évènements dans la zone d'étude. La théorème d'évidence est une approche probabiliste, elle se base sur la forme logarithmique linéaire de la loi de Bayes :

$$P(A|B) = P(B|A) \times \frac{P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

Cette méthode calcule le poids pour chaque facteur prédictif (B), elle est basée sur la présence ou l'absence (A) du glissement dans la zone d'étude.

$$W_i^+ = \ln\left(\frac{P\{B|A\}}{P\{B|\bar{A}}\right) \quad (2)$$

$$W_i^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{B}\ |A)}{P\{\bar{B}\ |\overline{A}\}}\right) \quad (3)$$

B est la présence d'une classe de glissement dans un facteur. $\bar{B}$ est l'absence d'une classe de glissement de terrain. A est la présence des glissements et $\bar{A}$ est l'absence des glissements.

Les valeurs positives du poids (W_i^+) indiquent la corrélation positive entre le facteur déclenchant et la classe de glissement. D'autre part, le poids négatif (W_i^-) indique une absence de la classe souhaitée et une corrélation négative. La différence entre les poids positifs et négatifs, est calculée pour chaque classe de chaque paramètre analysé, est appelée le contraste de poids WC, il est calculé comme suit :

$$WC = W_i^+ - W_i^- \quad (4)$$

Valeur de l'information (IV : Information Value)

Proposée par Yin et Yan (1988) et modifié par van Westen (1993). Elle est utilisée pour la prédiction spatiale des glissements de terrain. La valeur de l'information est déterminée pour chaque classe d'un paramètre lié aux glissements de terrain (Achour *et al.,* 2017). La valeur d'information d'un paramètre *i* se calcule de la façon suivante :

$$I_i = log_2 \frac{S_{im}/N_{im}}{S/N} \quad (5)$$

S_{im} est le nombre de cellules de grille des glissements dans une classe ***m*** d'un paramètre ***i***.

N_{im} est le nombre de cellules de la grille de la classe ***m*** dans un paramètre ***i.***

S est le nombre total des cellules de la grille contenant des glissements.

N est le nombre total des cellules de la grille dans la zone d'étude**.**

Rapport des fréquences (FR : Frequency Ratio)

« Frequency ratio (FR) » est l'une des méthodes les plus simples pour l'évaluation de l'aléa ou la susceptibilité au glissement de terrain (Roukh et Abdelmansour, 2018). Le *FR* est défini par le rapport du ratio de présence des glissement (a_{im}) divisé par le ratio d'absence de glissement (b_{im}) (Tang *et al.,* 2020 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Lee et Sambath, 2006). Le rapport des fréquences se calcule comme suit :

$$FR_{im} = \frac{a_{im}}{b_{im}} \quad (6)$$

Avec FR_{im} est le rapport des fréquences d'une classe ***m*** d'un facteur ***i***

a_{im} est le ratio de présence des glissement dans une classe ***m*** d'un facteur ***i,***

b_{im} est le ratio d'absence des glissement dans une classe m d'un facteur i

Analyse multi-variée

L'application de ces méthodes requiert :

- Division du site en sous unités homogènes ;
- Détermination et préparation des cartes de facteurs qui contrôlent l'occurrence des glissements ;
- Préparation d'un inventaire des glissements ;
- Détermination de pourcentage des sous unités affectées par les glissements ;
- Classifications de ces sous unités en unités stables ou instables selon les valeurs seuils ;
- Combinaison des cartes de facteur avec les cartes de sous unités du site ;
- Création d'une matrice de présence ou absence pour une classe donnée d'un facteur donné à l'intérieur de chaque sous unité de site ;
- Analyse statistique multi variée ;
- Classification des sous unités et production de la carte de susceptibilité/aléa de glissement (Mastere, 2011).

Selon Thierry et Terrier (2019) et Pardeshi *et al.* (2013), plusieurs approches multi variées sont distinguées telles que : la régression logistique, analyse discriminante, etc. Dans cette partie, nous détaillerons la méthode régression logistique car elle est très souvent utilisée dans le domaine des sciences de la terre.

Régression logistique (LR : Logistic Regression)

La régression logistique est un modèle non linéaire. Elle calcule la probabilité d'occurrence d'un glissement d'un terrain en fonction des facteurs de prédisposition. Ce modèle a un avantage d'ajout d'une fonction de liaison appropriée au modèle de régression linéaire. Les variables utilisées peuvent être continues ou discrètes. Les variables continues n'ont pas nécessairement une distribution normale. La régression logistique distingue deux types : Régression binaire (quand la variable dépendante est dichotomique et la variable indépendante est de n'importe quel type). Régression multidimensionnelle (quand la variable dépendante a plus de deux classes). Le modèle de régression logistique permet d'identifier la présence ou l'absence de glissements selon les variables dépendants et un ensemble de paramètres indépendants : La pente, l'aspect, la lithologie et l'occupation du sol. Dans l'étude de la

susceptibilité (et/ou l'aléa), la présence des glissements est estimée à 1 et l'absence à 0. Ces deux coefficients peuvent être utilisés pour calculer le rapport pour chaque paramètre indépendant. Ci-dessous l'équation linéaire de la régression logistique :

$$Y = \text{logit}\,(p) = \ln \frac{p}{1-p} \quad 7$$

$$Y = C_0 + C_1.X_1 + C_2.X_2 + \cdots C_n.X_n \quad 8$$

où p est la probabilité que la variable dépendante (Y) soit égale à 1, p/(1-p) est ce qu'on appelle le rapport d'impairs ou de fréquence, C_0 est l'ordonnée à l'origine, et C_1, C_2,..., C_n sont des coefficients qui mesurent la contribution des facteurs indépendants (X_1, X_2,..., X_n) aux variations de Y (Lee, 2005). Cette méthode a été utilisée par nombreux auteurs pour évaluer la susceptibilité et/ou l'aléa au glissement de terrain (Lee, 2005 ; Ayalew et Yamagishi, 2005 ; Nefeslioglu *et al.,* 2008 ; Pradhan et Lee, 2009 ; Chen *et al.,* 2017 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Lee, 2007 ; Choi *et al.,* 2012 ; Yalcin *et al.,* 2011 ; Tang *et al.,* 2021).

Il existe d'autres méthodes qui se basent sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux neurones, *Deep Learning* (DL) et *Support Vector Machine* (SVM).

1.3.2.1. Approche déterministe

Les méthodes déterministes se basent principalement sur des lois physiques notamment la conservation de masse, d'énergie et de mouvement pour la détermination du facteur de sécurité (FS). Les propriétés physiques sont incorporées dans un modèle mathématique afin de calculer le FS. Contrairement aux méthodes statistiques qui sont utilisées dans des cas d'étude régional, les méthodes déterministes sont appliquées pour des terrain précis et connus par le chercheur (Van Westen *et al.,* 1997).

Pour l'évaluation de la stabilité d'une région, des approches, uni, bi et tridimensionnelles peuvent être utilisées. Nous distinguons plusieurs modèles, par exemple :

Modèle de pente infinie

Ce modèle est très utilisé dans l'étude de la stabilité des terrains. Il fait appel aux calculs effectués par les SIG, il est appliqué seulement aux glissements de type translationnel dont la surface de rupture est plus ou moins plane. Le facteur de sécurité (FS) est calculé pixel par pixel ; il intègre des cartes de pente, l'épaisseur de dépôt et les informations de la surface de

cisaillement et la profondeur de la nappe phréatique, le paramètre d'accélération sismique et l'angle de frottement interne. Il existe une autre méthode qui est l'approche dynamique (Levasseur, 2003 ; Van Westen et Terlien, 1996 ; Thiery et Terrier, 2019 ; Yu *et al.,* 2021).

1.4. Aperçu sur la notion de risque et la vulnérabilité

1.4.1. Risque

Le risque est lié à l'occurrence d'un évènement « l'aléa » en présence des enjeux qui représentent des conséquences et, dans certaines situations, des pertes humaines. Le risque est le résultat de l'intersection de danger « l'aléa » et les éléments à risque en raison de leur vulnérabilité (Malet *et al.,* 2006 ; Zêzere *et al.,* 2008, Drejza, 2010). Varnes (1984) a défini le risque comme « le nombre prévu de vies perdues, de personnes blessées, de dommages matériels et de perturbations de l'activité économique dus à un phénomène dommageable particulier pour une zone et une période de référence données ». Le risque peut s'écrire comme suit :

$$R = H \times E \times V \qquad 9$$

Le risque de glissement est le produit de trois facteurs ; 1) l'aléa ((H) est la probabilité d'occurrence d'un phénomène, 2) Les éléments à risque (E) ; 3) La vulnérabilité (V) représente le degré de perte prévue résultant de l'intensité de glissement de terrain. L'évaluation du risque peut également s'exprimer par le croisement des deux composantes : l'aléa et la vulnérabilité (R= H×V). L'aléa comprend deux composantes, une spatiale c'est-à-dire l'emplacement « où », temporelle « quand » et l'ampleur « l'intensité de l'évènement ». La composante spatiale de l'aléa « la susceptibilité » est très souvent évaluée. La deuxième composante est dite « temporelle » ; elle est difficile à appréhender en raison de la limite des données relatives aux précipitations qui déclenchent les glissements. Concernant notre zone d'étude, les données relatives à la composante temporelle sont sporadiques. De ce fait, le risque est exprimé sans référence à la composante temporelle de l'aléa (Glade et Crozier, 2005 ; Malet *et al.,* 2006 ; Abella et Varnes 2007 ; Zêzere *et al.,* 2008).

1.4.2. Vulnérabilité

Le terme de vulnérabilité, lié au type de perturbation ou d'aléa, est très complexe ; il n'est pas absolu et diffère selon l'utilisation que nous souhaiterions en faire. Cela veut dire que le système ou l'élément peut être vulnérable à certains aléas et autres non. La vulnérabilité,

exprimée sur une échelle de 0 (aucune perte) à 1 (perte totale), permet d'estimer ou de mesurer les conséquences potentielles de l'aléa sur les enjeux socioéconomiques (Glade, 2003).

1.4.2.1. Composantes de la vulnérabilité

L'étude de la vulnérabilité des communautés littorales est importante à l'heure actuelle et pourrait augmenter avec les changements de la morphologie du milieu. Selon Guillard-Gonçalves et Zêzere (2018), l'analyse de la vulnérabilité ou les conséquences des glissements de terrain d'un milieu littoral peut se faire sur plusieurs facettes :

Vulnérabilité sociale (V_s)

Elle indique la prédisposition de la population locale aux aléas.

Vulnérabilité économique (V_e)

Elle traduit généralement les pertes ou l'endommagement des enjeux et des biens économiques.

Vulnérabilité physique (V_p)

Cette facette traduit les conséquences ou les dégâts de l'endommagement des logements, des réseaux routiers et des infrastructures.

Vulnérabilité environnementale (V_{en})

Elle exprime les pertes des ressources naturelles (forêts, plages et dunes, eau, etc.) (UNDPBCP, 2004).

1.4.2.2. Méthodes d'analyse de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité permet de fournir des renseignements sur les processus de planification des mesures d'atténuation et gestion des risques. Cependant, l'évaluation de la vulnérabilité est très compliquée. Tout d'abord, car il existe plusieurs types de mouvements de terrain (glissement de terrain, chute des blocs, écoulements de boues, etc.). En prime, l'intensité des mouvements de terrain qui diffère d'un phénomène à un autre, rend la prévention de la vulnérabilité très difficile dans des zones à grande échelle. Cette difficulté n'a pas empêché les chercheurs à appliquer différentes approches dans des sites où des glissements de terrain ont lieu, les approches suivies dépendent essentiellement de la disponibilité des données historiques en liaison avec les données disponibles sur les infrastructures, à savoir l'âge de la population,

l'état de la construction, etc. Il existe trois principales méthodes d'estimation de la vulnérabilité :

Méthode quantitative

Cette méthode se base sur la quantification des éléments vulnérables en évaluant les conséquences d'un aléa ; son application dépend essentiellement de la disponibilité des données. Uzielli *et al.* (2008) ont appliqué une méthode d'estimation quantitative fondée sur des scénarios émanant des jugements des experts et des données de glissements tels que l'ampleur du mouvement et les données sur la vulnérabilité des enjeux (Singh *etal.,* 2017)

Méthode qualitative

La méthode qualitative se base sur l'utilisation du matériel cartographique (carte topographique, photographie aérienne, etc.) pour l'identification des sites homogènes et sensibles aux glissements de terrain. Ce type de méthode est utilisé pour l'élaboration des Plans de Prévention de Risque en France (PPR).

Méthode semi-empirique

L'approche « semi-empirique » ou semi quantitative se base sur l'évaluation relative d'un élément ou l'évaluation globale en analysant un ensemble d'élément pour une aire homogène donnée. Cette approche a pour objectif de réaliser des cartes de vulnérabilité (Sardou, 2016).

Conclusion

L'évaluation de l'aléa, la susceptibilité et la vulnérabilité est un processus critique pour la gestion des glissements de terrain. De nombreux facteurs géo-environnementaux influencent le déclenchement des glissements qui varient d'une région à une autre. De ce fait, il est difficile de déterminer le poids d'un paramètre donné. La pondération des paramètres se base sur leurs importances relatives dans l'occurrence des glissements de terrain. Le poids des paramètres pourrait être déterminé selon différentes méthodes, elles peuvent être heuristiques qui impliquent une subjectivité dans l'attribution des poids. Des méthodes quantitatives, par contre, sont plus objectives pour déterminer le poids d'un paramètre donné en fonction de leur relation avec l'occurrence d'un glissement de terrain. Dans ce type d'étude, l'utilisation de la télédétection et les systèmes d'information géographiques est nécessaire.

Chapitre 2

Littoral de Mostaganem : Contexte législatif, géographique, géologique et climatologique

Introduction

Le littoral est l'intersection de l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère (Paskoff, 1992). La limite du littoral a connu de nombreuses suggestions de définitions de différentes disciplines telle que la géomorphologie, la géographie, etc. Dans le présent chapitre, nous présentons les différentes définitions de la notion du littoral. Nous mettrons l'accent sur les caractéristiques physiques, géologiques et climatiques du littoral de Mostaganem.

2.1. Généralités sur la notion du littoral

La notion du « littoral », admise communément partout, est la zone située sous l'influence exclusive de la mer (Bousquet, 1990). Le milieu littoral suscite un intérêt socio-économique et écologique important. De ce fait, il est l'objet de pusieurs réflexions par les États et les scientifiques en terme d'aménagement (Herbert *et al.,* 2006). La notion du littoral a évolué dans le temps mais elle reste toujours difficile à appréhender. De nombreuses disciplines scientifiques lui confèrent un sens et une délimitation particulière variable selon le type de problèmes et les objectifs d'aménagement.

Selon les géomorphologues, le littoral est la zone comprise entre les plus hautes et les plus basses mers. Cette définition est très restrictive car elle limite le littoral à l'estran. Cependant, les processus naturels hydrodynamiques et sédimentaires dans cette zone sont plus importants que l'étendue de l'estran. Ces processus interviennent dans l'évolution morphologique de l'arrière côte (plages, dunes, falaises, flèches littorales, etc.) et l'avant côte (la zone submergée). En conclusion, le littoral est défini comme la zone de rencontre d'interaction de l'hydrosphère et la lithosphère (Lacoste, 1999).

En géographie, la définition du littoral ne se limite pas au milieu naturel. Andreu-Boussut, (2008) considère le littoral comme un système dynamique articulé à des pratiques sociales. Le littoral a deux composantes principales, l'écosystème qui signifie : « *le milieu naturel aux potentialités diverses et aux contraintes très fortes et, d'autre part, le socio-système, combinaison de facteurs qui relèvent de la société ».* Ce système est la zone la plus peuplée de la planète ; 80% de la population mondiale y est installée. Le littoral abrite de nombreuses activités économiques tels que la pêche, le tourisme, l'industrie et l'agriculture, qui relient la côte à l'arrière-pays. Le littoral se présente comme un espace composite et siège d'interactions

entre les composantes naturelles et anthropiques. La répartition de ces activités rend la délimitation du littoral difficile à appréhender (Meur-Ferec, 2006).

Selon les biologistes marins, la limite du littoral dépend de l'espace occupé par les espèces végétales. Elle s'étend de la zone intertidale (zone d'humectation) jusqu'à les profondeurs délimitant le plateau continental (200 m). Ce système littoral est divisé en plusieurs étages en fonction de la pénétration de la lumière ; il comprend le supralittoral, le médiolittoral, l'infralittoral, le circalittoral et la zone bathyale (Houdart, 2003).

Contrairement aux géomorphologues, les géographes et les biologistes qui proposent des limites non figées du littoral car ce dernier est dynamique et mobile. Les juristes considèrent la notion du littoral comme « téléologique », dont la définition varie selon la problématique à traiter. Pour l'analyse des données socioéconomiques et démographiques, la délimitation de l'espace littoral est nécessaire. De nombreuses dispositions ont été mises en place afin de protéger les milieux naturels côtiers. Il s'agit soit des conventions internationales telle que la *convention de Ramsar* (1971), soit des conventions régionales comme la *convention de Barcelone* (1976), soit des conventions nationales. Dans ce contexte, il y a une nécessité de définir précisément les objets spatiaux pour la gestion du milieu littoral en appliquant la législation en vigueur. Le juriste procède d'une manière comparable à celle du géographe quand il s'agit d'un problème environnemental.

2.2. Littoralisation (facteur anthropique déclenchant de nombreux problèmes environnementaux)

Le littoral algérien s'étend sur un linéaire côtier de 1622 km. Depuis l'antiquité, le milieu côtier a été très sollicité. L'ouverture sur la Mer Méditerranée, les échanges commerciaux, culturels et le climat n'ont fait qu'accroitre sa convoitise par l'être humain (Kacemi, 2008 ; Bouhamadouche et Hemdane, 2016). D'un point de vue géomorphologique, le paysage du littoral algérien alterne des côtes sableuses et rocheuses. Il abrite également des zones humides à fort potentiel écologiques. Ces zones sont importantes pour maintenir l'équilibre des écosystèmes marins et côtiers (Woodward et Wui, 2001 ; Grafton *et al.,* 2009 ; Ghodbani *et al.,* 2015). Durant l'occupation française, le littoral algérien a connu une forte utilisation, de nombreux établissements humains et des activités ont été développées. Après l'indépendance, les pratiques d'investissements économique et industriel de la frange littorale se sont perpétuées. Cela a rendu cette partie du territoire plus attractive (Kacemi, 2009).

Le terme de littoralisation signifie le développement démographique, économique et la régression des espaces situés dans la zone côtière. Elle désigne également la forte urbanisation de la zone côtière (Liziard,2013). Selon Voiron-Canicio (1999), la littoralisation fait référence aux différents processus de densification et d'exploitation de la frange littorale. En Algérie, le processus de littoralisation de la côte est initialement engagé par la concentration de la population dans la bande littorale. Ce phénomène s'est manifesté d'une manière accélérée depuis le milieu des années 1970 (Ghodbani et Berrahi-Midoun, 2013 ; Bougherira *et al.,* 2018). La littoralisation est synonyme d'artificialisation et d'augmentation accrue des activités dans les espaces côtiers (Benmahiddine, 2013). La densification du littoral algérien a atteint des stades avancés et la forte littoralisation du territoire a conduit à des problèmes environnementaux multi-scalaires (Ghodbani, 2010 ; Masselink et Gehrels, 2014). À une échelle locale, le littoral est une interface mobile où la dynamique terrestre, marine et atmosphérique interagissent. La diversité des espaces côtiers dépend essentiellement des agents hydrodynamiques (courant, vagues et houles) et la nature géologique des fonds marins (Paskoff, 1992). La dynamique hydrosédimentaire est traduite par la quantité des sédiments produites, transportés et accumulées sur une période de temps bien définie (cellule hydrosédimentaire).

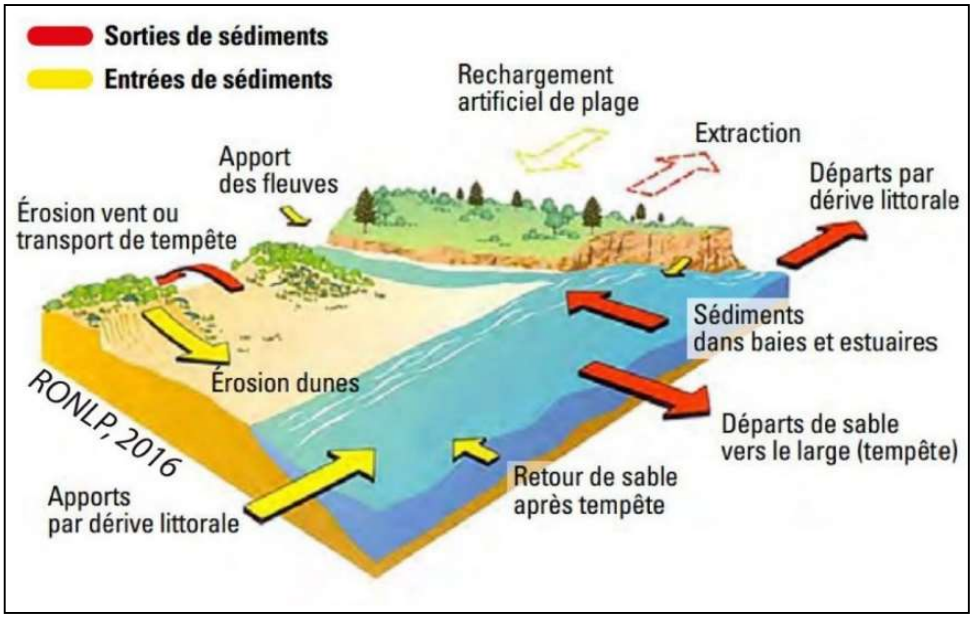


Figure 4: Cellule hydrosédimentaire (http://obscat.fr/glossaire)

Le bilan du sédiment varie en fonction des mouvements longitidinaux (la dérive littorale) et les mouvements transversaux (mer – continent). Les interventions humaines non liées à la mer induisent une perturbation de la dynamique de la cellule hydrosédimentaire (figure

4). La construction des barages entraine un piégeage des sédiments, l'extraction illicite du sable des plages et des dunes et l'implantation de constructions sur des sites fragiles aggravent le déficit sédimentaire (Ghodbani, 2009 ; Le Berre, 2017). Et par conséquent, une régression des côtes sableuses, l'altérartion des habitats littoraux, la pollution des eaux marines, la dégradation des herbiers de posidonies qui jouent un rôle primordial dans l'atténuation de l'énergie des vagues (Ghodbani et Bougherira, 2019). En Algérie, la littoralisation des espaces côtiers s'est développée principalement dans les grandes métropoles (Alger, Oran et Annaba). En effet, 37 % de la population algérienne est concentrée dans la bande littorale qui constitue 1.9% de la superficie du territoire nationale (Grimes, 2015). Cette frange littorale abrite plus de 51% des unités industrielles dont 25% se localisent dans les zones urbaines de l'algérois. Les infrastrutures du tourisme balnéaire se concentrent dans la frange littorale algérienne. En effet, 80% des Zones d'Expansion et Sites Touristiques sont implantés en zone littorale du pays (Laouar, 2010). La littoralisation intensive des espaces côtiers a provoqué une forte érosion, des glissements de falaise et la dégradation du système dunaire. Le développement économique et urbain du littoral algérien a entrainé une perte du foncier agricole et une régression de la biodiversité forestière.

2.3. Protection et délimitaton juridique du littoral algérien

L'importance économique et sociale du littoral n'a fait qu'augmenter les conflits d'usage de la zone côtière (Ghodbani, 2005). La dégradation des milieux marins et côtiers s'est intensifiée (Laouar, 2010 ; Kacemi, 2013 ; Boukhatmi, 2014). Le désir de protection de l'espace littoral est très récent. La loi 90-29 du 1er décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme a défini pour la première fois des dispositions particulières applicables pour une partie du territoire. Selon l'article 44 et 45 de la présente loi, le littoral englobe les iles, les îlots ainsi qu'une bande d'une largeur minimale de 800 m qui loge la mer et inclut l'intégralité des zones humides et les rivages de 300 m de largeur. Toutes les constructions sur une bande littorale de 100 mètre de largeur sont frappées de servitude de *non-aedificandi.*

Selon Kacemi, (2009), cette loi n'a pas empêché la forte littoralisation de l'espace côtier ; une urbanisation intensive s'est observée tout au long de la côte algérienne. Une dégradation des espaces côtiers a été constatée suite à une extraction illicite du sable et une forte fréquentation des plages.

Au début des années 2000, une loi spécifique au « littoral » a été promulguée. Il s'agit de la loi littorale de 05 février 2002 relative à la protection et la valorisation du littoral. Selon l'article 7 et 8 de cette loi, le domaine littoral inclut les iles et les îlots, le plateau continental ainsi qu'une bande avec une largeur minimale de 800 m, longeant la mer. Le domaine littoral englobe également :

- Les versants, les collines et les montagnes qui sont visibles de la mer et qui ne sont pas séparées par une plaine ;
- Les zones à végétation dense ;
- Les terres à vocation agricole ;
- Les zones humides dont leur rivage fait partie du littoral
- Les sites à caractère naturel, historique et archéologiques

La loi du littoral édicte des restrictions relatives à l'urbanisation dans le domaine littoral selon trois bandes (figure 5) :

Bande de 300 m de largeur : cette bande est inconstructible, elle inclut le rivage naturel dans lequel, la circulation et le stationnement sont interdits (sauf les véhicules de service, de sécurité, de nettoyage de plage, etc.).

Bande de 800 m de largeur : dans cette bande, les voies carrossables parallèles au rivage sont interdites. Les exceptions à cette disposition peuvent se faire en raison des difficultés topographiques ou le besoin immédiat de la mer.

Bande de 3 km de largeur : dans cette bande :

- Toute extension longitudinale du périmètre urbanisé est interdite
- Les voies de transit parallèle au rivage sont interdites
- L'extension de deux agglomérations adjacentes situées sur 1e littoral à moins de 5 km est également interdite (Kacemi, 2011).

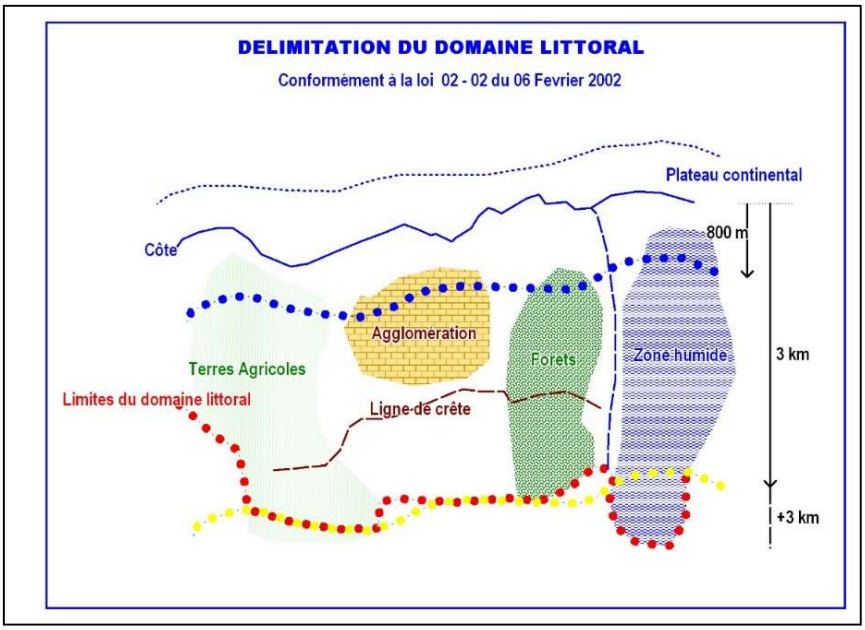


Figure 5: délimitation du domaine littoral en Algérie (PAC, 2005)

2.4. Présentation de la wilaya de Mostaganem

La wilaya de Mostaganem se localise dans le Nord-Ouest de l'Algérie occupant une superficie de 2175 km². Limitée au Nord par la Mer Méditerranée. A l'Est, par Chlef, le Sud par Relizane et l'Ouest par la wilaya d'Oran (figure 6). Mostaganem compte 32 communes dont 10 communes sont côtières.

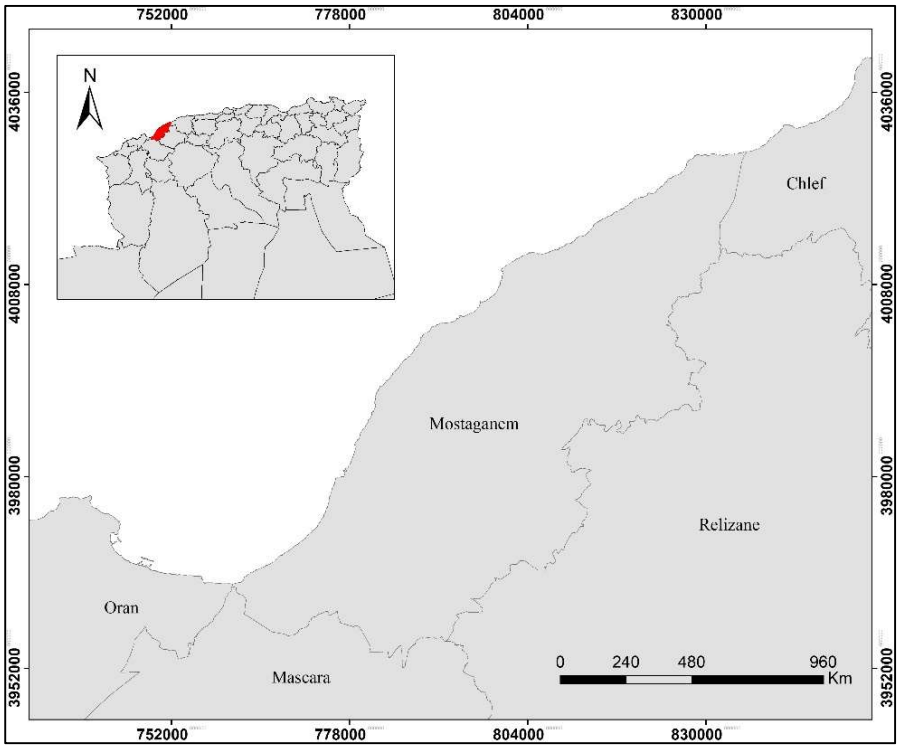


Figure 6: Localisation de la wilaya de Mostaganem (www.mediafire.com)

2.5. Cadre géomorphologique de la wilaya de Mostaganem

La wilaya de Mostaganem se caractérise par une altitude allant du 16 m à 552 m (Trache et Senouci, 2014). Cela a permis de distinguer une alternance de différentes formes de relief :

Cordon littoral

Situé dans la frange littorale de Mostaganem. Il se caractérise par des altitudes faibles allant jusqu'à 61 m. il est constitué d'une alternance de plages, dunes mobiles, dunes consolidées, de plaines formées de sable et de falaises qui peuvent atteindre 25% de pente. Ce cordon littoral jalonne toute la côte de la wilaya de Mostaganem, il occupe une superficie de 27.047 ha (figure 7).

Monts du Dahra

Situés au nord de la vallée de Chéliff, ils occupent une superficie de 80337 ha couvrant plus de dix communes (figure 7). Ces monts englobent une chaine de petits massifs culminant entre 300 et 552 m. Le relief des monts du Dahra est très accidenté ; il est marqué par un réseau hydrographique très développé qui contribue à forte érosion hydrique.

Collines sublittorales

Elles sont situées aux sommets arrondis, elles constituent les piémonts de la partie Ouest de des Monts du Dahra. L'altitude de ces collines varie entre 150 m et 300 m.

Plaines et vallées du Nord

Situées à l'Est de la wilaya de Mostaganem, elle est en contact avec les monts du Dahra et la vallée d'Oued Chéliff.

Plaines de Bourdjias

Les plaines de l'Ouest, situées au pied de Plateau de Mostaganem et à cheval sur les marais de la Macta. Elle fait partie de la grande plaine sublittorale d'El Habra (Zaoui, 2015). Les plaines de l'Ouest présentent un relief dont la pente varie entre 0° et 10°.

Vallée de Chéliff

La vallée de Chéliff est une bande d'une dizaine kilomètre, elle draine depuis de la Wilaya de Chlef jusqu'à son confluent avec Oued Mina.

Plateau de Mostaganem

Cette unité couvre une superficie de 750 km². Selon Trache et Senouci (2014), le plateau de Mostaganem couvre plus de 15 communes. Son altitude augmente en allant du l'Ouest à l'Est, elle peut atteindre 293 m. Le plateau de Mostaganem se caractérise par une morphologie bombée, Ces formes occupent le 2/3 du Plateau. Entre ces dernières s'intercalent des dépressions. Les formes bombées correspondent à des dunes très entaillées dont nous distinguons deux types, les dunes mobiles et les dunes consolidées.

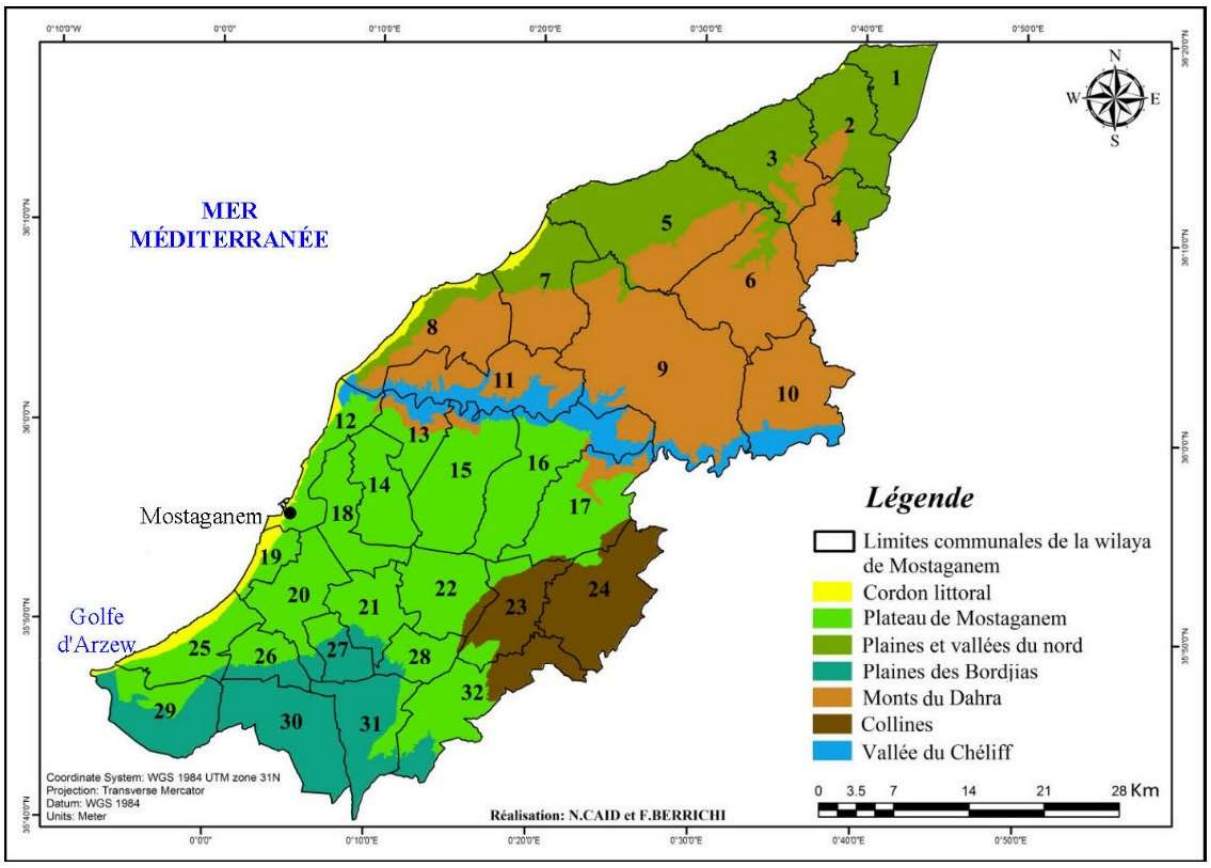


Figure 7: Morphologie de la wilaya de Mostaganem (Caid et al., 2019)

2.6. Littoral de Mostaganem

Le domaine littoral de Mostaganem couvre dix communes côtières, à savoir Fornaka, Stidia, Mazagran, Mostaganem (centre urbain), Benabdelmalek Ramadane, Hadjadj, Sidi Lakhdar, Khadra, Achaacha, Ouled Boughalem. Il est à noter qu'une partie de la commune de Sayada est comprise dans le domaine littoral de Mostaganem. Ce dernier couvre une superficie de 21230 ha avec un linéaire côtier de 124 km (figure 8).

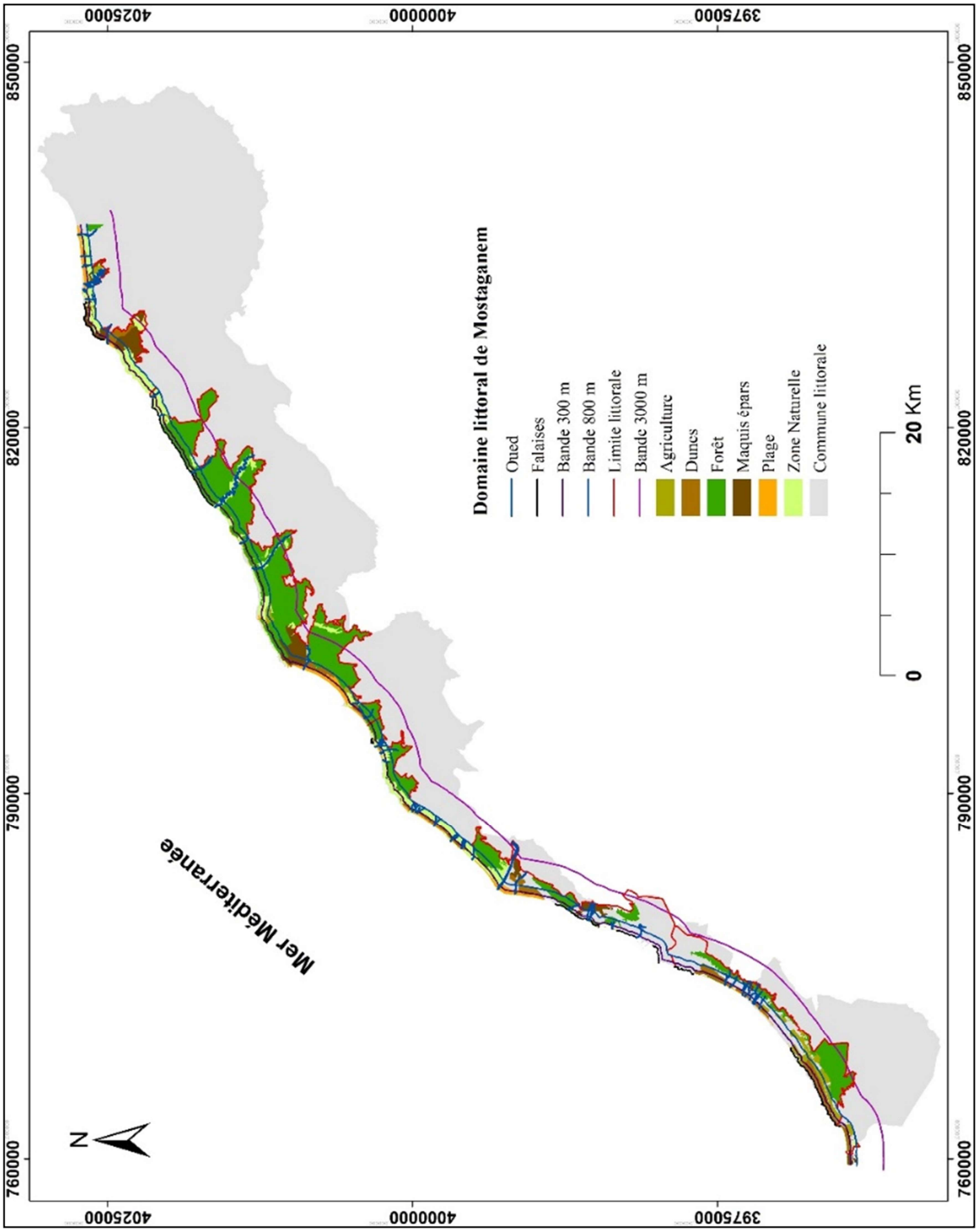


Figure 8: Limites juridiques du littoral de Mostaganem (PAC, 2005)

2.7. Zone d'étude

2.7.1. Localisation géographique

Notre zone d'étude s'étend sur la commune de Mostaganem, celle de Benabdelmalek Ramadane et une partie la commune de Sayada ; le domaine littoral concerné couvre une superficie de 5252 ha. L'Oued Chéliff divise la zone d'étude en deux parties : une partie Est peu urbanisée et possédant d'immenses plages, dunes, plaines littorales et forêts. Par contre, la partie Ouest est fortement urbanisée. D'un point de vue morphologique, les dunes littorales

occupent une superficie de 550.98 ha soit 10.64% de la superficie totale de notre zone d'étude. La zone littorale boisée s'étend sur une superficie de 1533.34 ha soit 29.62% de notre zone d'étude comprenant les forêts de Mostaganem, Kharrouba, Djebel Diss, Djebel Zagnoun, Bourahma et d'El Wiam au niveau d'El Hchem (figure 9).

Figure 9 : Zone d'étude « littoral de Mostaganem »

2.7.2. Cadre géologique de la zone d'étude

La connaissance de la lithologie de la zone d'étude est incontournable pour comprendre le comportement du substrat en relation avec les mouvements de terrain. Pour ce faire, une carte géologique basée sur la feuille géologique au 1/200 000/N 21, a été élaborée (figure 10). Notre zone d'étude fait partie du Plateau de Mostaganem et les plaines de l'Est, caractérisés par plusieurs formations géologiques. Cette diversité lithologique est le résultat des mouvements techtoniques d'affaissement et de subsidence datant du Quaternaire. Nous nous sommes basés sur les travaux de Boulaine (1955) pour analyser les différents types de substrat rencontrés :

Nappes de flysch

Ce sont des formations allochtones du Crétacé Supérieur qui se localisent dans le littoral de Mostaganem notamment à Kharrouba et à Djebel Diss. Cette classe occupe une partie importante du littoral de Benabdelmalek Ramadane.

Formations du Miocène

C'est une série marno-gréseuse bleue qui s'altère en jaune (Zaoui, 2015). Ces formations miocènes n'apparaissent que très localement où ils présentent des calcaires à lithothamniées, des marnes bleues « à cinérites » et des grès et sables (« niveau Sedra-Tliouanet »), tous appartenant aux faciès principaux du cycle marin. Le Miocène du cycle laguno-continental englobe les grès, les conglomérats et les argiles rouges.

Formations Pliocènes et Lumachelles

Les rides anticlinales du Plateau de Mostaganem du Nord-Est sont constituées par des formations pliocènes et post pliocènes. Recouvertes également des lumachelles du Calabrien. À l'Est du Plateau, se localisent les marnes plaisanciennes, les limons et les cailloutis villafranchien.

Alluvions continentaux du Quaternaire

Ce sont les formations les plus récentes de la région ; elles se localisent dans les dépressions du Plateau de Mostaganem avec des compositions limoneuses et/ou sableux argileux et dans les plaines de l'Est. Dans notre zone d'étude, cette formation occupe 47.06 % du littoral de Mostaganem.

Sable continental du Quaternaire

Cette formation apparait regulièrement avec les alluvions continentaux et résulte de la désagrégation des grès (figure 10). Selon les données géologiques, les formations sableuses, plus ou moins cimentés par la calcite, renontrées dans notre zone d'étude se sont formées durant le Pliocène et le Quaternaire.

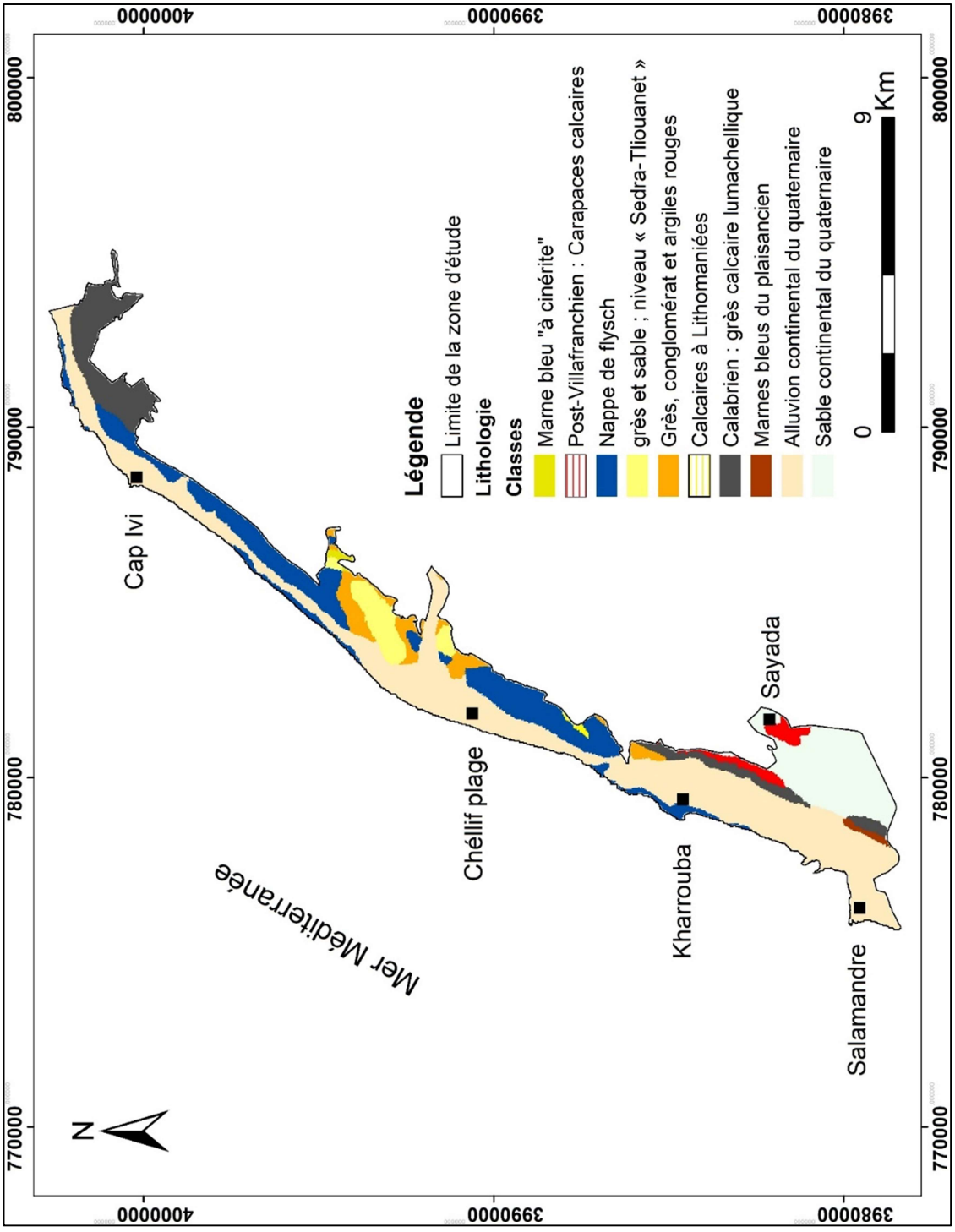


Figure 10 : Géologie du littoral de Mostaganem (Carte géologique 1/200 000)

2.7.3. Ressources hydriques

2.7.3.1. Réseau hydrographique

Le territoire algérien est divisé en cinq régions hydrographiques à savoir l'Oranie-Chott Chergui, Cheliff-Zahrez, Algérois-Hodna-Soumam, Constantinois-Seybouse-Mellegue et Sahara (Remini, 2010). La wilaya de Mostaganem fait partie de la région hydrographique Oranie-Chott Chergui et la région Cheliff-Zahrez. Notre zone d'étude est marquée par la présence d'un cours d'eau permanent nommé Oued Chéliff. Il est l'un des cours d'eau les plus importants du pays avec une longueur de 725 km. Oued Ain Safra est un autre cours d'eau important qui traverse la ville de Mostaganem (figure 11). La zone d'étude enregistre une certaine densité de cours d'eau temporaires. Cette densité est justifiée par l'importance de l'aquifère de Mostaganem, la pente du terrain et la nature imperméable du sol (Baiche *et al.,* 2015 ; Megherbi, 2015 ; Ouali, 2015).

2.7.3.2. Potentialités des eaux souterraines

La wilaya de Mostaganem dispose d'un important volume d'eaux souterraines évalué à 52.1 hm^3/an ; il est constitué de nappes phréatiques profondes et d'aquifères représentant les potentialités suivantes :

- Le Plateau de Mostaganem occupe une superficie de 700 km^2 avec une épaisseur de 70 m délivrant un apport annuel de 26 millions m^3 d'eau ;
- Les plaines de Bordjias couvrent une superficie de 250 km^2 avec une épaisseur 150 m apportant annuellement 10 millions de m^3 ;
- Le synclinal de Bouguirat, avec une superficie de 240 km^2, une épaisseur de 80 m et un apport d'eau estimé à 9.5 millions de m^3 ;
- La vallée du Chéliff occupe une superficie de 16.5 km^2, une épaisseur de 15 m et apport annuel de 6.6 millions de m^3 (Zaoui, 2015).

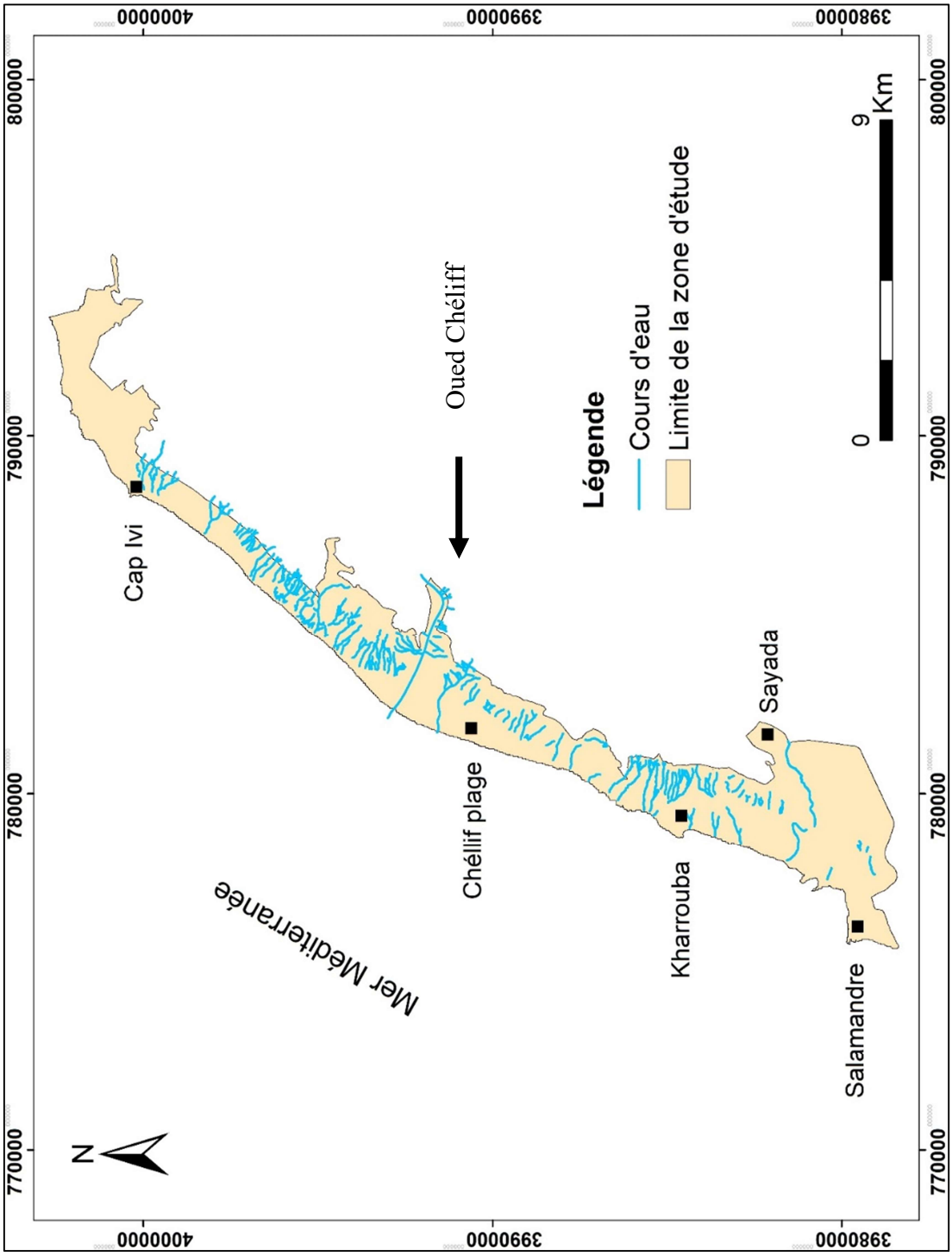


Figure 11 : Réseau hydrographique du littoral de Mostaganem (Carte topographique 1/50 000)

2.7.4. Cadre climatique

Le climat du bassin méditerranéen est un climat de transition entre une période de sècheresse et une période humide. Selon Nedjraoui (2011), le climat méditerranéen est constitué de deux composantes : un été sec, très faiblement arrosé et sec biologiquement, ainsi qu'un hiver très frais et humide.

Selon l'ANAT (2006), l'Ouest algérien marque une dominance du domaine semi-aride et aride, les wilayas d'Oran et de Mostaganem, dont notre zone d'étude fait partie, et quelques wilayas intérieures se situent dans un étage bioclimatique semi-aride (figure 12). La Sebkha d'Oran, la Plaine du Macta et la Plaine du Chéliff font partie d'un étage bioclimatique aride. Le type de sol dans ces sites est salin (Fekir, 2021).

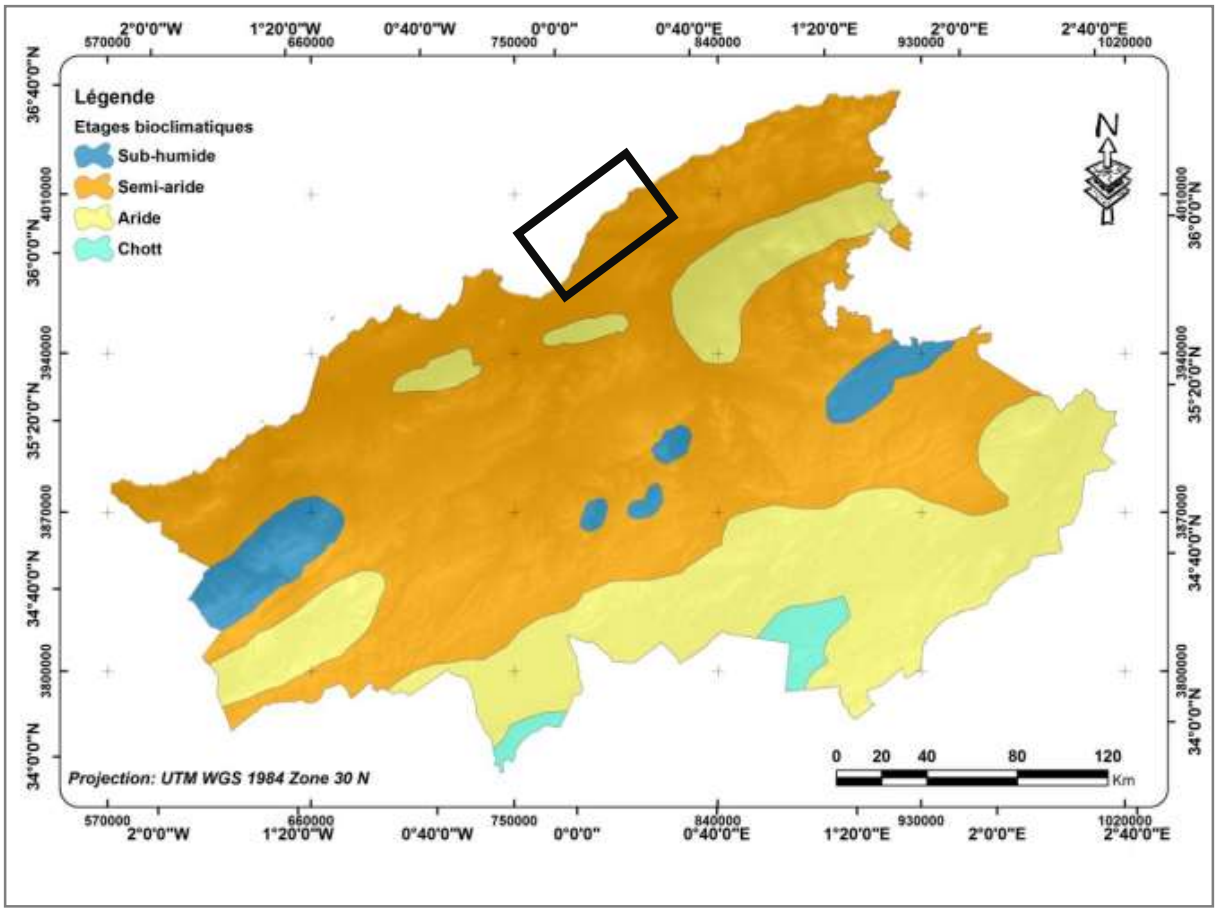


Figure 12 : Etage bioclimatique de l'Ouest d'Algérie (Fekir,2021)

2.7.4.1. Précipitations

Selon Djebaili (1978), les précipitations sont considérées comme un facteur clé déterminant le type de climat. En matière de mouvement de terrain, les précipitations jouent un rôle primordial pour le déclenchement des glissements de terrain. L'Ouest algérien est la partie du pays où il pleut le moins pour les raisons suivantes :

- L'Oranie se trouve à la même latitude que les plaines hautes ;
- Les vents chargés d'humidité sont soit arrêtés ou déviés vers l'Est par la Sierra Nevada en Espagne ou le Rif marocain (Megherbi, 2015).

La connaissance de la pluviométrie du littoral de Mostaganem s'avère primordial pour l'analyse de la susceptibilité et/ou l'aléa de glissements de terrain. Dans notre zone d'étude, il y a deux stations météorologiques, une à Mostaganem et l'autre à Cap Ivi. La figure 13 montre les valeurs moyennes mensuelles des précipitations durant les années 1976 et 2007.

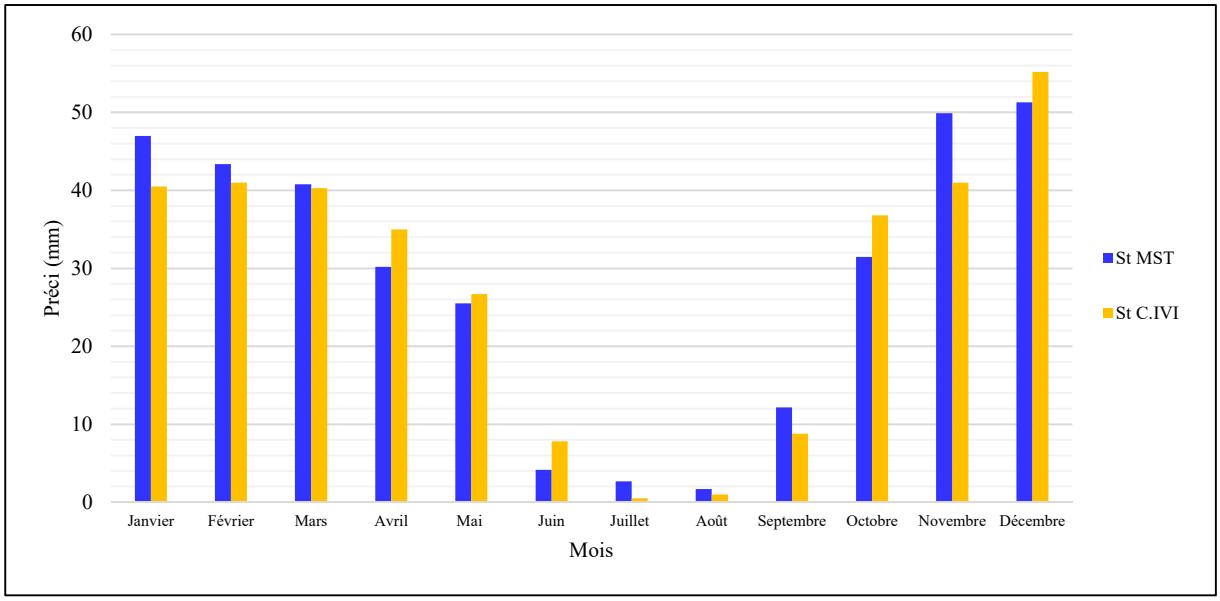


Figure 13 : Variation mensuelles des précipitations au niveau des stations de Mostaganem et Cap Ivi (1976-2007)

L'analyse graphique de la répartition des précipitations moyennes mensuelles montre que les maximums des précipitations s'observent au mois de décembre pour la station de Mostaganem et Cap Ivi (figure 13). Les minimums s'observent au mois d'août (1.71 mm) et au mois de juillet (0.5 mm) pour les stations de Mostaganem et Cap Ivi.

2.7.4.2. Température

Les températures moyennes mensuelles interagissent avec les autres facteurs météorologiques (pluie, le vent), elle influence propriétés physiques internes du sol ainsi que l'écoulement des réseaux de drainage. Les variations de la température peuvent entrainer une sècheresse du sol et par conséquence son fragmentation.

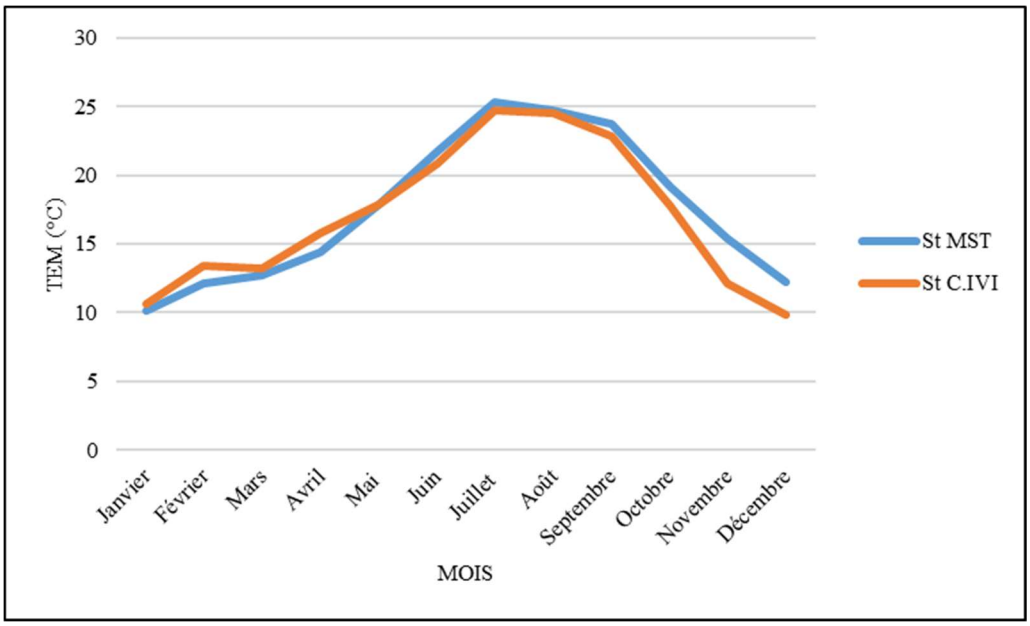


Figure 14 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles de la station de Mostaganem et Cap Ivi

L'analyse graphique des valeurs de la température moyenne mensuelle et annuelle montre que le mois de janvier enregistre les basses valeurs de température pour les deux stations (figure 14), elle est de 10.1 et 10.6 °C pour les stations de Mostaganem et Cap Ivi. Les hautes valeurs de températures moyennes mensuelles et annuelles sont observées au mois de Juillet, 25.35 °C pour Mostaganem et 24.75 °C pour la station de Cap Ivi

2.7.4.3. Climat

De nombreuses méthodes sont testées pour déterminer le type de climat d'une région ; parmi elles, celles d'ordre graphique et autres plutôt analytiques/statistiques. Les méthodes analytiques se basent sur le calcul des indices permettant de déterminer le type de climat d'une région. Nous citions à titre d'exemple les indices d'aridité mensuelle et annuelle de Martonne (Zaoui, 2015 ; Lahouel, 2013.), le quotient pluviométrique et le climagramme d'Emberger (Anteur, 2019).

Les méthodes graphiques permettent de visualiser les périodes sèches et humides. Dans ce cas d'étude, nous nous sommes basés sur la courbe ombrothermique de Bagnouls et Gaussen conçu en 1953 (Zaoui, 2015 ; Lahouel, 2013). Ce diagramme est la représentation de précipitations moyennes et mensuelles exprimées en mm et la température moyenne mensuelle exprimée en degré Celsius (°C). Ces deux variantes sont représentées sur l'axe des ordonnées. Sur cet axe, 1°C de température doit correspondre à 2 mm de précipitations ; les mois sont

représentés sur l'axe des abscisses. Selon les données des deux stations, nous avons pu dresser deux diagrammes ombrothermiques (figures 15 et 16). L'intersection de la courbe des précipitations moyennes mensuelles et la température moyenne mensuelle permet de déterminer deux périodes distinctes. La période sèche compte quatre mois ou plus. Elle s'étale de la mi-mai à la mi-octobre. La période humide dure sept mois durant lesquels les précipitations peuvent atteindre un maximum de 55.2 mm

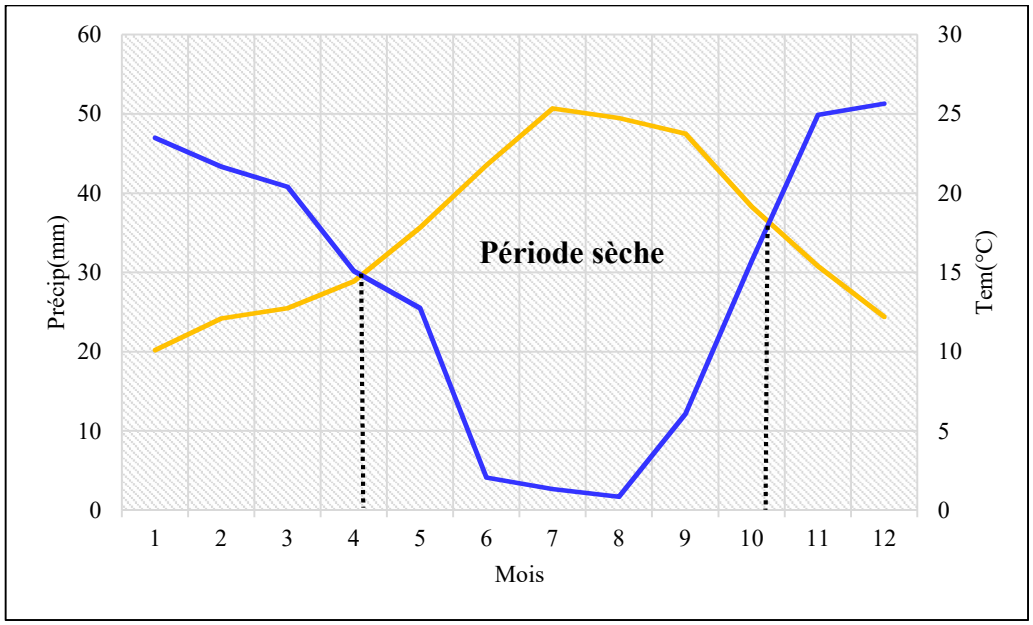


Figure 15 : Diagramme ombrothermique enregistré de la station de Mostaganem (1976-2007)

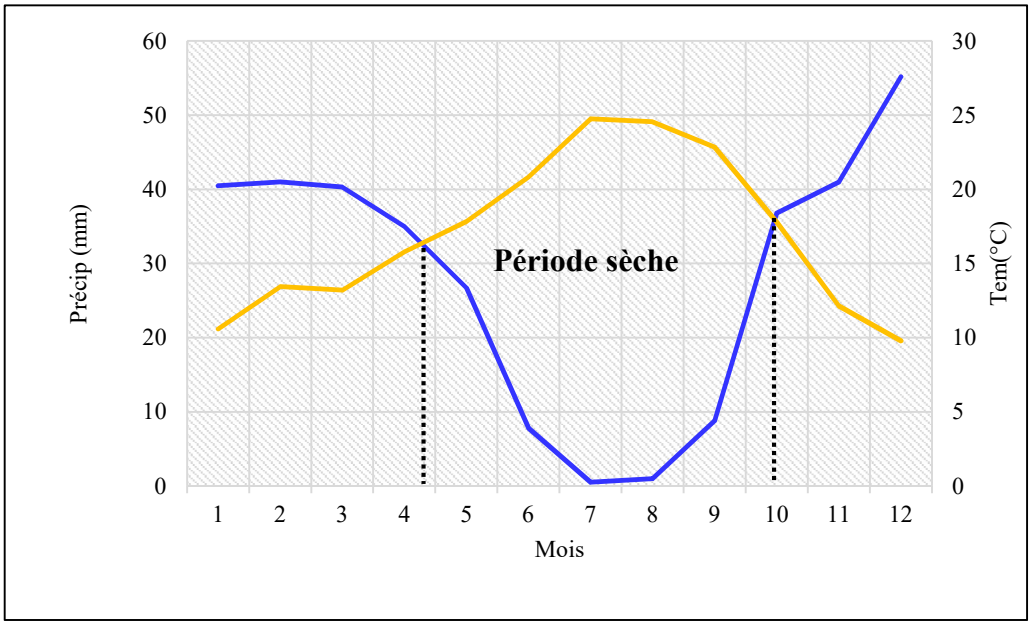


Figure 16 : Diagramme ombrothermique enregistré de la station de Cap Ivi (1979-2007)

Conclusion

Le littoral de Mostaganem se caractérise par un paysage côtier diversifié qui s'étend sur d'importantes superficies formées par les plages et les dunes côtières. Un climat méditerranéen semi-aride, un hiver froid pluvieux et un été chaud sec atténué par la brise de mer. Le milieu littoral mostaganémois est devenu l'objet de convoitise ; un objet de tous les intérêts et les pressions de type urbaine et touristique incontrôlable. L'intensification des activités anthropiques dans cette zone induit à autres problèmes et risques environnementaux (érosion, inondation, élévation du niveau de la mer).

Chapitre 3
Dynamique de l'occupation du sol dans le littoral de Mostaganem

Introduction

Le littoral de Mostaganem a subi une forte transformation en terme de projets de développement d'agglomérations et d'infrastructures touristiques, réalisés essentiellement sur des sols fragiles du littoral (Senouci et Taibi, 2019). Ces projets ont été réalisés en dépit de la loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable. Cette loi interdit « de porter atteinte aux ressources naturelles telles que l'eau, l'air, les sols et les sous-sols ». En prime, la loi n° 02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral, interdit également la construction sur des terrains fragiles tels que les plages et les dunes côtières. La loi 02-02 exige l'application des principes de développement durable qui réunissent les activités de l'Etat, les collectivités territoriales, les organisations et les associations.

À l'heure actuelle, le développement durable des zones côtières est devenu une préoccupation mondiale (Esmail *et al.,* 2016) d'où la nécessité du suivi du changement de l'occupation du sol dans de telles zones (Rabehi, 2018). L'évaluation du changement de l'occupation du sol constitue un outil primordial pour assurer la protection de l'écosystème côtier et sa durabilité (Schößer *et al.,* 2010). Afin de comprendre les changements survenus à Mostaganem, la connaissance de l'environnement de la zone littorale et la technologie moderne du traitement de l'imagerie satellite s'avère nécessaire. Le présent chapitre a pour objectif d'identifier les modes d'occupation du littoral de Mostaganem, et de quantifier leurs variations dans le temps. Cette approche permet de comprendre la dynamique spatiale des changements que le littoral de Mostaganem a subi en dépit des lois relatives à la protection de l'environnement.

3.1. Méthodologie

La méthodologie suivie dans ce travail se base sur l'utilisation de la télédétection, les systèmes d'information géographique et les réalités du terrain. La télédétection se réfère à la détection des objets par l'intermédiaire du rayonnement du spectre électromagnétique. Elle représente l'ensemble des techniques et méthodes permettant d'observer, à l'aide d'un capteur, la surface de la terre et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une cible sans contact direct avec elle. Il existe deux types de télédétection : la télédétection passive dont la source d'émission du rayonnement est naturelle, à savoir le

soleil, la terre et l'atmosphère. La télédétection active utilise par contre un rayonnement artificiel émis par un radar ou un lidar (Kergomard, 1990 ; Lillesand *et al.,* 2015).

Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont des systèmes assistés par un ordinateur pour la saisie, le stockage, la récupération, l'analyse et l'affichage de données spatiales. Les méthodes de SIG combinent la technologie de l'infographie avec les structures de base de données et l'analyse spatiale. Ces techniques connaissent un développement très rapide. Actuellement, le monde entier utilise ces systèmes afin de résoudre différents problèmes (Clarke, 1986 ; Huxhold, 1991 ; Anteur, 2019 ; Hartani, 2019). Afin de cerner la problématique de ce travail, la méthodologie suivie comprend deux étapes. La première concerne le traitement des données de différentes sources telles que les observations sur le terrain, les documents cartographiques et les images satellitaires. La deuxième étape se rapporte à la classification des images satellites Landsat et la cartographie de l'évolution de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem (figure 17).

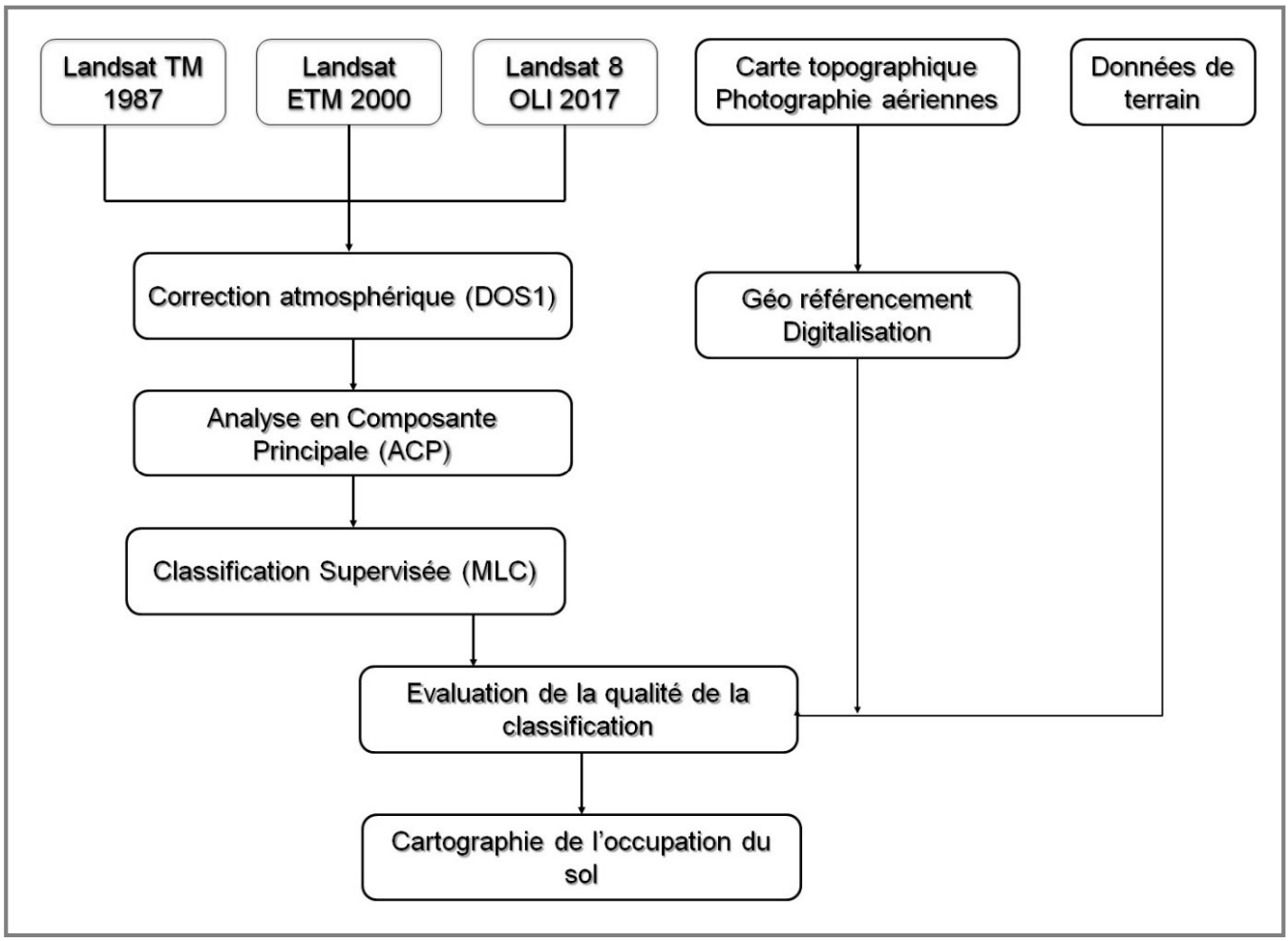


Figure 17 : Méthodologie de travail

3.1.1. Acquisition des données satellitaires

L'analyse de la dynamique de l'occupation du littoral de Mostaganem se fait à travers l'utilisation de l'imagerie satellite du capteur *Landsat.* Cette image fournit une vision synoptique des modes d'occupation du littoral, ce qui est dans le cas des grandes zones, n'est pas facile à le faire par le biais des enquêtes sur terrain (Richards, 2013 ; El-Hattab, 2016). Leur capacité d'identifier les différents modes d'occupation repose essentiellement sur le comportement spectral des objets (plage, zone urbaine, eau, etc.) (Ndao, 2012). L'avantage de l'utilisation de ces images est la multi temporalité, c'est-à-dire, la disponibilité des archives historiques qui permettent de cartographier et de comprendre les changements de l'occupation du littoral dans le temps (Bhatti et Tripathi, 2014 ; Li *et al.,* 2017). En Algérie, les études de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la zone côtière ont été abordées par plusieurs chercheurs notamment Bouhennache *et al. (*2014) et Rabehi (2018) ; ils se sont intéressés aux changements de l'occupation/utilisation du sol (*LULCC*) dans la wilaya d'Alger, en particulier la baie d'Alger. Dans ces différents travaux de recherche, une série multi-temporelle des images Landsat a été utilisée. Dans notre cas d'étude, les images : *Landsat* TM (1987), *Landsat* ETM (2000) et *Landsat* 8 OLI (2017) ont été utilisées après téléchargement à partir du site USGS (http:// earthexplorer.usgs.gov/). Les caractéristiques de ces images acquis du satellite Landsat sont décrites dans le Tab.1

Tab.1 : Caractéristique des images satellitaires

Capteur	**Date d'acquisition**	**Path/Row**	**Résolution spatiale**	**Nébulosité**
***Landsat* 5 TM**	07/09/1987	198/35	30 m	Faible
***Landsat* ETM**	05/08/2000	197/35	30 m	Faible
***Landsat* OLI**	16/07/2017	197/35	30 m	Faible

L'imagerie fournie par le satellite *Landsat* a été utilisée pour cartographier les changements de l'occupation du littoral de Mostaganem sur une période de 30 ans (1987-2017). Elle fournit une description détaillée des paysages de la surface de la terre. Elles ont été choisies en raison de l'accès libre et gratuit à l'imagerie *Landsat* qui permet de maximiser le contenu informatif des archives, sa haute résolution spatiale qui est assimilée à la taille couverte par les pixels de l'image ; son choix doit se faire en fonction de la taille minimale des éléments à connaitre sur la surface terrestre. Selon Hermosilla *et al.* (2015), Liang *et al*. (2015) et Dusseux *et al.* (2019), la résolution temporelle signifie la capacité de revisite d'un

capteur sur un même site d'étude estimée à 16 jours, la faible nébulosité et le champ du sol à l'image, c'est-à-dire qu'elle couvre toute la zone d'étude.

Les images satellitaires du capteur *Landsat* MSS de l'année 1987 ont une résolution spatiale de 60 m ce qui rend l'étude de l'occupation du sol difficile. De ce fait, les images du capteur TM de l'année 1987 dont la résolution est 30 m, ont été retenues pour cette étude. Selon les interviews faites auprès du commissariat littoral et la Direction de l'Environnement de Mostaganem, les différents projets de développement se sont multipliés à partir des années 2000 où une nouvelle gouvernance de développement économique est apparue. De ce fait, cette date a été retenue. L'image de *Landsat* 8 OLI 2017 a été choisie car elle est la plus récente. Elle a été retenue en raison du lancement du travail de thèse à la fin de l'an 2016.

3.1.2. Prétraitement des données satellitaires

3.1.2.1. Correction atmosphérique

Les conditions météorologiques ; la pluie, neige, nuages et les particules en suspension peuvent affecter la réflectance de la luminance et en conséquence les détails des données d'images satellites (figure 18). Ces effets atmosphériques peuvent être minimisés grâce à la correction atmosphérique qui permet d'extraire une information de la surface de la terre indépendamment des effets de l'atmosphère (Kergomard, 2000 ; Richards, 2013 ; Bru, 2015 ; Bernardo *et al.,* 2017).

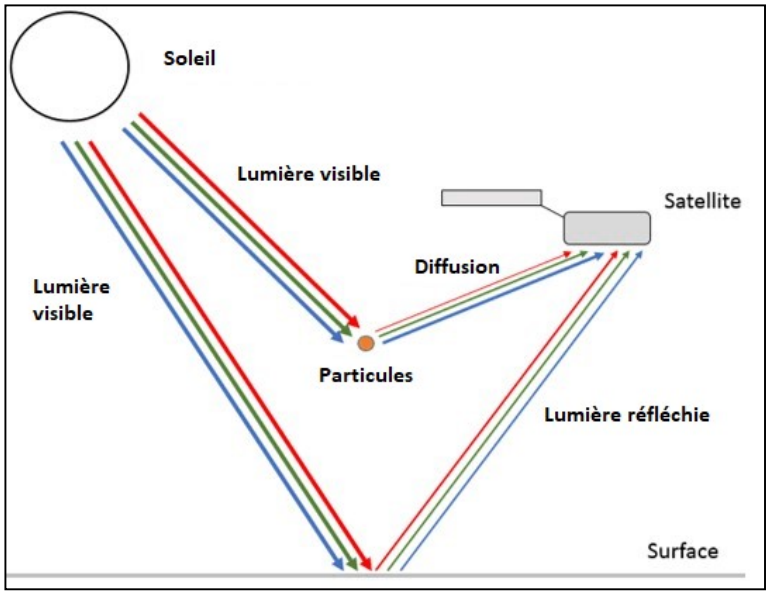


Figure 18 : Principe de la réflectance du rayonnement électromagnétique (www.sigterritoires.fr.)

Il existe plusieurs algorithmes de correction atmosphérique : « *Dark Object Subtraction* » *(DOS), « Quick Atmospheric Correction » (QUAC), « Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes » (FLAASH), « Atmospheric Correction for OLI 'lite' » (ACOLITE) et « Provisional Landsat-8 Surface Reflectance Algorithm » (L8SR)* (Chavez, 1988 ; Berk *et al.,* 1998 ; Gao *et al.,* 2006 ; Gao *et al.,* 2009 ; Bernardo *et al.,* 2017 ; Ilori *et al.,* 2019). Dans cette étude, la méthode de Soustraction d'Objet Sombre (DOS) a été appliquée du fait qu'elle soit empirique, simple et largement utilisée. Le DOS suppose que certains effets atmosphériques peuvent être éliminés en déterminant la valeur du pixel le plus sombre d'une bande (ou d'une image) et en soustrayant cette valeur de chaque valeur de pixel dans chaque bande. Cette méthode a été appliquée par plusieurs chercheurs (El Hajj, 2008; Kara et Keçeli, 2017).

A l'aide du logiciel *QGIS* 3.4.0 avec « *Semi-Automatic Classification plugin* » (SCP), la correction atmosphérique des images satellitaires des années 1987 2000 et 2017 a été effectuée (figure 19). Le résultat de la bande produite est appréciable car celle-ci présente une certaine clarté (figure 20b).

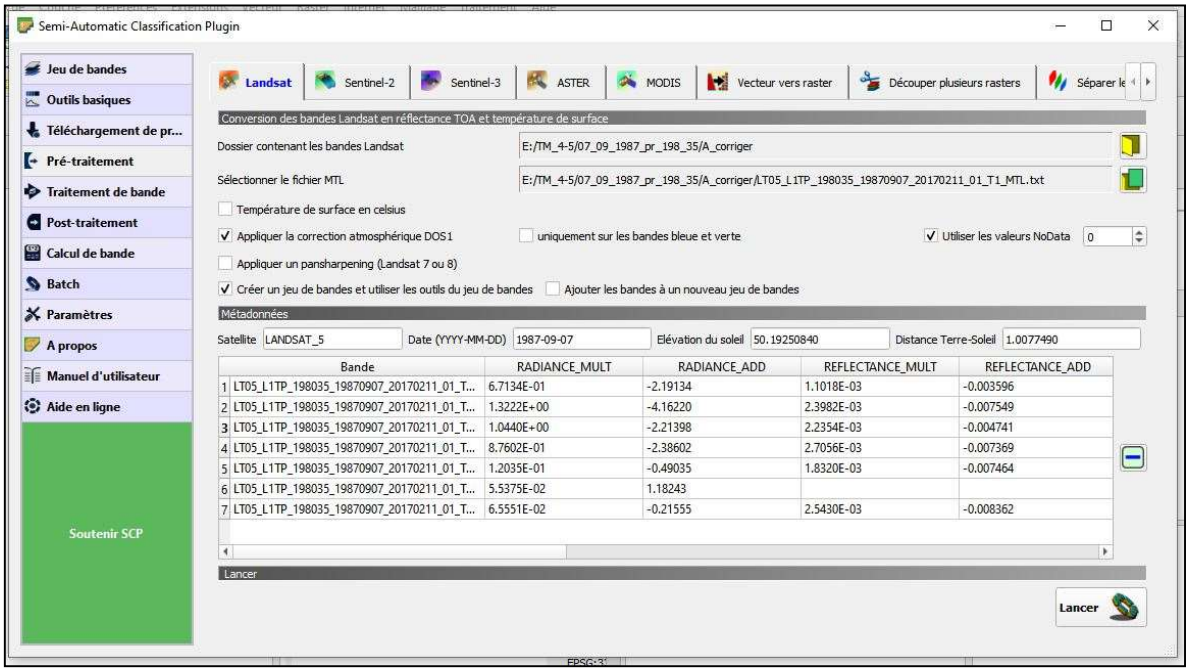


Figure 19 : Principe de la correction atmosphérique (DOS) in *QGIS* 3.4.0

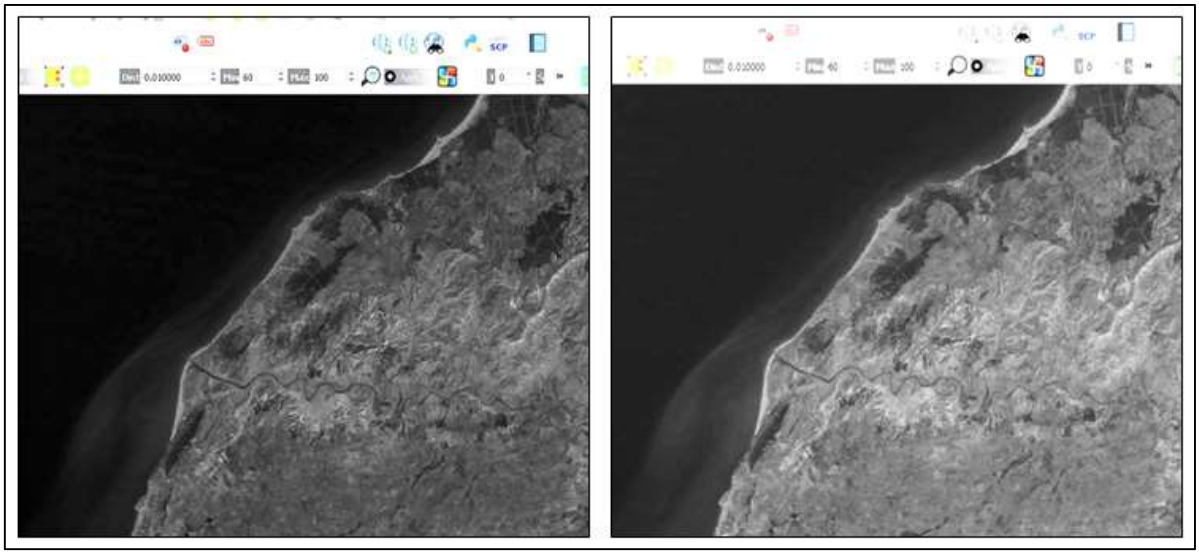


Figure 20 a : Avant la correction b : Après la correction

Après la correction des images à l'aide du l'algorithme DOS1 du « *semi-automatic classification* » plugin du logiciel 3.4.0, celles-ci sont enregistrées sous format BSQ afin de procéder à une analyse en composante principale (ACP) (figure 20 a & b)

3.1.2.2. Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale est une analyse factorielle basée sur l'analyse de la matrice de corrélation ou la matrice de covariance. Elle produit des facteurs (axes principaux) qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales, hiérarchisées et indépendantes les unes des autres (Guerrien, 2003 ; Habib *et al.,* 2013). En télédétection, cette méthode est très souvent utilisée dans le suivi de changements de l'occupation du sol (Lagabrielle, 2003 ; Samaali, 2011 ; Misra *et al.,* 2013). En imagerie satellitaire, le concept de l'ACP repose sur la réduction du nombre de bandes et en maximisant les informations contenues. Du point de vue de classification, la transformation des données sur des axes orthogonaux augmente la séparation entre les classes spectralement adjacentes, et par la suite l'augmentation de la précision de la classification (Dharani et Sreenivasulu, 2021 ; Li et Yeh, 2002 ; Maldonado *et al.,* 2002).

Dans cette partie, l'ACP a été appliquée à l'aide du logiciel *ENVI* 4.8 comme une pré-classification. Les composantes principales ont été calculées à l'aide d'une matrice de corrélation. Le résultat de l'ACP est une nouvelle série de bandes (composantes principales) dont chaque composante (bandes) a une variance plus importante que la suivante. D'après l'ACP de l'image satellitaire de 1987, le maximum d'informations figure

dans la bande 1 correspondant au canal bleu (97.30%) et dans la bande 2 au canal vert (1.56%) (Tab. 2).

Tab.2 : Composantes principales (PC) l'image satellitaire de 1987

Composante principale	Valeur propre	Pourcentage (%)
Bande 1	7783.00	97.30
Bande 2	124.68	1.56
Bande 3	48.55	0.61
Bande 4	24.34	0.30
Bande 5	9.14	0.11
Bande 6	8.37	0.10
Bande 7	1.25	0.02

La composante 2 traduit bien les gains de comptes numériques liés surtout à la classe bâtie. La fausse composition colorée de l'image de 1987 est Verte, Bleu et Infrarouge (RGB 241) (figure 21). L'ACP et la composition colorée des images de 2000 et 2017 sont illustrées dans l'annexe 1.

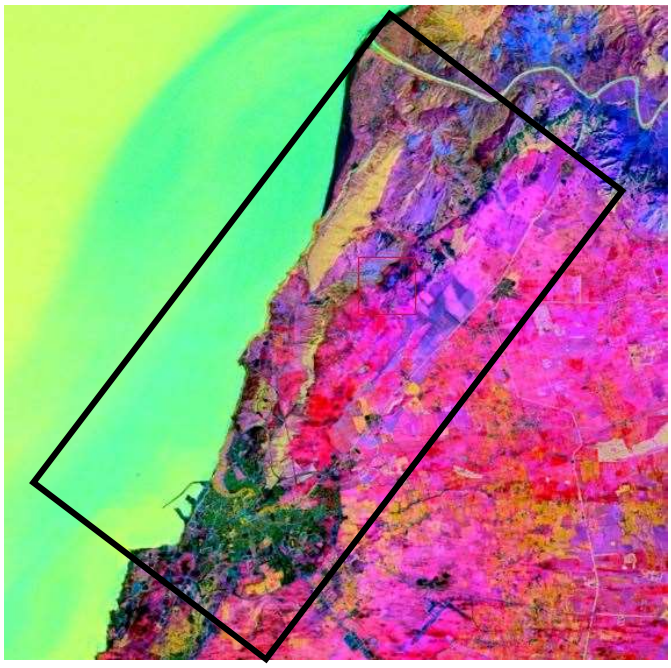


Figure 21 : Fausse composition colorée de l'image satellitaire Landsat TM de 1987 (RGB : 241).

3.1.3. Acquisition des données non satellitaires

Les données non satellitaires sont incontournables pour réaliser le processus de la classification et l'identification des différents modes d'occupation du sol. Des cartes de

bornage du littoral de Mostaganem ont été collectées auprès du Commissariat National du Littoral (CNL). Quant aux cartes topographiques à l'échelle 1/25 000 et 1/50 000, elles ont été empruntées à la cartothèque de l'Université Oran 2. Ces documents ont été géo-référencés à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Des photographies aériennes des années 1980, 2006 et 2014 sont utilisées afin d'identifier les modes d'occupation du sol. Le Plan d'Aménagement Côtier (PAC), le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) et le Plan d'Occupation du Sol (POS) sont des instruments d'aménagement et d'urbanisme établis à une échelle locale. Le POS *est un document juridique, il concerne toutes les propriétés privées ou publiques. Il constitue une référence de permis de construction, il fixe les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols, qui peuvent notamment comporter l'interdiction de construire*. Le PDAU est un instrument de planification à long terme révisé chaque dix ans. *« Il fixe les orientations fondamentales de l'aménagement du territoire, de la ou des communes concernées en tenant compte des schémas d'aménagement et plans de développement. Il définit les termes de référence du plan d'occupation des sols »* (loi n° 90-29 du 1er décembre 1990). Le PDAU couvre une ou plusieurs communes. Il oriente l'aménagement de l'extension urbaine et il fixe les différents indicateurs du plan d'occupation du sol. Une copie révisée du PDAU (2006) concernant le groupement des communes de Mostaganem, Mazagran et Sayada a été mise à notre disposition par la Direction de l'Urbanisme, de la Construction et de l'Habitat (DUCH) de Mostaganem. Ces trois communes ont une forte liaison économique, morphologique et en terme d'infrastructures.

3.1.4. Classification et comparaison des images

La classification est un processus utilisé largement dans le traitement de l'imagerie satellitaire (Sun *et al.,* 2013 ; Samaali, 2011). Elle permet de classer, identifier et détecter les objets d'une image selon ce qu'elle représente sur la surface terrestre. On distingue une classification supervisée, non supervisée et une classification hybride. La classification supervisée utilise des échantillons d'identité connus pour classer les pixels d'une image inconnue. La classification non supervisée ne nécessite plus d'échantillons, l'image est classée selon des valeurs spectrales. La classification hybride combine les deux précédentes classifications (Liu *et al.,* 2011 ; Misra *et al.,* 2013). Dans ce travail, une classification supervisée utilisant l'algorithme « *Maximum Likelihood Classifier* » (MLC) a été appliquée. Cet algorithme est le plus utilisé dans la classification supervisée (Pushpendra *et al.,* 2014).

Maximum likelihood Classifier se base sur le théorème de Bayes. Chaque pixel est assigné à une classe X selon une probabilité d'appartenance. Le calcul des distributions des probabilités suppose qu'elles ont une forme de modèles normaux multivariés (Richards, 2013). De nombreux chercheurs ont appliqué le MLC pour classifier les images *Landsat* car il fournit un résultat relativement précis (Butt *et al.,* 2015 ; Iqbal et Khan, 2014 ; Wan *et al.,* 2015 ; Kaliraj *et al.,* 2017 ; Koko *et al.,* 2020).

Afin d'appliquer ce type de classification, sept zones d'entrainement (ROIs) « des échantillons d'identité connue » ont été choisies : « plage-dunes et plaine formées de sable » (El-Hettab, 2016), « surface bâtie », « dunes à dense végétation », « zone à dense végétation », « Oued Chéliff », « grandes cultures » et « maraichères ». La connaissance de la zone d'étude a une grande importance pour déterminer l'appartenance de chaque pixel a une classe. En utilisant le logiciel *ENVI 4.8,* l'image a été classée en examinant la réflectance de chaque pixel et en décidant avec quelle classe d'information il appartient le plus. Ce processus est appliqué aux images *Landsat* de 1987,2000 et 2017. La comparaison des classes permet d'identifier et de suivre les changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem. De nombreux chercheurs ont utilisé une analyse spatio-temporelle pour la détection des changements qui se base sur une comparaison pixel à pixel des images classifiées de la zone d'études à deux moments différents.

3.1.5. Evaluation de la performance des classifications

3.1.5.1. Précision globale

L'évaluation de la performance des classifications se fait visuellement en comparant les images classifiées aux cartes topographiques, les photographies aériennes et les extraits de *Google Earth Pro*. Une méthode statistique a été adoptée pour estimer la qualité des classifications. Cette technique repose sur la comparaison des objets (classes) obtenus par la classification et des points de contrôle (référence) issus d'autres sources. Le pixel qui a été catégorisé à partir de l'image est comparé au même site sur le terrain. La matrice de confusion ou d'erreur contient des informations sur les classifications réelles et prédites effectuées par un système de classification (Sellin *et al.,* 2015 ; Pal et Ziaul, 2017).

Pour notre cas d'étude, l'évaluation de la qualité des classifications a été réalisée selon les données de références suivantes pour l'image satellitaire de 1987. Une carte topographique de 1987 et des photographies aériennes de la même année ont été utilisées.

Des cartes d'occupation du sol collectées auprès de la Direction Générale des Forêts ont été retenues pour l'année 2000. Les observations sur terrain et l'utilisation des extraits de *Google Earth Pro* ont permis de vérifier l'image classifiée de 2017.

Le résultat d'une évaluation de la précision fournit généralement aux utilisateurs une évaluation globale de la carte et la précision pour chaque classe de la carte. Quant à la précision globale (OA), celui-ci se calcule par :

$$\mathbf{OA}(\%) = \frac{\mathbf{N_{P.C}}}{\mathbf{N_{P.T}}} * \mathbf{100} \qquad 10$$

$\mathbf{N_{P.C}}$: nombre des pixels correctement classifiés ;

$\mathbf{N_{P.T}}$: nombre total des pixels

Le calcul de la précision globale ne fait intervenir que les éléments diagonaux de la matrice de confusion (annexe 2).

3.1.5.2. Coefficient de concordance

Le coefficient de concordance Kappa fut développé par Cohen (1960). Il mesure la concordance entre l'image classifiée et la réalité de terrain (González *et al.,*2013). D'autres auteurs ont recommandé le calcul de ce paramètre car il intègre tous les éléments de la matrice de confusion pour son estimation. Le paramètre Kappa est calculé selon la formule suivante :

$$\mathbf{Kappa} = \frac{\mathbf{P_g - P_m}}{\mathbf{1 - P_m}} \qquad 11$$

Avec : $\mathbf{P_g} = \frac{\sum_{i=1}^{C} \mathbf{M_{ii}}}{\mathbf{N}}$

$\mathbf{P_g}$: représente la précision globale à savoir le taux global de la bonne classification,

$\mathbf{M_{ii}}$:nombre d'échantillon de la classe**i** correctement classé,

N : nombre total d'échantillon, **C** est le nombre des classes.

$\mathbf{P_m} = \frac{\sum_{i=1}^{C} \mathbf{T1(i)T2(i)}}{\mathbf{N^2}}$ Est le rapport des échantillons marginaux et est calculé en utilisant T1(i)

$\mathbf{T1(i)} = \sum_{\mathbf{k=1}}^{\mathbf{C}} \mathbf{M_{ik}}$avec $\mathbf{M_{ik}}$ défini comme le nombre d'échantillon de la classe i affecté à la classe k et

$\mathbf{T2(i)} = \sum_{\mathbf{k=1}}^{\mathbf{C}} \mathbf{M_{ki}}$ avec $\mathbf{M_{ki}}$ défini comme le nombre d'échantillon de la classe **k** affecté à la classe **i**.

Monserud et Leemans (1992) ont suggéré que les valeurs de Kappa inférieures à 0.4 signifient une très faible concordance. Celles qui sont comprises entre 0.4 et 0.55 indiquent une concordance moyenne. Les valeurs comprises entre 0.55 et 0.7 signifient une bonne concordance. Lorsque les valeurs de Kappa sont supérieures à 0.7, ceci signifie que les images et la réalité présentent, entre-elles, une excellente concordance.

3.2. Résultats et discussions

En appliquant l'algorithme de la classification supervisée « *Maximum likelihood classifier* », des cartes d'occupation du sol du littoral de Mostaganem ont été réalisées pour les années 1987, 2000 et 2017 (figure 22a, b et c). La combinaison de l'analyse en composante principale (ACP) avec l'algorithme *Maximum likelihood* a montré que les précisions globales de classification obtenues et les statistiques du coefficient Kappa étaient de 77.72 (Kappa= 0.73), 91.41 (Kappa= 0.90) et 79.33% (Kappa= 0.76) respectivement pour la classification des images de 1987, 2000 et 2017 (annexe 2).

Selon Monserud et Leemans (1992), le rapport d'évaluation de la précision exige une précision de classification globale supérieure à 70%. Les statistiques de Kappa sont supérieures à 0.7. Ce résultat indique la bonne concordance entre l'image classifiée et la réalité de terrain.

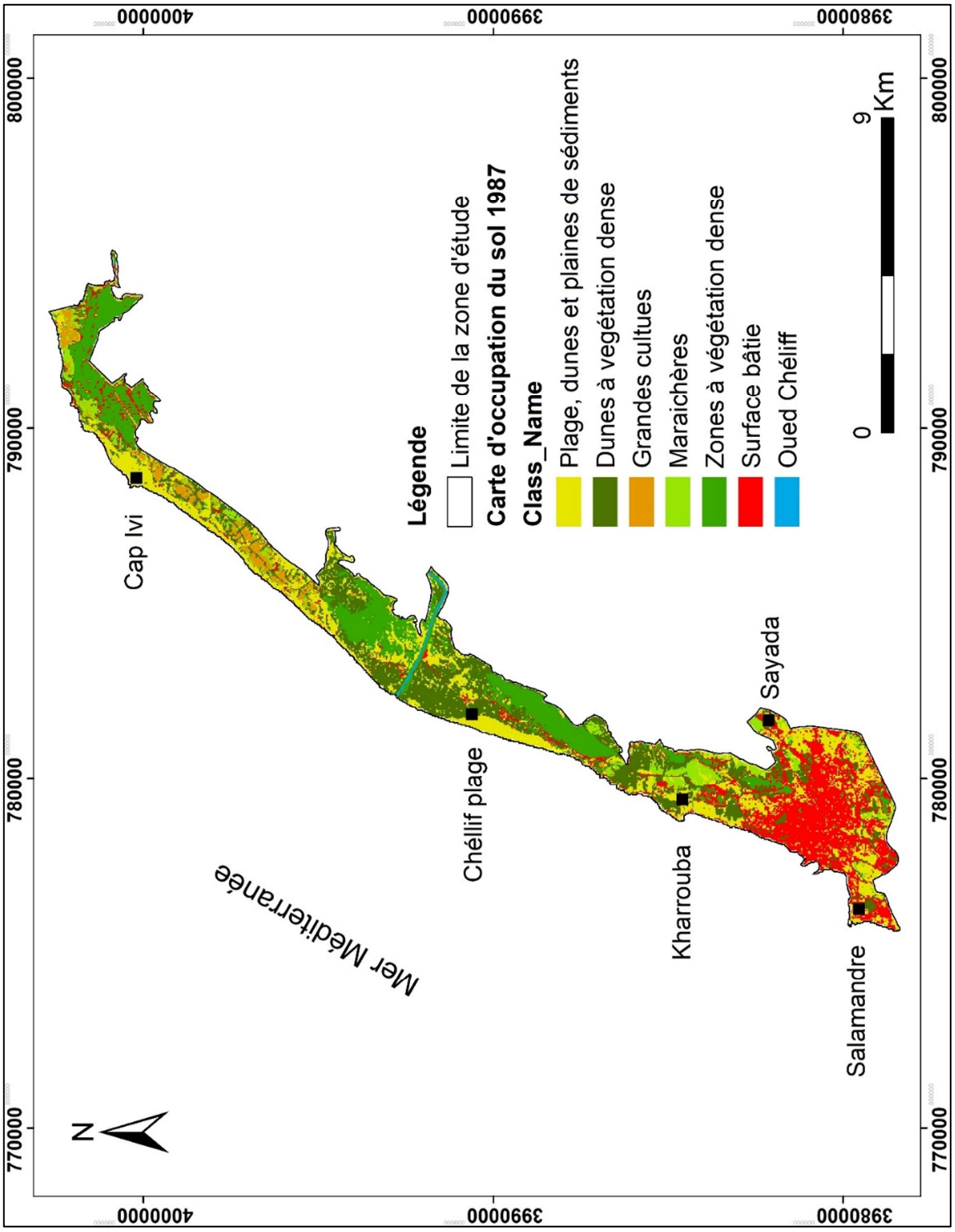


Figure 22a : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 1987

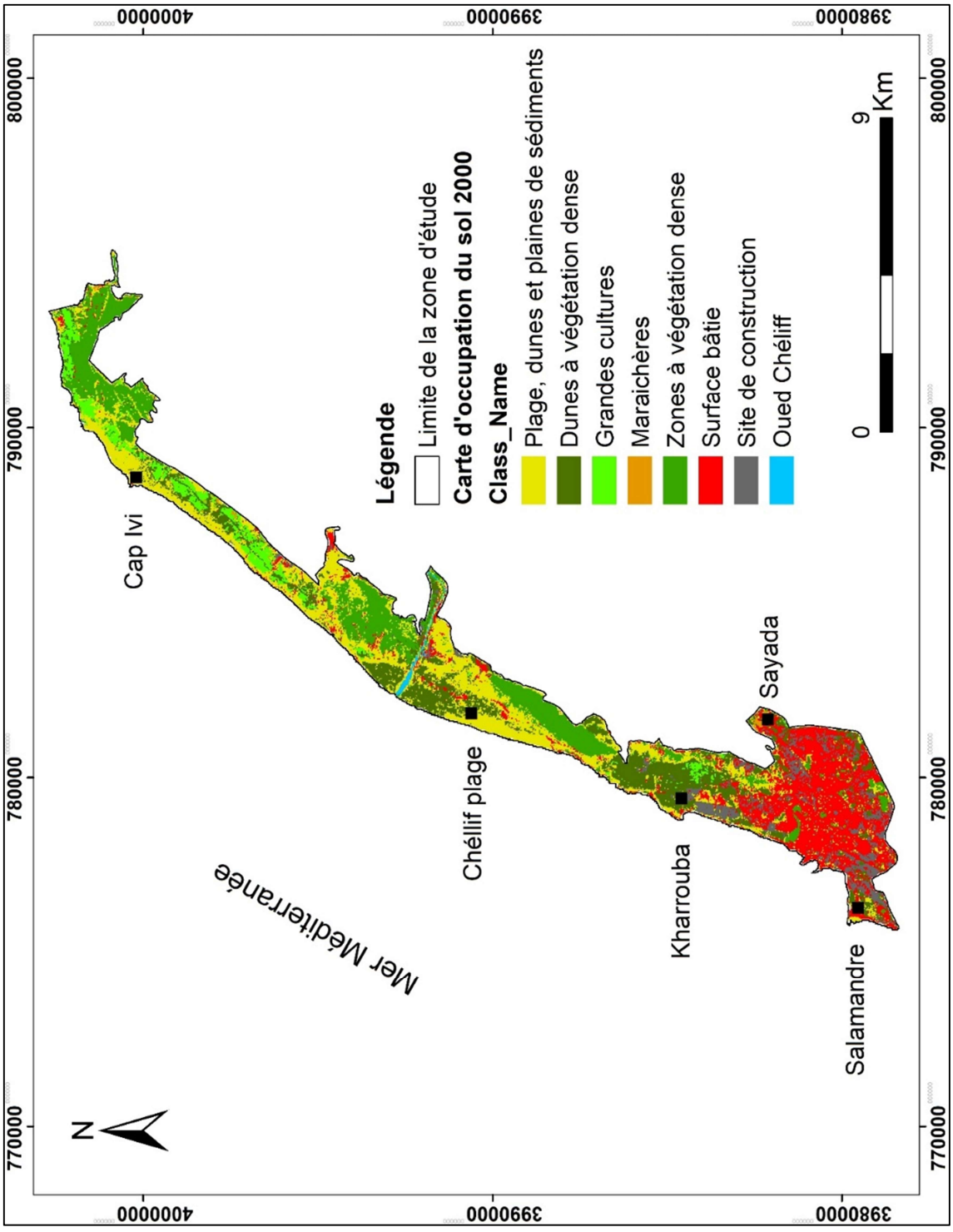


Figure 22b : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 2000

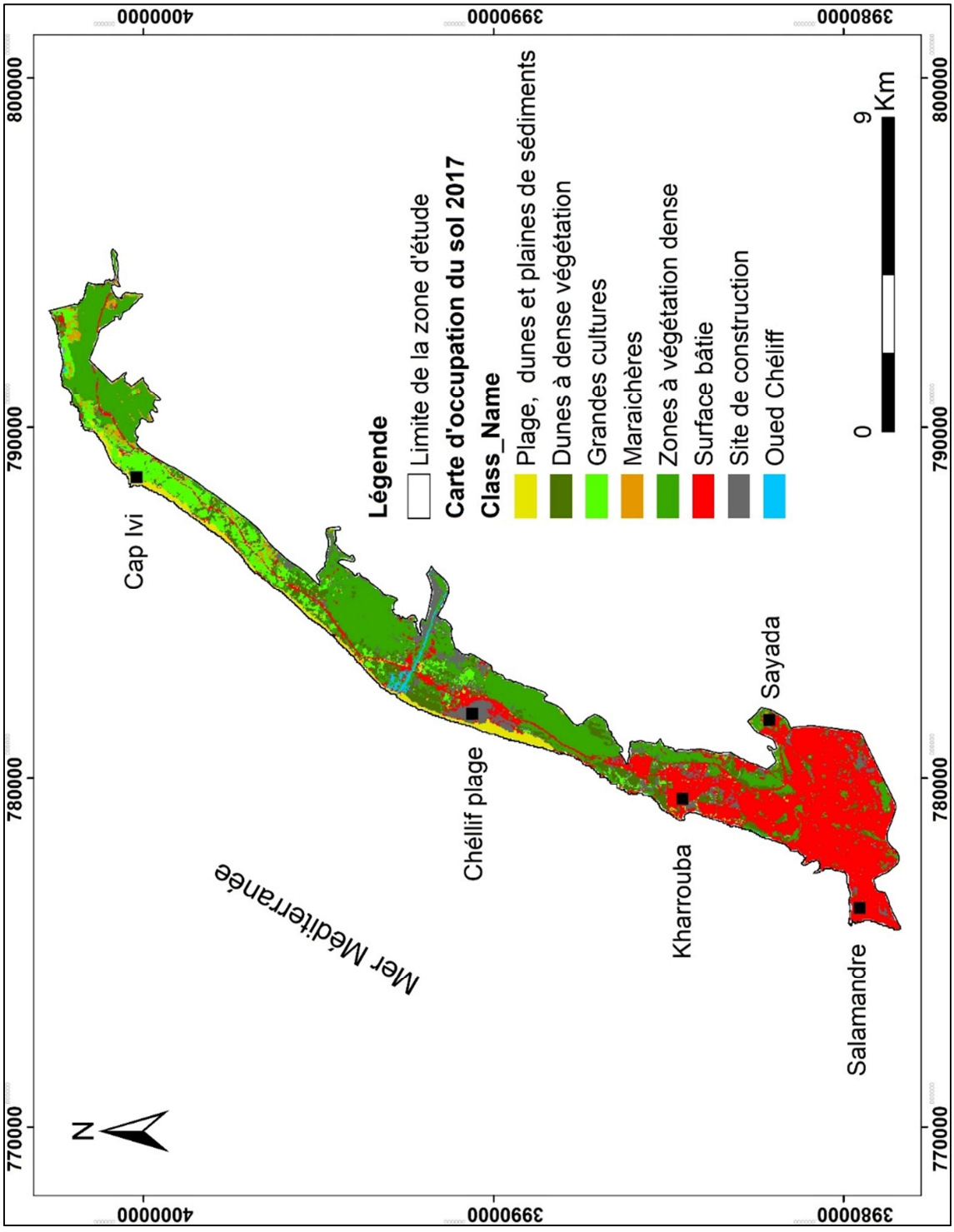


Figure 22c : Carte d'occupation du littoral de Mostaganem en 2017

Le fait marquant sur les cartes d'occupation du sol du littoral de Mostaganem est la présence des espaces naturels par rapport à l'habitat (figure 22a, b et c). La cartographie de l'occupation du sol dans cette portion du littoral montre la richesse et la spécificité des écosystèmes de la côte de Mostaganem. Sept à huit classes d'occupation du sol ont été

identifiées à savoir : « plage, dunes et plaines formées de sable », « dunes à dense végétation », « surface bâtie », « sites de construction », « zone à dense végétation », « grandes cultures », « maraichère » et « Oued Chéliff ».

3.2.1. Plage, dunes et plaines formées de sable

La carte de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem de 1987 montre que les classes « plage, dunes et plaines formées de sable » et « les dunes à dense végétation » couvrent une superficie importante du littoral. Ces unités constituaient respectivement 24.47% et 24.20% de l'espace total de la portion du littoral de Mostaganem. En se basant sur les calculs réalisés à l'aide du logiciel *ArcMap 10.5.1*, la classe « plage, dunes et plaines formées de sable » montre une évolution importante entre 1987 et 2000, le taux de son évolution est de l'ordre de 10.35% (soient 1251.03 ha en 1987 et 1380.47 ha en 2000). La croissance de la superficie de cette classe entre 1987 et 2000 pourrait être expliquée par le phénomène d'ensablement alimenté par du sable provenant de l'érosion éolienne. En Algérie, les zones littorales et steppiques sont exposées au risque d'ensablement. Selon Megherbi (2015), Mostaganem est l'une des zones littorales présentant ce risque. Il est le résultat des dépôts éoliens favorisés par la nature du sol, les conditions hydriques et climatiques (Khan, 2020). Pendant la période coloniale, la région de Mostaganem était parmi les régions les plus réputées pour la production de la vigne algérienne (Caïd *et al.,* 2019). Après l'indépendance, les surfaces de vignoble, situées au niveau du plateau de Mostaganem ont marqué un déclin important entre 1958 à 1983, cette perte est estimée à 85.22%. Selon Caïd *et al.* (2019), la diminution des terres de la vigne est due à leur déboisement afin de les substituer par des cultures céralières (figures 23a). Durant la période 1983-2017, la surface des vignes a marqué un déclin considérable où 548 ha, soit un taux de 10.39%, des vignes ont été préservés. Ces changements morphologiques ont des effets sur le milieu en accentuant la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique et éolienne. Cette dernière s'est produite sur les terrains marneux et les dunes littorales et par conséquence le risque d'ensablement s'accroît.

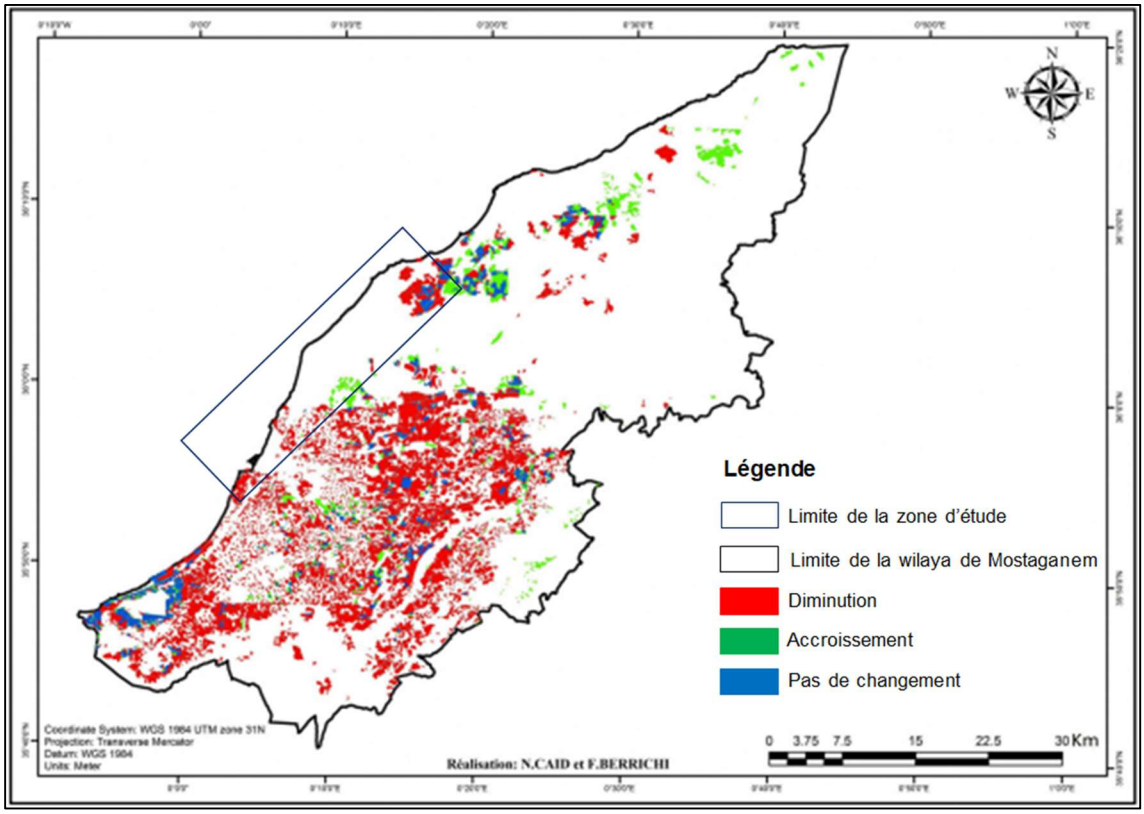


Figure 23a : Déclin du vignoble algérien durant la période 1958-1983 (Caîd et al., 2019)

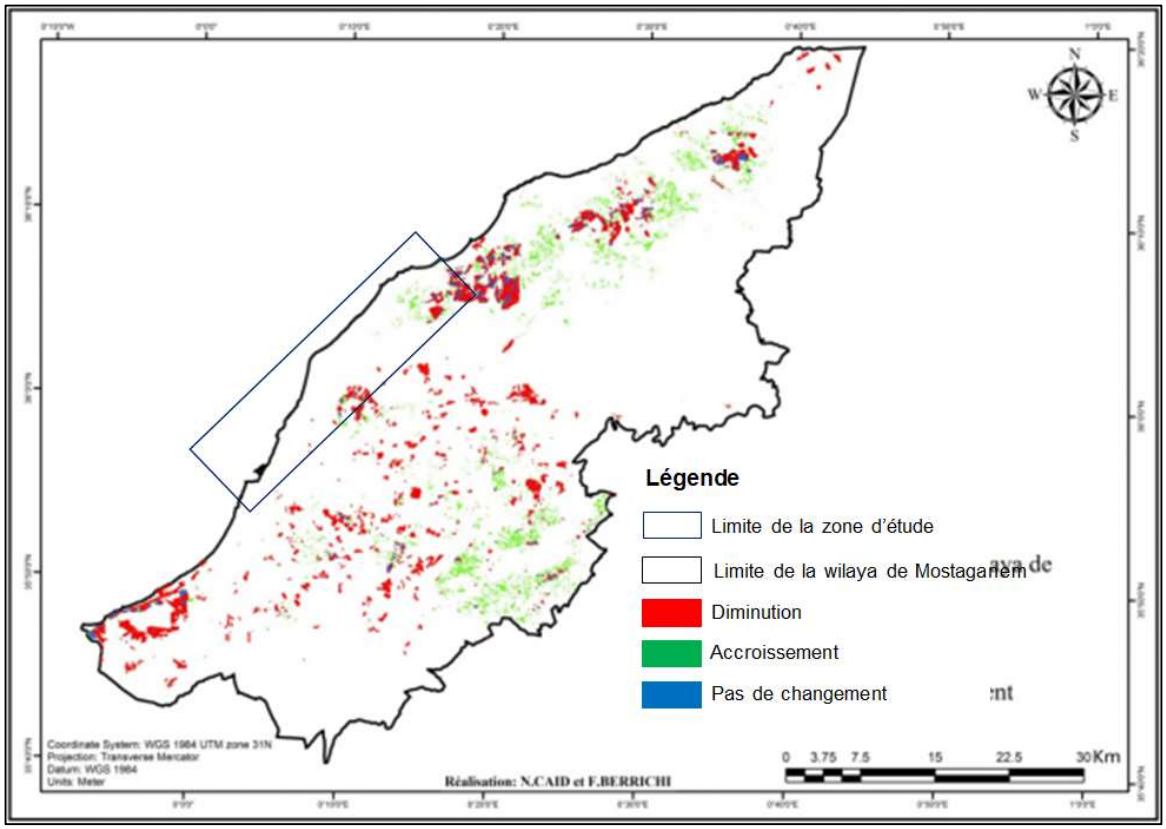


Figure 23b : Déclin du vignoble à Mostaganem durant la période 1983-2017 (Caîd et al., 2019)

Selon la carte géologique de Mostaganem Belle côte (1 /50 000), les terrains sont majoritairement de type sédimentaire. Des systèmes dunaires mobiles ou en voie de fixation se localisent notamment au niveau du plateau de Mostaganem où elles couvrent 2/3 de la superficie totale. Megherbi (2015) a pu conclure que Mostaganem connait un risque d'ensablement selon plusieurs critères :

a. Quand il se manifeste au niveau des structures routières, cela entraine des perturbations fréquentes du trafic.
b. Quand le sol est couvert d'une couche de sable et devient de ce fait stérile.
c. Lorsque les terres agricoles marquent une perte de fertilité et en conséquence une diminution de la production.

Les études de Megherbi (2015) sur le phénomène d'ensablement dans la wilaya de Mostaganem ont montré que :

- Un taux de 18. 47% de terres appartenant au plateau de Mostaganem sont affectées par le phénomène d'ensablement

- Sur une zone de test de 13507 ha, 7% de ces terres ont subi le phénomène d'ensablement. Le taux annuel d'évolution du processus d'ensablement est de 1.5 ha /an soit 2.2% de la superficie de la zone d'étude (Smahi, 2001 ; Megherbi, 2015).

Au cours de la période 2000- 2017, la classe « plage, dunes et plaines formées de sable » a connu un déclin important en terme de superficie (figure 22b & 22c). L'an 2017 a enregistré une décroissance de l'ordre de 85.17% de la superficie totale de cette classe (soient 1380.47 ha en 2000 et 204.70 ha en 2017) (figure 24). À Benabdelmalek Ramadane, les pertes qu'enregistrent les terrains sédimentaires meubles sont dues à la politique de mise en valeur agricole. Un programme national de développement agricole et rural (Pndr) est mis en place. Ce plan a pour but d'améliorer l'activité agricole locale. D'après les cartes d'occupation du sol de 2000 et 2017, il a été montré qu'une superficie considérable des terrains sédimenteux a été transformée en grandes cultures. Selon la Direction des Services Agricoles (DSA), les terres utiles pour l'agriculture couvrent une superficie de 3700 ha ; 260 ha de ces terres sont irrigués, 2857 ha sont des terres labourables et 825 ha sont des périmètres de culture (Megherbi, 2015).

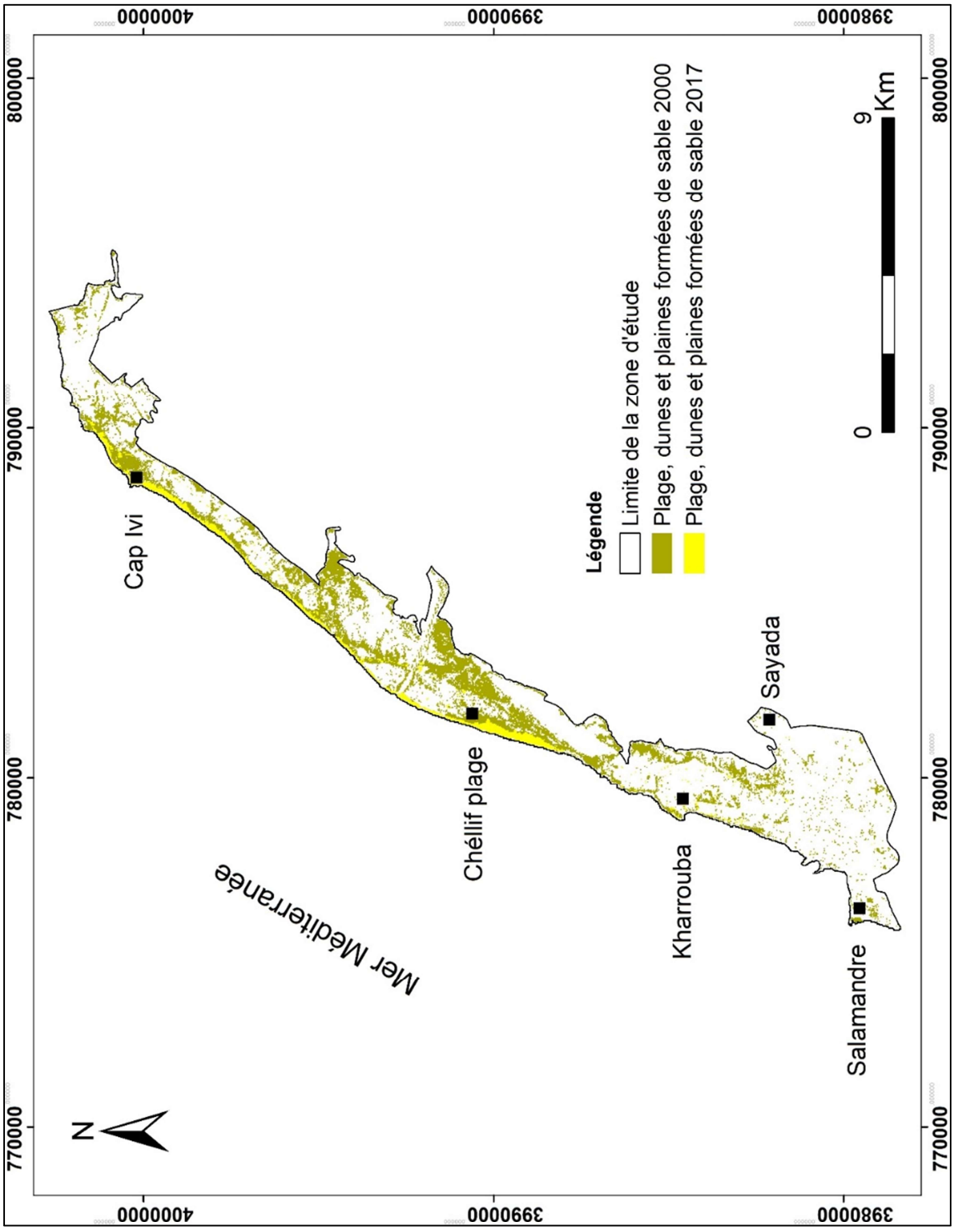


Figure 24 : Déclin de la classe plage, dunes et plaines formées de sable (2000-2017)

Un autre facteur qui pourrait aggraver le déclin de la superficie de terrains sédimenteux est le reboisement. Le littoral de la commune de Benabdelmalek Ramdane couvre un immense terrain forestier. Il est réparti en trois grandes forêts : la forêt de Djebel Zgnoun, Bourahma et la forêt de Bekatcham. Pour atteindre un taux de boisement de 20% à l'horizon 2025 dans le Nord algérien, un Plan National de Reboisement (PNR) a été élaboré

en 1998. Dans la commune de Benabdelmalek Ramdane, les forêts, selon la carte d'occupation du sol (2017), ont enregistré une certaine croissance au détriment de la classe plage, dunes et plaines formées de sable (figure 22b et c).

Le tourisme est l'une des activités principales qui modifie l'occupation du sol dans le bassin méditerranéen (Gormsen, 1997 ; Atik *et al.,* 2010). En Algérie, le développement du tourisme a été mis en valeur par le biais de la création des Zones d'Expansion Touristiques (ZET) (Meghzili, 2015 ; Ghodbani *et al.,* 2016). Récement « Zones d'Expansion et Sites Touristiques » (ZEST) . Cette dernière se définit comme " *toute région ou étendue de territoire jouissant de qualités ou de particularités naturelles, culturelles, humaines et créatives propices au tourisme, se prêtant à l'implantation ou au développement d'une infrastructure touristique et pouvant être exploitée pour le développement d'au moins une sinon plusieurs formes rentables de tourisme.* La Loi n° 03-03 du 17 février 2003, relative aux zones d'expansion et sites touristiques a été promulguée afin de définir les principales règles de délimitation, classement, protection, aménagement, promotion et réhabilitation des zones d'expansion et sites touristiques. Parmi ces objectifs, on cite :

- L'utilisation rationnelle et harmonieuse des espaces et ressources touristiques en vue d'assurer le développement durable du tourisme.
- L'intégration des Zones d'Expansion et Sites Touristiques ainsi que les infrastructures de développement des activités touristiques dans le schéma national d'aménagement du territoire (SNAT).
- La protection des bases naturelles du tourisme.
- La préservation du patrimoine culturel et des ressources touristiques à travers l'utilisation et l'exploitation, à des fins touristiques, du patrimoine culturel, historique, culturel et artistique.
- La création d'un bâti harmonieusement aménagé et adapté au développement des activités touristiques et la sauvegarde de sa spécificité.

La wilaya de Mostaganem compte seize Zones d'Expansion et Sites Touristiques (ZESTs) s'étalant sur 4.34 ha soit 16% de la superficie du littoral dont 41% sont constructibles (figure 25). L'ensemble des ZESTs devrait générer une capacité d'hébergement touristique de 37670 lits. La côte de Mostaganem reçoit annuellement environ de 11 millions de touristes (Taibi, 2016). Cependant, l'offre des structures d'accueil

ne satisfait pas la demande ; 1 lit pour 1000 touristes durant l'été 2015. Selon les rapports par le Centre National d'Etudes et d'Analyse pour la Population (CENEAP) en 2011, l'engouement des touristes pour le bord de mer s'est accompagné inévitablement d'un développement accru des structures d'accueil.

Notre zone d'étude se caractérise par la présence de quatre Zones d'Expansion et Sites Touristiques. La ZEST de Kharrouba, la ZEST de Sonactère, la ZEST de Cap Ivi et la ZEST de Benabdelmalek Ramdane. Ces deux dernières font partie du littoral de la commune de Benabdelmalek Ramdane.

Le littoral de Benabdelmalek Ramdane possède un important patrimoine naturel et écologique contribuant à une plus forte attractivité du tourisme balnéaire dans la wilaya de Mostaganem. La ZEST de Cap Ivi occupe une superficie de 383 ha dont 102.1 ha sont constructibles avec une capacité d'accueil de 2136 lits (ANDT, 2005a). Le complexe touristique de Cap Ivi a été construit dans un espace naturel d'une haute valeur écologique. La littoralisation consiste dans ce cas en la construction de structures d'accueil pour les touristes et en l'aménagement de sites pour la récréation, entre-autre, la création d'une marina (petit abri pour les embarcations). L'augmentation de la population des côtes sableuses conduit à la dégradation de ce milieu et à une augmentation des rejets polluants tels que les déchets solides et liquides (Ghodbani *et al.,* 2013).

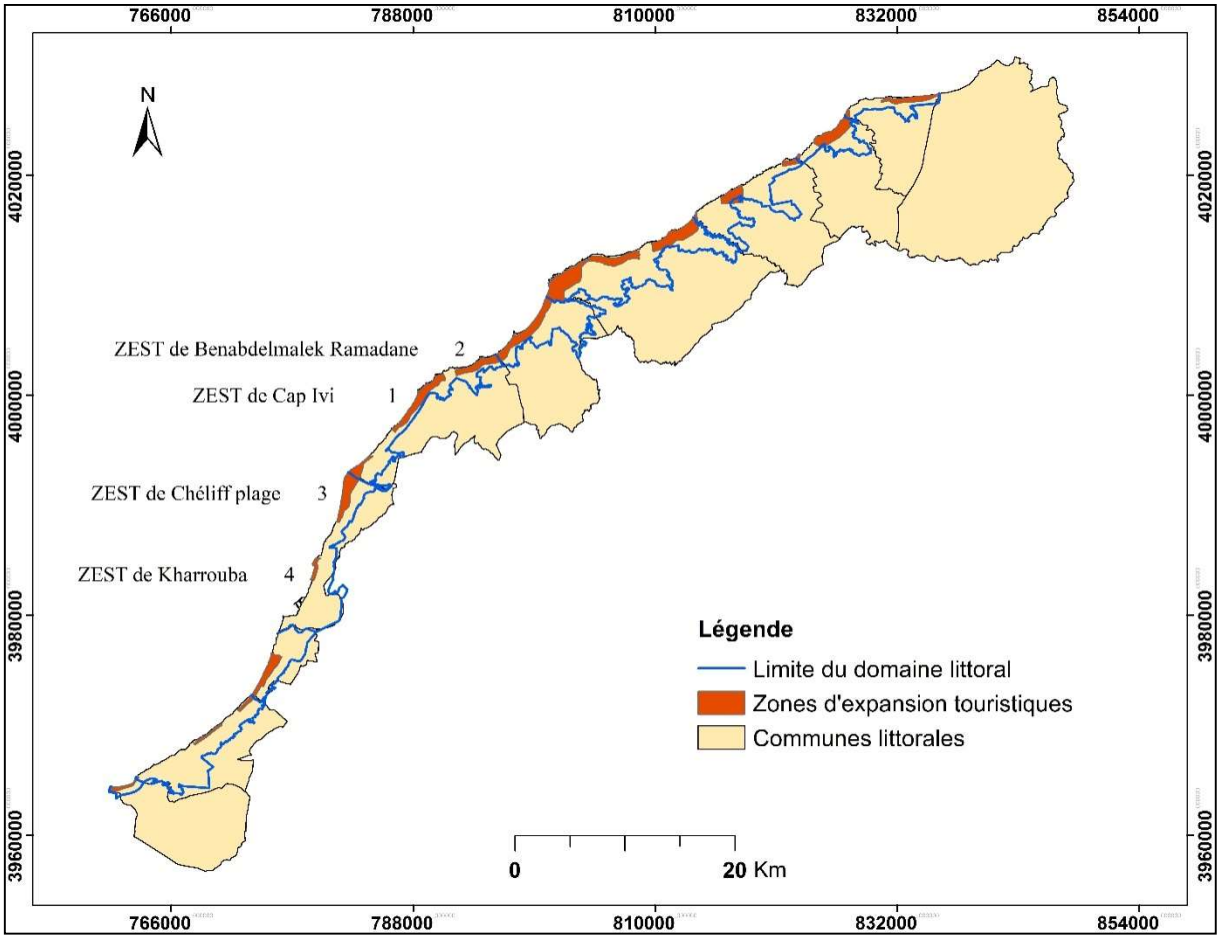


Figure 25 : Les Zones d'Expansion Touristiques à Mostaganem (ANAT, 2005)

La Zone d'Expansion et Site Touristiques (ZEST) de Benabdelmalek Ramdane couvre une superficie de 306 ha dont 166 ha est destiné à la construction d'habitations. Le projet d'aménagement de cette ZEST vise également à augmenter la capacité d'accueil pour les touristes. Ce site est principalement occupé par quatre classes : le milieu naturel côtier, des plages à sable fin et des plages rocheuses. Les sites agricoles cultivés et pastoraux sont situés dans la partie Ouest et centrale occupant une superficie importante de la ZEST (ANDT, 2005b). Les terres boisées, représentées principalement par l'Eucalyptus et le Pin d'Alep, se trouvent dans la partie Est de la ZEST. Il est à noter qu'il existe quelques sites urbanisés au centre de la ZEST de Benabdelmalek Ramadane (figure 26).

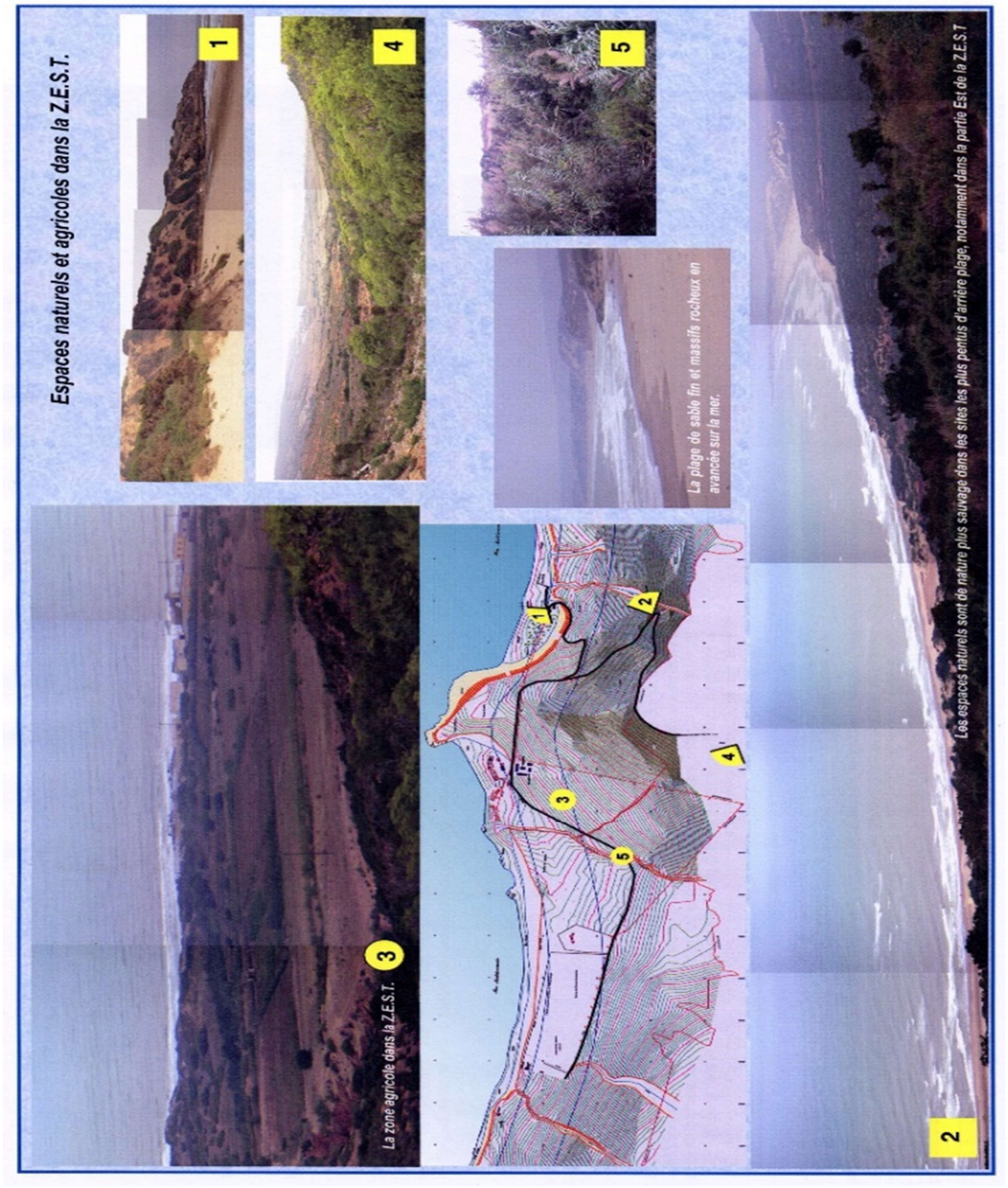


Figure 26 : ZEST de Benabdelmalek Ramdane (ANDT, 2005a)

Le littoral de la commune de Mostaganem se caractérise par la présence de deux ZESTs : la ZEST de Chéliff qui comprend la plage de Chéliff et la ZEST de Kharrouba. Avant 2008, la largeur maximale de plage de Chéliff était 376 m mesurée à l'aide d'une fonctionnalité de *Google Earth Pro*. Depuis 2009, cette ZEST fait l'objet d'intensifs travaux d'aménagement tels que l'installation d'une station de déssalement et une centrale électrique qui occupe une superficie de 242 ha (ANDT, 2005b). Tandis que, autres projets couvrent une superficie de 130 ha (ANDT, 2005b). Selon l'analyse des extraits de *Google Earth Pro*, la plage de Chéliff a été fortement exploitée entre 2009 et 2016 (figure 27 et 28). Au mois

de Janvier 2009, d'importants travaux d'excavation d'un canal reliant la mer à la station de dessalement ont été effectués dans cette plage. En Juillet 2010, les activités se sont poursuivies et ce canal a connu une extension importante de sa largeur estimée à 111 m (figure 27b) ; les installations sont en phase avancée de développement. Après l'achèvement des stations en 2012, la plage reprend sa morphologie initiale bien que sa pente a subi un changement (figure 28c). Encore une fois, 2017 est l'année la plus marquante , l'exploitation intensive de la plage se poursuit, où de nombreuses projets ont été lancés. Ces installations occupent une superficie importante au detriment de la plage dont la largeur a été reduite à 61 m (figure 28d).

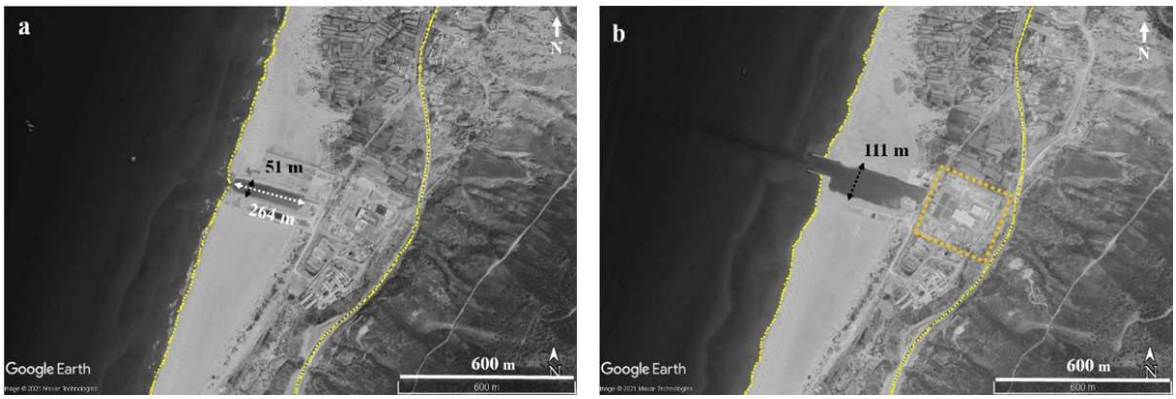


Figure 27 : ZEST de Chéliff plage : a. La plage en 2009 ; b. la plage en 2010 (*Google Earth Pro*, 2021).

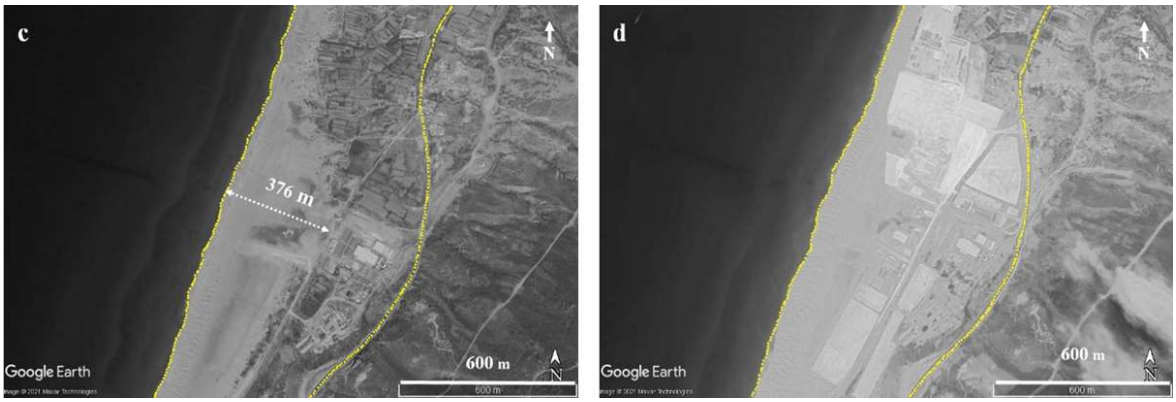


Figure 28 : Aménagement de la ZEST de Chéliff plage : c. Plage en 2012 ; d. Plage en 2017 (*Google Earth Pro*, 2021)

La déclaration de la ZEST de Kharrouba est fondée sur le décret ministériel n°88-232 du 5 Novembre 1988 portant sur la déclaration des zones d'expansion touristique. Elle occupe une superficie de 43 ha dont 18 ha sont destinés à la construction. De nombreux projets ont été lancés pour créer des structures d'hébergements de haut standing, de restauration et d'animation pour développer le tourisme balnéaire.

3.2.2. Dunes à dense végétation

A Mostaganem, le développement urbain a été la principale menace pour les systèmes dunaires au cours de la période 1990-2020. Ce système est toujours menacé et affecté par les diverses pressions anthropiques.

Les dunes stabilisées se développent entre les dunes mobiles et les fourrées littoraux (Houston, 2008 ; Hanifi *et al*., 2017 ; Valentini *et al*., 2020). En général, les dunes fixes s'étendent sur une largeur variable allant jusqu'à un kilomètre vers l'intérieur des terres (Mostari *et al.,* 2020). Elles peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres d'altitude voire cent mètres (100 m) à Kharrouba. A Cap Ivi, elles atteignent deux cents mètres (200 m) (Mostari *et al.,* 2020). Selon Zhao *et al.* (2008), plus de 60% du couvert végétal abrite les dunes fixes. Ce couvert est dense et diversifié (Martínez *et al.,* 2013). Dans une étude de classement du littoral mostaganémois comme une nouvelle Zone Importante pour les Plantes « ZIP ». Mostari *et al.* (2020) ont montré que cet écosystème est colonisé par des maquis bas de Rétam (*Retama raetam* subsp. bovei (Spach) Talavera & Gibbs). Autres espèces telles que Brassica *fruticulosa* subsp., *glaberrima*, *Erysimum semperflorens* subsp., *Elatumelle* et *Senecio pinguiculus*sont répandues à Sidi Mejdoub, Kharrouba, Chaaibia et sporadiquement présentes à Cap Ivi et Chéliff plage. Ces espèces, présentent un intérêt important de conservation sur le plan régional méditerranéen et mondial, et de ce fait elles sont déterminantes pour les ZIP. Dans la présente étude, les dunes à végétation dense ont enregistré une perte considérable entre 1987 et 2000, estimée à 24.79% soit une superficie de 313.73 ha. Un déclin de 458.01 ha est enregistré à nouveau entre 2000 et 2017 pour la même classe (figure 22a, b et c). Les dunes littorales ont pâti une forte dégradation en raison de différents aménagements favorisant le développement résidentiel et du tourisme. L'aménagement des corniches, la création des zones commerciales (balnéaires), l'aménagement du parc de loisirs appelé « Mostaland », la forte pression anthropique estivale et le piétinement des baigneurs afin d'accéder à la mer ont également contribué à la dégradation des dunes littorales. (Belgat, 1984) a souligné l'importance de cet écosystème et sa conservation. L'étude de l'impact de l'urbanisation sur les systèmes dunaires (figure 29) a montré une augmentation significative de la superficie du système urbain (7.8%) entre 1989 et 2004 (Senouci et Taibi, 2019) ; la régression des dunes est estimée dans ce cas à 60%.

La dégradation de ce système a entraîné une perte de la biodiversité en particulier des espèces endémiques de la côte mostaganémoise suite à la destruction de leur biotope et par la suite une déstabilisation du système côtier (Houston, 2008).

Durant la période 2012-2017, ces dunes ont connu un gain significatif estimé à 8%, il pourrait être un résultat de l'application des décrets de la loi littoral 02-02 du 05 février 2002.

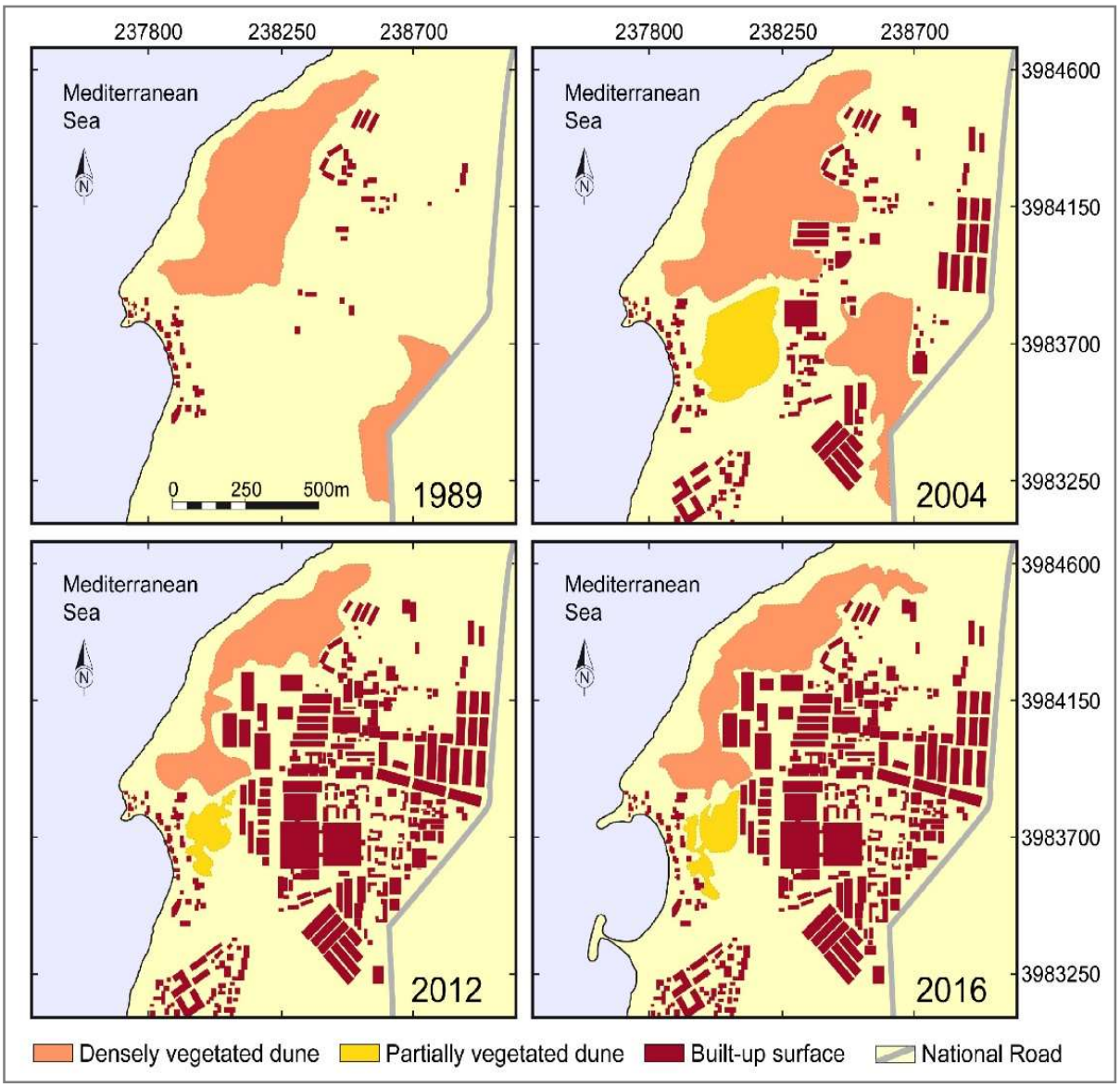


Figure 29 : Evolution du système dunaire côtier Kharrouba entre 1989-2016 (Senouci et Taibi, 2019)

3.2.3. Activité agricole

La wilaya de Mostaganem est, selon le climat, le type de sol et la production agricole, réputée pour être une région à vocation agricole dans le Nord-Ouest algérien. Elle dispose

d'une superficie de 144778 ha utiles pour l'agriculture, soit 63% de la superficie globale de Mostaganem. Trois principales activités sont exercées dans cette région : 1) l'élevage avicole, il occupe la première place à l'échelle nationale ; 2) la production des maraichères couvre 29% de la production régionale et 5.9% de la production nationale ; 3) la viticulture et l'arboriculture représentent 1/4 de la production régionale. Quant à la production des céréales, elle reste limitée en la comparant avec celle des wilayas limitrophes. Plusieurs facteurs ont favorisé la production agricole à Mostaganem notamment l'importance des plaines de cette wilaya, la vallée de Chéliff et le plateau de Mostaganem. Ce dernier occupe une superficie de 56000 ha dont la nature pédologique est favorable pour la production agricole. Le plateau de Mostaganem dispose d'un aquifère important dont l'apport annuel est de 26 milliards de m^3. La présence des agglomérations rurales favorise fortement le développement de l'agriculture. Dans notre zone d'étude, le cordon littoral présente une superficie importante estimée à 31.83% (ANAT, 2005). En dépit que la nature sableuse de ce cordon dunaire ne favorise pas l'agriculture, selon les observations sur terrain, le Plan d'Aménagement Côtier (PAC) de Mostaganem et les cartes d'occupation du sol, quelques sites sont occupés par de petites parcelles agricoles. À Mostaganem, cette activité n'est pratiquée que par 300 personnes. (ANAT, 2006 ; Trache et Senouci, 2014 ; Baiche *et al.,* 2015 ; Megherbi, 2015 ; DPSB, 2017 ; Mostari *et al.,* 2020). En analysant les cartes d'occupation du sol du littoral de Mostaganem, les classes de grandes cultures et maraichères ont marqué des changements considérables durant les années 1987 et 2017. Les calculs réalisés à l'aide du logiciel *ArcMap* 10.5.1 ont montré que la classe de grandes cultures a connu une légère croissance de 1.96% soit 196.58 ha en 1987 et 29783 ha en 2000. Jusqu' en 2017, la superficie de cette classe a connu une évolution positive considérable estimée à 3.4% soit 473.50 ha. Cette évolution est interprétée par les décisions de privatisation des terres agricoles avec la création des Exploitations Agricoles Collectives (EAC) et Individuelles (EAI) au profit de la Direction des Services Agricoles (DSA) (Megherbi, 2015). Selon les statistiques mises à disposition par la DSA, le pourcentage des terres exploitées par le secteur privé dépasse 28%. Quant au secteur public, le pourcentage des terres exploitées est de 7.18% (Tab.3).

Tab.3 : Nature juridique des terres exploitées (PDAU, 2006)

Secteur	Superficie (ha)	Superficie exploitée (ha)
Public	59 487	4 268
Privé	72 781	20 536
Superficie globale	132 268	24 804

L'arrachage des vignobles et la réhabilitation des terrains en terres agricoles peuvent interpréter la croissance de la superficie de cette classe. Les maraichères ont subi également une importante diminution de l'ordre 92.97% durant ces 30 ans ; soient 334**.**82 ha en 1987 et 23.53 ha en l'an 2000. Selon les cartes de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem, la classe représentant les maraichères a été transformée principalement en tissu urbain notamment dans la ZEST de Benabdelmalek Ramdane. Des parcelles de maraichères localisées autour de la route nationale (RN11) à Kharrouba n'ont pas été épargné de l'urbanisation. En 2017, la superficie des maraichères a marqué une légère augmentation estimée à 1.24%. Ce changement pourrait être l'une des décisions prises par le gouvernement local de Mostaganem et même changement de type d'activité agricole par les paysans (Boualem, 2009).

3.2.4. Zones à dense végétation

Le domaine forestier occupe une superficie importante dans le littoral de Mostaganem. Dans notre zone d'étude, il ne constitue que 1/5 de la surface cartographiée. Les zones présentant une dense végétation se situent principalement sur la côte de Benabdelmalek Ramadane. Cette commune est moins urbanisée que la commune de Mostaganem. La forêt de Bourahma, couvrant plus de 500 ha, fait partie du littoral de Benabdelmalek Ramadane. Les forêts de Djebel Diss et de Kharrouba occupent une surface moins importante. Au cours des dernières 30 ans, le système forestier de la commune de Mostaganem a connu des changements considérables ; les forêts ont accusé un déclin d'environ 1.3% soit 1053.21 ha en 1987 et 986.49 ha en 2000. D'après l'analyse des cartes d'occupation du sol de 1987 et 2000 (figure 22a et 22b), certaines surfaces forestières ont été substituées par des constructions d'habitations. Durant la période 2000-2017, le domaine forestier a enregistré un gain de 661.69 ha soit 12.8%. Megherbi (2015), qui évoque les changements de l'occupation du sol dans la wilaya de Mostaganem entre 1987et 2011, estime un taux d'évolution du domaine forestier à 4.99% ; le gain en surface du domaine forestier est dû à la politique de reboisement qui a été appliquée par la conservation des forêts

afin de renforcer la lutte contre le phénomène d'ensablement. Dans ce contexte, le taux de boisement a atteint 14.15% (DPSB, 2017). Selon Magherbi (2015), la pluviométrie qui a atteint un maximum de 373 mm au mois de février 2011, peut avoir contribué à une augmentation de la superficie du domaine forestier.

3.2.5. Développement du tissu urbain

3.2.5.1. Historique du développement des noyaux urbains à Mostaganem

Avant l'indépendance, Mostaganem se caractérise par la présence d'un noyau urbain important localisé au chef-lieu de la Wilaya. Les autres sites urbains ne représentent que des villages ou de petites agglomérations qui expérimentent avec le temps une remarquable évolution (figure 30). La ville précoloniale se localise autour de l'Oued de Ain Safra qui traverse trois quartiers populaires antiques : Tijdditt, El Darb-Tebbana et El Mattmare. L'Oued de Ain Safra constituait une ressource pour l'irrigation des jardins appartenant aux habitants locaux. Durant la période coloniale 1833-1855, le noyau urbain est de type militaire. À cette époque, la ville de Mostaganem connait le lancement de nombreux projets tels que la construction de l'hôpital militaire, la Place d'Armes et de nombreuses habitations. Au fur et à mesure que la ville prend forme, plusieurs quartiers, tels que La marine, La pépinière, Beymouth et Saint-Jules apparaissent autour du centre urbain colonial.

Durant la période coloniale, Mostaganem est devenue l'un des pôles de la production de la vigne dans l'Ouest algérien, ce qui favorise l'extension de la ville. La période 1910-1959 connait l'édification de nouveaux quartiers notamment Mon Plaisir à l'Est, La Salamandre au Nord-Ouest et leurs jonctions aux anciens quartiers : Beymouth, Saint-Jules et Raisin-ville. En 1958, vers la fin de la guerre d'Algérie, la France lance le plan de Constantine consistant en la construction de nombreux logements de type HLM (Habitations à Loyer Modéré) et leur financement. Les HLM sont réalisés près des quartiers Raisin ville, Beymouth et à l'extrémité Sud Est de la ville afin de loger les habitants issus de l'exode rurale. Ces différents projets de construction ont donné la configuration spatiale de Mostaganem après l'indépendance. A cette époque, l'urbanisation s'est faite à un très lent rythme. Dès les années 70, de nombreux projets ont été lancés (Péchoux, 1975 ; Yamani et Trache, 2020 ; Yamani et Brahimi, 2009 ; Chachou, 2019).

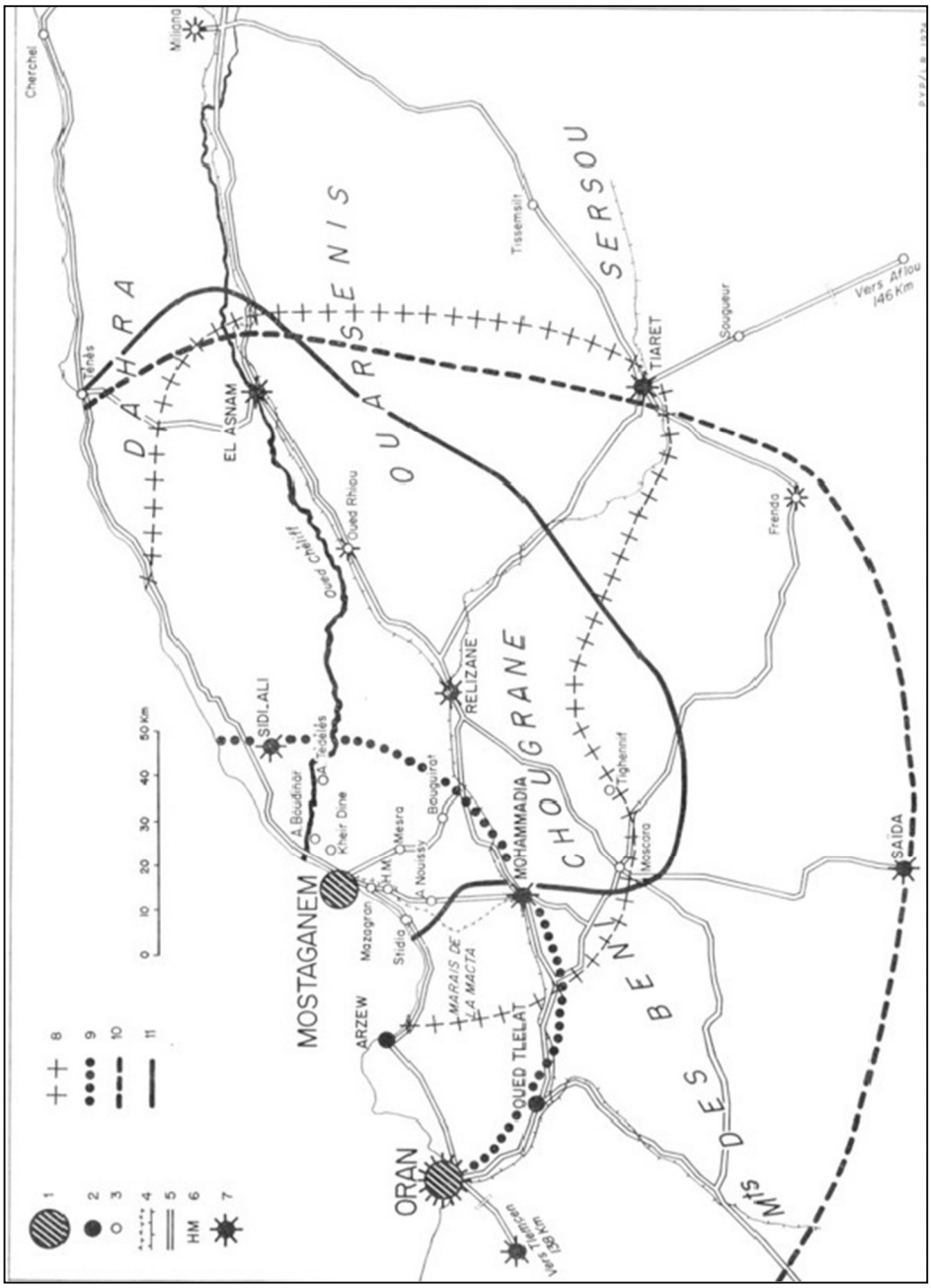


Figure 30 : Principaux sites et réseaux routiers de Mostaganem durant la période coloniale (Péchoux, 1975).

1.Grandes villes - 2. Ville moyenne – 3. Village, bourgades ou petites – 4. Voies et Ferries – 5. Routes principales – 6. Hassi-Mamèche – 7. Centre urbain entretenant des relations commerciales régulières avec Mostaganem par le biais d'institutions spécialisées – 8. Rayon du centre de cumulation téléphonique de Mostaganem – 9. Relations par autobus – 10. Isochrone de 3 heures – 11. De nombreuses communes de cette zone comptent 350 de leurs

3.2.5.2. Evolution de l'urbanisation durant la période 1975 et 1986

Depuis l'adoption du Plan d'Aménagement Urbain (PUD) au cours de la période 1975 et 1986. 815 ha ont été alloués au développement socioéconomique : 410 ha pour l'activité agricole et 405 ha localisés sur les plaines littorales Sud-Est autour de la route nationale (RN11), pour l'urbanisation (Yamani et Trache, 2020). En théorie, ce plan a été conçu pour protéger les terrains à vocation agricole localisés à la limite Est de la ville. En dépit de cela, deux zones urbaines ont été réalisées. La première comptant une superficie de 15 ha, elle se situe près du quartier Tijdidt ; la deuxième a substitué 74 ha de terres agricoles

au niveau de la vallée des jardins. Des orangeries ont également expérimenté une forte urbanisation où la cité 05 juillet a été réalisée sur ces terrains. Lors de l'inauguration de cette cité par le l'ancien et le défunt président Chadli Benjdid (Yamani et Trache, 2020), ce dernier a dit « il serait mieux de nommer cette cité par « cité Hram Alaikom » en montrant la forte exploitation des orangeries. Seulement 11 ha de ces terres ont été épargnés. (Yamani et Trache, 2020).

3.2.5.3. Evolution de la surface bâtie durant la période 1987-2017.

Les études sur l'évolution du système urbain se poursuivent. Dans ce projet de thèse, nous mettons l'accent sur l'évolution de la surface bâtie au cours de la période 1987- 2017. L'analyse visuelle des cartes d'occupation du sol permet d'appréhender la dynamique urbaine des agglomérations. Selon nos premières analyses, notre zone d'étude a enregistré un changement spectaculaire au cours de 30 ans (figure 22 a, b et c). En 1987, la surface bâtie couvre une superficie de 1044.82 ha soit un taux de 20.21% de la superficie globale de la zone d'étude. Cette surface est répartie inégalement et se localise principalement dans le littoral Ouest du « Chef-lieu » (figure 22a). Le littoral des communes de Benabdelmalek Ramadane et Sayada connait la répartition de quelques sites de construction. L'an 2000 marque l'extension des constructions de direction Nord-Est et Est de la ville initiale vers Kharrouba et Sayada. Quelques agglomérations rurales sont apparues près de l'Oued Chéliff et à Sonactère. Jusqu'à cet an, la surface bâtie a atteint 1148.27 ha soit un taux de croissance de 9.9%. Selon Yamani et Trache (2020), de nombreux projets ont été lancés dans le cadre de l'extension urbaine au niveau de Kharrouba, Salamandre et Sayada. Les projets en cours de réalisations sont représentés par une nouvelle classe nommée sites de construction. Cette classe occupe une superficie de 355.10 ha soit un taux de 6.87%. Selon la figure 22b et selon nos prospections de terrains, ces projets consistent en la réalisation de logements sur des terrains principalement sableux. Salamandre, située à l'Ouest du centre urbain de Mostaganem, n'est pas non plus épargnée étant donné que de nouveaux projets de construction ont été lancés. Globalement, notre zone d'étude montre que la surface bâtie couvre 29.08%. Selon Yamani et Trache (2020), la majorité des terrains publics sont urbanisés ou en cours de l'être ; seuls les terrains privés sont restés libres. Durant la période 1987-2000, le littoral de Mostaganem a subi une forte transformation du fait que la protection de la côte ne semble pas être une priorité pour les autorités locales. La période 2000-2017 est marquée par une forte littoralisation (Ghodbani, 2016). De ce fait, la révision du PDAU

s'est avérée nécessaire en 2006 ; cet instrument concerne trois communes, à savoir Mostaganem, Mazagran et Sayada (ANAT, 2006). L'application du PDAU était l'occasion pour le mettre en conformité avec les textes règlementaires de la convention des Nations Unies sur le droit de la mer (décret présidentiel n° 96-53 du 22 janvier 1996) et la loi relative à la protection et valorisation du littoral (Loi 02-02). De nombreux projets ont été réalisés sur des terrains dont le PDAU n'a pas tenu compte à un moment où la concurrence était acharnée entre les différents walis afin de concrétiser les programmes projetés. Selon Yamani et Trache (2020), le PDAU n'a apporté aucune nouveauté quant à la gestion du tissu urbain à Mostaganem. En 2007 et 2008, Kharrouba et Salamandre ont bénéficié d'un plan d'occupation du sol (POS). De nombreux logements collectifs ont été réalisés sans tenir compte du POS. Durant la période 2000-2017, il a été constaté que de nombreux sites à fort potentiel écologique et à faible résilience ont subi une forte urbanisation tels que : Kharrouba, Sonactère, Cap Ivi (figure 31).

Figure 31 : Exploitation du milieu naturel côtier (a. Kharrouba (Photographie : N. TAIBI2019), b. Plage Chéliff (Photographie : SENOUCI2018)

Le tissu urbain a connu une extension importante, de l'ordre de 53.13% correspondant à une superficie de 1758.39 ha. La classe des sites de construction a également vu une évolution considérable, estimée à 31.24% soit une superficie de 446.06 ha. Cette classe montre que le processus d'urbanisation dans la zone littorale se poursuit sans aucune considération de son impact sur le milieu naturel.

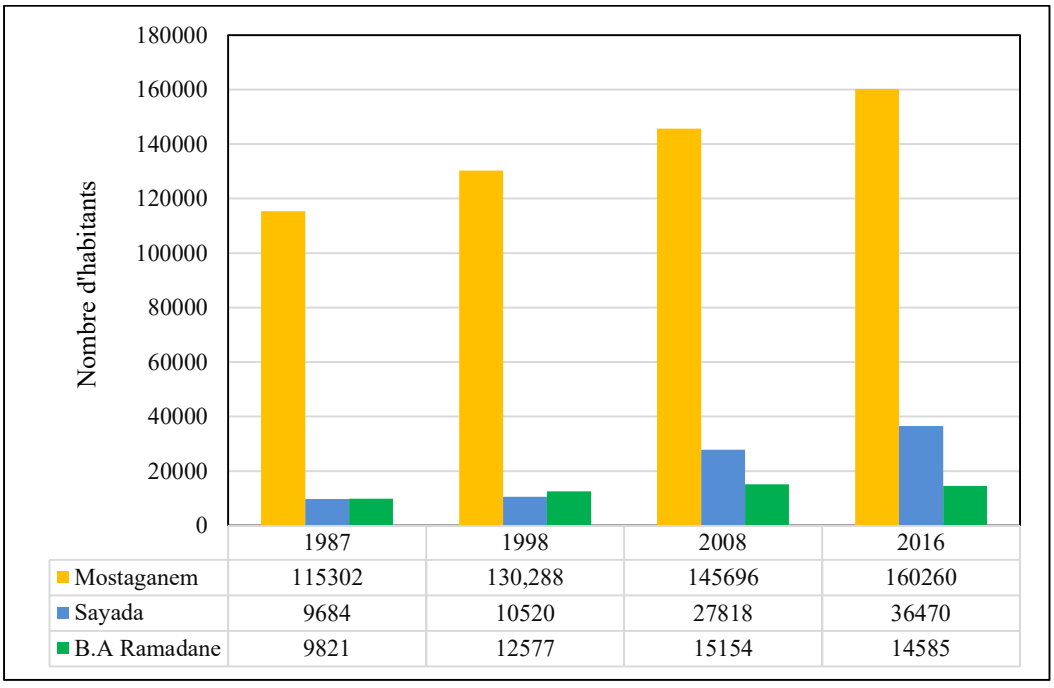
3.2.6. Oued Cheliff

Le réseau hydrographique de Mostaganem est constitué d'oued, rivière et affluents. Notre site d'étude est traversé par l'Oued Cheliff, long de 725 km est l'un des plus importants fleuves du Nord algérien. Le point de départ de cet Oued se trouve dans l'Atlas Saharien.

L'Oued Chéliff sépare notre site d'étude en deux parties, une occupée principalement par un couvert végétal dense à l'Est et l'autre, se trouvant à l'Ouest, marquée par une forte urbanisation. La surface de cet Oued a augmenté de 64% entre 1987 et 2017 probablement à cause de l'augmentation de son volume d'eau.

3. 3. Impact de la croissance démographique sur les changements de l'occupation du sol

L'analyse globale montre que le tissu urbain de la zone littorale s'est développé principalement dans la commune de Mostaganem en particulier dans le Chef-lieu. Par contre, les communes de Benabdelmalek Ramadane et Sayada montrent une urbanisation modérée. Avec le développement urbain, une croissance démographique galopante issue de l'exode rurale et des flux migratoires a eu lieu. La croissance démographique était la force motrice du changement du paysage côtier (Mhawish et Saba, 2016). Le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) effectué par l'Office National des Statistiques (ONS) en 1987 met en évidence une faible occupation du littoral de Mostaganem (figure 32). À partir de l'année 1998, cette Wilaya a connu une croissance démographique d'environ 13%. Les communes de Benabdelmalek Ramadane et Sayada marquent une croissance considérable de leurs populations, estimée respectivement à 28.06% et 8.65%. La croissance de la population est l'une des raisons du changement rapide de l'occupation du sol.



	1987	1998	2008	2016
Mostaganem	115302	130,288	145696	160260
Sayada	9684	10520	27818	36470
B.A Ramadane	9821	12577	15154	14585

Figure 32 : Croissance démographique durant la période 1987-2016

Conclusion

La croissance démographique et le besoin du développement économique ont provoqué des changements morphologiques spectaculaires dans le littoral de Mostaganem. La comparaison des cartes d'occupation du sol a révélé une forte augmentation de la superficie du tissu urbain. Durant la période 1987-2017, cette classe a enregistré un accroissement estimé à 68.29%. La classe « plage, dunes et plaines formées de sable » et la classe « dunes à dense végétation » ont également changé d'une manière significative. Le taux de perte de ces classes est estimé à 83.64% et 60.97% respectivement. Les autres classes : grandes cultures, maraichères, zones à dense végétation, cours d'eau et sites de construction ont subi des variations moins significatives.

Cette étude met en exergue que les milieux côtiers sableux ont subi une forte urbanisation durant la période 1987-2017 en raison des activités humaines. Les nouveaux projets auraient pu être réalisés tout en respectant la Loi du Littoral (02-02) relative à la protection et à la valorisation du littoral.

Chapitre 4

Analyse spatiale et cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

Introduction

Les glissements de terrain sont des phénomènes d'origine naturelle ou anthropique. Ils constituent un obstacle de développement en raison des pertes économiques qu'ils engendrent (Saadatkhah *et al.,* 2014 ; Mahalingam *et al.,* 2016 ; Shanmugam et Wang, 2015 ; Chen *et al.,* 2017). La prévention du risque de glissement est devenue une nécessité primordiale dans la gestion et l'aménagement de territoire. La cartographie de la susceptibilité et/ou l'aléa de glissement est un outil performant pour la gestion du risque de glissement (Guzzetti *et al.,* 1999, Hadmoko *et al.,* 2010 ; Hadji *et al.,* 2018). Le présent chapitre se centre sur l'étude de la susceptibilité au glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem.

4.1. Glissements de terrain en Algérie

Selon la littérature, les études de glissements de terrain sont principalement limitées à la région Est d'Algérie. Cette partie est plus exposée au risque de glissement de terrain que d'autres régions du pays. Historiquement, de nombreux événements importants ont été enregistrés, par exemple dans la ville de Constantine, le pont emblématique a subi en 1935 un dommage considérable causé par un glissement de terrain. La commune de Belouizdad-Kitouni a également connu de nombreux glissements de terrain (Machane *et al.,* 2008). En fait, ce phénomène s'est accentué à Constantine en raison de la croissance chaotique de la ville. La région de Ain Hamam (Michelet), ville située dans la région de Tizi-Ouzou, au Centre-Est de l'Algérie, est une zone instable s'étalant sur 23 hectares ; elle présente une activité intense de glissement de terrain en raison des hivers rigoureux et de l'activité sismique (Bourenane *et al.,* 2014 ; Achour *et al.,* 2017 ; Manchar *et al.,* 2018 ; Djerbal, 2013 ; Hadji *et al.*, 2018). Quant à la région Ouest du pays, les études sur les glissements du terrain sont sporadiques. Roukh et Abdelmansour (2018) ont évalué la susceptibilité aux glissement de terrain à Oran, dans l'Ouest algérien. En général, les études concernant les glissements de terrain des falaises ou des dunes consolidées du domaine littoral algérien sont exceptionnelles.

4.2. Méthodologie

Ce travail a été initié par la collecte de données provenant de différents rapports et celles de la localisation des évènements de glissement sont collectées en utilisant le Système Global de Navigation par Satellite (GNSS) afin d'élaborer l'inventaire des glissements de terrain. Ensuite, les différents paramètres contrôlant les glissements de terrain ont été extraits en

utilisant le logiciel *ArcGIS* 10.5.1. Ces facteurs ont été standardisés à une résolution spatiale de 30 m. En se basant sur la connaissance des experts, la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) combinée avec la méthode de superposition pondérée (WOM) sont suivies pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem. Afin de comparer les deux cartes produites, une fonction de linéaire de la logique des floues (LF) a été appliquée. Au final, la qualité des cartes produites a été vérifiée (figure 33).

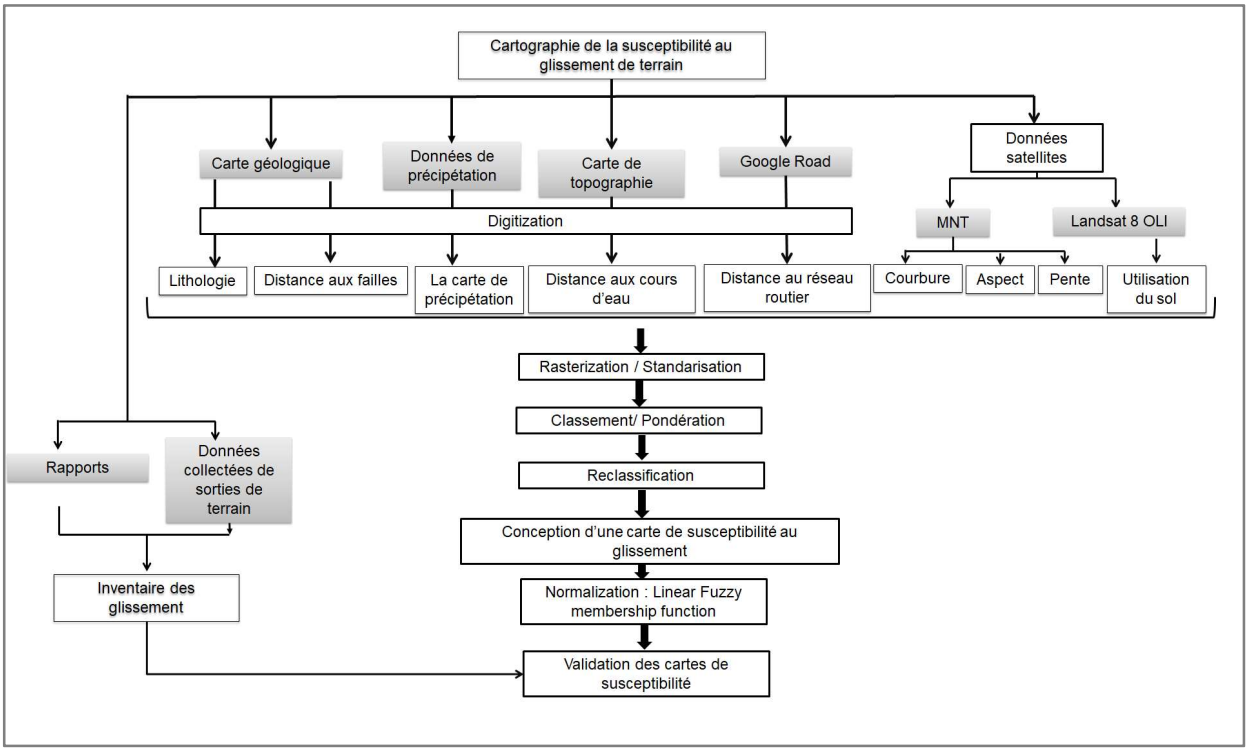


Figure 33 : Méthodologie de travail appliquée pour la zone d'étude

4.2.1. Conception de l'inventaire du glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem

La carte d'inventaire des glissements de terrain est la clé pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain (Del Ventisette *et al.,* 2014). Cette carte peut être utilisée d'une part pour prévenir les événements susceptibles à se produire dans les zones instables et d'autre part, la comparer avec la carte de susceptibilité aux glissements de terrain modélisée (Galli *et al.,* 2008 ; Pardeshi et *al.,* 2013 ; Guzzetti *et al.,* 2005 ; van Westen *et al.,* 2005 ; Guri *et al.,* 2015). La carte d'inventaire des glissements de terrain peut être produite à une échelle locale, régionale et nationale ; sa conception dépend essentiellement de la superficie de la zone d'étude (Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Bourenane *et al.,* 2016 ; Cardinali *et al.,* 2002 ; Igwe, 2015). Dans notre

zone d'étude, 17 cas d'événements de glissement de terrain ont été identifiés au cours de la période 2017-2019 (figure 34).

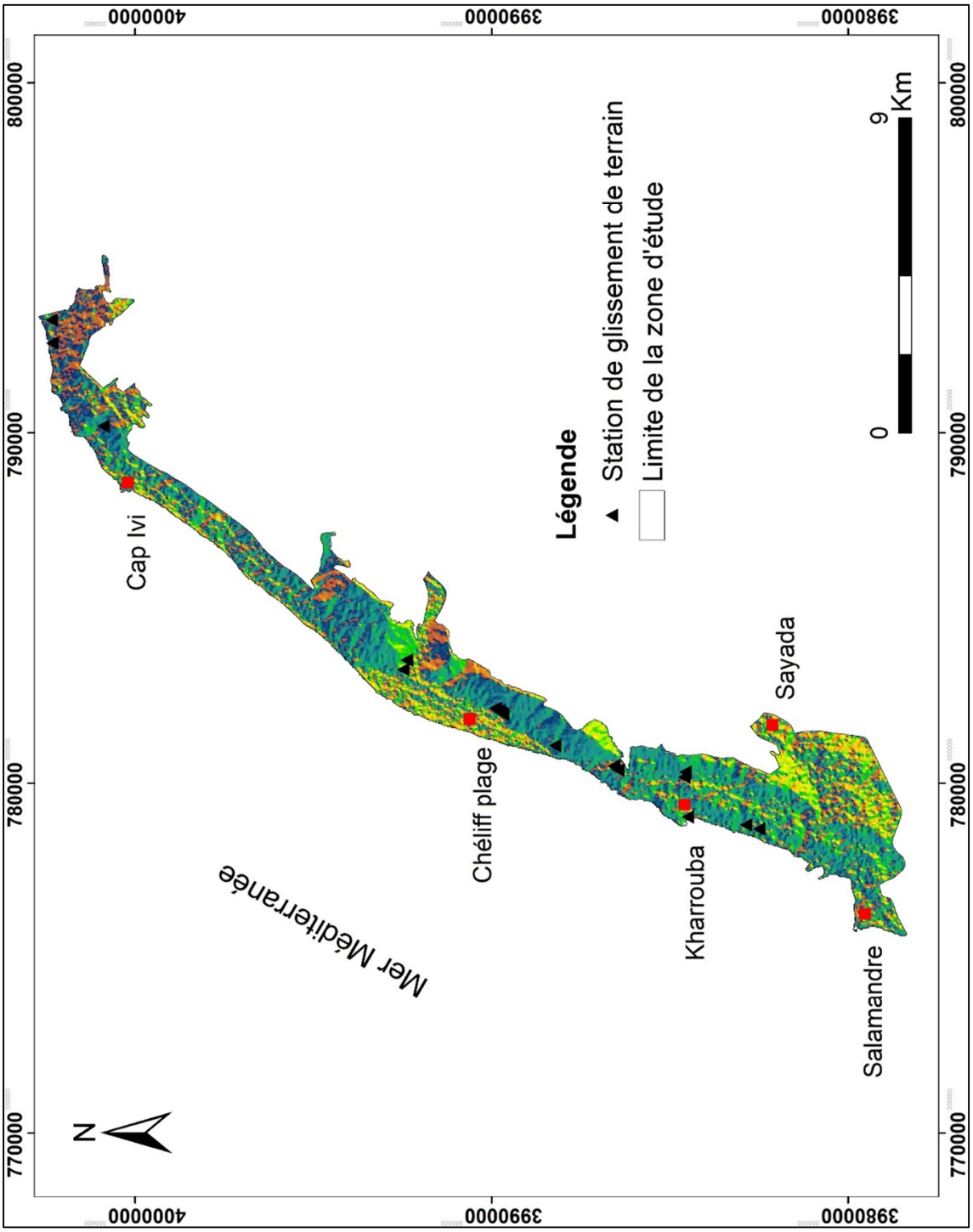


Figure 34 : Carte d'inventaire des glissements de terrain (littoral de Mostaganem)

La compilation de la carte d'inventaire des glissements de terrain a été réalisée à travers une série d'entretiens avec le corps administratif du Commissariat National du Littoral (CNL) et de la Direction des Travaux Publics (DTP) de la wilaya de Mostaganem. L'utilisation de *Google Earth Pro*, les rapports publiés par le Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM/Alger)

(LEM, 2012) nous a permis de compléter nos données. Par ailleurs, le travail de terrain entrepris entre 2017 et 2019 (trois ans) a contribué à la validation des données collectées et à la localisation des évènements de glissements. En se basant sur l'analyse de l'ensemble des données acquises, différents glissements de terrain produits récemment dans la zone d'étude, ont été mis en évidence. Les cas enregistrés sont principalement peu profonds correspondant à des glissements superficiels (igure 35). Ils se sont produits dans des terrains à des profondeurs allant de quelques décimètres à quelques mètres. Ces glissements ont eu lieu principalement à proximité de la zone urbaine notamment près du réseau routier construit sur le système de dunes consolidées, une unité géomorphologique présentant une forte vulnérabilité aux risques côtiers.

Figure 35 : Glissements de terrain et affaissements dans le littoral de Mostaganem (a. Falaise de Sidi El Mejdoub ; b. Parking du Site V de l'Université de Mostaganem ; c. Route à Hai Salam ; d. Route Nationale RN11 (Sonactère)

4.2.2. Description des paramètres contrôlant l'occurrence des glissements

Lithologie

Dans les travaux d'analyse de la susceptibilité au glissement, la lithologie est considérée comme un facteur primordial dans l'occurrence des glissements de terrain (Pradhan et Lee,

2010 ; Dahoua *et al.*, 2017; Kouli *et al.,* 2009; Awawdeh *et al.,* 2018). Dans notre travail, la lithologie a été extraite de la carte géologique de Bosquet Mostaganem avec une échelle de 1/ 200 000. Notre zone d'étude est divisée en 10 classes (figure 36). Les terrains de type sédimentaire occupent la majeure partie de littoral de Mostaganem.

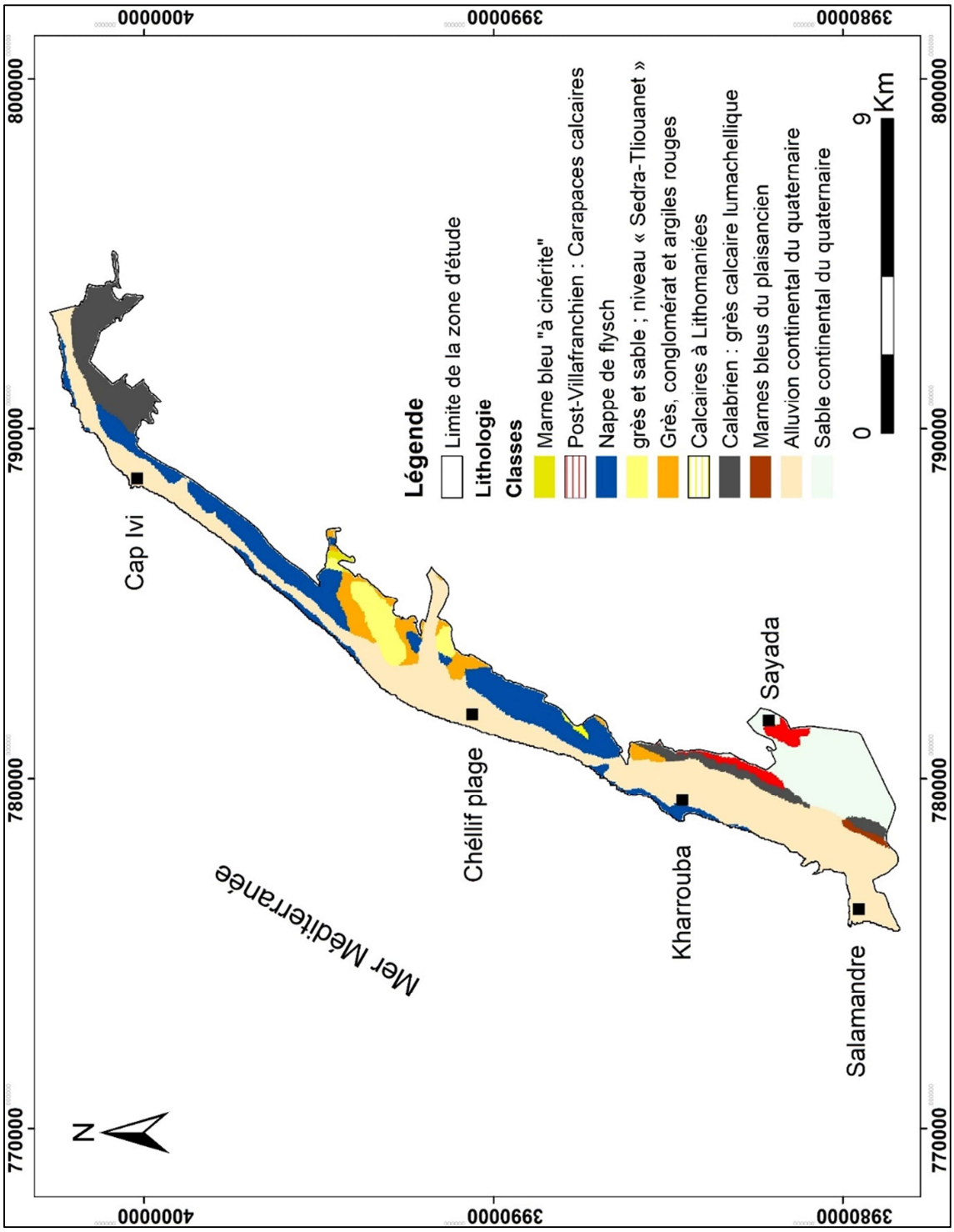


Figure 36 : Carte de la lithologie du littoral de Mostaganem

Pente

La pente est considérée l'un des paramètres les plus importants pour la rupture du terrain. Pour notre cas, en utilisant l'outil spatial « slope » du logiciel *ArcGIS 10.5.1*, elle a été dérivée du SRTM DEM (*Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model*) avec une résolution de 30 m. Elle a été reclassée en 5 classes (figure 37). La probabilité d'un glissement de terrain augmente lorsque la pente est plus abrupte que lorsqu'elle est douce (Pham *et al.,* 2016).

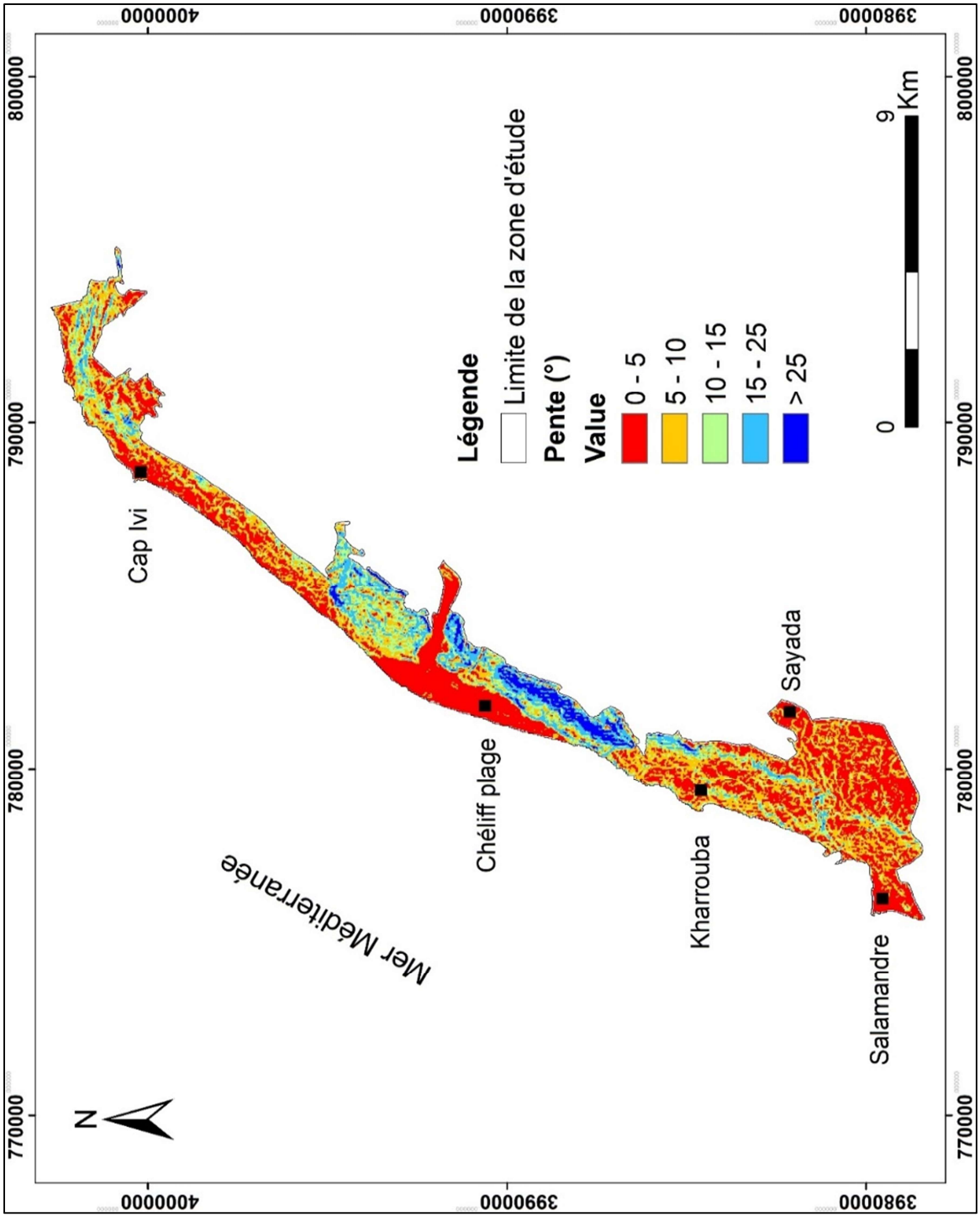


Figure 37 : Carte de la pente du littoral de Mostaganem

Occupation du sol

L'occupation du sol est l'un des facteurs clés qui influencent la stabilité des pentes (Gokceoglu, 2002 ; Glade, 2003). La distribution non organisée des constructions sur des dunes consolidées et les sites abrupts peut augmenter l'occurrence des glissements de terrain (Hong *et al.,* 2016 ; Perera *et al.,* 2018). Le couvert végétal joue également un rôle primordial dans la réduction des événements de glissement de terrain par sa structure racinaire en ajoutant de la stabilité au sol et en assurant sa solidité, et donc en atténuant l'effet érosif des agents hydrologiques (Choi *et al.,* 2012 ; Saha *et al.,*2010). Dans ce travail, l'évaluation de l'impact des différents modes d'occupation du sol sur l'occurrence des glissements de terrain a été réalisée en traitant une image satellite de *Landsat-8 Operational Land Imager* (OLI) (acquise en octobre 2017). De plus, une classification supervisée avec l'algorithme de *Maximum likelihood* (ML) a été appliqué sur l'image satellite en utilisant le logiciel *ENVI* 4.8 (Teodoro *et al.,* 2011). Le site étudié a été divisé en 8 classes : « plage, dunes et plaines formées de sables », « dunes à dense végétation », « grandes cultures », « maraichères », « zones à dense végétation », « surface bâtie », « sites de construction », « Oued Chéliff » (figure 38). La carte produite a été évaluée à l'aide de la matrice de confusion. Elle a montré une précision globale de 79.33 %.

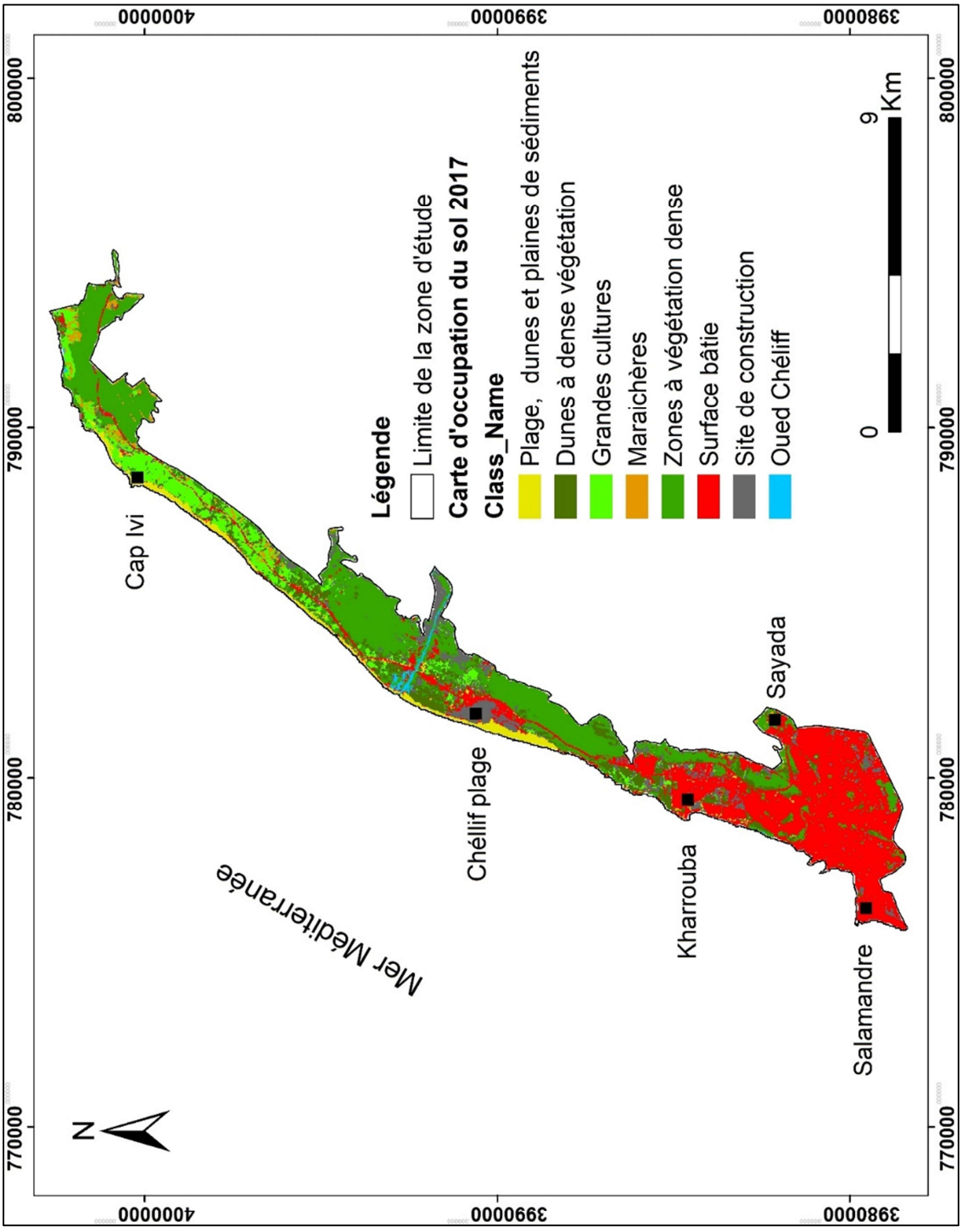


Figure 38 : Carte de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem

Exposition

La connaissance de l'exposition d'un terrain est cruciale dans les travaux d'étude des glissements de terrain. Elle a une action indirecte sur l'instabilité de la pente. L'exposition est liée principalement aux agents climatiques tels que les précipitations, la surface de ruissellement, l'exposition au soleil et le vent sec qui influencent ensuite l'humidité du sol et la végétation, et par conséquent l'occurrence des glissements de terrain (Saha et *al.,* 2010 ;

Kayastha *et al.,* 2013 ; Roşian *et al.,* 2016 ; Sifa *et al.,* 2019). Dans ce travail, ce paramètre a été dérivé du Modèle Numérique de Terrain (MNT SRTM) avec une résolution de 30 m, il est divisé en 5 classes : Plat, Nord, Est, Sud et Ouest (figure 39).

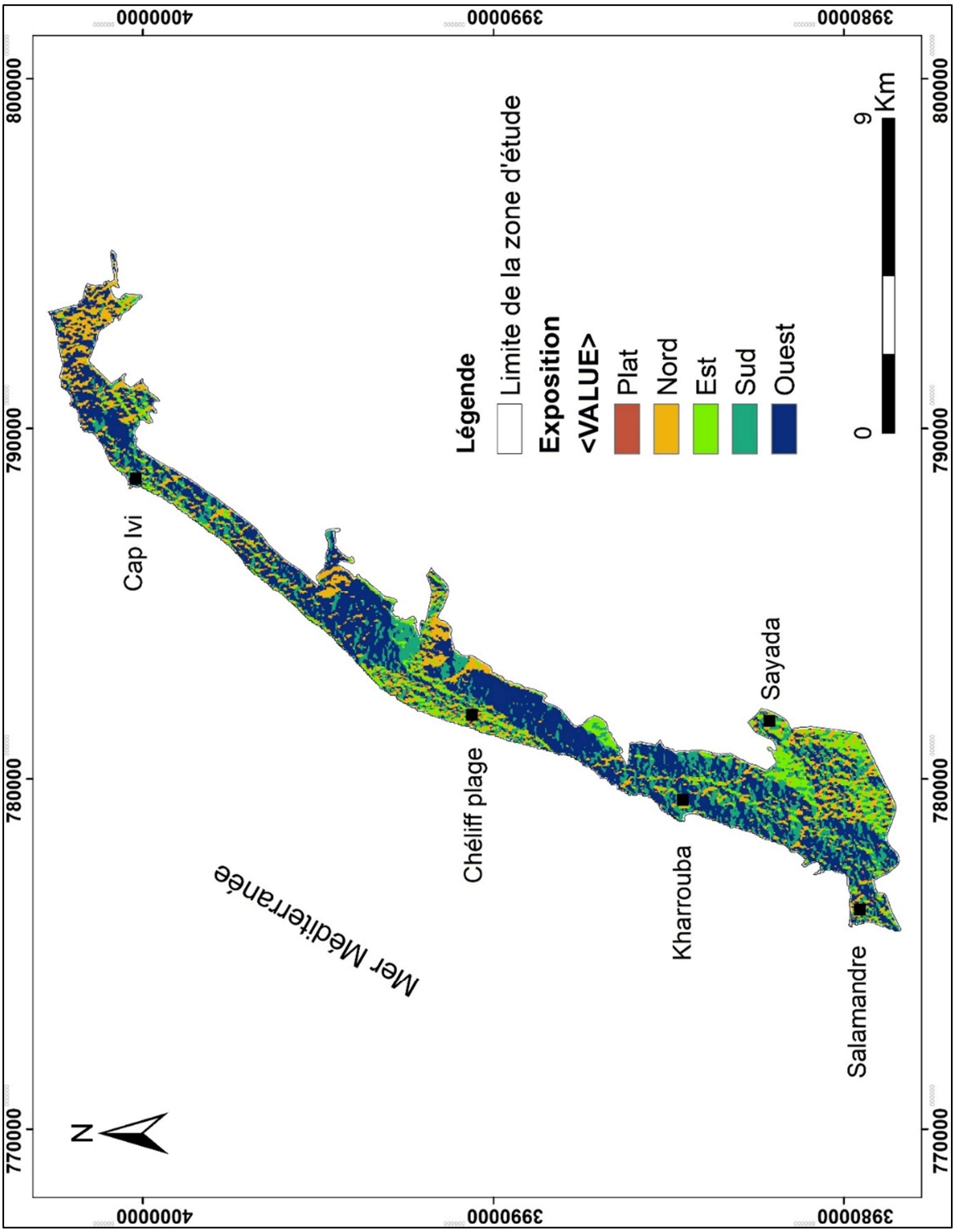


Figure 39 : Carte d'exposition du littoral de Mostaganem

Plan de courbure

Le plan de courbure est défini comme le taux de changement de l'angle ou de l'aspect de la pente (Wilson et Gallant, 2000 ; Zhu *et al.,* 2014). Il peut prendre 3 formes de pente : plate,

convexe et concave. Les valeurs positives de la courbure du plan correspondent à une forme convexe de la pente. A l'inverse, des valeurs négatives signifient que la pente est concave. Ce facteur a une influence importante sur la surface de ruissellement. En général, les surfaces convexes dispersent les eaux de ruissellement d'une manière égale, et par conséquent, elles n'affectent pas la stabilité de la pente. Cependant, les surfaces concaves contribuent à l'accumulation d'eau dans sa partie avale. Cela entraîne l'apparition de glissements de terrain. Dans cette étude, le plan de courbure a été dérivé du Modèle Numérique de Terrain MNT SRTM en utilisant les outil spatial *Curvature* d'un environnement SIG (figure 40).

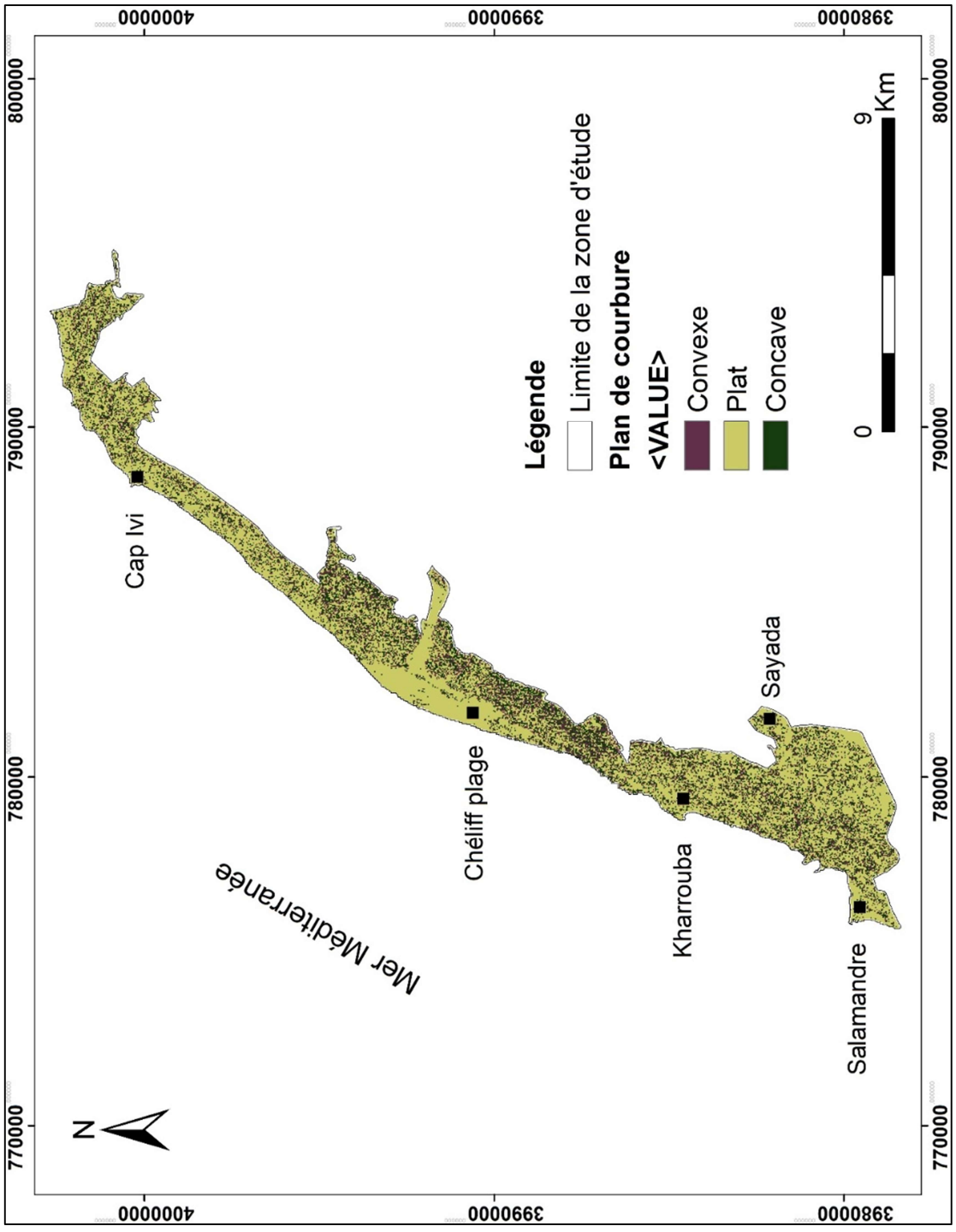


Figure 40 : Carte de plan de courbure du littoral de Mostaganem

Précipitations

La pluie est l'un des facteurs les plus importants dans le déclenchement des glissements de terrain (Bălteanu *et al.,* 2010 ; Anis *et al.,* 2019). L'infiltration des eaux de pluie augmente l'humidité du sol et par la suite une diminution de la résistance au cisaillement et de la cohésion du sol ce qui induit son instabilité (Bourenane *et al.,* 2016 ; Anis *et al.,* 2019 ; Mousavi *et al.,* 2011). L'Est de l'Algérie étant plus pluvieux que l'Ouest. Dans la wilaya de Mostaganem, les fortes précipitations sont enregistrées principalement au mois décembre et janvier (Baiche *et al.,* 2015). Dans la présente étude, nous avons dérivé ce paramètre en numérisant la carte pluviométrique de l'Algérie (1/200 000) et en la divisant en 2 classes (350-400 mm et 400-450 mm ; figure 41). Pour les deux approches suivies, le rang (le classement) et le poids de ce paramètre ont été attribués sur la base de connaissances d'experts.

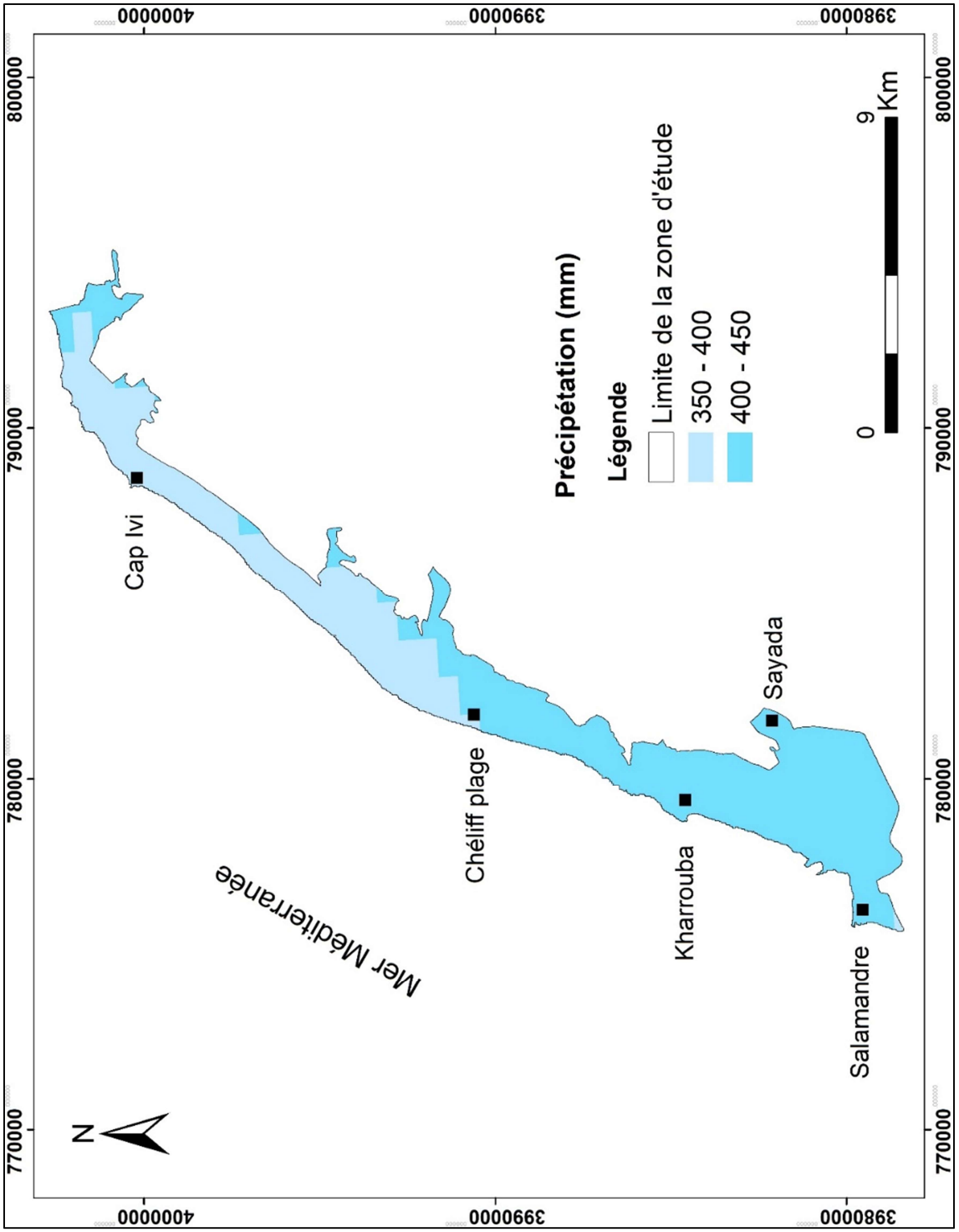


Figure 41 : Carte des précipitations du littoral de Mostaganem

Distance aux cours d'eau

Le plateau de Mostaganem possède un aquifère terrestre important (Saibi, 2010 ; Baiche *et al.,* 2015). Cette ressource pourrait indiquer la forte densité de cours d'eau dans la région. La distance au cours d'eau joue un rôle crucial dans les phénomènes de glissement de terrain. Elle

peut affecter la stabilité de la pente où les cours d'eau saturent la partie inférieure du sol en augmentant le niveau d'eau (Pourghasemi *et al.,* 2012 ; Chen et Huang, 2013). Sur le plan méthodologique, les cours d'eau ont été numérisés à partir d'une carte topographique (1/25 000). De plus, un tampon multi-anneaux a été créé à l'aide d'outils SIG et divisé en 5 classes avec un intervalle de 50 m (figure 42).

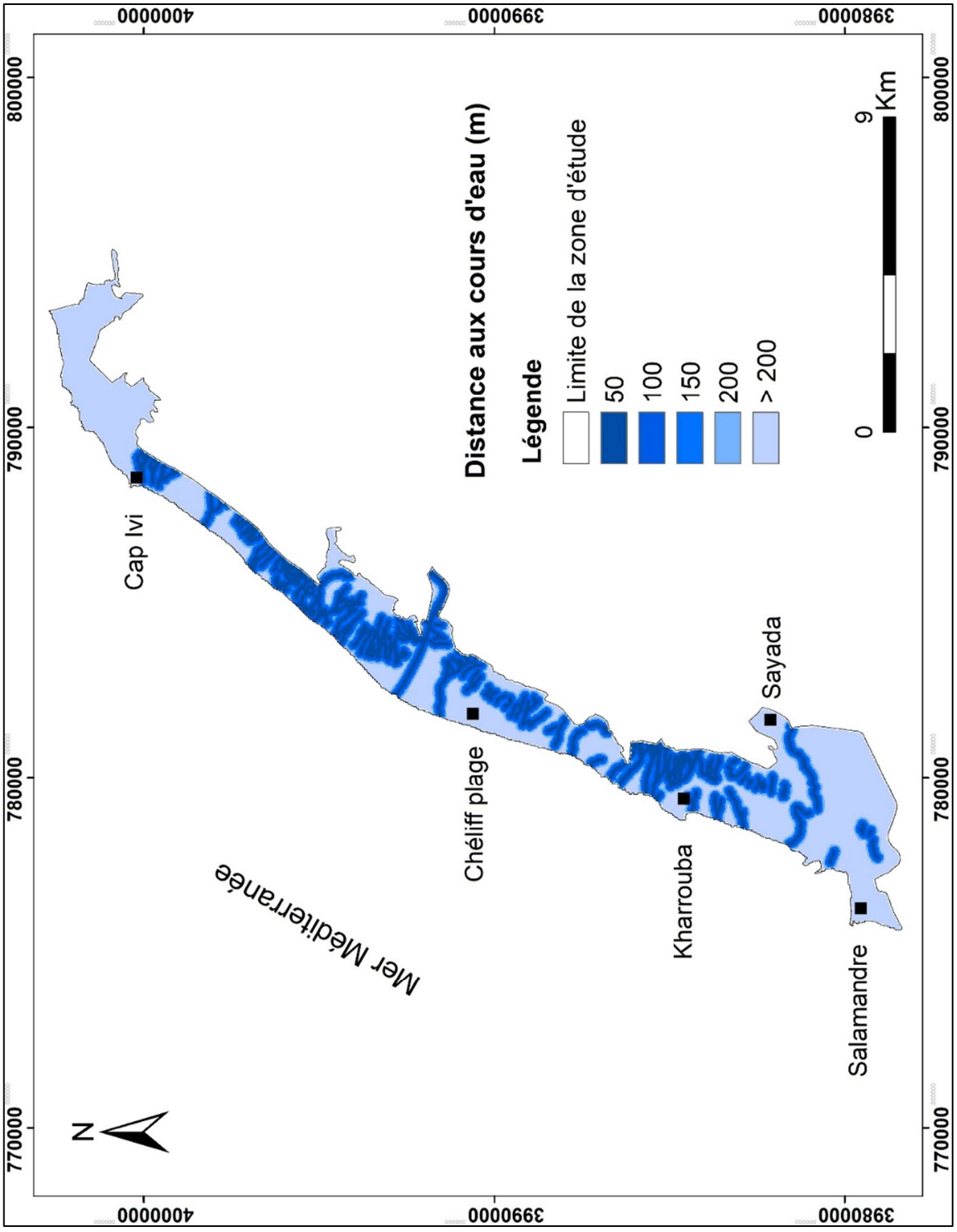


Figure 42 : Carte de distance aux cours d'eau dans le littoral de Mostaganem

Distance au réseau routier

Le réseau routier est une structure anthropique importante qui pourrait également affecter la stabilité du terrain (Arca *et al.,* 2018). La Route Nationale (RN11) est la route la plus importante située dans la zone d'étude. Méthodologiquement, nous avons numérisé le réseau routier du Google Road en utilisant le plugin « *QuickMapServices »*, extension du *QGIS* 3.8. En outre, un tampon à multiple-anneaux a été créé à l'aide du logiciel *ArcGIS* 10.5.1. Dans lequel cinq classes avec un intervalle de 50 m ont été regroupées (Figure 43).

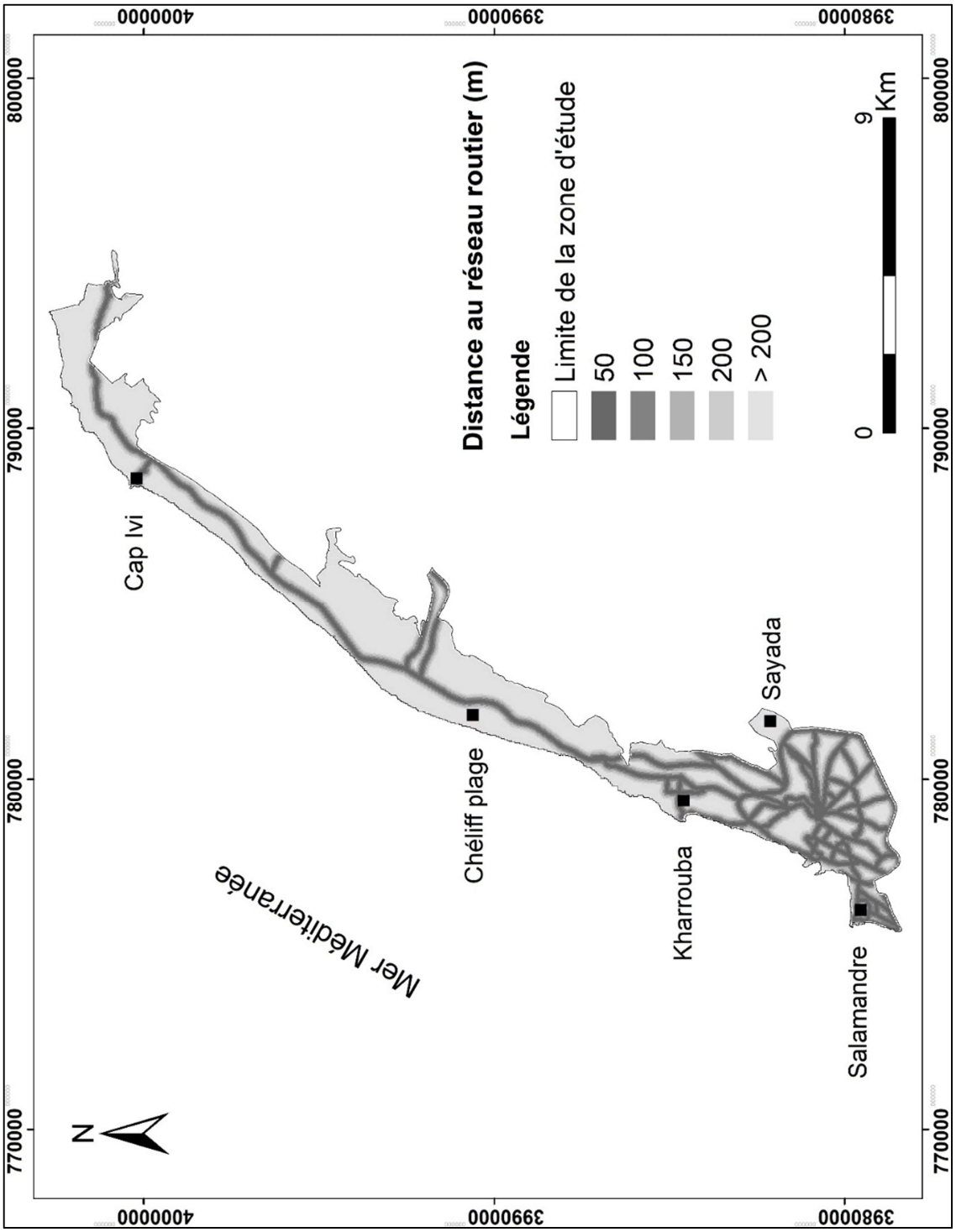


Figure 43 : Carte de distance au réseau routier dans le littoral de Mostaganem

Distance aux failles

Les zones proches des failles actives sont faibles et par conséquent, leur susceptibilité à l'instabilité augmente. Dans le domaine côtier de Mostaganem, les failles ont été dérivées par numérisation de la carte géologique Bosquet-Mostaganem (1/200 000). Un tampon à multiple-anneaux a été calculé avec un intervalle de 100 m en utilisant des outils SIG. Les distances à la faille ont été regroupées en 5 classes (figure 44)

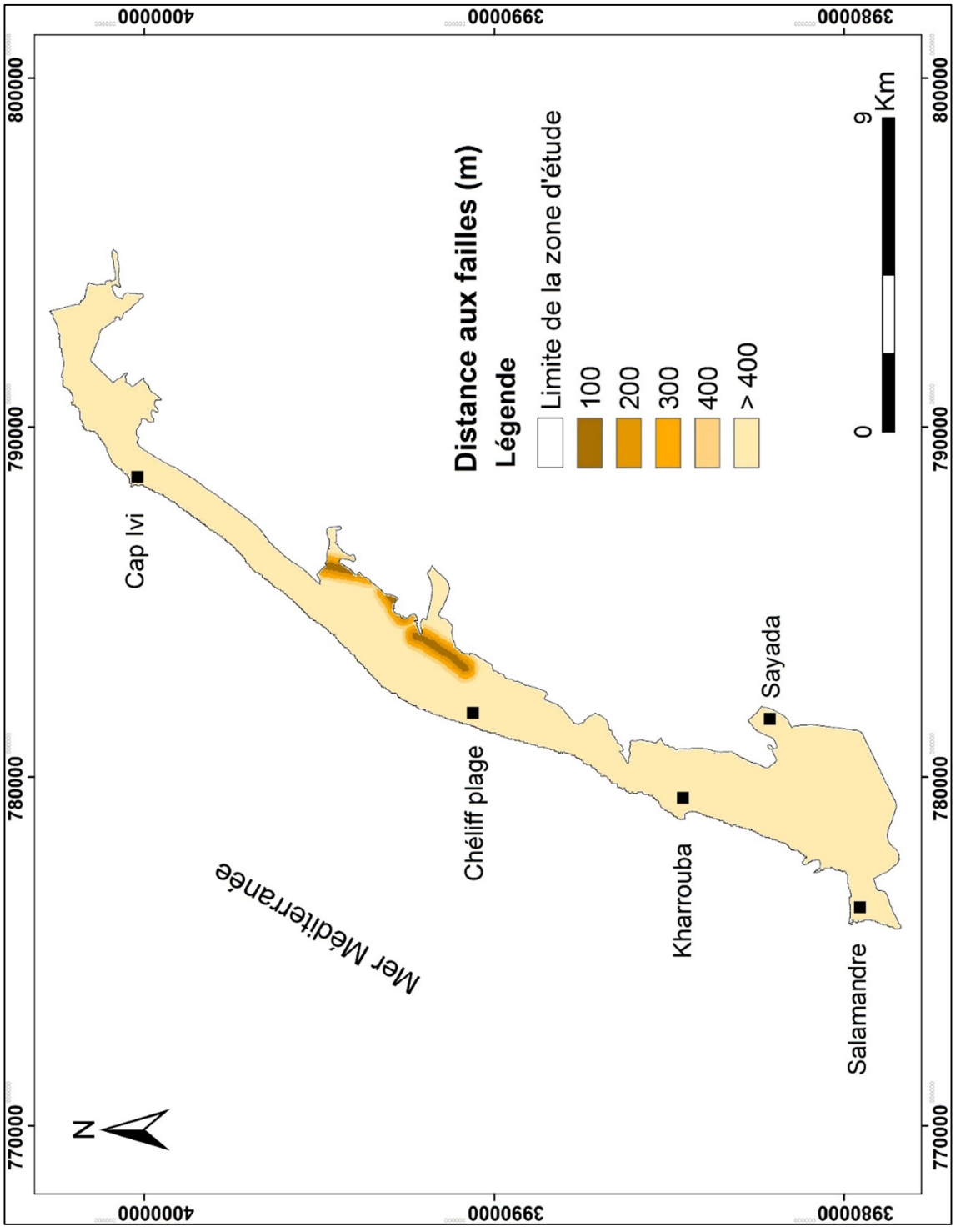


Figure 44: Carte de distance aux failles dans le littoral de Mostaganem

4.2.3. Evaluation de la susceptibilité aux glissements

4.2.3.1. Combinaison de Carte d'Index (CCI)

L'approche fondée sur la connaissance des experts est une approche qualitative. Elle peut être directe ou indirecte. La méthode directe est basée sur la cartographie géomorphologique de la susceptibilité ou l'aléa de glissement. Cependant, La méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) est une approche indirecte basée sur l'attribution d'évaluations et de pondérations en fonction de l'influence des facteurs de prédisposition (Kaur *et al.,* 2018). Le succès de cette méthode repose principalement sur les connaissances des experts (van Westen *et al.,* 2003). Dans le cas présent, une échelle numérique varie de (1- 5) a été attribuée aux facteurs. La valeur la plus élevée a été attribuée aux facteurs et à leurs classes ayant une influence importante sur l'occurrence des glissements de terrain et inversement (Rabehi *et al.,* 2018 ; Michael et Samanta, 2016). La carte de susceptibilité aux glissements de terrain a été produite en utilisant l'outil *Raster Calculator* du logiciel *ArcGIS* 10.5.1 selon l'équation (12).

$$(\mathrm{LSM}) = (W_\alpha \times \alpha) + (W_\beta \times \beta) + (W_\gamma \times \gamma) + (W_\delta \times \delta) + (W_\varepsilon \times \varepsilon) + (W_\lambda \times \lambda) + (W_\mu \times \mu) + (W_\tau \times \tau) + (W_\varpi \times \varpi) \quad (12)$$

Où ; LSM (CCI) est la carte de susceptibilité aux glissements de terrain (*Landslide Susceptibility Map* / Combinaison de Carte d'Index (CCI), α : est la lithologie, β : pente, γ : utilisation du sol, δ : aspect de la pente, ε : plan de courbure, λ : précipitations, μ : distance au cours d'eau, τ : distance aux routes, ω : distance aux failles.

W_α est le poids du facteur lithologie, W_β est le poids de la pente ; $W\gamma$ est le poids de l'utilisation du sol, W_δ est le poids de l'aspect de la pente, $W\varepsilon$ est le poids du plan de courbure, W_λ est le poids de la précipitation, W_μ est le poids de la distance au cours d'eau, W_τ est le poids de la distance au réseau routier et W_ω est le poids de la distance aux failles.

4.2.3.2. Analyse par Processus Hiérarchique (Analyse multicritères)

Le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) introduit pour la première fois par Saaty (1977). C'est une analyse multicritère utilisée dans différents domaines en raison de sa simplicité et sa flexibilité. La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain est l'un des domaines qui utilisent le plus souvent l'AHP. (Pourghasemi *et al.*, 2012). Elle consiste à

attribuer des poids pour les paramètres qui contrôlent le déclenchement des évènements de glissements de terrain. (Shit *et al.,* 2016 ; Ali *et al.,* 2019), L'analyse multicritère AHP repose sur trois concepts :

- Décomposition du problème en différents niveaux hiérarchiques dans lesquels le niveau supérieur représente l'objectif principal de la prise de décision ;
- Classification des facteurs selon leur importance, c'est-à-dire, faire un jugement comparatif à travers la comparaison par paire des facteurs.
- Synthèse des propriétés en fonction de l'importance de chaque facteur sur la base de la littérature et des connaissances des experts.

En outre, afin de décrire la relation qui existe entre les différents facteurs, une valeur numérique basée sur l'échelle de Saaty (1977) a été attribuée à chaque facteur (Tab. 4). La matrice de comparaison (n × n) par paire entre les différents facteurs (i, j) a été créée selon les jugements donnés par les experts. L'importance de la composante ***i*** par rapport à la composante ***j*** est déterminée selon l'échelle de Saaty (1977) (Tab. 4). Cette valeur est affectée à la $ij^{ème}$ position. Dans le cas inverse (j est plus important que i), la valeur est affectée inversement ($1/a_{ij}$). Une fois que la matrice de comparaison est formée (M_1), le calcul du poids de chaque paramètre consiste à :

- Extraire des valeurs propres, c'est-à-dire la normalisation de la matrice (M_1) en divisant la valeur de chaque ligne par la somme des lignes de la même colonne ;
- Calculer la moyenne de chaque ligne de la nouvelle matrice (M_2) ;
- Multiplier l'ancienne par la nouvelle matrice (M_1 et M_2) ;
- Diviser le résultat de chaque multiplication (M_1 et M_2) par la moyenne qui lui est associée.

Cette méthode a été appliquée pour déterminer la valeur du poids des paramètres et leurs classes (rang)

Tab.4: Echelle de Saaty (Saaty, 1977)

Degré d'importance de chaque facteur (a_{ij})	**Définition**	**Explication**
1	Importance égale	Les deux paramètres contribuent de la même façon à l'objectif
3	Importance modérée	L'expérience et les jugements favorisent un paramètre par rapport à un autre
5	Forte importance	Un paramètre est favorisé fortement par rapport à un autre
7	Importante très forte et attesté	Un paramètre est très fortement favorisé par rapport à l'autre
9	Importance extrême	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugement	Importance intermédiaire
Valeur réciproque	Valeur inversée ($1/a_{ij}$)	Le paramètre***j*** est plus important que ***i***

a. L'évaluation de la cohérence des jugements

L'évaluation de la qualité de l'approche suivie dans ce travail se fait par le calcul de la cohérence du ratio ou la consistance (CR). Elle constitue un test pour les jugements des experts. La cohérence du ratio. Le calcul de la cohérence du ration (CR) selon l'équation suivante :

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \qquad 13$$

Avec CI est l'indice de cohérence, il est calculé selon l'équation suivante :

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n-1} \qquad 14$$

Avec λ_{max} valeur propre maximale, n est le nombre d'éléments de la matrice

RI : Indice aléatoire de cohérence, il dépend du nombre des éléments de la matrice (Tab.5)

Tab.5: Indice aléatoire de la cohérence (Saaty, 1977)

N	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Si la valeur calculée du rapport de cohérence est inférieure à 10%, cela signifie que les jugements des experts sont cohérents (Chen *et al.,* 2013). Si le CR est supérieur à 10 %, ceci indique que les comparaisons ne sont pas cohérentes. Cela nécessite par conséquence une révision. Dans notre travail, l'AHP a été appliquée afin de déterminer le poids de chaque

paramètre et le rang de chaque classe. En ce qui concerne le paramètre de précipitation, le rang des classes a été attribué directement sur la base des connaissances des experts (Tsoata *et al.,* 2020).

a. Méthode de superposition pondérée (WOM)

La WOM est un outil simple, direct et adéquat, disponible dans le logiciel *ArcGIS 10.5.1*. Elle est largement utilisée pour résoudre des problèmes multicritères tels que la susceptibilité aux glissements de terrain (Shit *et al.,* 2016 ; Ahmed *et al.,* 2017) en combinant différents paramètres en fonction de leur pondération (Kaur *et al.,* 2018 ; Basharat *et al.,* 2016). Dans cette étude, les valeurs de classement (rang) et les poids des paramètres ont été déterminés en utilisant l'AHP afin de produire la carte de prédiction de la susceptibilité aux glissements de terrain. Tous les paramètres ont été intégrés dans l'outil WOM du logiciel *ArcGIS 10.5.1.* La somme des poids doit être égale à 100. Chaque poids a été multiplié par le facteur qui lui a été attribué selon l'équation suivante :

$$\mathrm{LSM} = \sum_{i=1}^{n} (X_i \times W_i) \qquad 15$$

Où Xi est le rang de chaque classe et Wi est le poids du paramètre contrôlant les glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem.

b. Normalisation

Zadeh (1965) a introduit pour la première fois la logique des flous. Elle a été largement appliquée dans différentes disciplines et sur des mesures distinctes en raison de sa simplicité (Zimmermann, 2010 ; Carranza et Hale, 2001). Dans cette logique, tous les objets sont considérés comme des éléments d'un ensemble. Chaque élément peut prendre une valeur comprise entre 0 et 1 (Ilanloo, 2011 ; Zhu *et al.,* 2014). De nombreux chercheurs l'ont combinée avec l'AHP afin d'améliorer la précision de l'évaluation de la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain (Pouraghasemi *et al.,* 2012 ; Feizizadeh *et al.,* 2014 ; Mijani et Neysani Samani, 2017 ; Mokarram et Zarei, 2018).

Dans ce travail, nous avons élaboré deux cartes différentes en terme de valeur de classes (CV) en appliquant deux méthodes : la Combinaison de Carte d'Index (CCI) et l'AHP combinée avec le WOM. De cette façon, il n'a pas été possible de comparer les deux cartes et d'éliminer

les valeurs incertaines. En outre, une fonction linéaire de la logique floue a été appliquée dans le but de convertir les données d'entrée (CV) de manière linéaire sur une échelle de 0 à 1 dans laquelle la valeur 0 est attribuée aux données d'entrée les plus basses et la valeur 1 aux valeurs d'entrée les plus élevées. La normalisation a été effectuée dans le logiciel *ArcGIS 10.5.1.*

4.3. Résultats et discussions

4.3.1. Combinaison de Carte d'Index (CCI)

En se basant sur la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI), l'évaluation de la susceptibilité a intégré plusieurs paramètres tels que la lithologie, la pente, l'occupation du sol, l'aspect, le plan de courbure, la précipitation, la distance aux cours d'eau, la distance au réseau routier et la distance aux failles. Tous les facteurs ont été classés et pondérés en fonction de leur importance. Une échelle numérique (1-5) de faible à forte influence leur a été attribuée. Les facteurs les plus influençant étaient la lithologie, la pente, l'occupation du sol et l'aspect. Le plan de courbure, les précipitations, la distance aux cours d'eau et la distance au réseau routier sont moins importants en ce qui concerne l'instabilité des pentes de la zone d'étude. La distance aux failles augmente la probabilité d'occurrence des glissements de terrain (Pradhan et Lee, 2010). Cependant, dans notre cas d'étude, ce facteur contribue très faiblement au déclenchement des glissements de terrain. Afin de produire la carte de susceptibilité aux glissements de terrain (figure 45A), chaque paramètre a été multiplié par son poids correspondant en utilisant l'outil *Raster Calculator* (Equation 12).

4.3.2. Pondérations par processus d'analyse hiérarchique

L'AHP a été appliquée pour estimer le poids et le rang (classement) en se basant sur la matrice de comparaison. La matrice a été construite pour deux niveaux : 1) pour évaluer le rang (classement) des classes de chaque paramètre ; 2) pour estimer le poids des paramètres au moyen de *scripts Python* intégrés dans le logiciel *ArcGIS 10.5.1.* Comme le montre le Tab. 6, la lithologie est le paramètre le plus influençant avec une valeur de 0.280, les classes : alluvions et sable continentales du quaternaire ont présenté des valeurs de classement de 0.29 et 0.26 respectivement. La pente avait également une valeur de poids considérable de 0.164, suivie par l'utilisation du sol avec 0.15 et l'aspect de pente avec 0.11. Les facteurs à savoir, le plan de courbure, distance aux cours d'eau, distance au réseau routier et précipitations étaient moins importants. En revanche, la distance aux failles a eu une très faible influence.

Tab. 6 : Poids et rang des différents paramètres selon l'approche CCI et l'AHP

Paramètre	Classe	CCI		AHP	
Lithologie		Classe	Poids	Classe	Poids
	a^1	5	5	0.26	0.28
	a^2	5		0.29	
	F	4		0.12	
	m^m	3		0.09	
	p^m	3		0.10	
	m^g	2		0.03	
	m^{gm}	2		0.03	
	q^c	2		0.030	
	p^L	1		0.024	
	q^1	2		0.026	
				CR= 0.006	
Pente (°)	0 – 5	1	4	0.073	0.164
	5 – 10	2		0.110	
	10 – 15	3		0.161	
	15 – 25	4		0.259	
	>25	5		0.395	
				CR= 0.017	
Occupation du sol	Plage, dunes et plaines formées de sable	3		0.071	0.154
	Dunes à dense végétation	3		0.107	
	Surface bâtie	4		0.240	
	Sites de construction	5		0.409	
	Terres agricoles	2		0.058	
	Maraichères	2		0.044	
	Zones à dense végétation	1		0.039	
	Oued Chéliff	1		0.032	
				CR= 0.030	
Exposition	Plat	1	3	0.062	0.111
	Nord	2		0.114	
	Est	3		0.171	
	Sud	4		0.146	
	Ouest	5		0.504	
				CR= 0.005	
Plan de courbure	Concave	5	2	0.619	0.086
	Plat	1		0.096	

	Convexe	3		0.284	
				CR = 0.057	
Paramètre	Classe	CCI		AHP	
Précipitation (mm)	350 – 400	2	2	0.25	
	400 – 450	3		0.750	
Distance aux cours d'eau (m)	50	5	2	0.552	0.077
	100	4		0.189	
	150	3		0.137	
	200	2		0.077	
	>200	1		0.041	
				CR= 0.004	
Distance au réseau routier (m)	50	5	2	0.537	0.043
	100	4		0.202	
	150	3		0.129	
	200	2		0.081	
	>200	1		0.052	
				CR= 0.027	
distance aux failles (m)	100	5	1	0.480	0.028
	200	4		0.229	
	300	3		0.161	
	400	2		0.089	
	>400	1		0.041	
				CR = 0.005	
				CR= 0.088	

a^1 : Sable continental du quaternaire ; a^2 : Alluvion continental du quaternaire ; F : nappe de flysch ; m^m : marnes bleus « à cinérites » ; p^m : marnes bleus du plaisancien ; m^g : grès, conglomérat et argiles rouges ; m^{gm} : grès et sable ; niveau « Sedra-Tliouanet » ; q^c : Post-Villafranchien : carapaces calcaires ; p^L : calcaires à Lithomaniées ; q^1 : Calabrien : grès calcaire lumachellique

Les valeurs de la cohérence du ratio (CR) sont inférieures à 10% (Tab. 6). Cela est conforme à la cohérence de la comparaison par paire. Ces résultats confirment la validité des jugements et la pondération des facteurs (Pourghasemi *et al.,* 2012). La carte de susceptibilité a été générée en utilisant l'outil WOM de l'*ArcGIS 10.5.1* (figure 45B).

4.3.3. Cartographie de la susceptibilité au glissement de terrain

Les deux cartes produites montrent une distinction en terme de valeur de classe (figure 45 A et B). La carte produite à la base de la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) montre que les valeurs de classe sont comprises entre 30 et 112. La carte élaborée à la base de la méthode AHP combinée à la WOM présente des valeurs de classes allant de 6 à 39. Dans le but de comparer ces deux cartes, les valeurs de leur classe ont été normalisées selon une échelle de 0 à 1 en utilisant la fonction linéaire de la logique des floues.

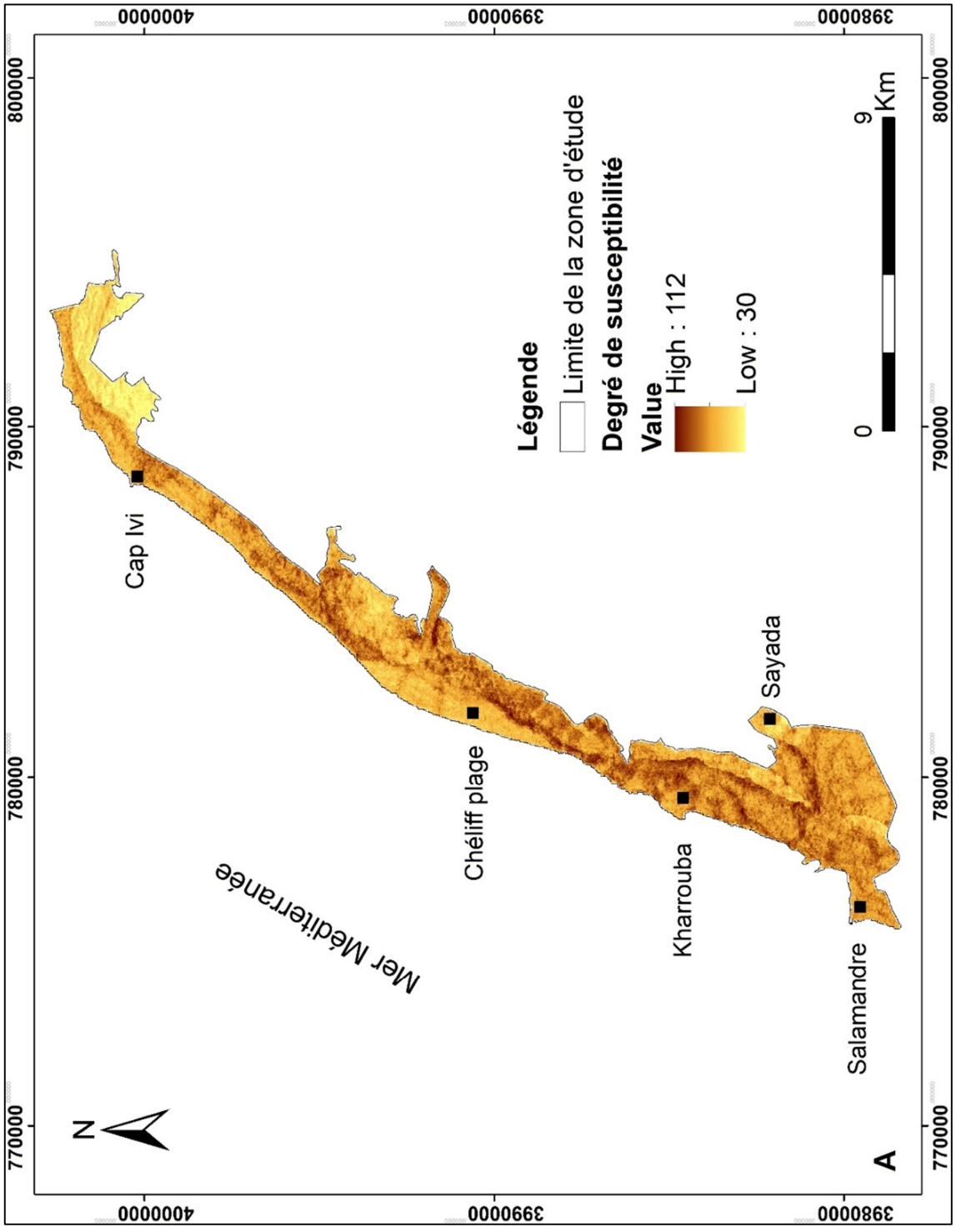


Figure 45 A: Carte de degré de susceptibilité au glissement de terrain dans la zone d'étude selon la méthode CCI (avant la normalisation)

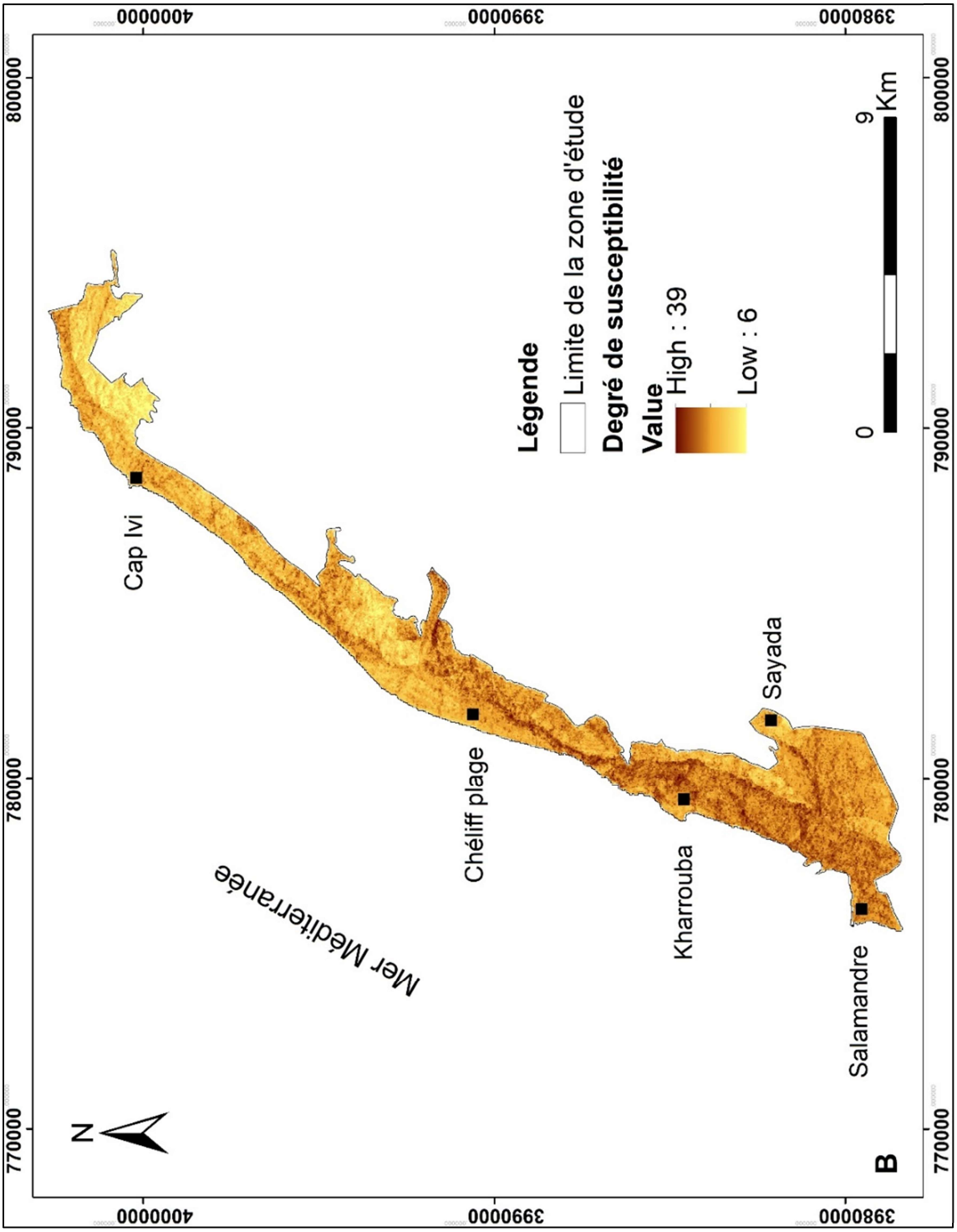


Figure 45 B: Carte de degré de susceptibilité au glissement de terrain dans la zone d'étude selon la méthode AHP combiné au WOM (avant la normalisation)

En vue de faciliter la lecture des cartes de susceptibilité, il est primordial de traduire l'intervalle 0-1 en classe de degré de susceptibilité. Cette démarche est compliquée, car les experts reposent sur leur expérience et sur la littérature pour passer des données continues à des classes ou valeurs manuelles. Malgré la subjectivité de cette démarche, elle est très souvent utilisée dans le cas d'une distribution multimodale. Il existe de nombreux classificateurs en

statistiques qui se basent sur des relations mathématiques. Les classificateurs appliqués dans cette étude sont déjà implémentés dans le logiciel *ArcGIS 10.5.1.* (Ayalew et *al.,* 2004 ; Mastere, 2011). Ils ont été abordées afin choisir le meilleur classificateur :

- La méthode de classification manuelle qui consiste à attribuer des valeurs manuelles aux différents intervalles. Cela est inacceptable pour notre cas d'étude car nous trouvons que cette méthode est très subjective.

- La méthode « *equal interval* » ou intervalle égal est une méthode très simple que nous avons utilisée dans notre étude ; elle consiste à diviser l'intervalle en classes égales (figure 46) et montre que la majorité des valeurs de classes se localisent dans l'intervalle 0.4-0.6. Cet intervalle représente la classe correspondant au degré de susceptibilité modéré, ce qui semble être illogique. Selon nos observations, cette méthode ne répond pas à l'objectif souhaité car elle produit des degrés de susceptibilité égaux et cela n'est pas le cas du littoral de Mostaganem.

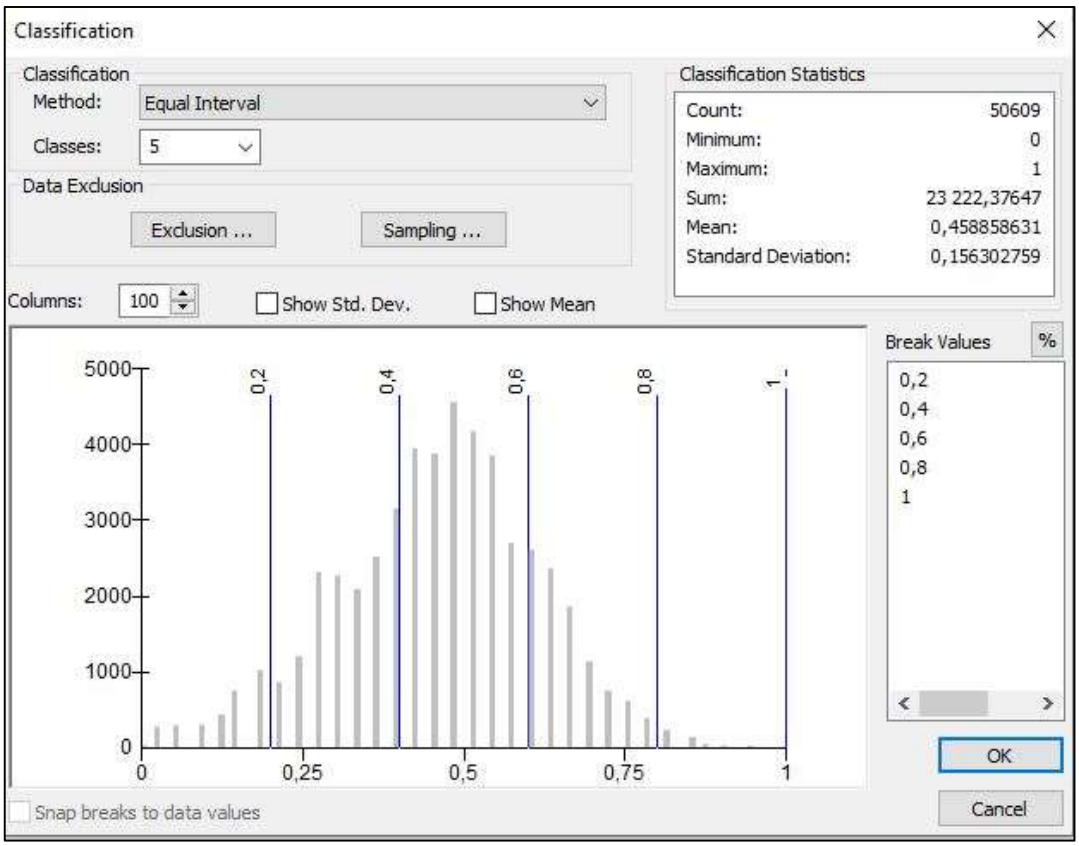


Figure 46 : Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par « Equal interval classification » (littoral de Mostaganem)

- La méthode de « *standard deviation* », ou déviation standard, elle consiste à diviser les données continues en classes en se basant sur les standards de déviation et la moyenne des probabilités obtenues. Cette méthode n'a pas été retenue en raison du nombre de classes déterminé par le logiciel *ArcGIS 10.5.1*. qui est 6 (figure 47). Considérant le premier degré de susceptibilité est nul et qui est inacceptable pour le terrain du littoral de Mostaganem car il est constitué majoritairement des terrains sableux et donc le risque n'est plus nul.

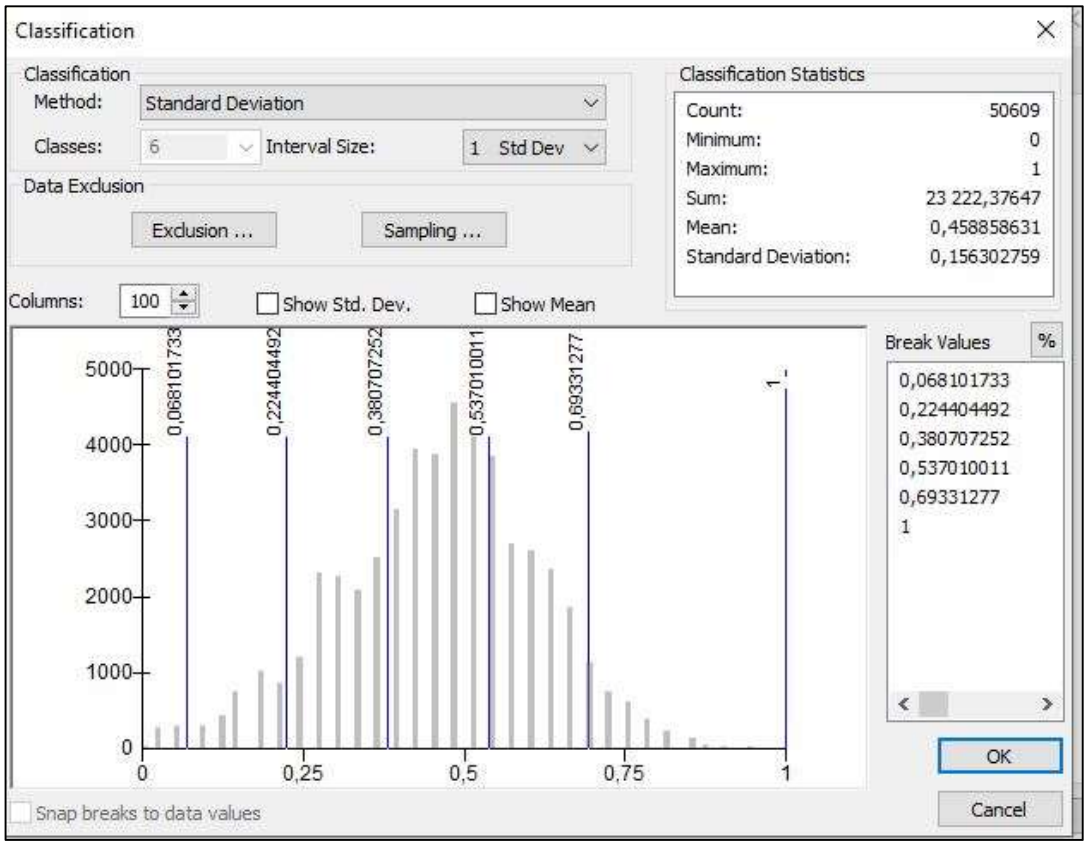


Figure 47 : Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par « Standard deviation classification » (littoral de Mostaganem)

- La méthode de classification *natural breaks* (discontinuités naturelles) est l'une des méthodes les plus utilisées (Ba *et al.,* 2017; Chalkias *et al.,* 2014; Cantarino-Marti *et al.,* 2019; Arabameri *et al*., 2020). Cette méthode consiste à regrouper naturellement des pixels dont les valeurs similaires ou comparables dans des ensembles communs et en maximisant la différence entre ces derniers (Mastere, 2011). Dans cette méthode, les changements brutaux de valeur correspondent à une variation du degré de susceptibilité. Dans ce sens, la carte de susceptibilité au glissement a été divisée en 5 classes en allant du degré le plus faible au degré de susceptibilité le plus fort (figure 48). Cette méthode a été appliquée aux deux cartes produites sur la base de la méthode Combinaison de Carte

d'Index (CCI) et l'AHP combinée à la WOM. Cette méthode a été choisie en raison de la classification naturelle des valeurs de classes et le résultat de comparaison de cette classification avec la réalité de terrain.

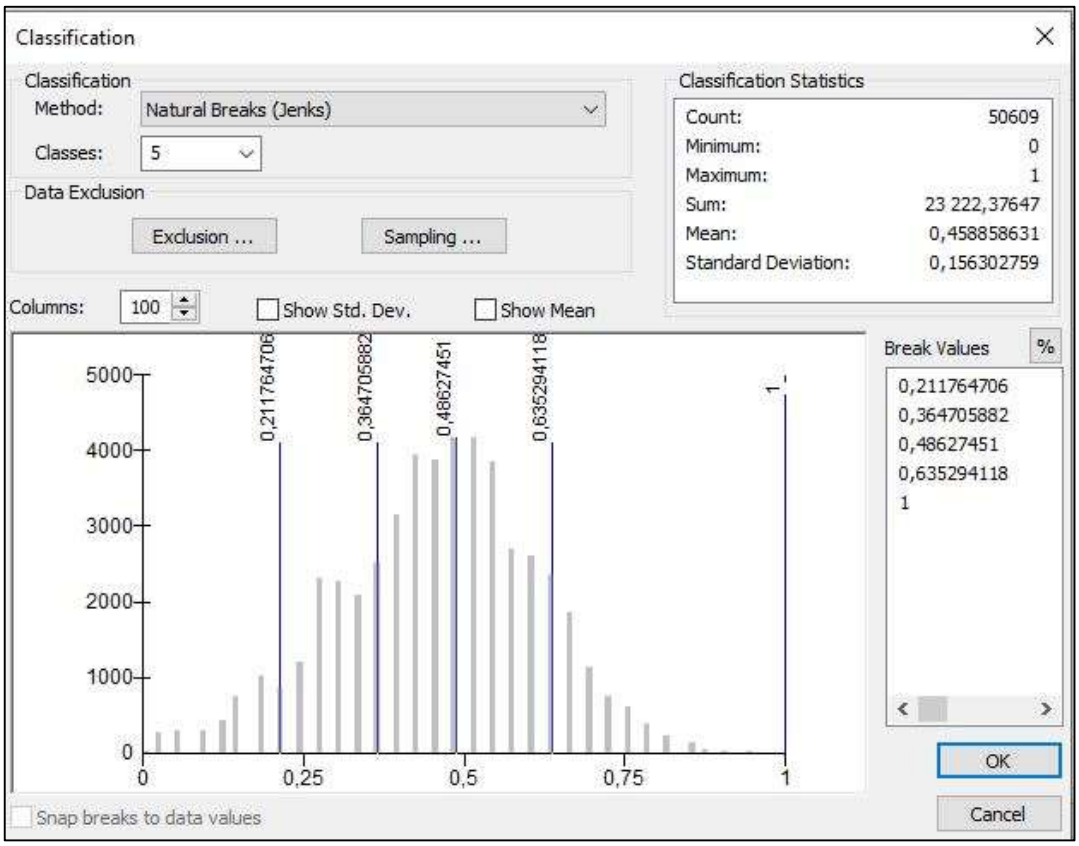


Figure 48: Histogramme des méthodes Combinaison de Carte d'Index et AHP combiné à la WOM. Reclassification par la méthode « Natural Breaks classification » (littoral de Mostaganem)

Les cartes de susceptibilité ont été regroupées en 5 classes (figure 49 A& B) : très faible, faible, moyen, fort et très fort. Ces classes sont détaillées dans le Tab. 7.

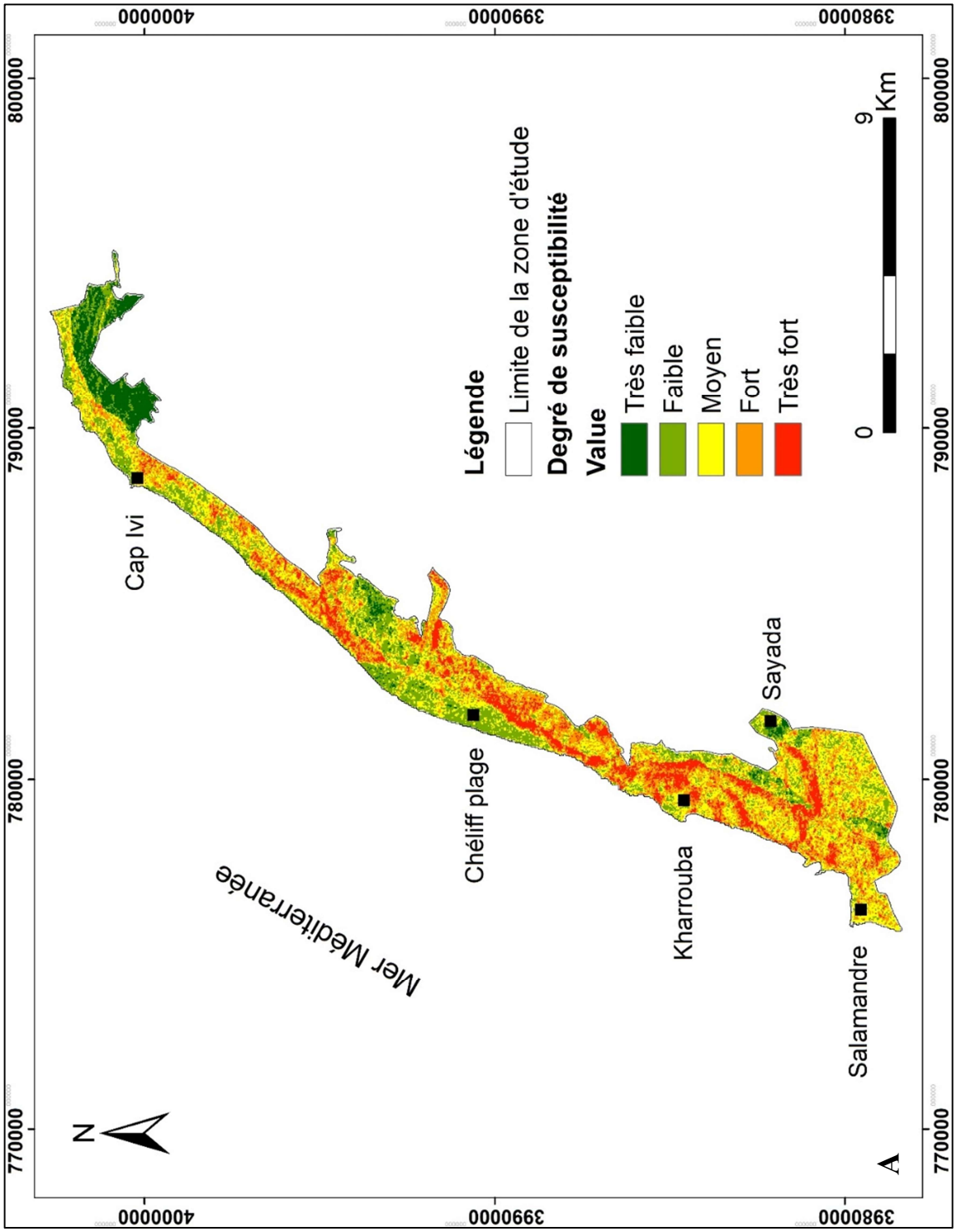


Figure 49 A : Reclassification des cartes de degré de susceptibilité au glissement de terrain après la normalisation produite selon la méthode CCI.

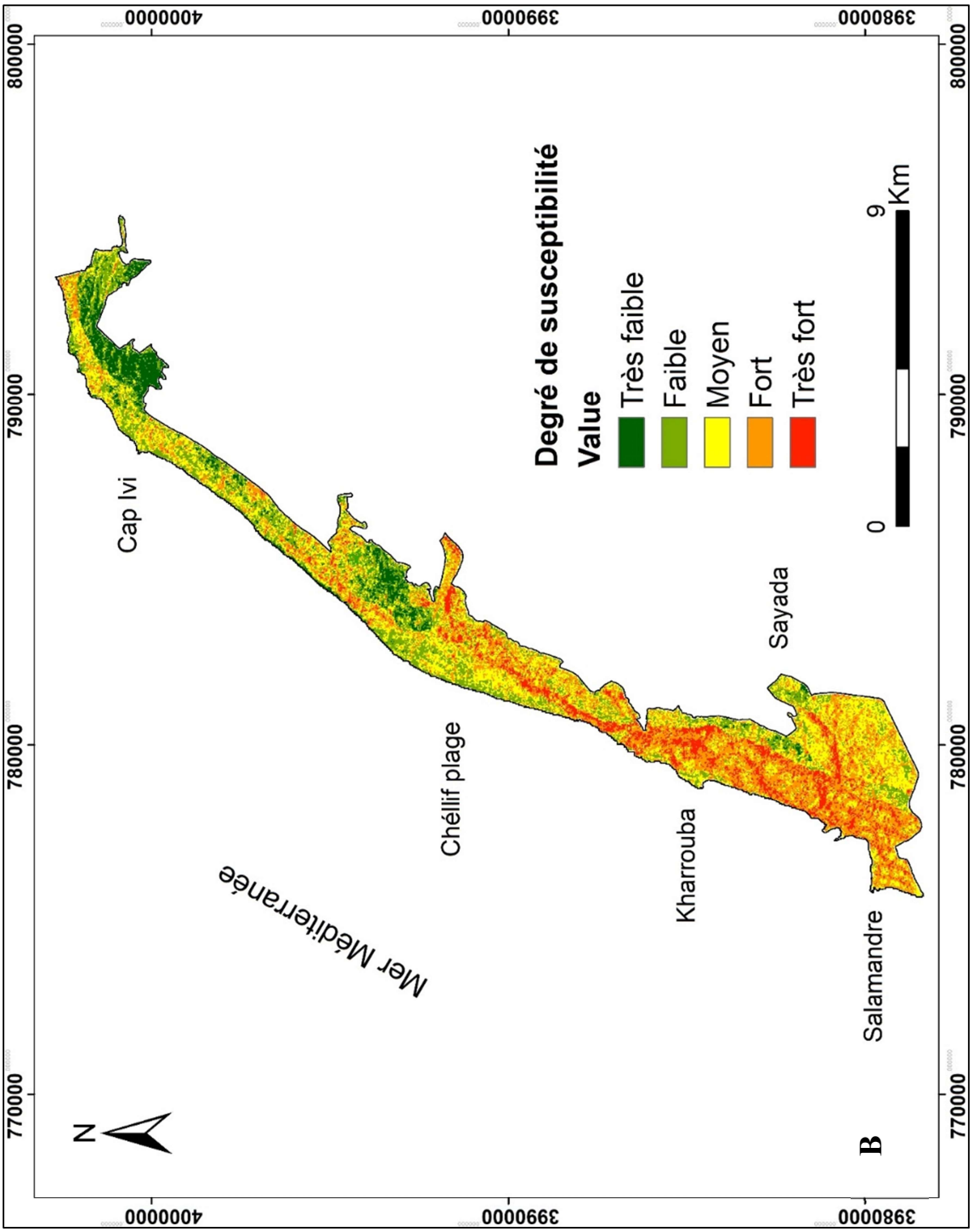


Figure 49 B : Reclassification des cartes de degré de susceptibilité au glissement de terrain après la normalisation produite selon la méthode AHP combiné au WOM

Tab.7 : Classes de susceptibilité

Susceptibilité	Définition
Très faible	La possibilité de déclenchement des glissement est très faible
Faible	La possibilité d'occurrence des glissements est faible
Moyen	La probabilité de déclenchement d'un glissement de terrain est modérée
Fort	Les facteurs géo environnementaux favorisent fortement le déclenchement des glissements
Très fort	Très forte probabilité que des glissements de terrain

Les zones très faiblement susceptibles aux glissements de terrain couvrent une superficie 382.27 ha (figure 49A). Elles sont principalement situées dans la zone à fort dense couvert végétal. Les racines des plantes assurent une efficace stabilité au sol et par conséquent aucun événement de glissement de terrain n'a été enregistré dans cette classe (figure 50). La zone à faible susceptibilité aux glissements de terrain couvre 1148.42 ha. Ces zones appartiennent à la classe des plages, dunes et plaines formées de sable qui a une très faible pente (0-5°). La classe modérée couvre une superficie estimée à 1632.90 ha. Les sites à fort et à très fort degré de susceptibilité sont situés près du noyau urbain et près de la route nationale (RN11), ils couvrent une surface de 1329.45 ha et 683.38 ha respectivement. Une très forte densité de glissement de terrain a été observée près de cette structure anthropique (figure 51). Les classes de fort et très fort degré de susceptibilité sont localisées principalement dans la partie Ouest où elles couvrent une superficie respectivement estimée à 72.24% et 79.19%. La classe correspondant à un fort degré de susceptibilité couvre, dans la partie Est du littoral de Mostaganem, une superficie de 368.90 ha. La classe représentant un degré très fort de susceptibilité occupe une superficie de 142.20 ha (20.80%) du littoral de Benabdelmalek Ramadane. Ces sites sont principalement situés près des dunes à dense végétation et des terres agricoles.

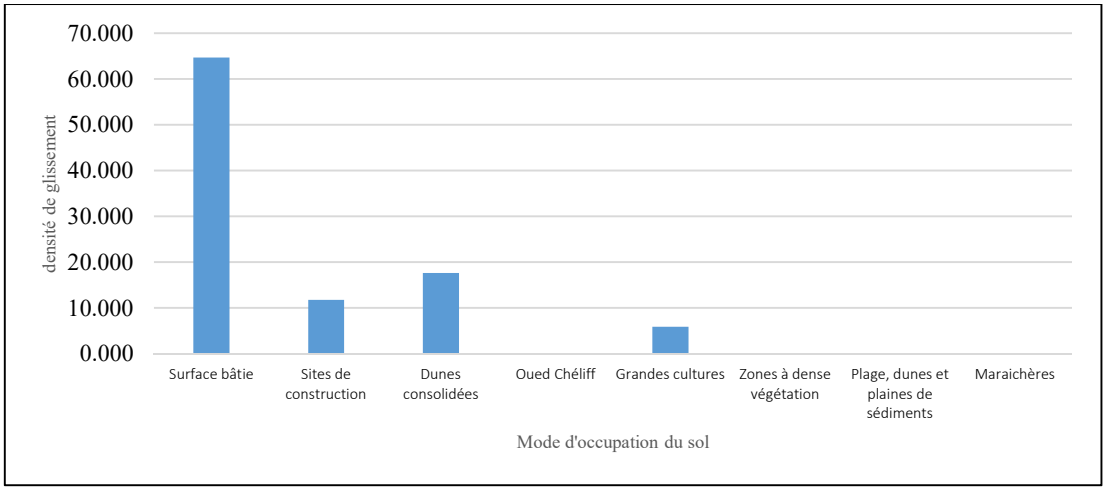


Figure 50: Densité de glissements dans les classes (occupation du sol dans le littoral de Mostaganem)

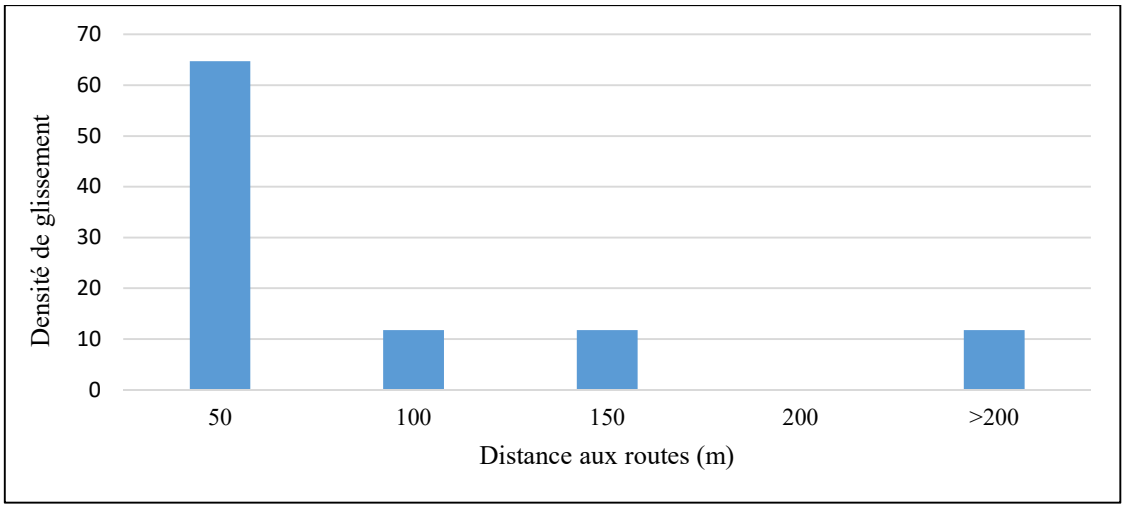


Figure 51 : Densité de glissements de terrain (distance aux routes dans le littoral de Mostaganem)

La carte de susceptibilité du littoral de Mostaganem produite selon la méthode Combinaison de Carte d'Index est comparable à celle établie au moyen de la méthode AHP (figure 49B). Le plus faible degré de susceptibilité aux glissements de terrain a été enregistré dans la commune de Benabdelmalek Ramdane, essentiellement dans la classe « zone à dense végétation » occupant une superficie 404.80 ha (7.82%). Par contre, les régions à faible susceptibilité aux glissements de terrain, couvrant 1063.04 ha (20.53%), sont situées dans les classes de sable, dunes et plaines formées de sable. Les zones présentant un moyen degré de susceptibilité se localisent principalement dans la partie occidentale du littoral de Mostaganem ; ces zones couvrent une superficie de 1583.95 ha (30.6%). Enfin, les classes de susceptibilité de fort et à très fort degré dominent la zone urbaine occidentale où elles couvrent respectivement une superficie de 1619.65 ha (31.29%) et 504.72 ha (9.75%) (Tab.8).

Tab.8: Distribution des degrés de susceptibilité au glissement

La susceptibilité	Combinaison de Carte d'Index		AHP combinée à la WOM	
	Superficie(ha)	D.G %	Superficie (ha)	D.G (%)
Très faible	382.27	0	404.80	0
Faible	1148.42	5.88	1063.04	11 ;77
Moyen	1632.90	11.77	1583.95	11.77
Fort	1329.45	35.29	1619.65	23.53
Très fort	683.38	47.06	504.72	52.94

D.G : densité de glissement

Les zones présentant une très faible susceptibilité aux glissements de terrain ont été enregistrées dans les zones jouissant d'une dense végétation. Cette dernière joue un rôle important dans l'amélioration de la stabilité des pentes et réduit la susceptibilité aux glissements de terrain (Miles et Keefer, 2009). Les zones peu susceptibles aux glissements de terrain sont situées le long des plages, des dunes mobiles et des plaines formées de sable (a déjà été illustrée dans la figure 49). En général, ces zones présentent une pente douce et n'enregistrent aucun événement de glissement. Les régions présentant une susceptibilité modérée aux glissements de terrain ont été identifiées près des surfaces bâties au Sud-Est de la zone d'étude et près des terres intensément cultivées. En raison de la prédominance des cours d'eau, les zones à fort et à très fort degré de susceptibilité ont été enregistrées au niveau du noyau urbain et près de la route nationale RN11. Dans le domaine côtier de Mostaganem, la plupart des infrastructures ont été construits sur les alluvions et les sables continentaux du Quaternaire. Ces deux roches ont une faible résistance au cisaillement lorsque les conditions hydrogéologiques sont favorables. Cela entraîne une augmentation de la susceptibilité aux glissements de terrain. À cet égard, les alluvions continentales du Quaternaire ont enregistré une densité considérable d'événements de glissement de terrain estimée à 52.94%. Les résultats obtenus montrent clairement que la densité des événements de glissement de terrain augmente avec le degré de susceptibilité (Tab.8). La situation actuelle à Mostaganem est due à l'utilisation non planifiée et non contrôlée de cette zone. Depuis 2000, le paysage du littoral de Mostaganem subit une altération intensive due à l'exploitation excessive des ressources naturelles et à l'expansion incontrôlée des constructions résidentielles. Cela se fait sans tenir compte des impacts environnementaux (glissements, inondations) en dépit de la loi littorale qui doit protéger la zone côtière (Akgun *et al.,* 2012). La situation du domaine côtier à Mostaganem reflète un manque important de planification au cours du processus d'urbanisation (Senouci et Taibi, 2019).

4.3.4. Validation des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain

L'évaluation de la qualité des cartes prédictives de glissement de terrain représente une étape primordiale dans ce type d'études. Différentes méthodes ont été utilisées comme l'analyse de la densité des glissements de terrain (Ld), la courbe du taux de prédiction (PRC) et l'aire sous la courbe (AUC) de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) (Vakhshoori et Zare, 2018). Dans ce travail, deux méthodes ont été appliquées. La première méthode est basée sur l'utilisation de la carte de vérité terrain des glissements dans le but de comparer les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain produites. Afin d'atteindre l'objectif de cette méthode, une échelle numérique (1-5) a été attribuée aux classes (degrés) des cartes de la susceptibilité. La valeur la plus faible correspondait à la zone la moins susceptible aux glissements de terrain. La valeur la plus élevée correspondait aux zones de plus grande susceptibilité aux glissements de terrain (Tab. 9). En outre, deux hypothèses, basées sur l'emplacement de l'événement de glissement de terrain dans la carte de vérité terrain du glissement de terrain, sont proposées :

a. L'événement de glissement de terrain est situé dans la même degré (classe) de susceptibilité (figure 49 A et B), le résultat est bon, et le choix du modèle était correct.

b. L'événement de glissement de terrain est situé dans deux classes de susceptibilité différentes (degré), deux hypothèses peuvent être envisagées :

   - Si la différence entre deux classes de cartes prédictives est de un (1), le choix du modèle est accepté.

   - Si la différence est supérieure à un (>1), le modèle doit être révisé.

Tab. 9: Attribution de l'échelle numérique

Degré de susceptibilité	Echelle numérique
Très faible	1
Faible	2
Moyen	3
Élevé	4
Très élevé	5

Selon notre analyse de la localisation des évènements, 59% des cas sont versés dans le même degré de susceptibilité aux glissements de terrain, ce qui signifie que le choix des modèles est appréciable. En revanche, 41% des cas appartiennent à deux classes distinctes avec une différence égale à 1. Cette analyse reflète un choix acceptable des modèles (Tab.10).

Tab.10 :Emplacement des cas de glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem

Évènement de glissement	Connaissance des experts		AHP combinée à WOM		Diff. M1 /M2	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
	Fa	M	Fo	T. Fo	B	Acc.

Fa : faible ; M : moyen ; Fo : fort ; T. Fo : très fort ; B : Bon modèle ; Acc. : Acceptable

La deuxième méthode est la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). C'est une technique statique utilisée par de nombreux chercheurs pour valider les résultats prédictifs (Lin *et al.,* 2017). Il s'agit d'une représentation graphique qui définit la relation entre la sensibilité et la spécificité. L'axe des ordonnées (la sensibilité) représente l'occurrence des glissements de terrain ; l'axe des ordonnées (la spécificité) représente les valeurs du degré de la susceptibilité au glissement de terrain. L'aire sous courbe AUC « *Area Under Curve* » caractérise la qualité des cartes de susceptibilité produites. Cette méthode évalue précisément la probabilité de survenance d'un cas de glissement du terrain. Dans ce contexte, la valeur de l'AUC est variable de 0 à 1. Elle reflète la fiabilité du modèle utilisé ; les valeurs comprises entre 0.5 et 1 indiquent que le modèle est performant ; Les valeurs < 0,5 indiquent un mauvais choix du modèle. Dans ce travail, l'AUC a été calculée en utilisant le logiciel *XLSTAT 2015.4.01.22368.* Les résultats des cartes prédictives montrent que la carte produite à la base des de la méthode Combinaison

de Carte d'index (CCI) a une valeur de l'AUC égale à 0.686. Contrairement, la carte basée sur l'AHP combinée avec la WOM où le ROC dénote une bonne précision (AUC = 0.753) (figure 52). Ces valeurs indiquent que les modèles utilisés sont adaptés à la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem. Sur la base des techniques utilisées, les cartes prédictives des glissements de terrain montrent un résultat acceptable.

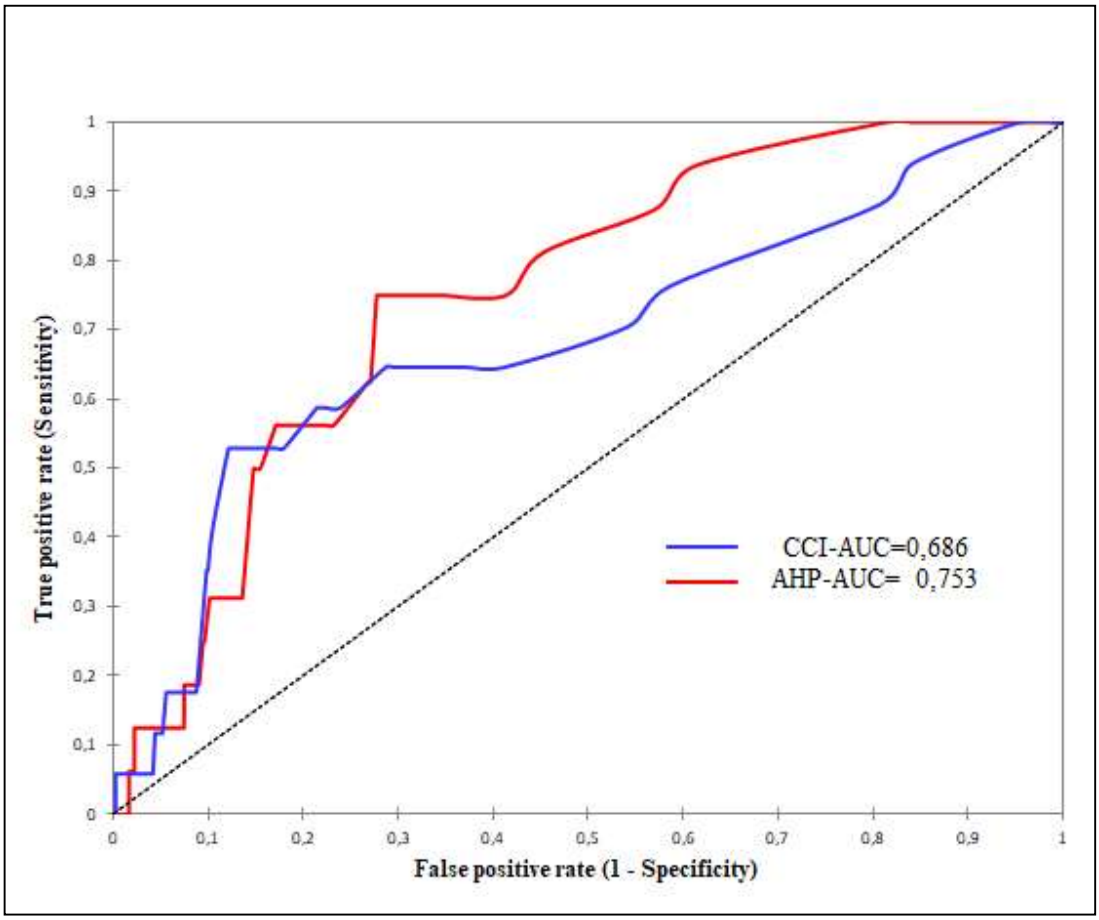


Figure 52 : Courbe AUC-ROC (CCI et AHP combinés avec WOM) pour le littoral de Mostaganem

Conclusion

La prévention de l'aléa de glissements dans le littoral de Mostaganem est difficile à déterminer par rapport aux autres aléas tels que les inondations et les séismes. Dans cette étude, la susceptibilité au glissement a été déterminée au moyen d'un système d'information géographique (SIG). Les paramètres se rapportant à la lithologie, la pente, l'exposition, l'occupation du sol, le plan de courbure, les précipitations, la distance aux cours d'eau, la distance au réseau routier, la distances aux failles ont été considérés, traités et combinés afin de produire une carte de susceptibilité. Les sites les plus susceptibles ont été enregistrés au niveau

du noyau urbain et près de la route nationale RN11. Une telle étude peut constituer un outil utile de gestion pour les aménagistes du littoral de Mostaganem et les décideurs des institutions locales. Il convient toutefois de noter que le littoral de Mostaganem est particulièrement sensible aux différentes pressions anthropiques, tels que la construction, le tourisme balnéaire et l'industrie.

Chapitre 5

Impact du changement de l'occupation du sol sur la zonation de la susceptibilité et évaluation du risque de glissement dans le littoral de Mostaganem

Introduction

Les glissements de terrain affectent les sols et engendrent des pertes socio-économiques faisant parfois même des victimes (Nhu *et al*., 2020). A Mostaganem, les glissements de terrain sont modérément fréquents. D'après notre étude, les différents cas de glissements rencontrés sont de type superficiel se situant près du noyau urbain et au niveau de certaines routes de la wilaya. Ces cas n'ont été enregistrés que récemment. Les changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem pourraient être la raison pour l'occurrence des dits glissements de terrain. Ces cas ont entraîné des perturbations sur le fonctionnement des routes. Les dommages et les effets causés par ces glissements de terrain peuvent être réduits par des politiques et pratiques adéquates. L'évaluation du risque de glissement est cruciale pour le littoral de Mostaganem en raison des enjeux socio-économique en disposition et la préparation insuffisante d'infrastructures (Gautam, 2017 ; Guillard-Gonçalves et Zêzere, 2018 ; Senouci *et al.,* 2021). En Algérie, l'évaluation du risque de glissement dans la zone côtière n'a fait plus l'objet des recherches. La plupart des études publiées sur les glissements de terrain se limitent à l'évaluation de l'aléa et la susceptibilité. Le monitoring du risque est un domaine complexe car il exige la combinaison de deux composantes spatiales : l'aléa (H : *hazard)* et la vulnérabilité (V : *vulnerability*). L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer l'impact des changements de l'occupation du sol sur la zonation de la susceptibilité au glissement et d'établir une carte à risques de glissement dans le littoral de Mostaganem. Afin d'estimer le risque de glissement, une méthodologie semi-empirique a été appliquée en utilisant un SIG. La limite de la disponibilité de données précises a été considérée à cet égard.

5.1. Impact des changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem sur la susceptibilité au glissement de terrain

Selon les recherches bibliographiques et nos prospections, les évènements de glissement ne se produisaient que depuis l'année 2010, marquée par une forte utilisation de la zone côtière (Senouci et Taibi, 2019). Cette situation nous a amené à formuler la question suivante : est-ce que les changements de l'occupation du sol ont-ils accentué la susceptibilité aux glissements de terrain ? Afin de visualiser l'impact des changements de l'occupation du sol, deux cartes de susceptibilité au glissement de terrain, une de 1987 et l'autre de l'an 2000 ont été produites. La conception d'une carte de susceptibilité de terrain peut se faire selon des méthodes qualitatives ou quantitatives. Le choix des paramètres qui influencent la susceptibilité des glissements de

terrain dépend principalement de la zone d'étude et les cas des évènements observés. Dans notre étude, la lithologie, la pente, l'exposition, l'occupation du sol, les précipitations, le plan de courbure, la distance aux cours d'eau, la distance au réseau routier et la distance aux failles ont été intégrés dans le logiciel *QGIS 3.14.0* ; ces paramètres contrôlent la disposition au glissement de terrain. La dynamique de l'occupation du sol est également un paramètre important pour l'évaluation de la susceptibilité au glissement. Certaines transformations du sol telles que la déforestation, la construction des routes et la rupture des pentes augmentent l'instabilité des terrains et favorisent les glissements de terrains (Mugagga *et al.,* 2012 ; Reichenbach *et al.,* 2014 ; Meneses *et al.,* 2019).

L'évaluation du degré de susceptibilité pour l'année 1987 a été entreprise en substituant le facteur d'occupation du sol de 2017 par celui de l'an 1987 ; cela a été fait également pour l'année 2000. Les cartes d'occupation du sol de l'année 1987 et 2000 sont dérivées des images satellitaires de *Landsat TM* et *Landsat ETM* respectivement et ont été présentées exhaustivement dans le chapitre 3. En appliquant la méthodologie Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) combinée avec la méthode de superposition pondérée (WOM), les cartes de susceptibilité de 1987 et 2000 ont été réalisées. Trois cartes de susceptibilité au glissement de terrain datant des années 1987, 2000 et 2017 ont été obtenues (figure 53, 54 et 57). Les valeurs de classe de la carte de susceptibilité de 1987 varient entre 6 et 41. Celles de la carte de susceptibilité de 2000 sont comprises entre 6 et 40. Les valeurs de classe de la carte de susceptibilité aux glissements de 2017 varient entre 6 et 39. Ces trois cartes ont été normalisées selon une échelle allant de 0 à 1 en appliquant la logique des floues « *linear membership function* ».

Les changements de l'occupation du sol durant la période 1987-2017 peuvent être considérés comme des scénarios montrant leur impact sur la susceptibilité au glissement de terrain. En 1987, le paysage côtier est occupé principalement par des terrains à couverture végétale et des formations sableuses qui constituent 30.66% et 48.69% respectivement de la superficie totale de la zone d'étude. Une légère régression est enregistrée pour l'année 2000, estimée à 17.47% pour la couverture végétale et 7.32% pour la formation sableuse. Concernant l'année 2017, la superficie de la couverture végétale a augmenté de 68.93%. Les formations sableuses ont enregistré par contre une forte régression (70.05%) à cause de la construction. D'après la conclusion du chapitre 3, il s'avère que l'extension de la surface bâtie est la force motrice de la modification de la morphologie littorale.

L'analyse visuelle de la carte de susceptibilité aux glissements relatifs à l'année 1987 montre que les zones les plus susceptibles à ce phénomène se localisent principalement dans le littoral de la commune de Mostaganem (figure 53). Les sites avec un degré de susceptibilité très faible à moyen se situent dans le littoral de la commune de Benabdelmalek Ramadane. Les sites près du tissu urbain présentent une très haute susceptibilité au glissement (figure 53). Le site de Kharrouba caractérisé par la présence de quelques constructions d'habitations, présente un degré moyen à très élevé de susceptibilité. Les alluvions continentales du quaternaire, la forte densité du réseau hydrographique, les valeurs de pente qui varient entre 0° et 25 ° et la présence d'un faible couvert végétal dans le site de Kharrouba augmentent le degré de susceptibilité au glissement de terrain. Sonactère est une plage énorme où une station de dessalement d'eau de mer est implantée et une centrale électrique est en cours de réalisation, elle se caractérise par un degré moyen de susceptibilité au glissement. Les zones de susceptibilité très élevée se localisent au niveau de la route nationale RN11. Cette dernière est installée dans un terrain sédimentaire présentant une pente dont l'inclinaison est >15º. Le littoral de Benabdelmalek Ramadane comprend quelques sites autour de la route nationale RN11 dont la susceptibilité aux glissements est très élevée. La majeure partie du littoral de Banabdelmalek Ramadane présente un degré de susceptibilité très faible à moyen en raison de la densité du couvert végétal qui augmente la stabilité des sols.

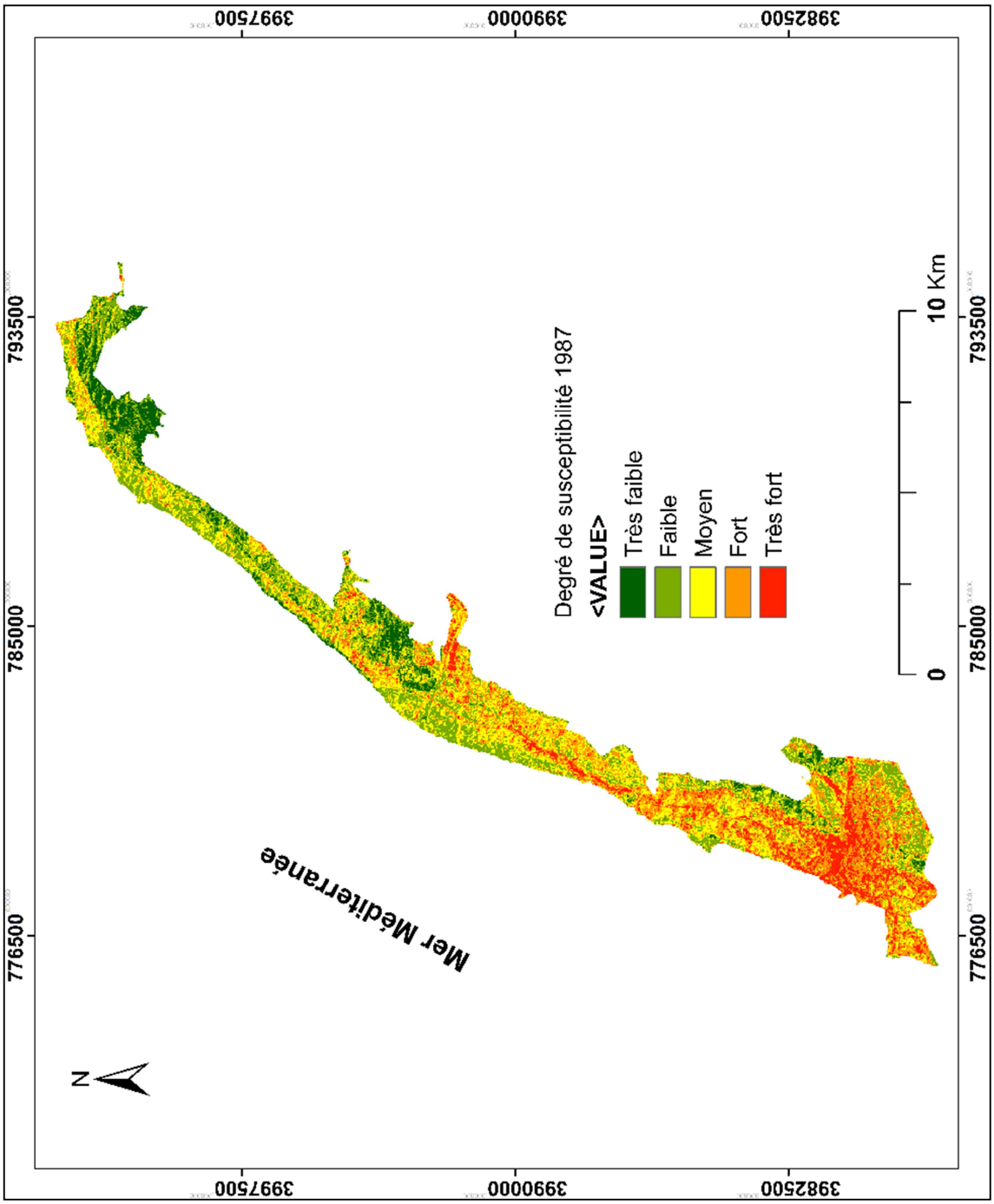


Figure 53 : Degré de susceptibilité au glissement de terrain pour l'année 1987 (littoral de Mostaganem)

L'an 2000 a marqué des changements importants en terme de morphologie littorale. La surface bâtie a enregistré un gain de 22.21% (soit 1044.82 ha en 1987 et 1148.27 ha en 2000). Jus qu'a cet an, de nombreux de projets de construction ont été lancés, cela est matérialisé par une nouvelle classe nommée : « sites de construction ». Cette classe occupe une superficie de 355.10 ha (Tab. 11). Ces projets sont situés principalement à Salamandre, Ain Safra (direction Sud, Sud-Est) et Kharrouba. En Analysant la carte de susceptibilité au glissement concernant

l'année 2000, ce sont les sites localisés principalement dans le littoral de Mostaganem qui présentent un fort à très degré de susceptibilité (figure 54).

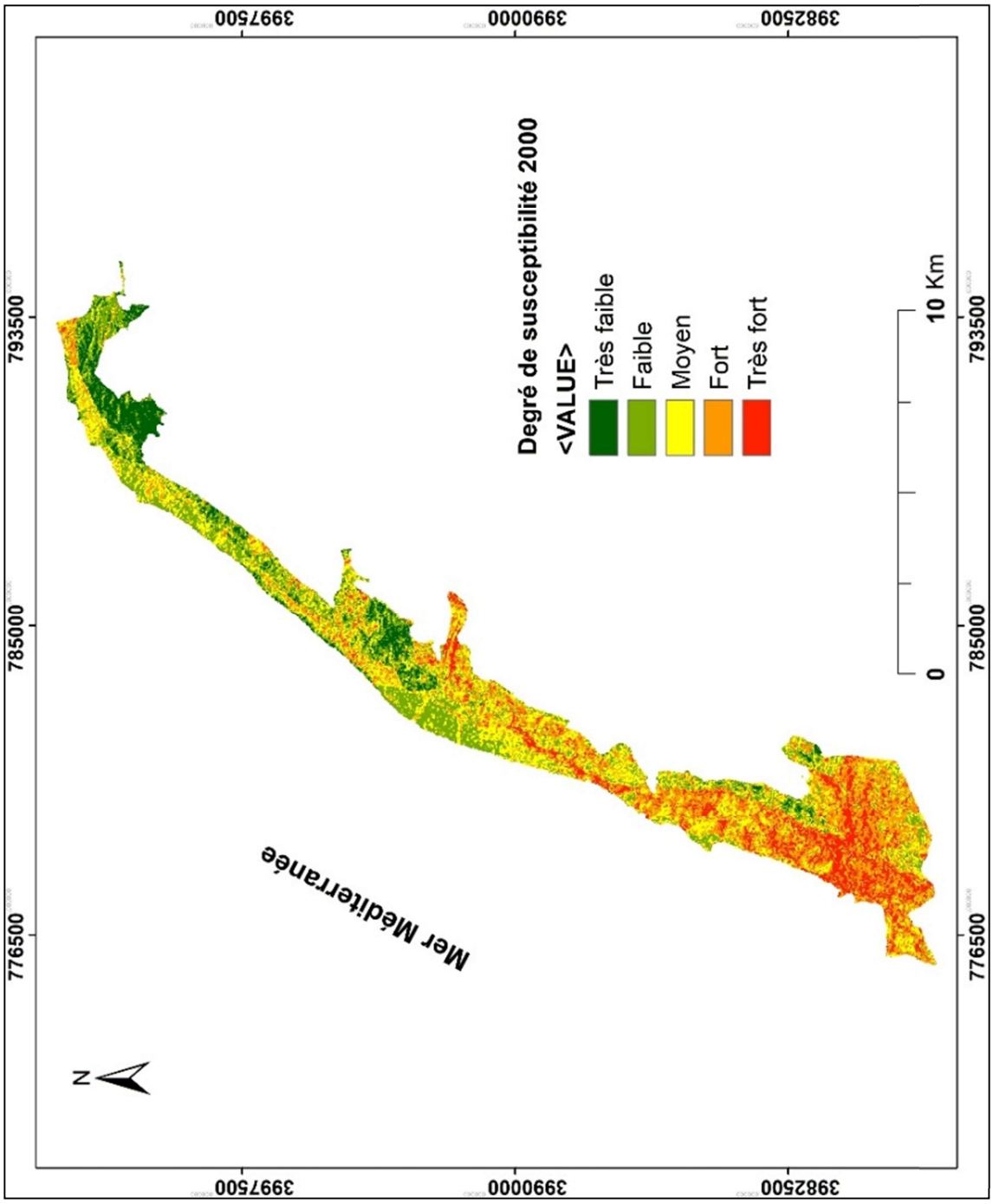


Figure 54 : Degré de susceptibilité au glissement pour l'année 2000 (littoral de Mostaganem)

Depuis 1987, nous avons noté grâce aux calculs réalisés à l'aide de l'*ArcMap* que le degré (fort et très fort) de susceptibilité aux glissements a enregistré une certaine augmentation en l'an 2000. Les zones à forte susceptibilité occupaient une superficie de 1268.73 ha en 1987 et

1367.54 ha en 2000. La classe du degré très fort était 592.44 ha en 1987 et 645.54 ha en 2000, soit un accroissement de 8.96%. Le degré moyen de susceptibilité concerne l'essentiel du littoral de Mostaganem. Durant la période 1987 et 2000, ces sites ont enregistré un déclin de 3.55% (Tab.11). Les sites présentant un degré de susceptibilité faible et très faible se localisent toujours dans les sites à forte densité végétale. Quelques sites dans la zone d'étude peuvent indiquer ces changements de susceptibilité :

Le site de Kharrouba, qui selon les paramètres géo environnementaux, est une zone fortement susceptible aux glissements de terrain. (figure 55a et b). Durant la période 1987-2000, le degré de susceptibilité au glissement a augmenté tel que l'illustre le carré 1 dans la figure 55a1 et a2). Le rectangle 2 de la figure 55 représente un site à forte susceptibilité au glissement de terrain. Ce site a connu durant la période 1987-2000, le lancement de nouveaux projets de construction

Tab.11: Degré de susceptibilité au glissement de terrain de l'année 1987, 2000 et 2017

Degré de susceptibilité	1987	2000	2017
Très faible	463.76	455.46	313.35
Faible	149675	1169.37	1159.89
Moyen	1354.25	1538.02	1592.42
Fort	1268.73	1367.54	1346.71
Très fort	592.44	645.54	76355

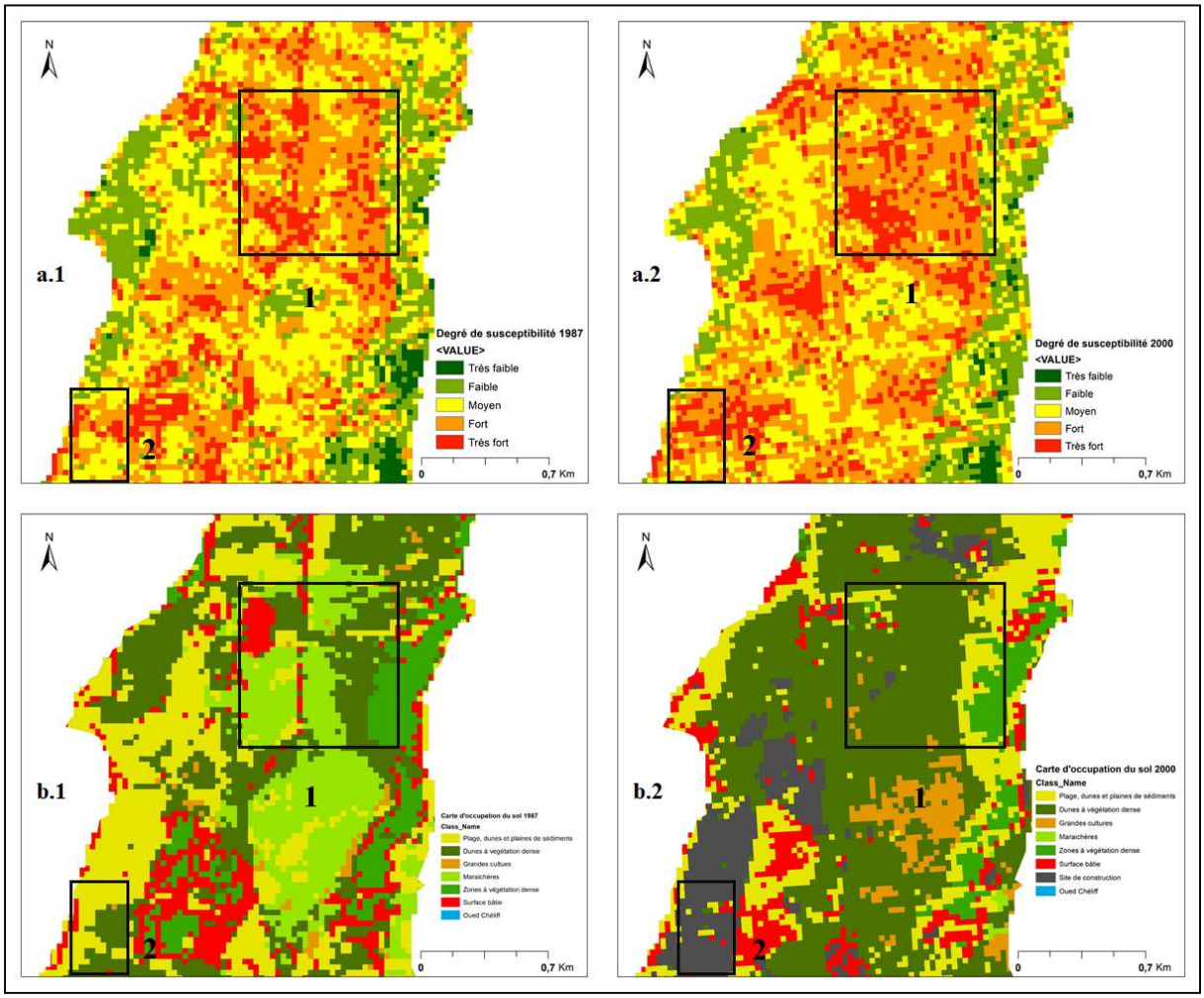


Figure 55 : Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité aux glissements dans le littoral de Kharrouba, littoral de Mostaganem (a.1 Degré de susceptibilité pour l'an 1987 ; a.2.Degré de susceptibilité en 2000 ; b.1. Occupation du sol en 1987, b.2. Occupation du sol en 2000

Au site Sud-Est de la zone d'étude, à la limite de la commune de Mostaganem et celle de Sayada, nous avons également noté que le degré de susceptibilité aux glissements (très faible, faible, moyen et fort) présente une tendance à l'augmentation (figure 56). La surface délimitée par les carrés 1 et 2 de la figure 56 (a.1 et b.1) montre les variations du degré de susceptibilité. Les carrés 1 et 2 de la figure 56 a.2 et b.2 montrent une transformation des différentes classes « plages, dunes et plaines formées de sable » et « les maraichères » en classes de « surface bâtie » et « sites de construction ». Ces changements sont accompagnés par une augmentation du degré de susceptibilité aux glissements (figure 56 a.1 et b.1).

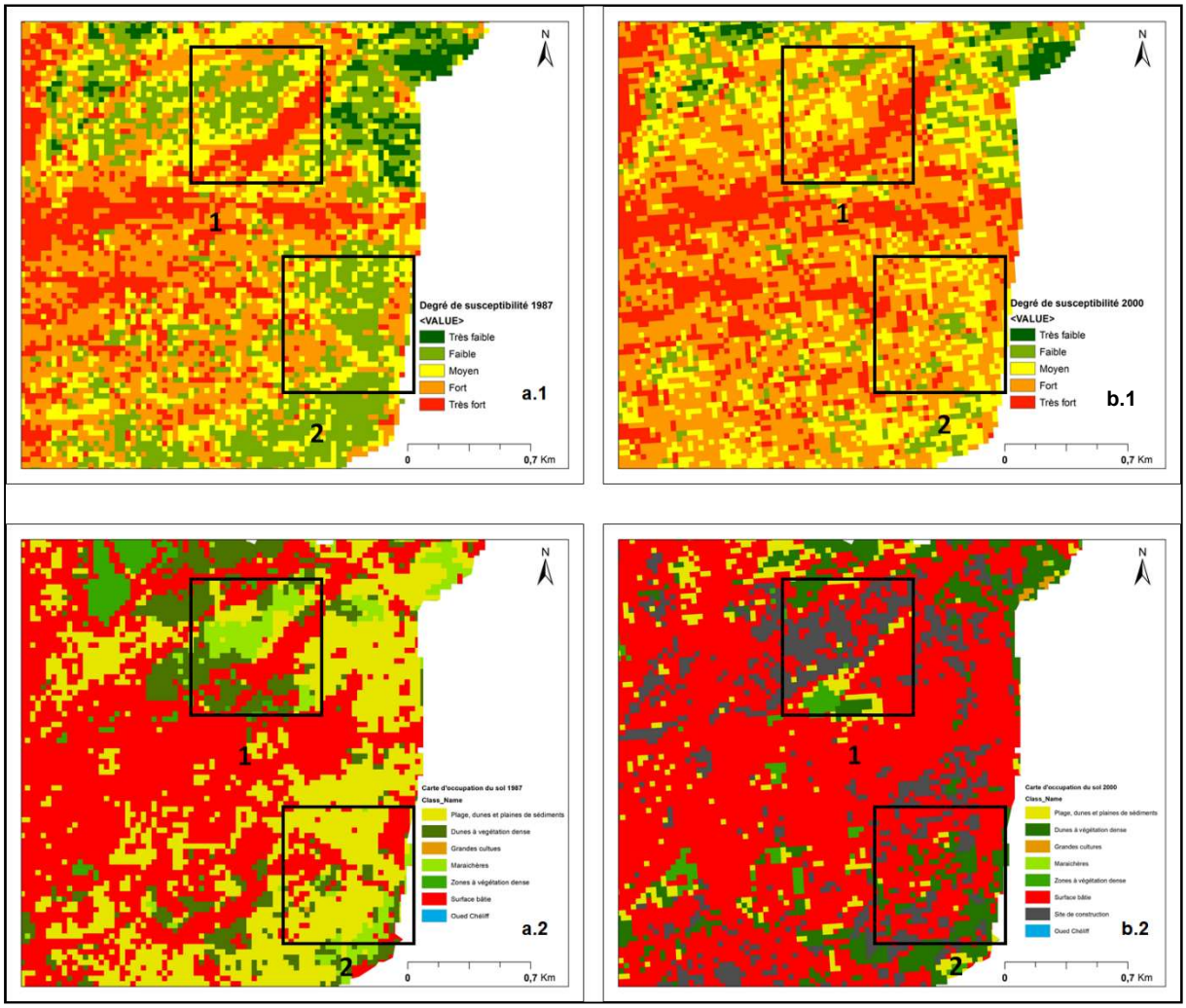


Figure 56: Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité au glissement durant la période 1987-2000, site direction Sud-Est du littoral de Mostaganem (a.1. Degré de susceptibilité en 1987 ; b.2.Degré de susceptibilité 2000 ; b.2. Occupation du sol 2000

Selon la carte de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem de 2017, le taux d'accroissement de la surface bâtie a atteint 53.13%. La classe de « sites de construction » a marqué également un certain accroissement estimé à 31.24%. Ces changements d'occupation du sol sont accompagnés avec une élévation du degré de susceptibilité (figure 57 ; Tab. 11).

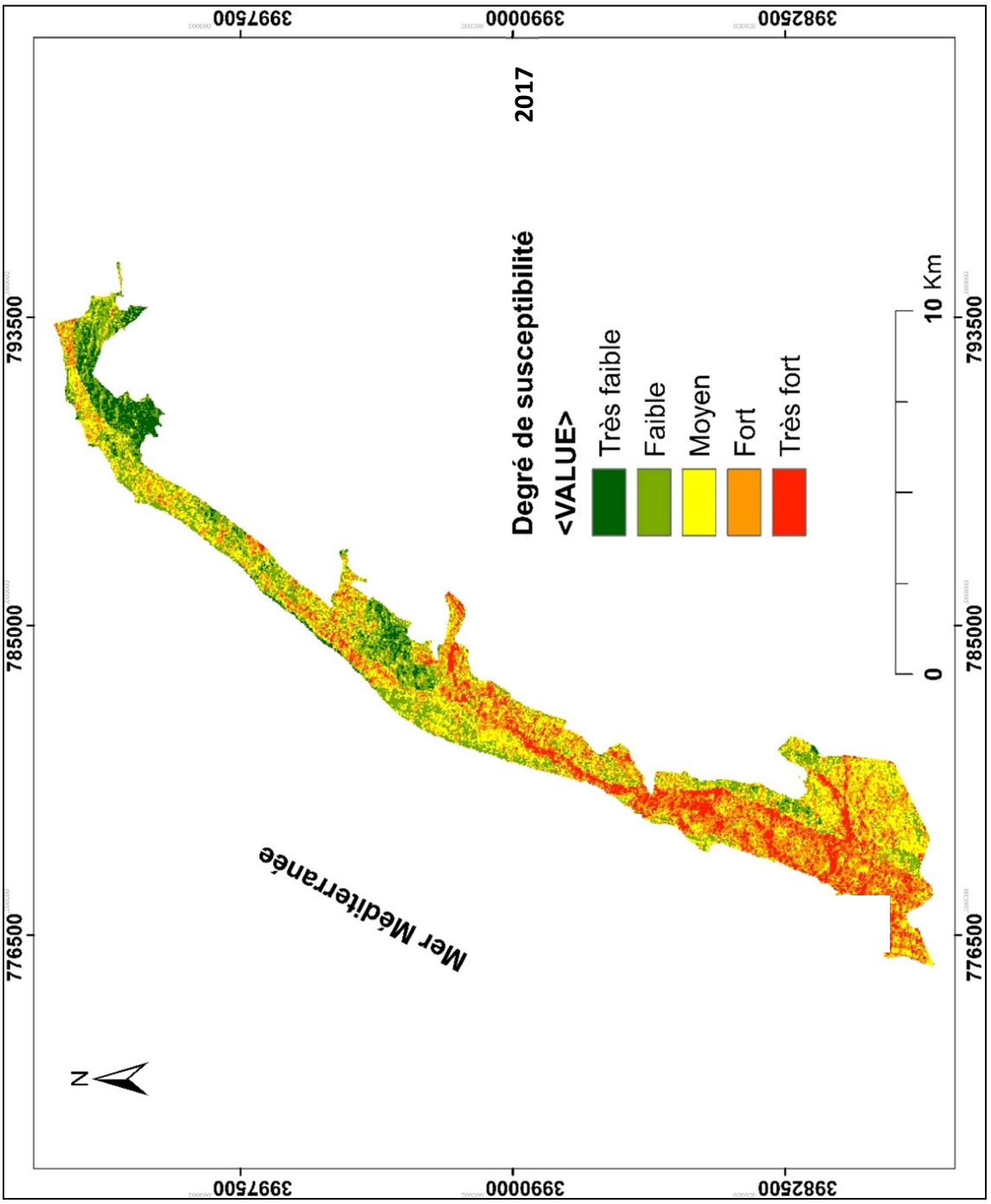


Figure 57 : Degré de susceptibilité au glissement de terrain pour l'année 2017 (littoral de Mostaganem)

Le site de Kharrouba est fortement susceptible aux glissements de terrain du fait qu'il ait connu une forte urbanisation durant la période 2000-2017 où de nombreux glissements de terrain ont été enregistrés (figure 58). Cette situation reflète l'insuffisance d'études d'impact et de planification.

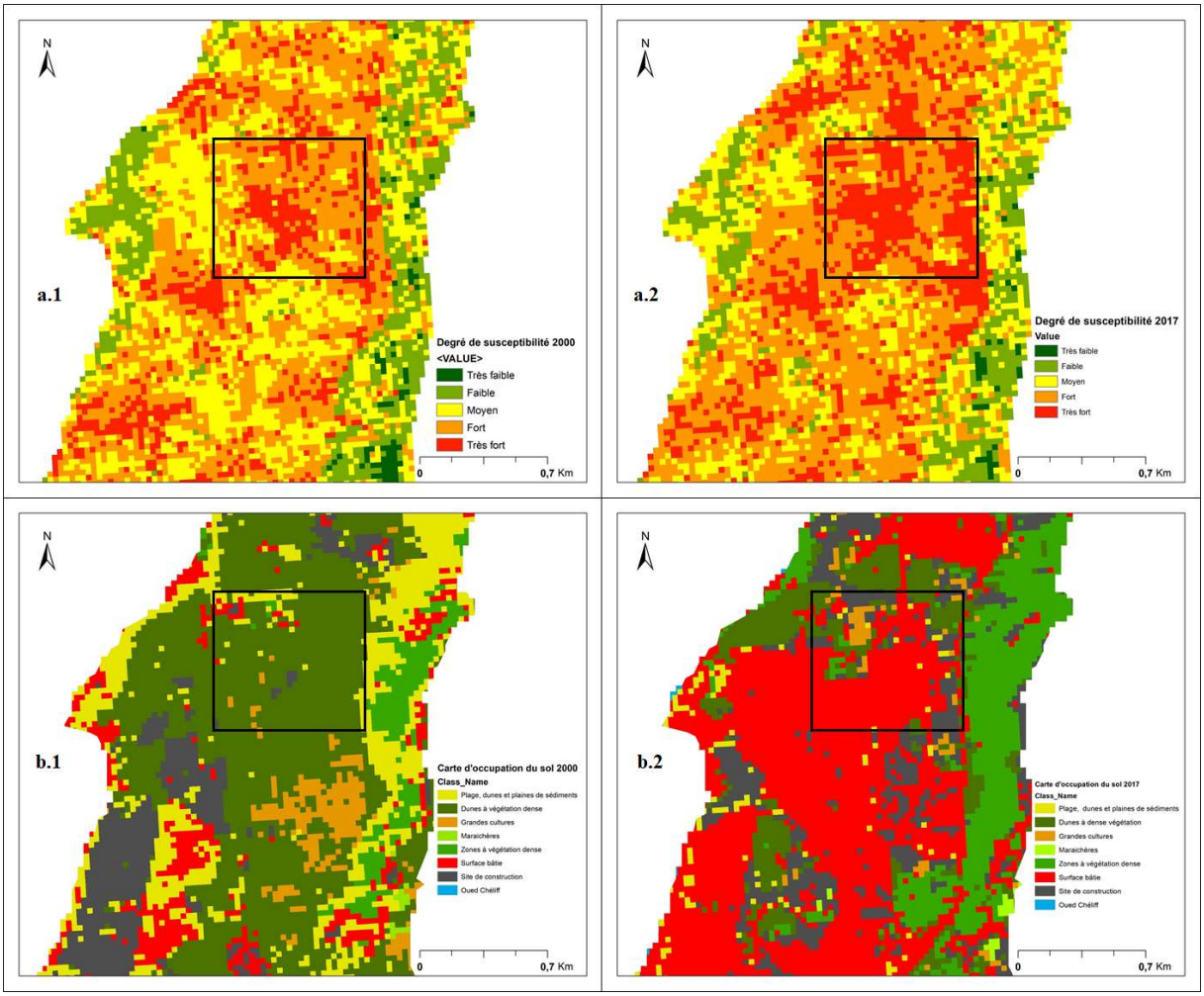


Figure 58: Impact du changement de l'occupation du sol sur le degré de susceptibilité au glissement durant la période 2000-2017 à Kharrouba. (a.1. Degré de susceptibilité en 2000 ; a.2. Degré de susceptibilité en 2017 ; b.1. Occupation du sol en 2000 ; b.2. Occupation du sol en 2017

5.2. Analyse de risque de glissement de terrain dans le littoral de Mostaganem

5.2.1 Méthodologie de travail

Dans ce travail, l'évaluation du risque de glissement de terrain est réalisée grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG). Nous proposons une méthodologie appliquée par (Malet *et al.,* 2006) en France et Abella et Varnes (2008) à Cuba (figure 59). Elle consiste en trois principales étapes :

1. Évaluation et cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain (présentées dans le chapitre 4.
2. Évaluation de la vulnérabilité « ou les conséquences potentiels » d'un évènement par l'identification des éléments exposés et l'analyse de leurs dommages éventuels. Les

conséquences potentielles sont évaluées selon une approche semi-quantitative (AHP). Elles sont catégorisées selon les aspects physique, social et environnemental. La carte globale de vulnérabilité est le résultat de la sommation des trois composantes.

3. Cartographie du risque de glissement dans le littoral de Mostaganem se fait par la combinaison des deux composantes : la susceptibilité et la vulnérabilité.

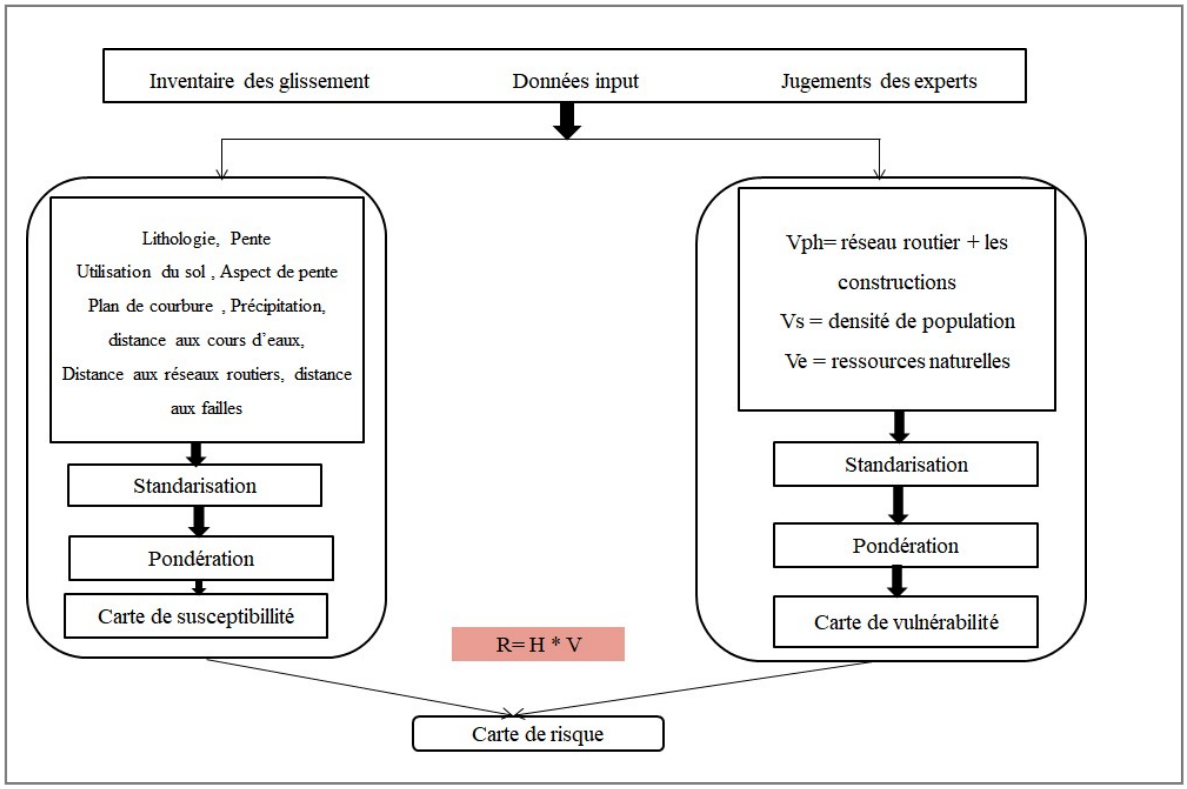


Figure 59: Méthodologie de travail

5.2.1.2. Cartographie de la vulnérabilité aux glissements de terrain dans le littoral de Mostaganem

La sélection des indicateurs de la vulnérabilité a été effectuée après l'analyse de travaux similaires (Léone, 1996 ; Malet et *al.,* 2006 ; Abella & Varnes, 2007). La vulnérabilité ou les conséquences éventuelles qui lui sont associées sont estimées selon une approche semi-quantitative. Cette technique est basée sur l'avis des experts et la connaissance du terrain. La zone d'étude a été limitée au littoral de la commune de Mostaganem et Benabdelmalek Ramadane. La partie du littoral incluant la commune de Sayada n'a pas été pas prise en compte en raison du manque de données démographiques la concernant. La méthode appliquée dans cette partie consiste, dans un premier temps, à déterminer les aspects de la vulnérabilité, à savoir physique, environnemental et social. Ces aspects de la vulnérabilité ont été choisis selon la

disponibilité des données et selon l'endommagement subi. Ensuite, une base de données géomatiques composée d'éléments se rapportant au glissement de terrain est élaborée. Les trois aspects peuvent être catégorisés selon :

Vulnérabilité physique

Elle concerne les conséquences potentielles liées aux réseaux routiers et aux habitations :

Paramètre concernant la construction

Il a été extrait de la carte de l'occupation du sol pour l'année 2017. La densité des constructions est inégale dans les communes de Mostaganem et Benabdelmalek Ramdane (Tab. 12). Le Chef-lieu de Mostaganem présente une forte densité de tissu urbain en comparant avec les sites de Aizeb, Sonactère et El Marsa (ex. Willis). Étant donné que le nombre de logements présente une forte corrélation avec la population. Afin d'intégrer ce paramètre dans l'évaluation des conséquences éventuelles, la densité des constructions a été calculée pour chaque domaine littoral en terme de limites administratives. Les cartes produites ont une résolution spatiale de 30 m (figure 60).

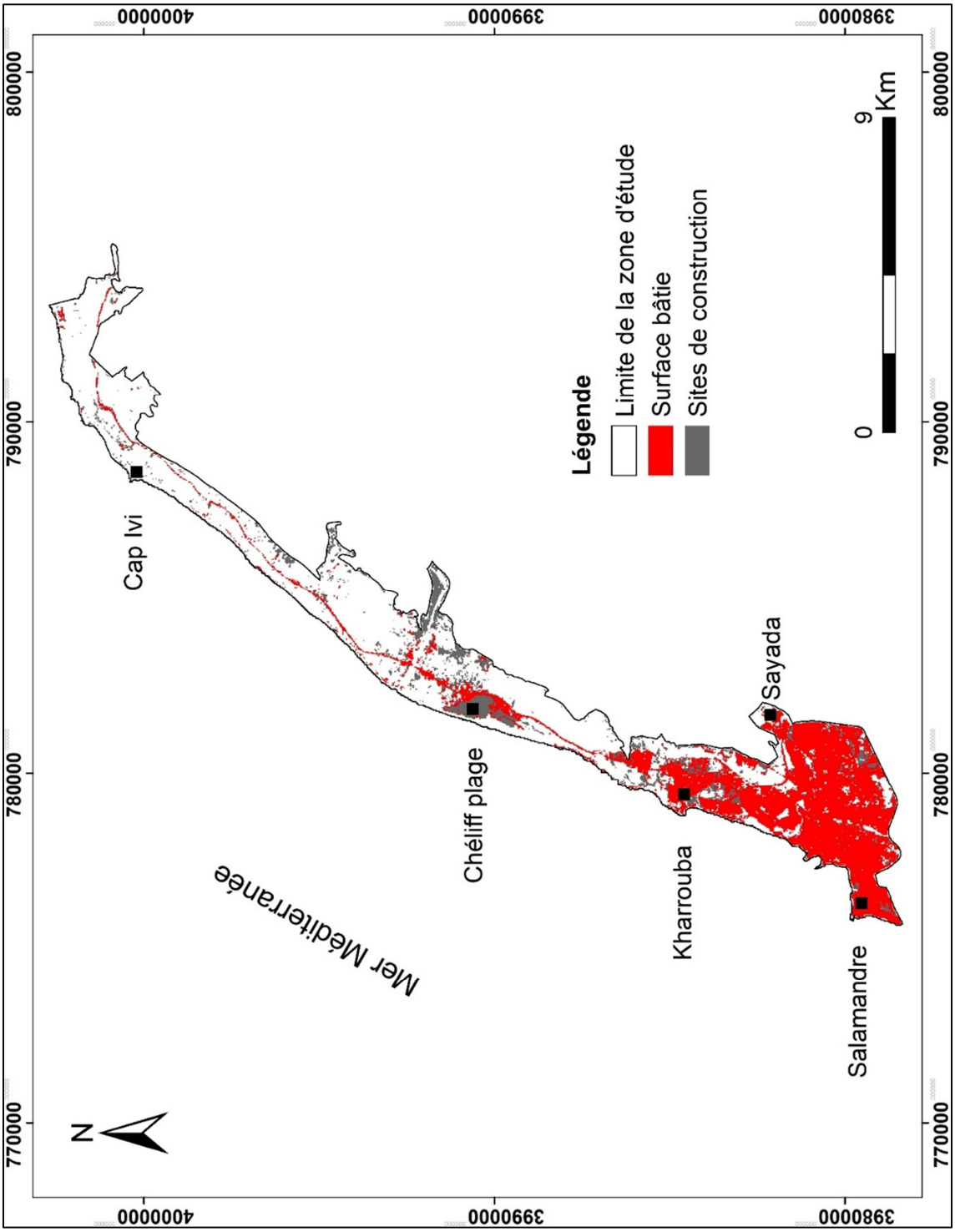


Figure 60: Construction d'habitations dans le littoral de Mostaganem (2017)

Réseau routier

Le réseau routier dans la zone d'étude se concentre principalement dans la commune de Mostaganem, le littoral de Benabdelmalek Ramadane est traversé par la route nationale RN11. Cette dernière est la principale route vers Mostaganem ; elle est construite sur un terrain

essentiellement sablonneux. Le réseau routier a été extrait du Google Road en utilisant le plug-in *QuickMapServices*. La densité du réseau routier est calculée en divisant la longueur du réseau routier par la superficie du domaine littoral de chaque commune (figure 61).

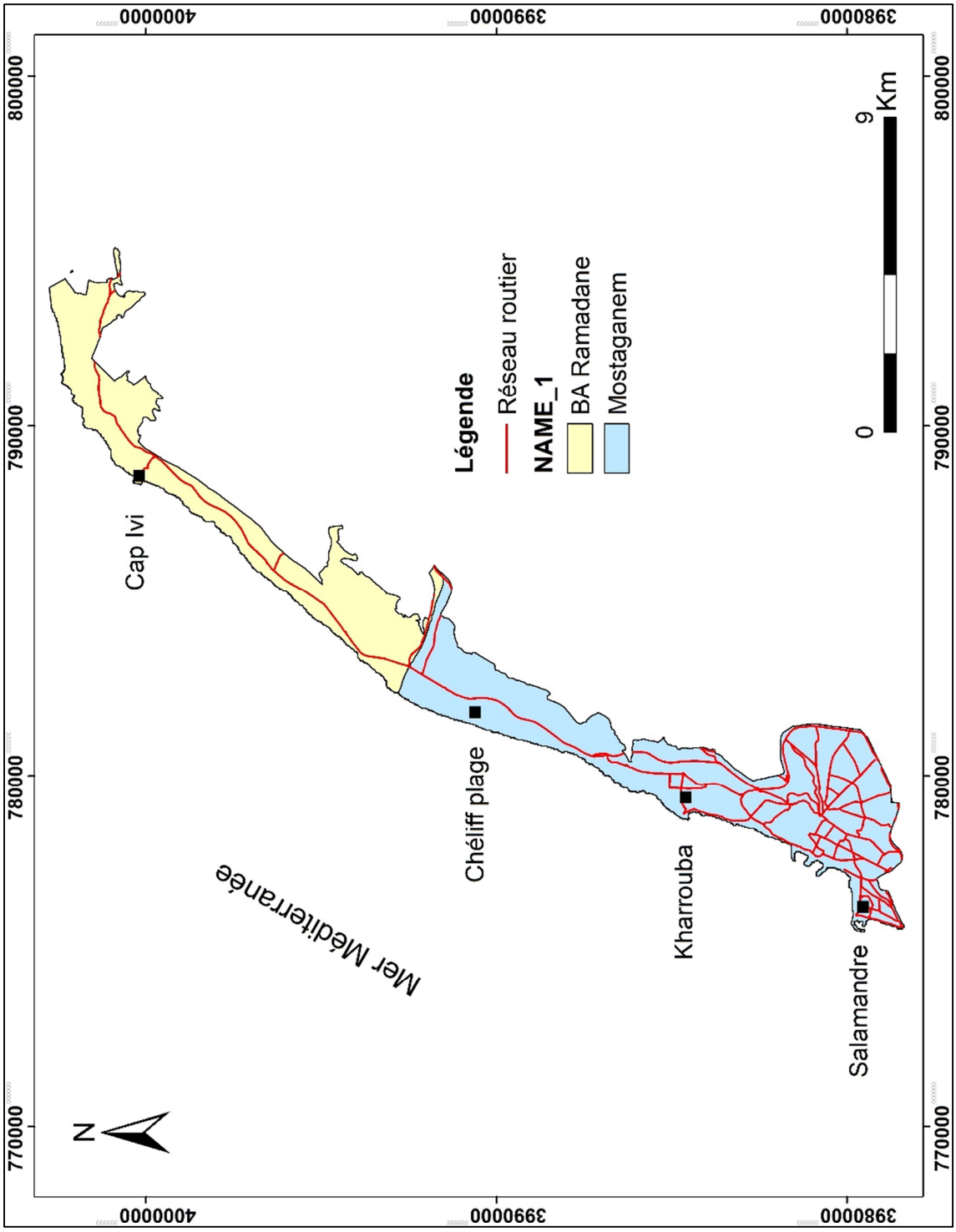


Figure 61: Densité du réseau routier du domaine littoral de Mostaganem et Benabdelmalek Ramadane

La détermination de la valeur de la vulnérabilité physique se fait selon l'équation suivante :

$$V_p = C_c + C_{r.r} \quad 16$$

Avec V_p : vulnérabilité physique ; C_c : Les conséquences potentielles des construction ; $C_{r.r}$: conséquences potentielles de réseaux routiers

Vulnérabilité environnementale (V_e)

Cet aspect comprend les « plages, dunes et les plaines formées de sable » et les « zones à dense végétation ». Il a été extrait de la carte de l'occupation du sol de 2017. Ce facteur est déterminé par la division de la superficie de ces classes par la superficie totale de chaque domaine littoral (figure 62).

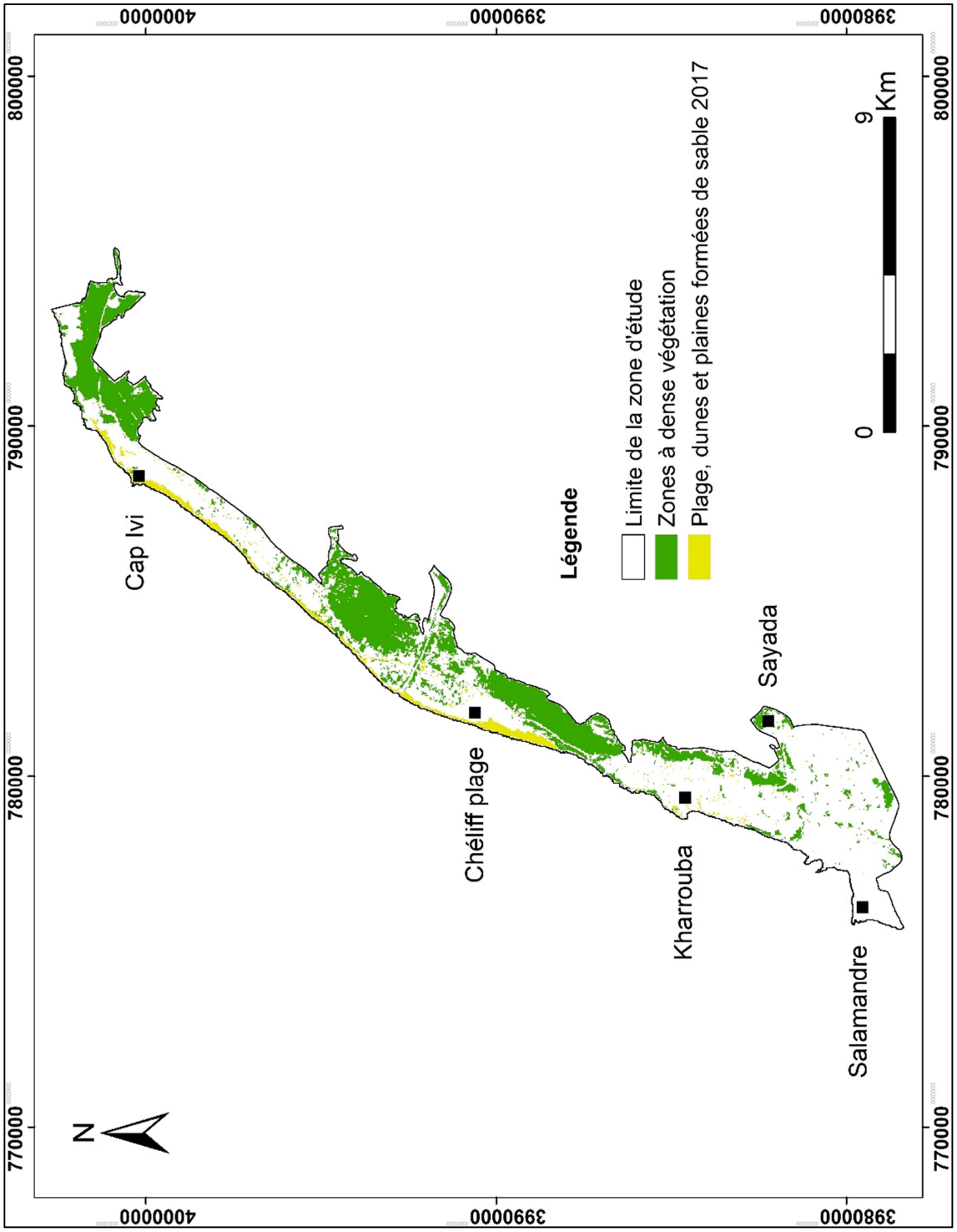


Figure 62 : Densité des ressources naturelles du littoral de Mostaganem

Vulnérabilité sociale (V_s)

La population a été épargnée de ce phénomène, mais cela n'empêche pas de déterminer les conséquences potentielles que pourrait subir la population mostaganémoise. Les quatre catégories de populations considérées sont les enfants dont l'âge est compris entre 0 et 5 ans. L'âge du genre féminin et masculin est compris entre 5 et 59 ans. L'âge des personnes âgées

est supérieur à 59 ans (figure 63A et B). Ces données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) ont été collectées auprès de la Direction de Programmation et de Suivi Budgétaire de Mostaganem (DPSB Ex DPAT). La vulnérabilité sociale est le résultat de la sommation de ces quatre indicateurs. Elle peut s'écrire comme suit :

$$V_s = C_e + C_{gf} + C_{gm} + C_v \qquad 17$$

Avec C_e sont les conséquences potentielles que subissent les enfants ; C_{gf} : conséquences potentielles du genre féminin, C_{gm} : conséquences potentielles du genre masculin et C_{pa} : conséquences potentielles des personnes âgées.

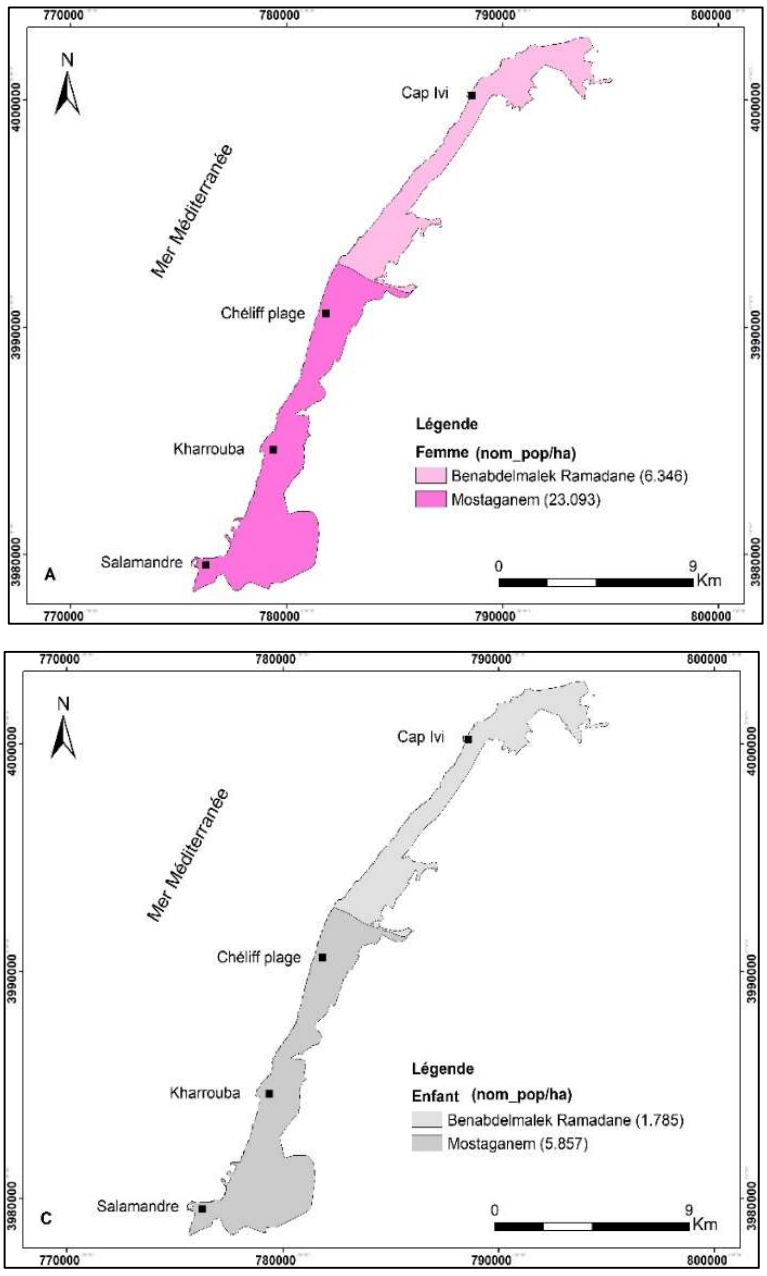


Figure 63A : Densité de la population (littoral de Mostaganem)

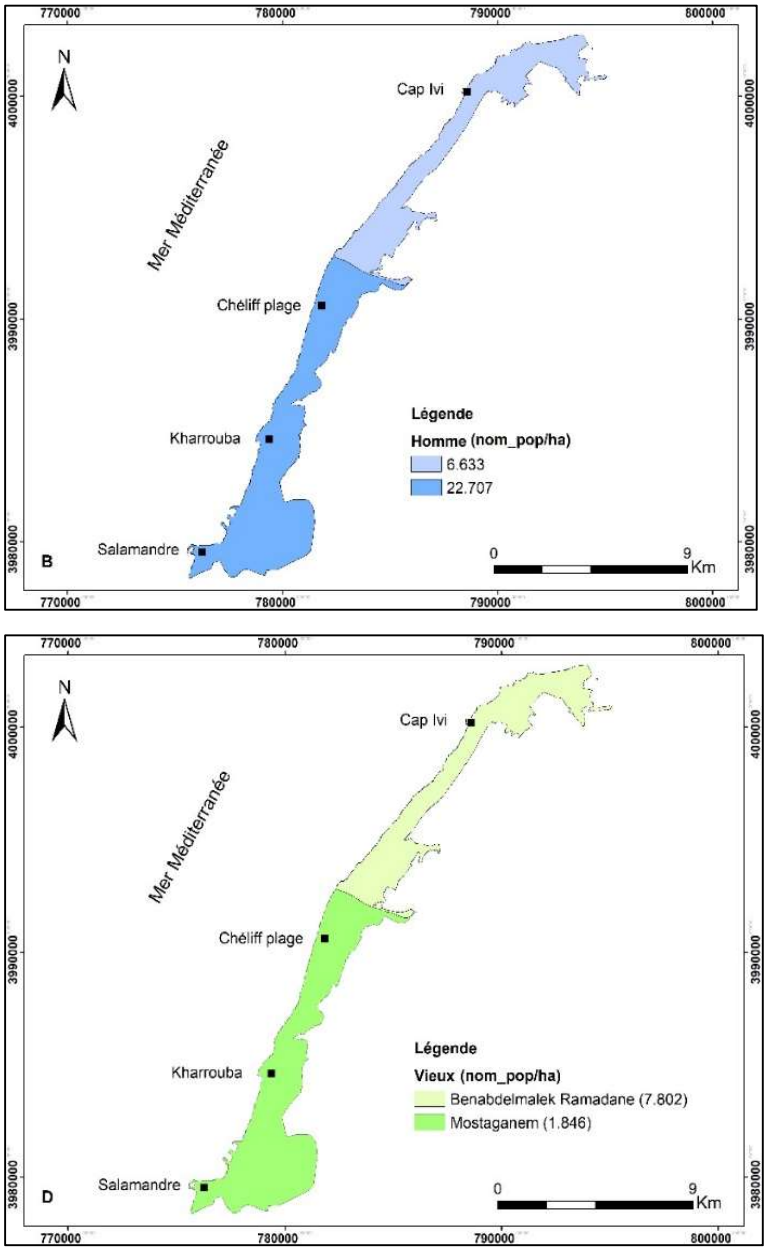


Figure 63B : Densité de la population (littoral de Mostaganem)

Tab.12: Densité des éléments de vulnérabilité

	Domaine littoral de Mostaganem		Domaine littoral de B. Ramadane	
	Densité	Classement	Densité	Classement
Vulnérabilité physique				
Construction	0.92	5	0.09	2
Réseau routier (km^{-1})	6.1	5	1.3	2
Vulnérabilité environnementale				
Ressources naturelles	0.129	2	0.630	5
Vulnérabilité sociale (nombre population/ha)				
PopGf	23.09	5	6.35	2
PopGm	22.71	5	6.63	2
Enfant	5.86	4	1.79	2
Vieux	1.85	2	7.80	4

5.2.1.3. Détermination du poids des paramètres

Afin de déterminer la vulnérabilité du littoral de Mostaganem. Les paramètres ont été classés selon une échelle numérique de 1 à 5. Les valeurs les plus faibles de classe ont été assignées aux très faibles conséquences potentielles. Les valeurs les plus élevées correspondent aux fortes conséquences potentielles dues aux glissements de terrain. L'attribution des valeurs de classe se base sur l'expertise (Tab.12). Le littoral de la commune de Mostaganem est considéré comme une référence en raison de la densité de la population, réseau routier et le taux d'activités anthropiques.

Les trois composantes de la vulnérabilité totale ; vulnérabilité physique, environnementale et sociale ont un poids différent. Selon l'analyse des données collectés et nos recherches de terrain. Les enjeux physiques du littoral de Mostaganem influencent fortement la vulnérabilité totale. Le poids des facettes a été déterminé en appliquant la méthode Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP).

La combinaison des trois facettes de vulnérabilités (physique, environnementale et sociale) permet d'évaluer la vulnérabilité totale selon l'équation suivante :

$$V = V_s + V_p + V_e \qquad 18$$

La vulnérabilité totale peut s'exprimer selon 3 degrés : faible, moyen et fort (Tab. 13)

Tab. 13 :Description de degré de vulnérabilité selon Malet et *al*., (2006)

Degré de vulnérabilité	Définition
Faible	Dommage et perturbations des activités économiques très faible
Moyen	Pas de blessés, des dommages de construction et le réseau routier sont moyens
Fort	Des blessés, perturbation forte des activités humaines

5.2.1.4. Cartographie et analyse du risque de glissement

Afin de déterminer les éventuelles menaces pour la population, ses biens et ses activités, la susceptibilité et la vulnérabilité sont combinées afin d'être traduites en une carte de risques dans une matrice à double entrée (figure 64) (Malet *et al.,* 2006). Dans notre cas d'étude, deux cartes de risque ont été produites. La première est le résultat de la combinaison de la carte de susceptibilité, produite par la méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI) et la carte de vulnérabilité. La deuxième carte a été réalisée en combinant la carte de vulnérabilité et la carte de susceptibilité, produite selon l'AHP combiné avec la WOM.

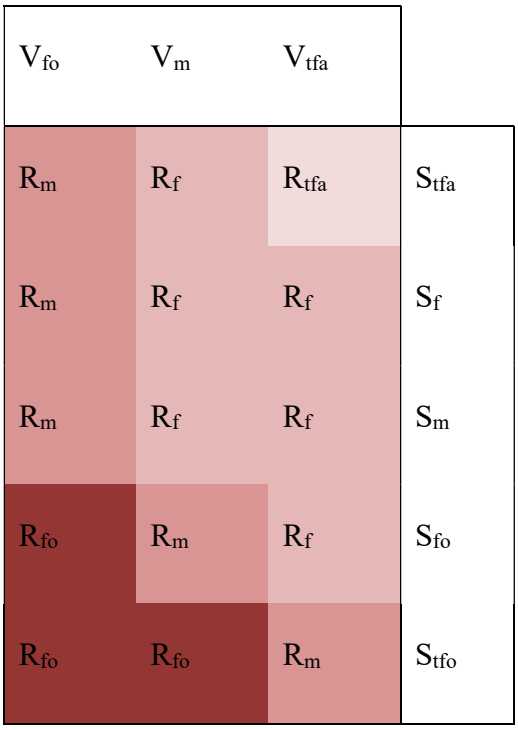


Figure 64: Matrice de la combinaison de la susceptibilité et la vulnérabilité

En se basant sur la classification de Natural Breaks (Jenks) (Ba *et al.,* 2017), la carte de risques est classifiée en quatre degrés : Très faible, faible, moyen et fort (Tab. 14).

Tab.14 :Degré de risque de glissement de terrain (Malet et *al.,* 2006)

Degré de risque	Définition
Très faible	La menace sur les enjeux et les bienfaits est très faible
Faible	La menace sur les enjeux est faible
Moyen	La menace sur les enjeux est modérée ; les dommages dans les logements et les routes sont à prendre en compte. Cette zone pourrait considéré inconstructible
Fort	Les menaces sur les enjeux sont élevées ; destruction forte des constructions et perturbation importante de activités humaines. Dans ces sites, tout type de construction est interdit.

5.2.2. Résultats et discussions

5.2.2.1 Cartographie de la susceptibilité au glissement de terrain

L'évaluation de la susceptibilité au glissement dans le littoral de Mostaganem a été faite selon deux approches : la Combinaison de Carte d'Index (CCI) et l'approche basée sur l'analyse multicritère (AHP) combinée à la méthode de superposition pondérée (WOM). Neufs paramètres ont été analysés d'une manière exhaustive afin de produire la carte de susceptibilité. Ces paramètres sont : la lithologie, la pente, l'occupation du sol, l'exposition, plan de courbure, précipitations, distance aux cours d'eau, distance au réseau routier, distance aux failles. La production des cartes de susceptibilité a été faite dans le logiciel *ArcGIS 10.5.1*. L'analyse de ces cartes de susceptibilité a montré que les caractéristiques lithologiques constituent un facteur important pour l'occurrence des glissements de terrain. Les sites les plus susceptibles se situent au niveau du noyau urbain.

5.2.2.2. Cartographie de la vulnérabilité

Le classement des paramètres de vulnérabilité a été fait selon une échelle de 1 à 5, chaque domaine littoral est considéré comme une classe. Le tableau 12 montre les différentes valeurs assignées aux classes des paramètres. Le poids des trois composantes de vulnérabilité a été calculé en appliquant le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). La valeur de CR est inférieure à 10 %. Cela montre que les différents jugements sont compatibles (Pourghasemi *et al.,* 2012).

En se basant sur la densité des enjeux par commune, le degré de vulnérabilité a été déterminé selon les jugements des experts. La carte de vulnérabilité est produite selon

l'équation (18). Les valeurs de classe de la carte de vulnérabilité varient entre 1.11 et 2.14 (figure 65).

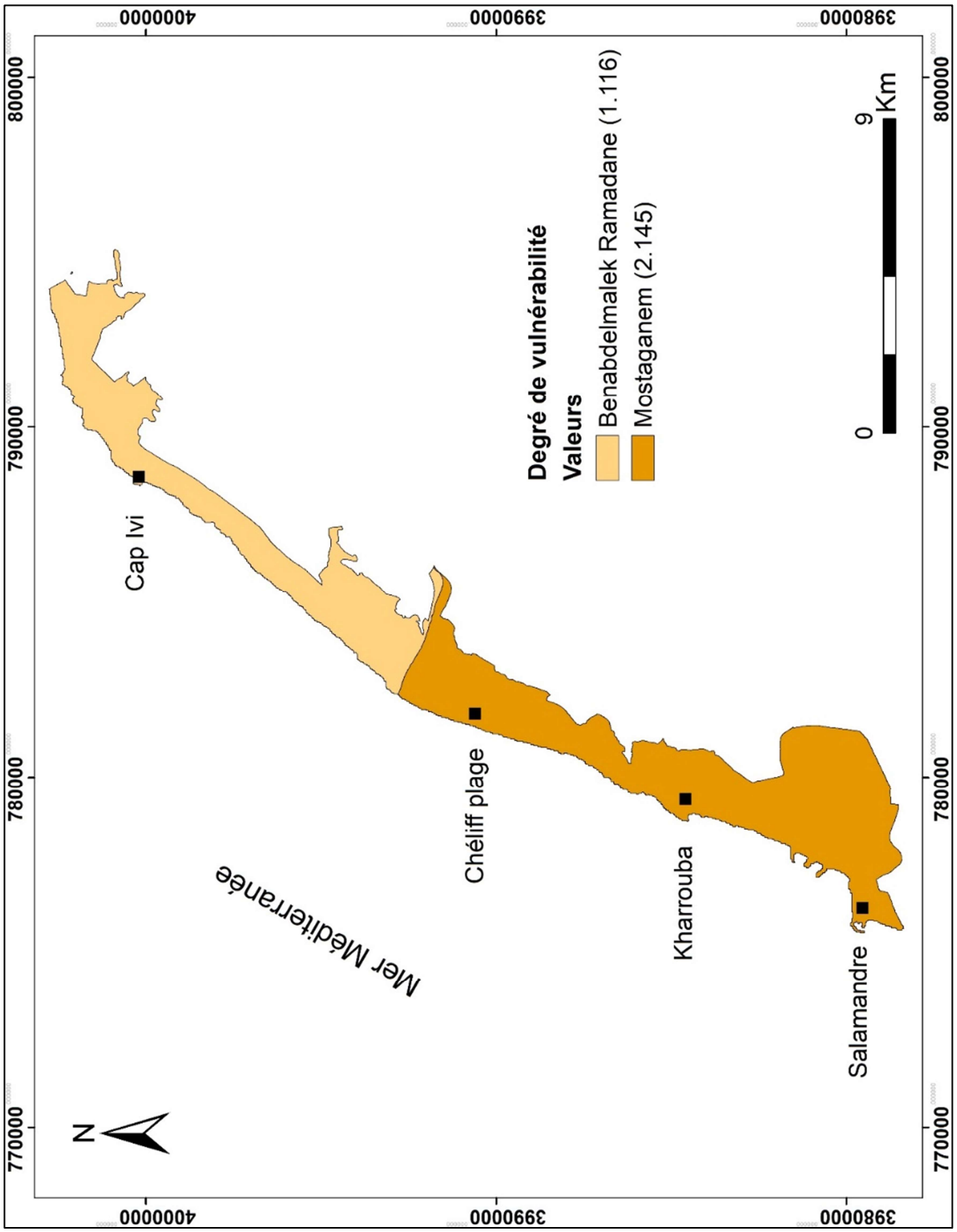


Figure 65: Vulnérabilité au glissement de terrain (littoral de Mostaganem, 2019)

Notre zone d'étude est catégorisée en deux classe de vulnérabilité faible et fort (figure 65). Selon l'analyse de cette figure, le littoral de la commune de Mostaganem se caractérise par une forte vulnérabilité où les valeurs de classes peuvent atteindre 2.14. Cela est dû au fait que la commune de Mostaganem se caractérise par son importance socio-économique matérialisée par la forte démographie, la densité du réseau routier et le tissu urbain. À Benabdelmalek Ramadane, les menaces sur les enjeux de la population sont par contre faibles car cette commune est moins dense en terme de biens matériels.

5.2.2.3. Evaluation du risque de glissement de terrain

La combinaison des deux cartes de susceptibilités normalisées avec la carte de vulnérabilité a permis de produire deux cartes de risques. Ces cartes présentent les mêmes valeurs de classes qui varient entre 0 et 1.31. En se basant sur la classification de Natural Breaks (Jenks), chacune des deux cartes ont été catégorisées en 4 classes (très faible, faible, moyen et fort) (figure 66). L'analyse visuelle de ces cartes montre que le littoral de la commune de Mostaganem présente un degré élevé en terme de risques (figure 66).

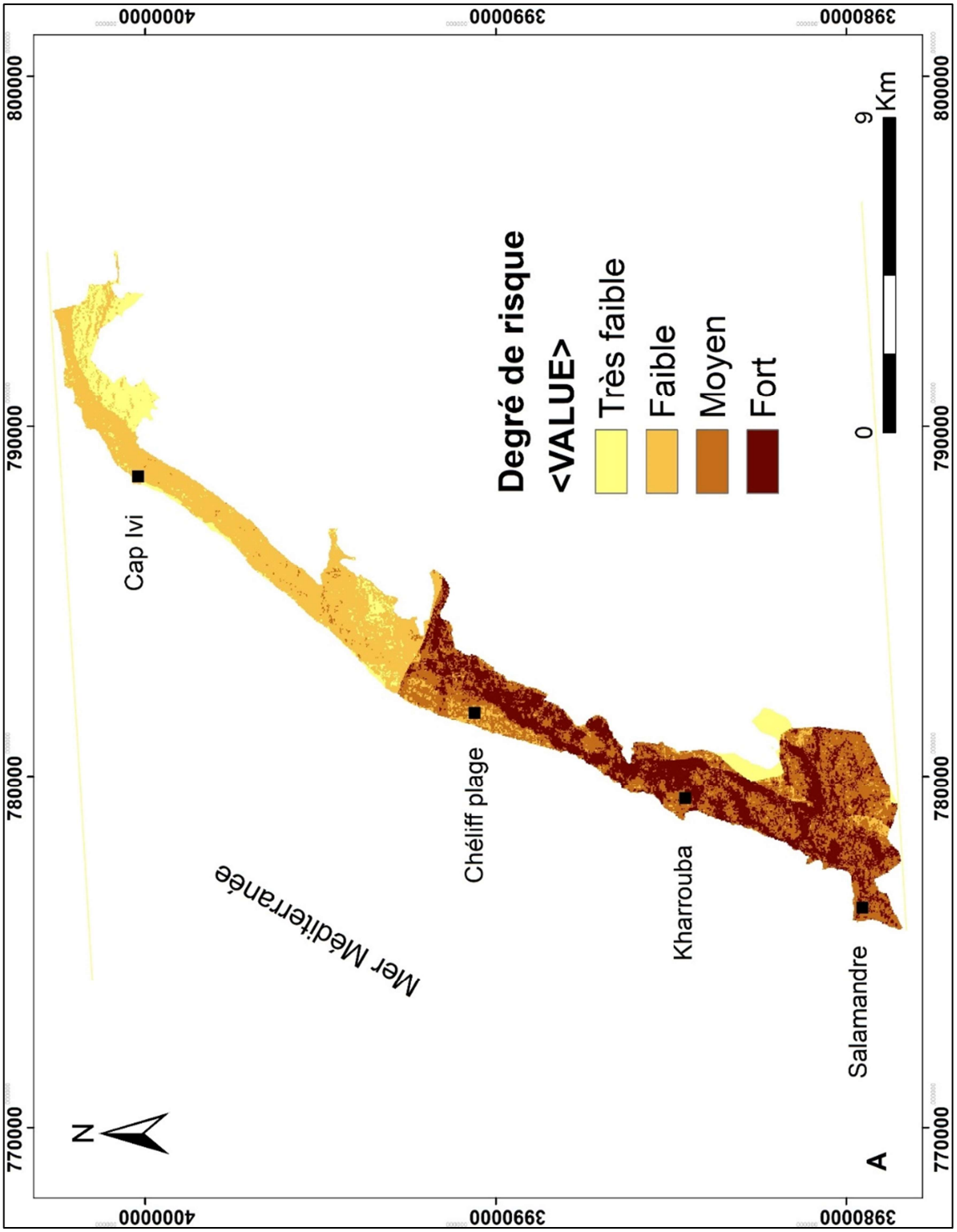


Figure 66 A: Carte de risque du littoral de Mostaganem produite selon la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI),

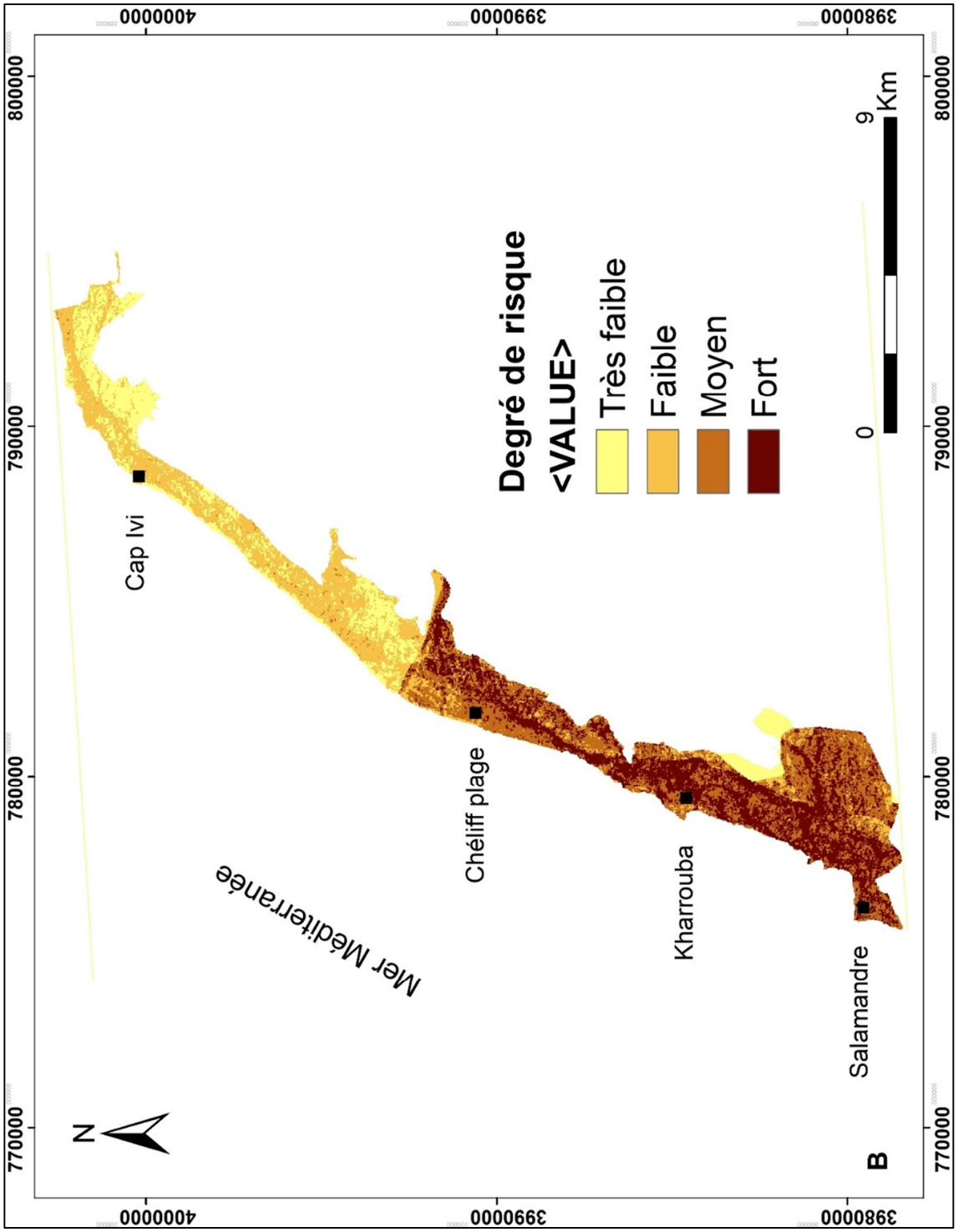


Figure 66 B: Carte de risque du littoral de Mostaganem produite selon la méthode AHP combinée au WOM

En comparant les deux cartes (figure 66 A et B). La majeure partie du littoral de Benabdelmalek Ramadane enregistre un risque très faible à faible. En se basant sur la méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI), ces deux classes (très faible et faible) occupent respectivement une superficie de 402.10 ha et 1548.49 ha. La carte générée à la base de AHP combinée au WOM montre que les classes très faible et faible occupent une superficie de 766.76

ha et 1358.55 respectivement. Les sites à moyen et à fort degré se localisent principalement dans le littoral de Mostaganem. Elles couvrent une superficie de 1278.59 ha et 1770.55 ha respectivement, ce calcul est basé sur la méthode Combinaison de Carte d'Index. Selon la méthode de l'AHP combinée au WOM, la classe avec un degré moyen de risque couvre une superficie de 1448.00 ha (soit 28.96%). La classe du risque le plus élevé occupe une surface de 1426.14 ha (Tab. 15).

Tab. 15: Degré de risque dans le littoral de Mostaganem

	Connaissance des experts			**AHP combiné au WOM**		
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Densité	Superficie (ha)	Superficie (%)	Densité
Très faible	402.10	8.04	0	766.76	15.34	1
Faible	1548.49	30.97	5	1358.55	27.17	4
Moyen	1278.59	25.57	1	1448.00	28.96	2
Fort	1770.55	35.41	11	1426.14	28.53	10

La faible vulnérabilité du littoral de Benabdelmalek Ramadane est due au fait que les infrastructures routières et les habitations soient bien réparties sur une grande surface évitant toute densification urbaine (0.09 et 1.3 km^{-1}). Ces deux paramètres sont les principaux facteurs qui ont influencé la vulnérabilité de cette commune. Selon les données collectées, il est possible d'observer que 29 % des cas de glissements sont enregistrés dans le domaine littoral de Benabdelmalek Ramadane. Il est noté que la densité de la population avec ses différentes composantes a eu la moins influence sur la vulnérabilité de Benabdelmalek Ramadane (Tab. 12). En Analysant la carte produite selon la méthode Combinaison de Carte d'Index (CCI) (figure 66A), nous remarquons que la superficie du degré de risque fort est la plus importante, elle est estimée à 35.41 %. La carte de risque produite à la base de la méthode AHP combinée au WOM montre que le taux de degré de risque moyen et fort sont presque similaires. Il est possible d'observer également que le site de Kharrouba et le chef-lieu de Mostaganem sont les sites présentant un risque fort. Selon la figure 66, le site de Sonactère présente un degré moyen à élevé de risque.

Une étude d'évaluation du risque au glissement dans les communes littorales de Mostaganem et Mazagran a été faite par Senouci *et al.,* (2020). Cette étude consiste à combiner l'aléa et la vulnérabilité. L'analyse de l'aléa s'est basée sur l'utilisation de la télédétection, les

systèmes d'information géographiques (SIG) et la collecte des données de terrain. Six paramètres ont été combinés afin de produire la carte de l'aléa : la géomorphologie a été extraite de la carte de la carte géologique de Mostaganem (1/50 000). En utilisant la carte topographique, les courbes de niveau ont été numérisées. En appliquant la fonction IDW (*Inverse Distance Weighting*) de *QGIS* 3.8.0, l'élévation a été produite avec une résolution spatiale de 15 m. La pente a été extraite en utilisant la fonction « *slope* » du logiciel *ArcGIS* 10.5.1. En utilisant la fonction Gram-Schmidt (GS) Sharpening du logiciel *ENVI* 4.8, la résolution spatiale de l'image satellitaire *Landsat 8 OLI* (acquis le 26 mars 2017) a été améliorée en 15 m. En utilisant, l'algorithme *Maximum likelihood*, le paramètre occupation-utilisation du sol a été extrait. Le réseau de drainage a été dérivé en digitalisant la carte topographique de Mostaganem (1/25 000). Le paramètre distance au réseau de drainage a été calculé avec un intervalle de 50 m. La précipitation a été dérivée de la carte des précipitions d'Algérie (1/200 000). La distance aux failles a été calculé à un intervalle de 100 m. Ces paramètres ont été pondérés selon une échelle de 1-9. En utilisant « *Weigthted Linear Combination method* » (WLC), ces paramètres ont été combinés afin de produire la carte de l'aléa (Bourenane *et al.,* 2016 ; Akgun *et al.,* 2012 ; Sari *et al.,* 2017 ; Lee, 2006 ; DPSG, 2016 ; Thywissen, 2006) (figure 67).

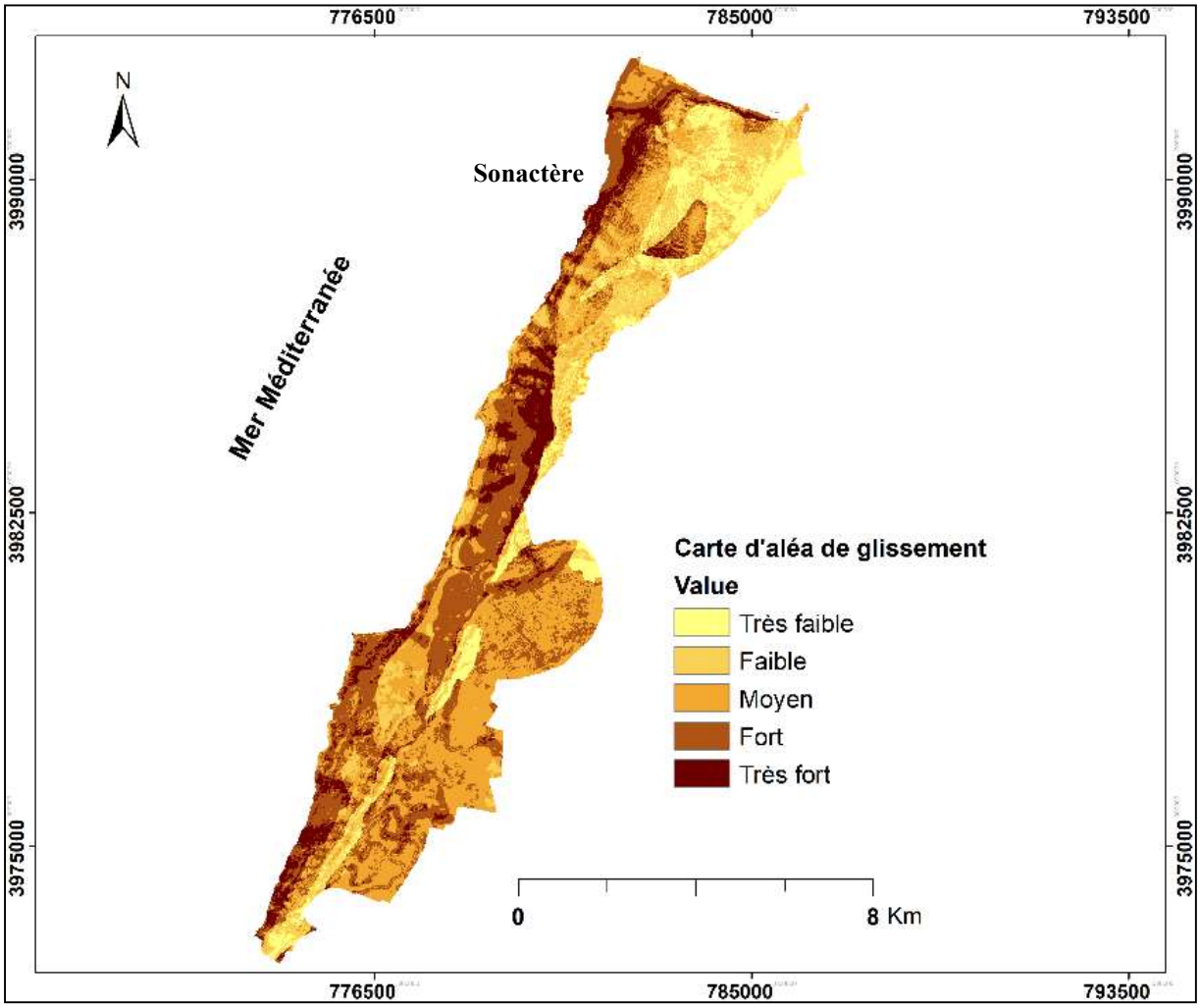


Figure 67: Degré d'aléa de glissement de terrain à Mostaganem et à Mazagran(2017)

Selon cette carte d'aléa (figure 67), les caractéristiques géomorphologiques de la zone étudiée constituent un facteur important dans l'apparition des glissements de terrain. Les sites les plus hasardeux sont principalement situés dans la commune de Mostaganem. Cette classe couvre une superficie de 629 ha (soit un taux de 10.48% de la superficie totale). Dans ces deux communes, les zones à fort et très fort aléa sont situées principalement dans des sites formés de dunes consolidées et dans les terrains à éboulis. L'occurrence des glissements de terrain dans la zone d'étude est due également à la forte densité du réseau hydrographique qui traverse les terrains sédimentaires. D'après nos enquêtes sur terrain, les plages et les dunes ont fait l'objet d'une extraction illicite à Kharrouba et Salamandre. La classe de degré modérée occupe une superficie de 1972 ha (Tab. 16) ; elle occupe des sites présentant une faible pente, situés principalement sur des terrains sédimentaires à proximité du noyau urbain (direction Sud-Est). Les zones à très faible et faible degré d'aléa de glissement de terrain sont situées dans des sols à dense végétation où les racines les stabilisent et réduisent leur érosion.

Tab.16:Superficie des degrés d'aléa

Degré d'aléa	Superficie (Km^2)	Superficie (%)
Très faible	6.13	10.21
Faible	9.90	16.51
Moyen	19.72	32.90
Fort	17.92	29.89
Très fort	6.29	10.48

La carte de vulnérabilité des communes de Mostaganem et Mazagran a été produite en combinant quatre aspects de vulnérabilité (social, économique, physique, environnemental). L'analyse de cette carte montre que la commune de Mostaganem présente une très forte vulnérabilité (figure 68).

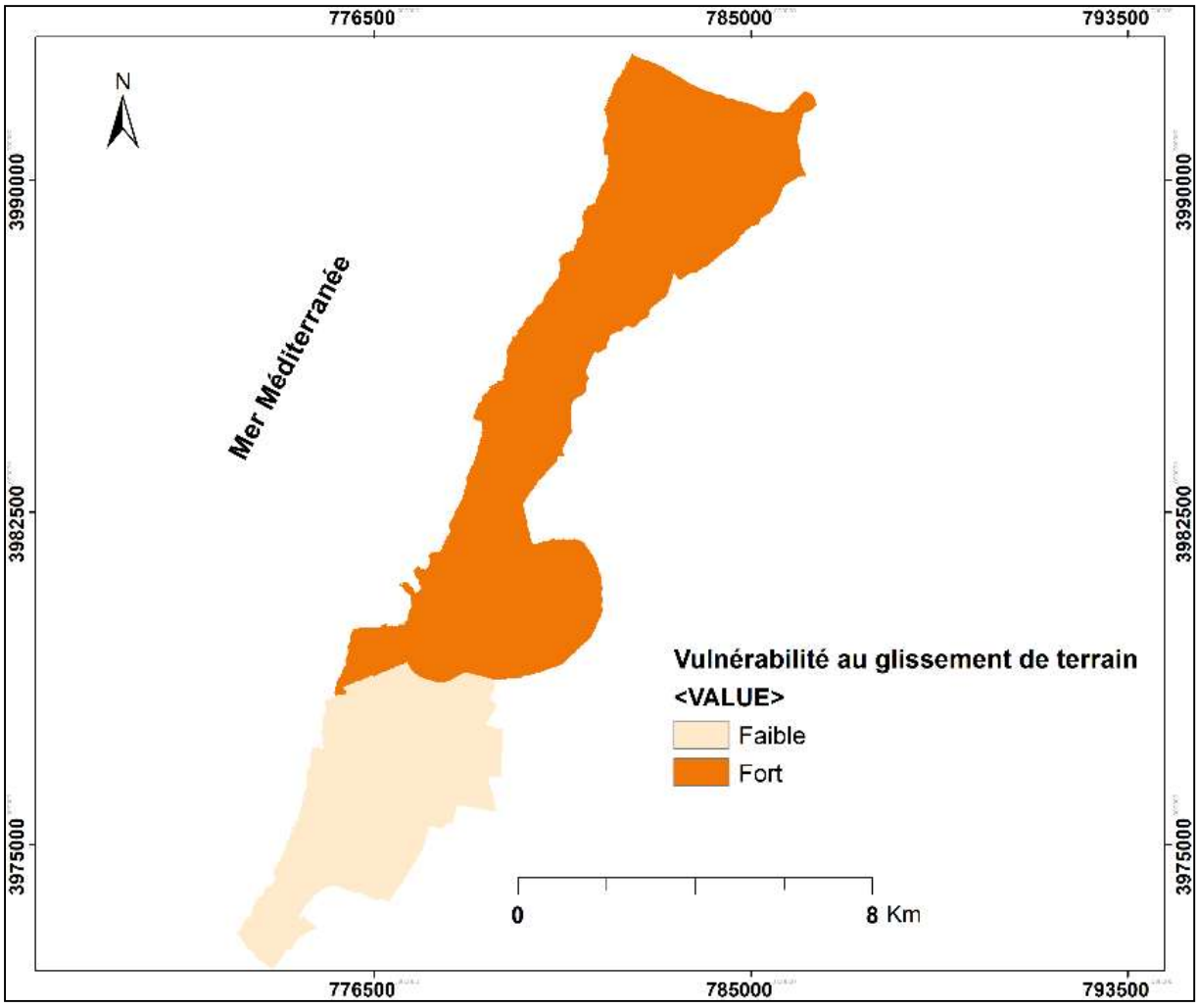


Figure 68: Vulnérabilité des communes littorales de Mostaganem et Mazagran (2017)

La combinaison des deux cartes a permis de produire une carte de risque regroupant quatre classes de susceptibilité aux glissements (très faible, faible moyen et fort). L'analyse de la carte de risque de glissement révèle que les sites à fort risque se situent dans sites urbanisés. Sonactère plage est une zone à risque fort, elle connait actuellement une forte exploitation (figure 69).

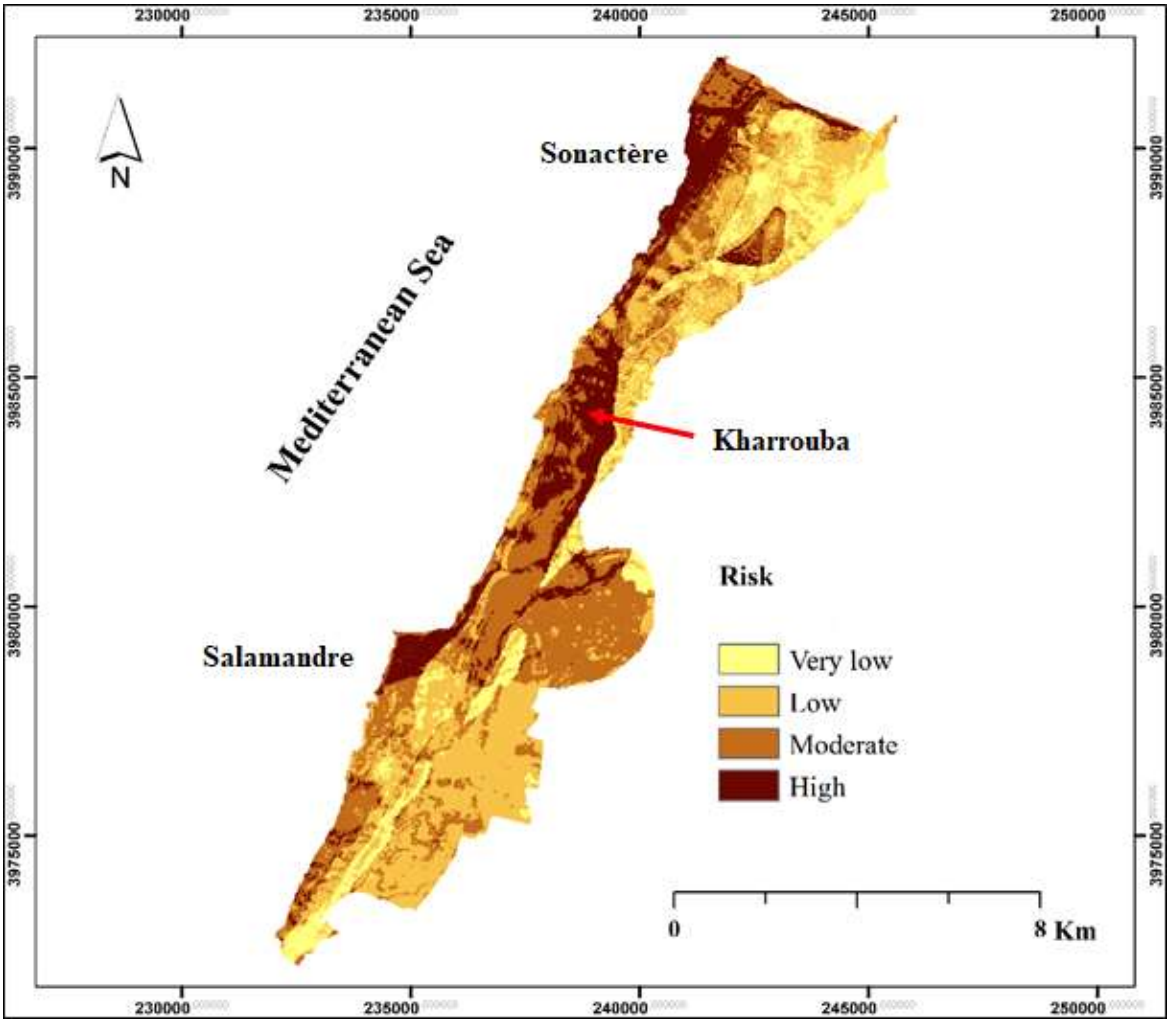


Figure 69 : Risque de glissement dans les communes de Mostaganem et Mazagran(2017)

Conclusion

L'analyse des cartes de risque a montré que les zones à degré de risque élevé sont situées dans les sites urbanisés. En comparant la carte des risques de glissement de terrain et les cartes de susceptibilité, on se rend compte que le degré de vulnérabilité peut influencer le degré de risque. Contrairement à la commune de Mostaganem, la faible vulnérabilité à Benabdelmalek Ramadane a probablement prémuni cette commune contre les risques de glissement de terrain.

Conclusion générale et Recommandations

Conclusion générale

Actuellement, le littoral de Mostaganem est dans un état inquiétant quant à la dégradation du paysage à cause de l'intensification des risques côtiers. La connaissance de l'état du milieu côtier est devenue une préoccupation majeure pour une bonne gestion. Durant son évolution, le littoral de Mostaganem, défini comme milieu à faible résilience, a subi une transformation spectaculaire. L'arrivée des nouveaux résidents suite à un climat d'insécurité sociale durant la décennie noire (1990-1999) explique l'accroissement de la population (Haffad, 2004). De ce fait, le monitoring de la dynamique de l'occupation du sol s'avère nécessaire.

L'utilisation de la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour le suivi des changements de l'occupation du sol a montré l'efficacité de ces outils. L'application de l'analyse en composante principale combinée à l'algorithme « *maximum likelihood »* s'est avéré efficace en livrant une bonne qualité de la classification des images satellitaires *Landsat* de 1987, 2000 et 2017, qui est de l'ordre de 77.72%, 91.41% et 79.33% respectivement.

La cartographie des changements de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem a mis en exergue la dégradation des écosystèmes formés de dunes à dense végétation à cause de l'urbanisation. Le déclin des systèmes dunaires est estimé à 60.97% durant la période 1987–2017. Les plages, les dunes et les plaines formées de sable ont également enregistré une perte, en terme de superficie, estimée à 83.64%. L'exploitation et la transformation des plages est clairement visible à la plage de Sonactère où une station de dessalement d'eau de mer a été implantée et une centrale électrique est en voie de construction. Cap Ivi également a subi une dégradation de son système dunaire à cause de la construction d'un complexe touristique en première ligne. Les cartes produites de la dynamique de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem constituent un outil indispensable pour l'aménagement de la zone côtière. Elle pourra servir de base aux décideurs locaux pour définir les sites prioritaires en terme de protection.

Le littoral de Mostaganem est formé essentiellement par des unités géomorphologiques sableuses dont l'artificialisation a conduit au déclenchement de glissements dans certains sites. Ces évènements sont récents, ils se sont développés principalement au niveau des routes reliant Mostaganem à la côte Est de la wilaya. Des méthodes qualitatives et quantitatives ont été appliquées afin d'estimer la susceptibilité aux glissements de terrain. Dans ce travail, une approche semi-quantitative basée sur la connaissance des experts a été suivie. Le Processus

d'Analyse Hiérarchique (AHP) combiné à la *Wighted Overlayed Method* (WOM) et la méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI) ont été appliqués. Le manque de données statistiques de l'inventaire des glissements de terrain a favorisé le choix de ces méthodes. Les cartes de susceptibilités produites montrent que les zones à très faible et faible degré de susceptibilité aux glissements de terrain se localisent dans les sites caractérisés par une dense végétation, les plages et les dunes côtières. Par contre, les zones de susceptibilité élevée et très élevée ont été enregistrées au niveau du noyau urbain et près de la route nationale RN11 ; des cours d'eau importants ont été enregistrés dans ces deux sites. Les cartes prédictives de susceptibilité aux glissements de terrain ont été évaluées à l'aide de la carte de vérité terrain (inventaire des glissements) et la méthode *Area Under Curve (AUC)* de la ROC (*Receiver Operating Characteristic*). La carte de vérité de terrain a confirmé que les cartes modélisées présentent une fiabilité acceptable compte tenu de l'emplacement des événements de glissements de terrain. La validation basée sur l'aire sous la courbe (ROC) indique une précision de 0.68 pour la carte produite selon la méthode de Combinaison de Carte d'Index (CCI). La carte réalisée à l'aide de l'AHP combinée à la WOM a montré une bonne performance (AUC= 0.753). Les deux techniques ont prouvé que les modèles appliqués sont acceptables car ils sont issus de l'analyse des experts pour l'élaboration d'une carte de susceptibilité aux glissements de terrain.

À Mostaganem, de nombreux projets de construction ont été lancés sur des unités côtières sableuses vulnérables, sans tenir compte de la loi du littoral 02-02 qui l'interdit. Les projets de construction inadéquatement planifiés dans la zone de faible résilience, réalisés sans tenir compte du réseau hydrographique et de la pente du terrain, ont contribué au déclenchement des glissements de terrain. Les cartes réalisées pourraient être utilisées pour surveiller et prévenir les glissements de terrain. Les autorités locales de Mostaganem ont établi un programme de développement économique pour l'horizon 2030. À cet égard, la carte de susceptibilité aux glissements de terrain pourrait aider les décideurs à mieux concevoir les futurs projets de construction afin d'éviter leur localisation dans les zones hautement sensibles.

L'évaluation de l'effet des changements de l'occupation du sol sur le zonage de susceptibilité aux glissements de terrain a été faite sur une période de 30 ans (1987-2017). Dans ce travail, les cartes de susceptibilité sont produites à la base du Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) combinée à la WOM. Selon les trois cartes de susceptibilité, les zones forestières contribuent à la stabilité du terrain et par conséquent réduisent sa susceptibilité aux glissements. Ces cartes montrent également une variation surfacique du degré de susceptibilité ;

les terrains nus, qui présentaient en 1987 un faible degré de susceptibilité sont passés à un degré moyen, voire pour certains sites, à élevé en 2000 et en 2017 ; Kharrouba, Salamandre et Sayada en sont des cas concrets. En se basant sur les résultats de notre étude, nous pouvons considérer Kharrouba comme un site de référence en terme de densité d'évènements. Cette zone, présentait un fort à très fort degré de susceptibilité aux glissements de terrain durant les années 1987 et 2000. Durant la période 2000-2017, Kharrouba a connu une forte urbanisation réalisée sur des terrains à haut degré de susceptibilité aux glissements. D'importants projets ont été mis en place tels que le nouveau pôle universitaire de Mostaganem (site V), les sites résidentiels de 10 étages, les structures d'accueil pour les touristes et le parc de loisir « MostaLand ». La production de cartes de susceptibilité et l'acquisition de nouvelles données géomatiques sur la zone d'étude ont contribué à des analyses efficaces sur les glissements de terrain. De ce fait, les résultats et les conclusions émanant de cette étude sont utiles pour l'évaluation des effets de la transformation des terrains sur la stabilité de leurs pentes.

L'identification des sites à risques a été réalisée en considérant la composante de la vulnérabilité. L'estimation du degré de vulnérabilité se base sur les paramètres démographiques, physiques et environnementaux. Les données détaillées liées à répartition de la population et au nombre de logements n'étaient pas disponibles. Pour cette raison, la représentation des données s'est basée sur des polygones des limites administratives du littoral de la commune de Mostaganem et de Benabdelmalek Ramadane. La pondération des paramètres liés à la démographie, physiques et environnementaux s'est basée sur la connaissance des experts. Dans ce sens, le poids de chaque facette est déterminé par l'analyse multicritère de l'AHP. La combinaison des composantes de la vulnérabilité a permis de produire une carte de vulnérabilité globale. Le littoral de la commune de Mostaganem présente un degré élevé de vulnérabilité en raison de la densité des enjeux socioéconomiques qui s'y trouvent. La réalisation des cartes de risques aux glissements de terrain est le résultat de la combinaison des cartes de susceptibilité et la vulnérabilité. Le littoral de la commune de Benabdelmalek Ramadane présente un risque très faible à faible en raison de sa faible vulnérabilité résultant de la faible densité urbaine. Concernant les autres sites de la zone d'étude, la plage de Sonactère, la route nationale RN11 près de cette plage et le site de Kharrouba présentent un risque moyen à élevé de glissements.

De part cette étude, nous avons pu avoir une idée concrète sur les changements de l'occupation du sol, surtout ceux liés à la dégradation des milieux sableux et dont la population

de Mostaganem en est consciente. Les résultats ont également contribué à l'identification des sites susceptibles et à risque de glissements. Certes, il aurait intéressant et pertinent de cartographier les géo-risques dans plus de zones de la côte de Mostaganem, mais cela aurait dépasser la problématique de ce travail. Néanmoins, ces résultats et les nouvelles données produites constituent certainement un pas important vers une gestion adéquate et efficace du littoral de Mostaganem. Ils permettraient d'incorporer l'avis des experts, de prendre les bonnes décisions et d'être utiles pour les investisseurs visant un développement durable de l'économie locale.

Bien que la recherche en matière d'aménagement du littoral dans notre zone d'étude soit encore peu engagée et fragmentée, elle ouvre toutefois des portes sur d'autres projets de recherche.

Recommandations

- Les actions d'aménagement de territoire de Mostaganem doivent prendre en considération la spécificité des espaces côtiers notamment le système dune-plage.

- Le développement des projets de tourisme dans les plages doit tenir compte de l'éventuelle élévation du niveau de la mer.

- Les projets de développement (réseau routier, tourisme, industrie) doivent faire l'objet d'une étude d'impact en respectant la loi du 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement. Leur planification nécessite une concertation entre les différents acteurs de gestion et de développement du territoire mostaganémois.

- Les décrets d'application des lois ne doivent plus tarder après leur promulgation afin d'éviter les conflits d'usage du milieu côtier.

- Les instruments d'urbanisme POS et PDAU des communes littorales doivent être soumises à la loi du littoral 02-02 du 5 février 2002. Cette loi est un outil d'aménagement du littoral fixant les modalités et les règles d'urbanisme en tenant compte de la protection de l'environnement.

- Certains textes juridiques comportent des notions floues en termes de responsabilité ; il est nécessaire de les définir clairement pour faciliter leur application.

- Le contrôle technique et hiérarchique de l'application des textes juridiques doit se faire d'une façon rigoureuse.

- L'intégration des sciences humaines et sociales dans les questions d'aménagement du littoral afin de fournir des données et décisions synthétiques facilement lisibles par la société.

- Les différents projets planifiés dans le futur doivent prendre en considération la stabilité des terrains. Il est nécessaire d'implanter des structures qui répondent à la résistance des terrains au cisaillement.

- Face à la multiplication des problèmes environnementaux et risques côtiers, il s'avère nécessaire d'intégrer les principes de la Gestion Intégrée de la Zone Côtière (GIZC) dans les réflexions de gestion des milieux littoraux.

- Ce type d'étude pourrait servir à la réalisation d'un Plan concret de Prévention de Risques (PPR)

- Pour que les travaux de recherches scientifiques soient intégrés dans les actions d'aménagement du littoral, ils doivent être révisés par des experts du domaine et soutenus par les institutions compétentes et les collectivités locales.

Références bibliographiques

Références bibliographiques
References

Abella, E. A. C., & Van Westen, C. J. (2007). Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides, 4*(4), 311-325. doi:10.1007/s10346-007-0087-y

Achankeng, E. (2003). Globalization, urbanization and municipal solid waste management in Africa. Paper presented at the Proceedings of the African Studies Association of Australasia and the Pacific 26th annual conference.

Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., & Bendaoud, E. A. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 10(8). doi:10.1007/s12517-017-2980-6

Ahmed, M. F., Rogers, J. D., & Ismail, E. H. (2017). A regional level preliminary landslide susceptibility study of the upper Indus river basin. European Journal of Remote Sensing, 47(1), 343-373. doi:10.5721/EuJRS20144721

Akgun, A., Kincal, C., & Pradhan, B. (2012). Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (west Turkey). *Environ Monit Assess, 184*(9), 5453-5470. doi:10.1007/s10661-011-2352-8

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology the environment 58*(1), 21-44.

Ali, S., Biermanns, P., Haider, R., & Reicherter, K. (2019). Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China–Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(5), 999-1022. doi:10.5194/nhess-19-999-2019

Amod Sagar Dhakal, Takaaki Amada, & Aniya, M. (2000). Landslide Hazard Mapping and its Evaluation Using GIs: An Investigation of Sampling Schemes for a Grid-Cell Based Quantitative Method. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.

ANAT. (2005). Bornage du domaine littoral de la wilaya de Mostaganem. Commune de Mostaganem et Benabdelmalek Ramadane.

ANAT. (2006). REVISION DU PLAN DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET D'URBANISME DU GROUPEMENT DES COMMUNES MOSTAGANEM – MAZAGRAN - SAYADA. Retrieved from Oran

Anbalagan, R. (1992) Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. Engineering Geology 32, 269–277p

Andreu-Boussut, V. (2008). La nature et le balnéaire. Le littoral de l'Aude: L'Harmattan.

Agence Nationale de Developpement du Tourisme (ANDT). (2005a). Zone d'Expansion et Site Touristique de Cap Ivi. Deuxième mission-Phase 4.

Agence Nationale de Developpement du Tourisme (ANDT). (2005b). Zone d'Expansion et Site Touristique de Benabdelmalek Ramadane. Deuxième mission-Phase 3.

Anis, Z., Wissem, G., Vali, V., Smida, H., & Mohamed Essghaier, G. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. Open Geosciences, 11(1), 708-726. doi:10.1515/geo-2019-0056

Anteur, D. (2019). Integration des donnees multi-sources dans un systemed'informations geographiques (sig) pour le diagnosticdu milieu et l'amenagement hydro-agricole de la regionsteppique ouest-algerienne. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem.

Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Chen, W., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Landslide Susceptibility Evaluation and Management Using Different Machine Learning Methods in The Gallicash River Watershed, Iran. Remote Sensing, 12(3), 29. doi:10.3390/rs12030475

Arca, D., Kutoglu, H. S., & Becek, K. (2018). Landslide susceptibility mapping in an area of underground mining using the multicriteria decision analysis method. Environ Monit Assess, 190(12), 725. doi:10.1007/s10661-018-7085-5

Atik, M., Altan, T., & Artar, M. (2010). Land Use Changes in Relation to Coastal Tourism Developments in Turkish Mediterranean. Polish J. of Environ. Stud, 19(1), 14.

Awawdeh, M. M., ElMughrabi, M. A., & Atallah, M. Y. (2018). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from North Jordan. Environmental Earth Sciences, 77(21). doi:10.1007/s12665-018-7910-8

Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 65(1-2), 15-31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010

Ba, Q., Chen, Y., Deng, S., Wu, Q., Yang, J., & Zhang, J. (2017). An improved information value model based on gray clustering for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Geo-Information, 6*(1), 18.

Baghdadi, D.(2019). Imapct des facteurs écologiques sur la dégradation des sols agricoles et forestiers méditerranéens du bassin versant de l'Oued Mina- Algérie Nord Ouest. Thèse de doctorat, Université de Mostaganem.

Baiche, A., Mohamed, H. S., & Ablaoui, H. (2015). surexploitation des ressources en eau de l'aquifere du plateau de mostaganem. larhyss journal(22), 153-165.

Bakir, N. (2017). Etude de L'effet du renforcement par les fibres de verre sur le taux et l'amplitude de l'affaissement d'un sol à effondrement brusque. Université de Batna 2,

Bălteanu, D., Chendeş, V., Sima, M., & Enciu, P. (2010). A country-wide spatial assessment of landslide susceptibility in Romania. Geomorphology, 124(3-4), 102-112. doi:10.1016/j.geomorph.2010.03.005

Basharat, M., Shah, H. R., & Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. Arabian Journal of Geosciences, 9(4). doi:10.1007/s12517-016-2308-y

Baztan, J., Chouinard, O., Jorgensen, B., Tett, P., Vanderlinden, J.-P., & Vasseur, L. (2015). Coastal zones: Solutions for the 21st century: Elsevier.

Belgat, S. (1984). *Etudes édaphiques en vue de l'aménagement du cordon dunaire littoral de la région de Mostaganem(Algérie)* (Doctoral dissertation).

Bengoufa, S., Niculescu, S., Mihoubi, M. K., Belkessa, R., & Abbad, K. (2021). Cartographie de la vulnérabilité côtière par l'intégration des méthodes géo-spatiales: cas de Mostaganem (ouest Algérien).

Benmahiddine, R. (2013). *Littoralisation, écologie urbaine et tourisme durable* (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire).

Berk, A., Bernstein, L., Anderson, G., Acharya, P., Robertson, D., Chetwynd, J., & Adler-Golden, S. (1998). MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. Remote sensing of Environment 65(3), 367-375.

Bernardo, N., Watanabe, F., Rodrigues, T., & Alcântara, E. (2017). Atmospheric correction issues for retrieving total suspended matter concentrations in inland waters using OLI/Landsat-8 image. Advances in Space Research, 59(9), 2335-2348. doi:10.1016/j.asr.2017.02.017

Bhatti, S. S., & Tripathi, N. K. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. GIScience & Remote Sensing, 51(4), 445-467. doi:10.1080/15481603.2014.939539

Blahut, J., van Westen, C. J., & Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. Geomorphology, 119(1-2), 36-51. doi:10.1016/j.geomorph.2010.02.017

Bombard, J. P. (1968). Une approche des problèmes posés par l'étude des mouvements de terrain: essai méthodologique. Université de Grenoble,

BOUALEM, M. (2009). *Etude bioécologique de phyllocnistis citrella stainton (Lépidoptera: gracillariidae) et de son complexe parasitaire dans la région de Mostaganem* (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis).

Bougherira, A., GHODBANI, T., & Grimes, S. (2018). Une cartographie des enjeux fonciers pour une meilleure gestion des zones côtières algériennes: Cas de la zone écologique sensible d'Ain El-Turck–Bousfer (Oran, Algérie). Paper presented at the FONCIMED. Réseau de recherche et d'échange sur le foncier méditerranéen. 11e Séminaire Annuel "L'allocation des ressources foncières dans les espaces méditerranéens : usages du droit et formes de régulation", Méknès Maroc.

Bouhennache, R., Bouden, T., & Taleb, A. A. (2014). Change Detection in Urban Land Cover Using Landsat Images Satellites, A Case Study in Algiers Town. Paper presented at the 2014 Tenth International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems.

Bouhamadouche, M., & Hemdane, Y. (2016). Erosion of a sandy coast: continuous follow-up of the coastal groynes of protection in Boumerdes (Algeria). Environmental Earth Sciences, 75(10). doi:10.1007/s12665-016-5665-7

Boukhatmi, F. (2014). LA POLLUTION MARINE: CADRE JURIDIQUE ET INSTITUTIONNEL. *Revue de droit des transports et des activités portuaires-, 1*(1).

Boulaine, J. (1955). Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie au 1 /200 000. Feuille de Mostaganem N 21.

Bourenane, H., Bouhadad, Y., Guettouche, M. S., & Braham, M. (2014). GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(2), 337-355. doi:10.1007/s10064-014-0616-6

Bourenane, H., Guettouche, M. S., Bouhadad, Y., & Braham, M. (2016). Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. Arabian Journal of Geosciences, 9(2). doi:10.1007/s12517-015-2222-8

Bousquet, B. (1990). Définition et identification du littoral contemporain. Revue Juridique de l'environnement, 15(4), 451-468.

Bru, D. (2015). Corrections atmosphériques pour capteurs à très haute résolution spatiale en zone littorale. Bordeaux,

Butt, A., Shabbir, R., Ahmad, S. S., & Aziz, N. (2015). Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 18*(2), 251-259. doi:10.1016/j.ejrs.2015.07.003

Caïd, N., Chachoua, M., & Berrichi, F. (2019). Analyse spatiale diachronique de l'occupation du vignoble algérien depuis 60 ans: cas de la wilaya de Mostaganem. Physio-Géo. Géographie physique et environnement(Volume 13), 53-74.

Calcaterra, D., & Parise, M. (2005). Landslide types and their relationships with weathering in a Calabrian basin, southern Italy. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(2), 193-207. doi:10.1007/s10064-004-0262-5

Calvão, T., Pessoa, M. F., & Lidon, F. C. (2013). Impact of human activities on coastal vegetation; A review. Emirates Journal of Food and Agriculture, 25(12). doi:10.9755/ejfa.v25i12.16730

Cantarino-Martí, I.; Carrión Carmona, MÁ.; Goerlich-Gisbert, F.; Martínez Ibáñez, V. (2018). A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. Landslides. 1- 18. doi:10.1007/s10346-018-1063-4

Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Science, 2(1/2), 57-72. doi:10.5194/nhess-2-57-2002

CENEAP. (2011). SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE DEVELOPPEMENT TOURISTIQUE DE LA WILAYA DE MOSTAGANEM : Etat des lieux - Diagnostic prospectif de la wilaya de Mostaganem. Retrieved from Mostaganem:

Chachou, I. (2019). «Mostaganem avant l'envahissement»: fragments de discours numériques autour de l'appropriation de l'espace de la ville. Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée (31).

Champatiray, P. (2000). Perationalization of cost-effective methodology for landslide hazard zonation using RS and GIS: IIRS initiative. *Natural Disasters their mitigation* 95-101.

Chavez Jr, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote sensing of environment, 24(3), 459-479.

Chen, C. Y., & Huang, W. L. (2013). Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. Environ Monit Assess, 185(5), 4125-4139. doi:10.1007/s10661-012-2855-y

Chen, W., Xie, X., Peng, J., Wang, J., Duan, Z., & Hong, H. (2017). GIS-based landslide susceptibility modelling: a comparative assessment of kernel logistic regression, Naïve-Bayes tree, and alternating decision tree models. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 950-973. doi:10.1080/19475705.2017.1289250

Choi, J., Oh, H.-J., Lee, H.-J., Lee, C., & Lee, S. (2012). Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. Engineering Geology, 124, 12-23. doi:10.1016/j.enggeo.2011.09.011

Clarke, K. C. (1986). Advances in geographic information systems. Computers, environment urban systems 10(3-4), 175-184.

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational psychological measurement 20*(1), 37-46.

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., . . . environment, t. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. 73(2), 209-263.

Crossland, C. J., Kremer, H. H., Lindeboom, H., Crossland, J. I. M., & Le Tissier, M. D. (2005). Coastal fluxes in the Anthropocene: the land-ocean interactions in the coastal zone project of the International Geosphere-Biosphere Programme: Springer Science & Business Media.

Cruden, D., & Varnes, J. (1996). Landslide types and processes. Landslides: investigation and mitigation, transportation research board (National Research Council). In: National Academy Press, Washington, DC.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 43(1), 27-29.

Dahoua, L., Yakovitch, S., & Hadji, R. H. (2017). GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-west highway, North Algeria. Mining Science, 24.

Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 30, 238-246. doi:10.1016/j.jag.2014.02.008

Dharani, M., & Sreenivasulu, G. (2021). Land use and land cover change detection by using principal component analysis and morphological operations in remote sensing applications. International Journal of Computers Applications 43(5), 462-471.

Dickson, M. E., & Perry, G. L. (2016). Identifying the controls on coastal cliff landslides using machine-learning approaches. Environmental Modelling Software 76, 117-127.

Djebaili, S.(1978). Recherches phyto-écologiques sur la végétation des hauts plaines steppiques de l'Atlas Saharien. Thèse Doct. Sci. Tech. Languedoc. Montpellier

Djerbal, L. (2013). Analyse des mécanismes de déformation et de la rupture progressive du versant instable d'Ain El Hammam. (Doctorat), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou.

DPSB. (2017). La monographie de la wilaya de Mostaganem. Retrieved from

Drejza, S. (2010). Impacts et efficacité des zonages des risques côtiers dans un contexte de changements climatiques exemple de Percé, Québec. Université du Québec à Rimouski,

Dusseux, P., Corpetti, T., & Hubert-Moy, L. (2019). L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires: Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France. Cybergeo: European Journal of Geography

El-Hattab, M. M. (2016). Applying post classification change detection technique to monitor an Egyptian coastal zone (Abu Qir Bay). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 19(1), 23-36. doi:10.1016/j.ejrs.2016.02.002

El Hajj, M. (2008). Exploitation des séries temporelles d'images satellite à haute résolution spatiale par fusion d'informations multi-sources pour le suvi des opérations culturales: application à la détection des coupes de canne à sucre à la Réunion. AgroParisTech,

Elie, M. (2015). Filmer la nature déchaînée. La circulation des images de coulées de boue entre film scientifique, documentaire et film catastrophe au Kazakhstan, 1970-1980.

Cahiers du monde russe. Russie-Empire russe-Union soviétique et États indépendants 56(56/1), 25-52.

Emmanuel John M. Carranza, & Hale, M. (2001). Geologically Constrained Fuzzy Mapping of Gold Mineralization Potential, Baguio District, Philippines. Natural Resources Research, 10, No. 2, 2001.

Esmail, M., Masria, A. L. I., & Negm, A. (2016). Monitoring Land Use/Land Cover Changes Around Damietta Promontory, Egypt, Using RS/GIS. Procedia Engineering, 154, 936-942. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.515

Feizizadeh, B., Shadman Roodposhti, M., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. Comput Geosci, 73, 208-221. doi:10.1016/j.cageo.2014.08.001

Fekir, Y. (2021). Etude et Evaluation de la Dégradation des RessourcesNaturelles en Algérie Occidentale par SIG et Télédétection. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem.

Ferreira, J. C., Cardona, F. S., Jóia Santos, C., & Tenedório, J. A. (2021). Hazards, Vulnerability, and Risk Analysis on Wave Overtopping and Coastal Flooding in Low-Lying Coastal Areas: The Case of Costa da Caparica, Portugal. Water, 13(2). doi:10.3390/w13020237

Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. Natural Hazards Earth System Sciences 18(8), 2161-2181.

Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. Geomorphology, 94(3-4), 268-289. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.023

Gao, B.-C., Davis, C., & Goetz, A. (2006). A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean color. Paper presented at the 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing.

Gao, B.-C., Montes, M. J., Davis, C. O., & Goetz, A. F. (2009). Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. Remote sensing of environment 113, S17-S24.

Gautam, D. (2017). Assessment of social vulnerability to natural hazards in Nepal. Natural Hazards and Earth System Sciences, 17(12), 2313-2320. doi:10.5194/nhess-17-2313-2017

Ghennani, B. (2003) Cartographique et zonage de l'alea de zones exposées aux risques de mouvement de pentes. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid,

Ghodbani, T. (2005). Rechgoun, un espace à protéger sur le littoral ouest de l'Algérie. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*, (105), 87-94.

Ghodbani, T. (2009). Environnement et littoralisation du l'Ouest Algérien. Thèse de doctorat. Université de Paris VIII et l'Université d'Oran 1.

Ghodbani, T. (2010). Environnement et littoralisation de l'Ouest algérien. Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales (50), 53-60.

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.

Ghodbani, T., & Bougherira, A. (2019). Le littoral algérien entre protection de l'environnement et impératifs du développement, Enjeux et Perspectives. Geo-Eco-Trop, 43(4), 559-568.

Ghodbani, T., Kansab, O., & Kouti, A. (2016). Développement du tourisme balnéaire en Algérie face à la problématique de protection des espaces littoraux. Le cas des côtes mostaganemoises. *Études caribéennes*, (33-34).

Ghodbani, T., Milewski, A., & Bellal, S. A. (2015). Un écosystème littoral fragile menacé sur la rive sud de la Méditerranée. La région côtière de Terga et ses zones humides (ouest de l'Algérie). Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography(125), 153-164.

Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. Catena.

Glade, T., & Crozier, M. (2005). A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. Landslide hazard risk 75, 75-138.

Gokceoglu, M. E. C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental Geology, 41(6), 720-730. doi:10.1007/s00254-001-0454-2

Gormsen, E. (1997). The impact of tourism on coastal areas. GeoJournal, 42(1), 16. doi:https://doi.org/10.1023/A:1006840622450

Grafton, R. Q., Akter, S., & Kompas, T. (2009). Guide to the ex-ante socio-economic evaluation of marine protected areas. Retrieved from

Grimes, S., 2015. Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières en Algérie (Rapport d'étude). Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Alger

Guillard-Gonçalves, C., & Zêzere, J. (2018). Combining Social Vulnerability and Physical Vulnerability to Analyse Landslide Risk at the Municipal Scale. Geosciences, 8(8). doi:10.3390/geosciences8080294

Guneroglu, A. (2015). Coastal changes and land use alteration on Northeastern part of Turkey. Ocean & Coastal Management, 118, 225-233. doi:10.1016/j.ocecoaman.2015.06.019

Gupta, S. K., Shukla, D. P., & Thakur, M. (2018). Selection of weightages for causative factors used in preparation of landslide susceptibility zonation (LSZ). Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9(1), 471-487. doi:10.1080/19475705.2018.1447027

Guri, P. K., Ray, P. K., & Patel, R. C. (2015). Spatial prediction of landslide susceptibility in parts of Garhwal Himalaya, India, using the weight of evidence modelling. Environ Monit Assess, 187(6), 324. doi:10.1007/s10661-015-4535-1

Guerrien, M. (2003). L'intérêt de l'analyse en composantes principales (ACP) pour la recherche en sciences sociales. Présentation à partir d'une étude sur le Mexique. *Cahiers des Amériques latines*(43), 181-192.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. J. G. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. 31(1-4), 181-216.

Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews, 112*(1-2), 42-66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81(1-2), 166-184.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. Geomorphology, 72(1-4), 272-299. doi:10.1016/j.geomorph.2005.06.002

Habib, A., Labbassi, K., Akdim, N., & Tajdi, A. (2013). Contribution des données ALOS et LANDSAT dans la cartographie et l'analyse des linéaments dans le Sahel Central (Maroc occidental). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 203*, 33.

Hadji, R., Achour, Y., & Hamed, Y. (2018). Using GIS and RS for Slope Movement Susceptibility Mapping: Comparing AHP, LI and LR Methods for the Oued Mellah

Basin, NE Algeria. In Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (pp. 1853-1856).

Hadmoko, D. S., Lavigne, F., Sartohadi, J., Hadi, P., & Winaryo. (2010). Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. Natural Hazards, 54(3), 623-642. doi:10.1007/s11069-009-9490-0

Haffad, T.(2004). Quelques conséquences économiques et sociales de l'évolution démographiqueen Algérie**.** Revue des Sciences Économiques et de Gestion,Volume 100, p. 3

Hanifi, N., Kadik, L., & Guittonneau, G.-G. (2007). Analyse de la végétation des dunes littorales de Zemmouri (Boumerdès, Algérie). Acta Botanica Gallica, 154(2), 235-249. doi:10.1080/12538078.2007.10516054

Hartani, A. (2019). Utilisation de la télédétection dans l'étude de la dégradation des agroécosystèmes dans le bassin versant de l'Oued Chéliff. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem.

Hemdane, Y., Bouhamadouche, 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(1), 54-67.

Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Hobart, G. W. (2015). Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics. Remote Sensing of Environment, 170, 121-132.

Hidalgo, C. A., Vega, J. A., & Obando, M. P. (2018). Effect of the Rainfall Infiltration Processes on the Landslide Hazard Assessment of Unsaturated Soils in Tropical Mountainous Regions. Engineering Mathematical Topics in Rainfall 163-185.

Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*: US Geological Survey Reston.

Hobbs, P., Humphreys, B., Rees, J., Tragheim, D., Jones, L., Gibson, A., . . . Airey, R. (2002). Monitoring the role of landslides in 'soft cliff'coastal recession. Instability–Planning Management 589-600.

Hong, H., Pradhan, B., Bui, D. T., Xu, C., Youssef, A. M., & Chen, W. (2016). Comparison of four kernel functions used in support vector machines for landslide susceptibility mapping: a case study at Suichuan area (China). Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 544-569. doi:10.1080/19475705.2016.1250112

Houdart, M. (2003). Entre terre et mer, les 250 ans du littoral.

Houston, J. (2008). MANAGEMENT of Natura 2000 habitats * Fixed coastal dunes with herbaceous vegetation ("grey dunes"). Retrieved from

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2), 167-194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y

Huxhold, W. E. (1991). An introduction to urban geographic information systems. OUP Catalogue

Igwe, O. (2015). The geotechnical characteristics of landslides on the sedimentary and metamorphic terrains of South-East Nigeria, West Africa. Geoenvironmental Disasters, 2(1). doi:10.1186/s40677-014-0008-z

Iqbal, M. F., & Khan, I. A. (2014). Spatiotemporal Land Use Land Cover change analysis and erosion risk mapping of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 17*(2), 209-229. doi:10.1016/j.ejrs.2014.09.004

Ilanloo, M. (2011). A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 19, 668-676. doi:10.1016/j.sbspro.2011.05.184

Ilori, C. O., Pahlevan, N., & Knudby, A. (2019). Analyzing performances of different atmospheric correction techniques for Landsat 8: application for coastal remote sensing. Remote Sensing, 11(4), 469.

Kacemi, M. (2008). DES RECOMMANDATIONS POUR L'INTEGRATION DES SPECIFICITES DU LITTORALDANS LES INSTRUMENTS D'URBANISME EN ALGERIE. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, 19-30.

Kacemi, M. (2009). Protection du littoral en Algérie entre gestion et législation. Droit et société(3), 687-701.

Kacemi, M. (2013). Protection et valorisation du littoral en Algérie: législation et instruments: Le cas des communes littorales d'Oran. *Études caribéennes*, (2013).

Khan, F. (2020). L'environnement du projet de tramway de Mostaganem

Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Ramachandran, K. K., Srinivas, Y., & Saravanan, S. (2017). Coastal landuse and land cover change and transformations of Kanyakumari coast, India using remote sensing and GIS. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 20(2), 169-185. doi:10.1016/j.ejrs.2017.04.003

Kara, F., & Keçeli, A. (2017). Impact of rapid urbanisation on land cover in Istanbul Province. Spatial Information Research 25(2), 293-302.

Kaur, H., Gupta, S., Parkash, S., & Thapa, R. (2018). Knowledge-driven method: a tool for landslide susceptibility zonation (LSZ). Geology, Ecology, and Landscapes, 1-15. doi:10.1080/24749508.2018.1558024

Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. Computers & Geosciences, 52, 398-408. doi:10.1016/j.cageo.2012.11.003

Kergomard, C. (1990). La télédétection aérospatiale: une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris.

Kergomard, C. (2000). Pratique des corrections atmosphériques en télédétection: utilisation du logiciel 5S-PC. Cybergeo: European Journal of Geography.

Kies, F., & Kerfouf, A. (2014). Impact of the climate change on the West coast of Algeria: Gulf of Oran, Arzew and Nostalgia. Sustainability, Agri, Food and Environmental Research, 2(3), 1-15.

Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. N. (2020). Monitoring and Predicting Spatio-Temporal Land Use/Land Cover Changes in Zaria City, Nigeria, through an Integrated Cellular Automata and Markov Chain Model (CA-Markov). *Sustainability, 12*(24). doi:10.3390/su122410452

Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., & Vallianatos, F. (2009). Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. Natural Hazards, 52(3), 599-621. doi:10.1007/s11069-009-9403-2

Kuhn, F. (2020). L' Environnement du projet de tramway de Mostaganem. Retrieved from France:

Lacoste, Y. (1999). Littoral, frontières marines. *Hérodote: Revue de géographie et de géopolitique*, (93), 3-19.

Lagabrielle, E. (2003). Télédétection des changements et SIG : application à l'étude de l'évolution des modes d'occupation des sols à la Réunion entre 1989 et 2002 ; Mastère SILAT, 47 p.

Lahouel, N. (2013). Caractérisation édapho-floristique dans les écosystèmesforestiers dans la région du littoral Mostaganémois(Oranie-Algérie). Thèse de doctorat. Université de Abou Bekr Belkaid, Telmcen.

Laigle, D., Naaim, M., Saramito, P., Neyret, F., & Cani, M.-P. (2003). Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et de caractérisation pour les risques naturels en montagne. *Ingénieries eau agriculture territoires*, 127-136.

Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM).(2012). Reconstruction de la falaise surplombant le rivage de Sidi Mejdoub-Mostaganem.

Laouar, S. (2010). État de la Biodiversité en Algérie. In *Actes du colloque international de Paris. L'efficacité de l'évaluation environnementale pour l'atteinte des objectifs de développement durable: application à la gestion de la biodiversité* (Vol. 20).

Le Berre, I. (2017). L'artificialisation des littoraux: déterminants et impacts.

Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, 26(7), 1477-1491.

Lee, S. (2006). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. Environmental Geology, 52(4), 615-623. doi:10.1007/s00254-006-0491-y

Lee, S. (2007). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, 26(7), 1477-1491. doi:10.1080/01431160412331331012

Lee, S., & Sambath, T. (2006). Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. Environmental Geology, 50(6), 847-855. doi:10.1007/s00254-006-0256-7

Léone, F. (1996). Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Grenoble 1,

Levasseur, M. (2003). Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa (glissement de terrain): exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique,

Li, D., Lu, D., Wu, M., Shao, X., & Wei, J. (2017). Examining Land Cover and Greenness Dynamics in Hangzhou Bay in 1985–2016 Using Landsat Time-Series Data. Remote Sensing, 10(2). doi:10.3390/rs10010032

Liang, Z., Huiyong, S. Y. G., Fang, A., Ying, Z., & Shilei, W. (2015). A new approach for mapping regional land cover and the application of this approach in Australia. Remote Sensing Letters, 6(4), 267-275. doi:10.1080/2150704X.2015.1029089

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation: John Wiley & Sons.

Lin, L., Lin, Q., & Wang, Y. (2017). Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 17*(8), 1411-1424. doi:10.5194/nhess-17-1411-2017

Liu, K., Shi, W., & Zhang, H. (2011). A fuzzy topology-based maximum likelihood classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66*(1), 103-114.

Liziard, S. (2013). Littoralisation de la façade nord-méditerranéenne : analyse spatiale et prospective dans le contexte du changement climatique. Université Nice Sophia Antipolis,

Machane, D., Bouhadad, Y., Cheikhlounis, G., Chatelain, J. L., Oubaiche, E. H., Abbes, K., . . . Bensalem, R. (2008). Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria. Natural Hazards, 45(2), 295-308. doi:10.1007/s11069-007-9167-5

Mahalingam, R., Olsen, M. J., & O'Banion, M. S. (2016). Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study). Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(6), 1884-1907. doi:10.1080/19475705.2016.1172520

Maldonado, F. D., Santos, J. D., & De Carvalho, V. C. (2002). Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixaba, PE): characterization by principal component analysis (PCA). International Journal of Remote Sensing, 23(23), 5005-5013.

Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O., & Puissant, A. (2006). Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain. *Revue internationale de géomatique, 16*, 499-525.

Manchar, N., Benabbas, C., Hadji, R., Bouaicha, F., & Grecu, F. (2018). Landslide Susceptibility Assessment in Constantine Region (NE Algeria) By Means of Statistical Models. Studia Geotechnica et Mechanica, 40(3), 208-219. doi:10.2478/sgem-2018-0024

Martínez, M. L., Hesp, P. A., & Gallego-Fernández, J. B. (2013). Coastal Dunes: Human Impact and Need for Restoration. In Restoration of Coastal Dunes (pp. 1-14).

Masselink, G., & Gehrels, R. (2014). Coastal environments and global change: John Wiley & Sons.

Mastere, M.(2011). La susceptibilité aux mouvemenst de terrain dans la province de Chefchaouen (Rif Central, Maroc)

McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2016). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. Environment and Urbanization, 19(1), 17-37. doi:10.1177/0956247807076960

Megherbi, W. (2015). L'ensablement, un risque négligé en zone tellienne littorale Cas de la région Mostaganem. (Magistère), Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed,

Meghzili, H. (2015). Modèles d'aménagement et d'urbanisation des Zones d'Expansion Touristique de la wilaya de Skikda (Algérie). (Thèse dedoctorat), UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, France.

Meneses, B. M., Pereira, S., & Reis, E. (2019). Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,, 19(3), 471-487.

Meur-Ferec, C. (2006). De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral: un itinéraire de géographe.

Meur-Férec, C., & Morel, V. (2004). L'érosion sur la frange côtière: un exemple de gestion des risques. Natures Sciences Sociétés 12(3), 263-273.

Mhawish, Y. M., & Saba, M. (2016). Impact of population growth on land use changes in Wadi Ziqlab of Jordan between 1952 and 2008. International Journal of Applied Sociology, 6(1), 7-14.

Michael, E. A., & Samanta, S. (2016). Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. Modeling Earth Systems and Environment, 2(2). doi:10.1007/s40808-016-0141-7

Mijani, N., & Neysani Samani, N. (2017). COMPARISON of FUZZY-BASED MODELS in LANDSLIDE HAZARD MAPPING. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W4, 407-416. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-407-2017

Miles, S. B., & Keefer, D. K. (2009). Evaluation of CAMEL—comprehensive areal model of earthquake-induced landslides. *Engineering Geology*, *104*(1-2), 1-15.

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie du Développement Durable et de la Mer. (2010). Gestion du trait de côte. Editions Quae

Misra, A., R, M. M., & P, V. (2013). Assessment of the land use/land cover (LU/LC) and mangrove changes along the Mandovi–Zuari estuarine complex of Goa, India. *Arabian Journal of Geosciences, 8*(1), 267-279. doi:10.1007/s12517-013-1220-y

Mokarram, M., & Zarei, A. R. (2018). Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy-AHP. Geotechnical and Geological Engineering, 36(6), 3931-3943. doi:10.1007/s10706-018-0583-y

Mostari, A., Benabdeli, K., & Vela, E. (2020). Le littoral de Mostaganem (Algérie), une "zone importante pour les plantes" (ZIP) autant négligée que menacée. Flora Mediterranea, 30. doi:10.7320/FlMedit30.207

Mousavi, S. Z., Kavian, A., Soleimani, K., Mousavi, S. R., & Shirzadi, A. (2011). GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2(1), 33-50. doi:10.1080/19475705.2010.532975

Mugagga, F., Kakembo, V., & Buyinza, M. (2012). Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides. Catena 90, 39-46.

Ndao, M. (2012). Dynamiques et gestion environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal: étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès et Saint-Louis). Université Toulouse le Mirail-Toulouse II,

Nedjraoui, D. (2011). Vulnérabilité des écosystèmes steppiques en Algérie. *Université de KasdiMerbah–Ouargla–Alger, du*, *21*, 41-53.

Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. Engineering Geology, 97(3-4), 171-191. doi:10.1016/j.enggeo.2008.01.004

Nemani, R. R., & Running, S. W. (1996). Satellite monitoring of global land cover changes and their impact on climate. In Long-Term Climate Monitoring by the Global Climate Observing System (pp. 265-283): Springer.

Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding--a global assessment. PLoS One, 10(3), e0118571. doi:10.1371/journal.pone.0118571

Nhu, V.-H., Mohammadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B. B., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., . . . Nguyen, H. (2020). Landslide Detection and Susceptibility Modeling on Cameron Highlands (Malaysia): A Comparison between Random Forest, Logistic Regression and Logistic Model Tree Algorithms. Forests, 11(8). doi:10.3390/f11080830

Nowamooz, H. (2007). *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels.* Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL,

Ouali, S. (2015).Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem

Pal, S., & Ziaul, S. (2017). Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 20*(1), 125-145. doi:10.1016/j.ejrs.2016.11.003

Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques.

Paskoff, R. (1992). Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution. Edition de Masson

Pasquali, D., & Marucci, A. (2021). The Effects of Urban and Economic Development on Coastal Zone Management. Sustainability, 13(11). doi:10.3390/su13116071

Péchoux, P.-Y. (1975). Mostaganem, ou la mutation d'une région coloniale en Algérie. Paper presented at the Annales de Géographie.

Perera, E. N. C., Jayawardana, D. T., Jayasinghe, P., Bandara, R. M. S., & Alahakoon, N. (2018). Direct impacts of landslides on socio-economic systems: a case study from Aranayake, Sri Lanka. Geoenvironmental Disasters, 5(1). doi:10.1186/s40677-018-0104-6

Pham, Shirzadi, Shahabi, Omidvar, Singh, Sahana, . . . Lee. (2019). Landslide Susceptibility Assessment by Novel Hybrid Machine Learning Algorithms. Sustainability, 11(16). doi:10.3390/su11164386

Pham, B. T., Bui, D. T., Dholakia, M. B., Prakash, I., Pham, H. V., Mehmood, K., & Le, H. Q. (2016). A novel ensemble classifier of rotation forest and Naïve Bayer for landslide susceptibility assessment at the Luc Yen district, Yen Bai Province (Viet Nam) using GIS. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 649-671. doi:10.1080/19475705.2016.1255667

Postacchini, M., & Romano, A. (2019). Dynamics of the Coastal Zone. Journal of Marine Science and Engineering, 7(12). doi:10.3390/jmse7120451

Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. Natural Hazards, 63(2), 965-996. doi:10.1007/s11069-012-0217-2

Pradhan, B., & Lee, S. (2009). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. Environmental Earth Sciences, 60(5), 1037-1054. doi:10.1007/s12665-009-0245-8

Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. Environmental Modelling & Software, 25(6), 747-759. doi:10.1016/j.envsoft.2009.10.016

Prakash, N., Manconi, A., & Loew, S. (2020). Mapping landslides on EO data: Performance of deep learning models vs. traditional machine learning models. Remote Sensing 12(3), 346.

Pushpendra, S. S., Vivekanand, T., & Anil, K. (2014). *Analysis of Supervised Maximum Likelihood Classification for Remote Sensing Image*. Paper presented at the IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering.

Rabehi, W. (2018). Détermination spatio-temporelle de l'expansion urbaine sur la baie d'Alger et impact environnementals sur la bande côtière. (Doctorat), Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du …, Algiers.

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. Mediterranee.

Ramos, A., Cunha, L., & Cunha, P. P. (2014). Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal: Figueira da Foz–Nazaré. *Geo-Eco-Trop, 38*(1), 33-44.

Reichenbach, P., Mondini, A., & Rossi, M. (2014). The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). Environmental management 54(6), 1372-1384.

Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (8).

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. Earth-Science Reviews, 180, 60-91.

Richards, J. A. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.

Rizzo, A., & Anfuso, G. (2020). Coastal Dynamic and Evolution: Case Studies from Different Sites around the World. Water, 12(10). doi:10.3390/w12102829

Roşian, G., Csaba, H., Kinga-Olga, R., Boţan, C.-N., & Gavrilă, I. G. (2016). Assessing landslide vulnerability using bivariate statistical analysis and the frequency ratio model. Case study: Transylvanian Plain (Romania). Zeitschrift für Geomorphologie, 60(4), 359-371. doi:10.1127/zfg/2016/0404

Roukh, Z. E. A., & Abdelmansour, N. (2018). Landslide susceptibility mapping using information value and frequency ratio for the Arzew sector (North-Western of Algeria). Bulletin Of The Mineral Research and Exploration, 1-10. doi:10.19111/bulletinofmre.502343

Saadatkhah, N., Kassim, A., & Lee, L. M. J. E. (2014). Qualitative and quantitative landslide susceptibility assessments in Hulu Kelang area, Malaysia. 19(47), 545-563.

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology 15(3), 234-281.

Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process Mcgraw Hill, New York. 70.

Saba, S. B., van der Meijde, M., & van der Werff, H. (2010). Spatiotemporal landslide detection for the 2005 Kashmir earthquake region. Geomorphology, 124(1-2), 17-25. doi:10.1016/j.geomorph.2010.07.026

Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. (2010). GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. International Journal of Remote Sensing, 23(2), 357-369. doi:10.1080/01431160010014260

Saibi, H. (2010). Etude hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (Nord-ouest Algérien): Géologie, Géophysique, Climatologie, Hydrodynamisme, Hydrochimie et Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC: Éditions universitaires européennes.

Samaali, H. (2011). *Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques.* Université de Sfax,

Sardou, M. (2016). Contribution à la cartographie du risque d'inondation en Algérie : Cas de l'Ouest Algérien. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem

Sari, D. A. P., Innaqa, S., & Safrilah. (2017). Hazard, Vulnerability and Capacity Mapping for Landslides Risk Analysis using Geographic Information System (GIS). IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering, 209. doi:10.1088/1757-899x/209/1/012106

Schößer, B., Helming, K., & Wiggering, H. (2010). Assessing land use change impacts – a comparison of the SENSOR land use function approach with other frameworks. Journal of Land Use Science, 5(2), 159-178. doi:10.1080/1747423x.2010.485727

Sekkak, M. (2014). Stabilité des mouvements de terrain en pentes (traitement de cas au niveau d'autoroute ESTOUEST). (Thèse de Magistère). UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEN

Sellin, V., Magnanon, S., Gourmelon, F., Debaine, F., & Nabucet, J. (2015). Etude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Senouci, R., & Taibi, N.-E. (2019). Impact of the Urbanization on Coastal Dune: Case of Kharrouba, West of Algeria. Journal of Sedimentary Environments, 4(1), 90-98. doi:10.12957/jse.2019.39951

Senouci, R., Taibi, N.-E., Teodoro, A. C., Duarte, L., Mansour, H., & Yahia Meddah, R. (2021). GIS-based expert knowledge for landslide susceptibility mapping (LSM): case of Mostaganem Coast District, West of Algeria. Sustainability, 13(2), 630.

Senouci, R., Taibi, N., Teodoro, A., Duarte, L., & Yahia Meddah, R. (2020). Estimation of landslide risk map considering landslide vulnerability: Case of Algerian Western coasts. Paper presented at the Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XI.

Serratrice, J. F., & Soyez, B. (1996). Les essais de gonflement. *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 65-86.

Shanmugam, G., & Wang, Y. (2015). The landslide problem. Journal of Palaeogeography, 4(2), 109-166. doi:10.3724/sp.J.1261.2015.00071

Sharpe, CFS. (1938). Landslides and related phenomena. Columbia University Press, NY, 1370

Shit, P. K., Bhunia, G. S., & Maiti, R. (2016). Potential landslide susceptibility mapping using weighted overlay model (WOM). Modeling Earth Systems and Environment, 2(1). doi:10.1007/s40808-016-0078-x

Sifa, S. F., Mahmud, T., Tarin, M. A., & Haque, D. M. E. (2019). Event-based landslide susceptibility mapping using weights of evidence (WoE) and modified frequency ratio (MFR) model: a case study of Rangamati district in Bangladesh. Geology, Ecology, and Landscapes, 1-14. doi:10.1080/24749508.2019.1619222

Singh, A., Pal, S., Kanungo, D. P., & Pareek, N. (2017). An Overview of Recent Developments in Landslide Vulnerability Assessment-Presentation of a New Conceptual Framework. In Advancing Culture of Living with Landslides (pp. 795-802).

Smahi, E.L. (2001) **:** Etude du phénomène d'ensablement sur le plateau de Mostaganem et proposition d'aménagement, Thèse de Magister, IGAT Es-Sénia, Oran.p137

Sun, J., Yang, J., Zhang, C., Yun, W., & Qu, J. (2013). Automatic remotely sensed image classification in a grid environment based on the maximum likelihood method. *Mathematical and Computer Modelling, 58*(3-4), 573-581. doi:10.1016/j.mcm.2011.10.063

Taibi, N.-E. (2016). Conflict between Coastal Tourism Development and Sustainability: Case of Mostaganem, Western Algeria. European Journal of Sustainable Development. doi:10.14207/ejsd.2016.v5n4p13

Tang, R.-X., Kulatilake, P. H., Yan, E.-C., & Cai, J.-S. (2020). Evaluating landslide susceptibility based on cluster analysis, probabilistic methods, and artificial neural networks. Bulletin of Engineering Geology the environment, 79(5), 2235-2254.

Tang, R.-X., Yan, E. C., Wen, T., Yin, X.-M., & Tang, W. (2021). Comparison of Logistic Regression, Information Value, and Comprehensive Evaluating Model for Landslide Susceptibility Mapping. Sustainability, 13(7). doi:10.3390/su13073803

Teodoro, A., Pais-Barbosa, J., Gonçalves, H., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2011). Identification of beach hydromorphological patterns/forms through image classification techniques applied to remotely sensed data. International Journal of Remote Sensing, 32(22), 7399-7422. doi:10.1080/01431161.2010.523729

Terzaghi, K. (1925). Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage: F. Deuticke.

Thiery, Y., & Terrier, M. (2019). Évaluation de l'aléa glissements de terrain : état de l'art et perspectives pour la cartographie réglementaire en France. Revue Française de Géotechnique(156). doi:10.1051/geotech/2019003

Thywissen, K. (2006). *Components of risk: a comparative glossary*: UNU-EHS.

Trache, A.-E.-H., & Senouci, M. (2014). Etude de vulnérabilité aux Changement climatiques de la wilaya de Mostaganem. Retrieved from Ageria

Tsoata, F. T., Yemmafouo, A., & Ngouanet, C. J. R. i. d. g., aménagement et gestion des ressources. (2020). Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain à Bafoussam (Cameroun). Approch par analyse multicritère hiérarchique et Système d'information géographique.

Turconi, L., Luino, F., Gussoni, M., Faccini, F., Giardino, M., & Casazza, M. (2019). Intrinsic Environmental Vulnerability as Shallow Landslide Susceptibility in Environmental Impact Assessment. *Sustainability, 11*(22). doi:10.3390/su11226285

UNDPBCP. (2004). Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development-a Global Report: United Nations.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. Engineering Geology 102(3-4), 251-256.

Vakhshoori, V., Pourghasemi, H. R., Zare, M., & Blaschke, T. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-Based Data Mining Algorithms. Water, 11(11). doi:10.3390/w11112292

Vakhshoori, V., & Zare, M. (2018). Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps?. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *9*(1), 249-266.

Valentini, E., Taramelli, A., Cappucci, S., Filipponi, F., & Nguyen Xuan, A. (2020). Exploring the Dunes: The Correlations between Vegetation Cover Pattern and Morphology for Sediment Retention Assessment Using Airborne Multisensor Acquisition. Remote Sensing, 12(8). doi:10.3390/rs12081229

Van Westen, C., & TERLIEN, M. (1996). Deterministic landslide hazard analysis in GIS: A case study from Manizales (Columbia): Earth Surface Processes Landforms.

Van Westen, C. J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.

van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. Natural Hazards, 30(3), 399-419. doi:10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e

Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M., & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation. Geologische Rundschau, 86(2), 404-414.

van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2005). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2), 167-184. doi:10.1007/s10064-005-0023-0

Varnes, D., & practice, e. (1958). Landslide types and processes. Landslides 24, 20-47.

Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33

Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.

Voiron-Canicio, C. (1999). Urbanisation et littoralisation sur les rives de la Méditerranée. *O. Sevin, Les Méditerranées dans le monde, Cahiers scientifiques de l'Université d'Artois, Artois Presses Universités*, 103-112.

Wan, L., Zhang, Y., Zhang, X., Qi, S., & Na, X. (2015). Comparison of land use/land cover change and landscape patterns in Honghe National Nature Reserve and the surrounding Jiansanjiang Region, China. Ecological Indicators, 51, 205-214. doi:10.1016/j.ecolind.2014.11.025

Wang, X., Dong, X., Liu, H., Wei, H., Fan, W., Lu, N., . . . Xing, K. (2017). Linking land use change, ecosystem services and human well-being: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China. Ecosystem Services, 27, 113-123. doi:10.1016/j.ecoser.2017.08.013

Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). Terrain analysis: principles and applications: John Wiley & Sons.

Woodward, R. T., & Wui, Y.-S. (2001). The economic value of wetland services: a meta-analysis. Ecological economics, 37(2), 257-270.

Yagoub, M., & Kolan, G. R. (2006). Monitoring coastal zone land use and land cover changes of Abu Dhabi using remote sensing. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 34(1), 57-68.

Yahiaoui, M. (2008). Contribution à l'analyse de la dynamique des terrains en pente sous séisme par le logiciel. Thèse de Magisère, Université de Abou Bekr Belkaid.

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. Catena, 85(3), 274-287. doi:10.1016/j.catena.2011.01.014

Yamani, L., & Brahimi, K. (2009). Evolution sociale et reconfiguration spatiale: la ville de Mostaganem. Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales (44-45), 175-193.

Yamani, L., & Trache, S. M. (2020). Contournement des instruments d'urbanisme dans l'urbanisation de l'agglomération mostaganémoise (Algérie). Cybergeo: European Journal of Geography

Yin, K.L. & Yan, T.Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard C (ed) Proc., Fifth International Symposium in Landslides, Lausanne, vol. 2. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 1269–1272

Yu, X., Zhang, K., Song, Y., Jiang, W., & Zhou, J. (2021). Study on landslide susceptibility mapping based on rock-soil characteristic factors. Sci Rep, 11(1), 15476. doi:10.1038/s41598-021-94936-5

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets, Information and Control (Vol. 8).

Zaoui M. (2015) - *Système d'information géographique et méthodologie multicritère pour le choix de sites de retenues collinaires : application pour la wilaya de Mostaganem, Algérie*. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem (Algérie), 156 p.

Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Reis, E. (2008). Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology, 94*(3-4), 467-495. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.040

Zhao, H., Zhao, X., Zhao, X., & Zhang, T. (2008). Ground Discriminance on positive and negative processes of land desertification in Horqin Sand Land. J Journal of Desert Research, 28(1), 8-15.

Zhao, Y., Xu, M., Guo, J., Zhang, Q., Zhao, H., Kang, X., & Xia, Q. (2014). Accumulation characteristics, mechanism, and identification of an ancient translational landslide in China. Landslides, 12(6), 1119-1130. doi:10.1007/s10346-014-0535-4

Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C.-Z., Chen, Y., Liu, J., . . . Zhu, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. Geomorphology, 214, 128-138. doi:10.1016/j.geomorph.2014.02.003

Zimmermann, H. J. (2010). Fuzzy set theory. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(3), 317-332. doi:10.1002/wics.82

Textes juridiques

Loi n° 90-29 du 1er décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme

Loi n° 03-03 du 16 Dhou El Hidja 1423 correspondant au 17 février 2003 relative aux zones d'expansion et sites touristiques

Loi n° 02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et la valorisation du littoral

Site web
https://www.sigterritoires.fr/index.php/tutoriel-classification-dimages-avec-qgis-2-1-correction-atmospherique-des-images-landsat-8/ accédé le 23/02/2021.

https://www.vienne.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Risques-naturels-et-technologiques-majeurs/Les-risques-naturels/Mouvements-de-terrain/Les-mouvements-de-terrain accédé le 04/08/2021

http://www.mementodumaire.net/les-risques-naturels/rn-3-mouvements-de-terrain/ : accédé le 04/08/2021

https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/mouvements-de-terrain.php : accédé le 04/08/2021

http://obscat.fr/glossaire : accédé le 25/10/2021

https://www.heritage.nf.ca/articles/en-francais/environment/instabilite-des-pentes.php accédé le 29 août 2021

http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_PJ.php?id_PJ=119&id_DT=7 accédé le 29 août 2021

https://www.sigterritoires.fr/index.php/tutoriel-classification-dimages-avec-qgis-2-1-correction-atmospherique-des-images-landsat-8/ accédé le 30/11/2021

Annexes

Annexe1: Analyse en composante Principale

Tab: L'ACP del'imagesatellitairede2000

PC	Eigenvalue	Percent
1	7.2843	91.05
2	0.4556	96.75
3	0.1923	99.15
4	0.0315	99.55
5	0.0174	99.76
6	0.0110	99.90
7	0.0071	99.99
8	0.0007	100

Composition colorée

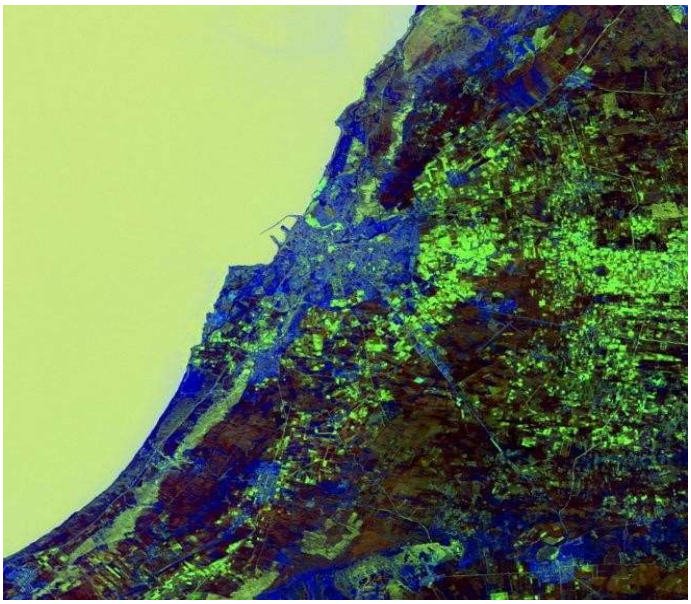


Figure : Composition colorée (RGB=143) de l'image *Landsat* ETM de2000

Tab.: L'ACP del'imagesatellitairede2017

PC	Eigenvalue	Percent
1	8.6095	86.09
2	0.88060	94.90
3	0.3368	98.27
4	0.0740	99.01
5	0.0733	99.74
6	0.0147	99.89
7	0.0053	99.94

8	0.0031	99.97
9	0.0020	99.99
10	0.0008	100.00

Figure : Composition colorée (RGB= 345) de l'image Landsat 8 2017

Annexe 2 : Matrices de Confusion

Tableau : matrice de confusion 1987

Classes	Oued Chéliff	Terres agricoles	Maraichère	Dunes consolidées	Plage et dunes	Surface bâtie	Forêts
Oued Chéliff	**93**	0	0	0	0	34	1
Terres agricoles	0	**51**	55	0	0	0	0
Maraichère	0	34	**34**	0	0	0	6
Dunes consolidées	0	0	1	**93**	0	7	0
Plage et dunes	0	4	0	0	**94**	26	6
Surface bâtie	2	0	2	0	0	**175**	20
Forêts	0	0	0	0	0	0	**151**
O.A.=77.724 %					**Kappa coefficient=0.735**		

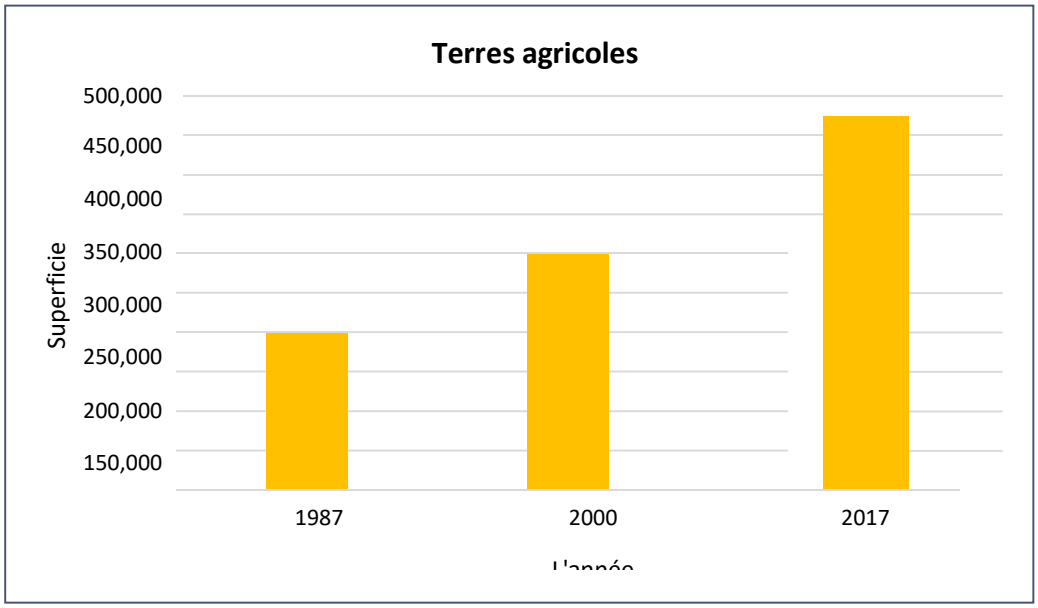
Tab.: Matrice de confusion 2000

Classes	Plage et dune	Surface bâtie	Dunes consolidées	Maraichère	Terres agricoles	Sites de construction	Oued Chéliff	Forêts
Plage et dune	**159**	3	1	16	2	1	0	9
Surface bâtie	0	**149**	2	.0	0	29	0	2
Dunes consolidées	0	1	**124**	15	2	0	0	0
Maraichère	0	0	0	**82**	0	0	0	0
Terres agricoles	0	0	0	9	**123**	0	0	0
Sites de construction	0	3	0	0	0	**116**	0	0
Oued Chéliff	0	2	0	1	0	0	**144**	0
Forêts	0	0	0	0	0	0	0	**146**
O.A.=91.411					**Kappa coefficient=0.901**			

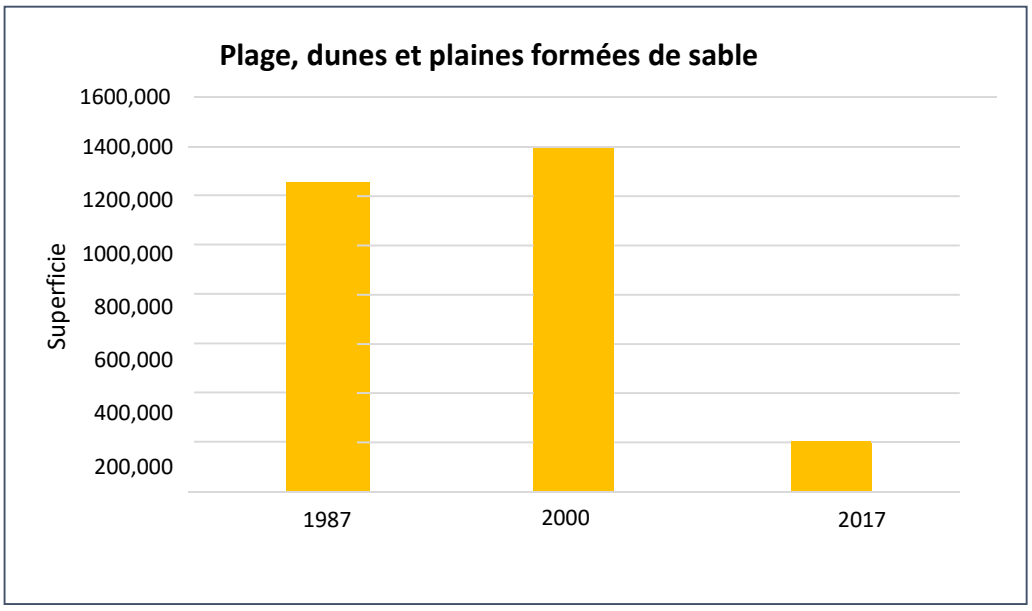
Tab.: Matrice de confusion 2017

Classes	Dunes consolidées	Surface bâtie	Sites de construction	Forêts	Terres agricoles	Maraichère	Oued Chéliff	Plage et dunes
Dunes consolidées	**101**	0	0	36	10	0	1	0
Surface bâtie	0	**123**	0	0	0	0	1	5
Site de Construction	0	0	**107**	0	4	0	1	0
Forêts	0	0	0	**74**	0	0	0	0
Terres agricoles	0	0	0	0	**4**	37	0	0
Maraichère	0	0	0	0	85	**68**	0	0
Oued Chéliff	0	0	0	0	0	0	**106**	0
Plage et dunes	0	0	0	0	0	0	0	**108**
O.A=79.334 %					**Kappa coefficient=0.764**			

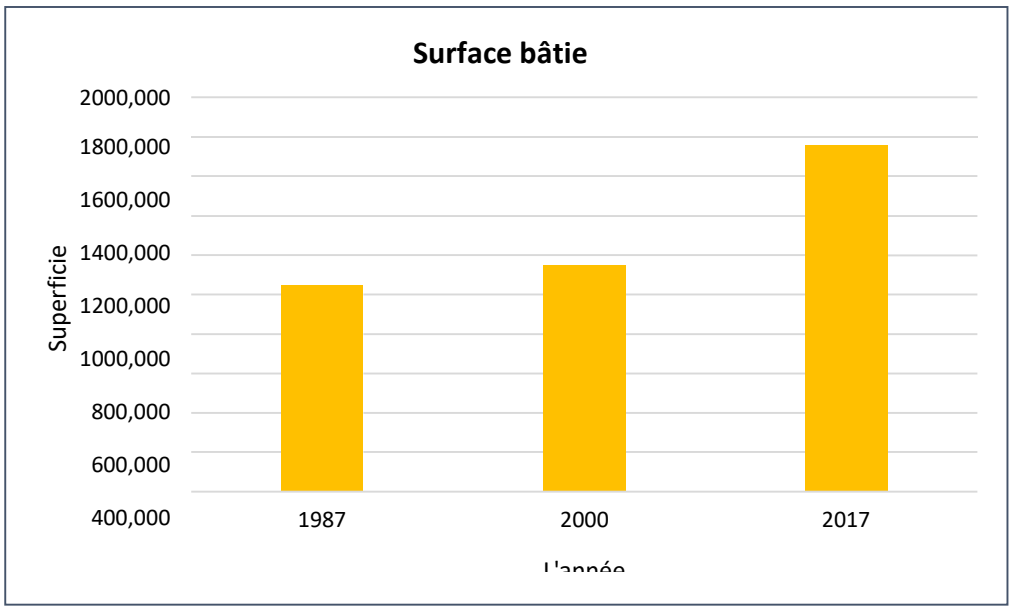
Annexe 3: Evolution de l'occupation du sol du littoral de Mostaganem



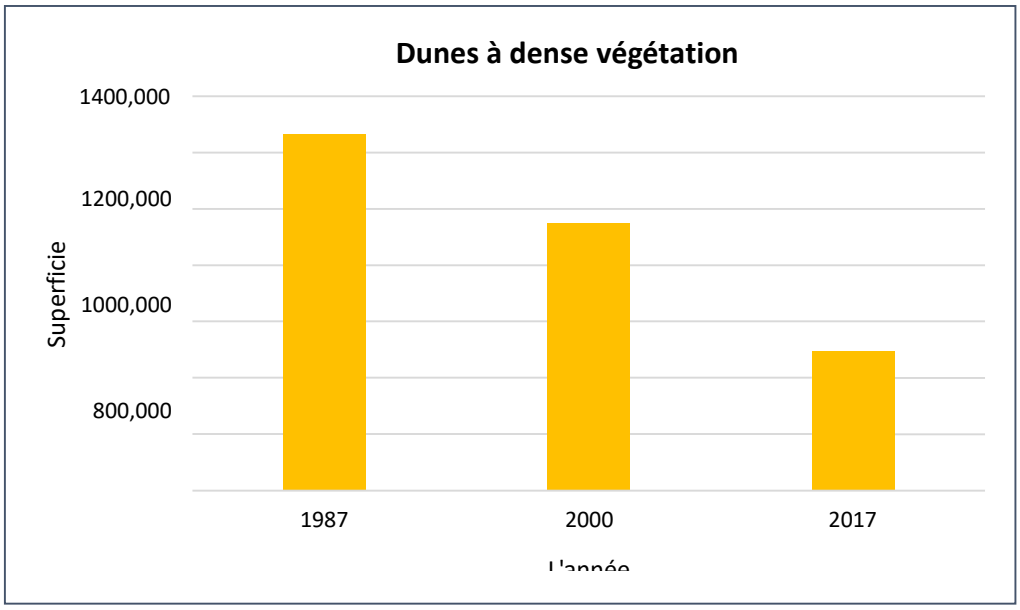
Evolution des « terres agricoles » durant la période1987-2017



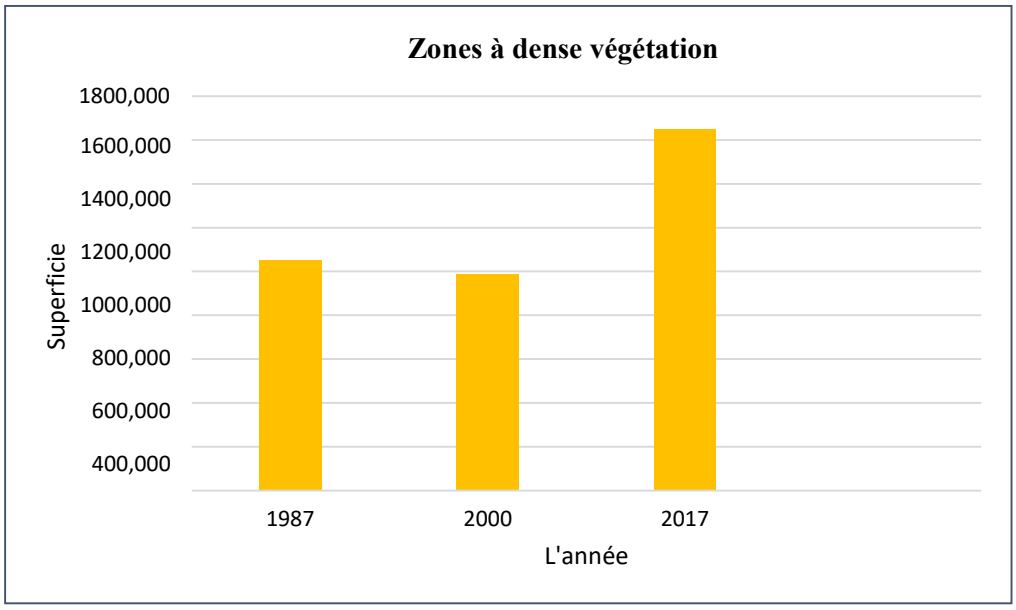
Evolution de la classe « plage, dunes et plaines formées de sable » durant la période1987-2017



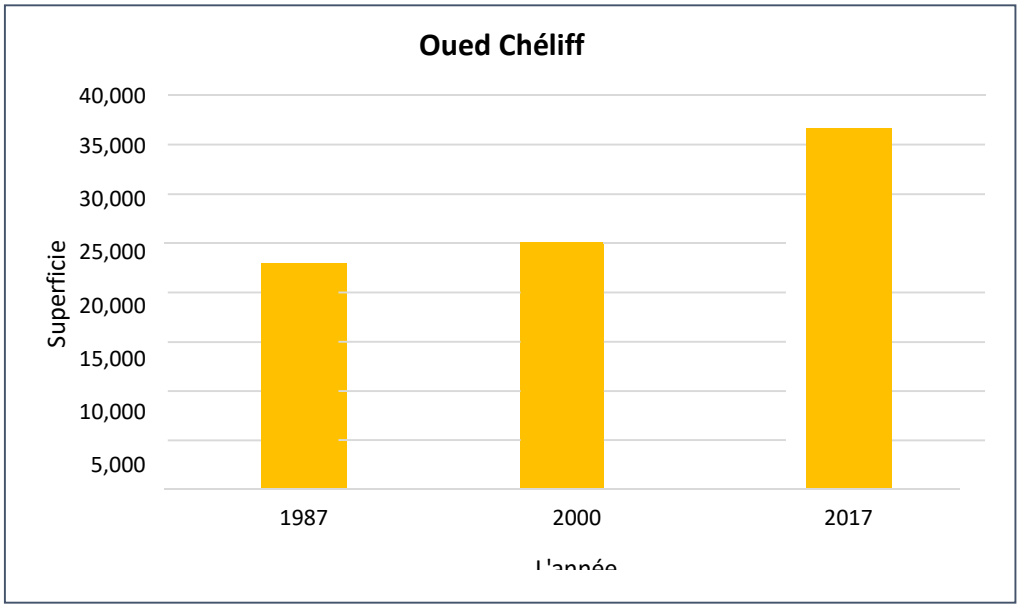
Evolution de la « classe surface bâtie » durantlapériode1987-2017



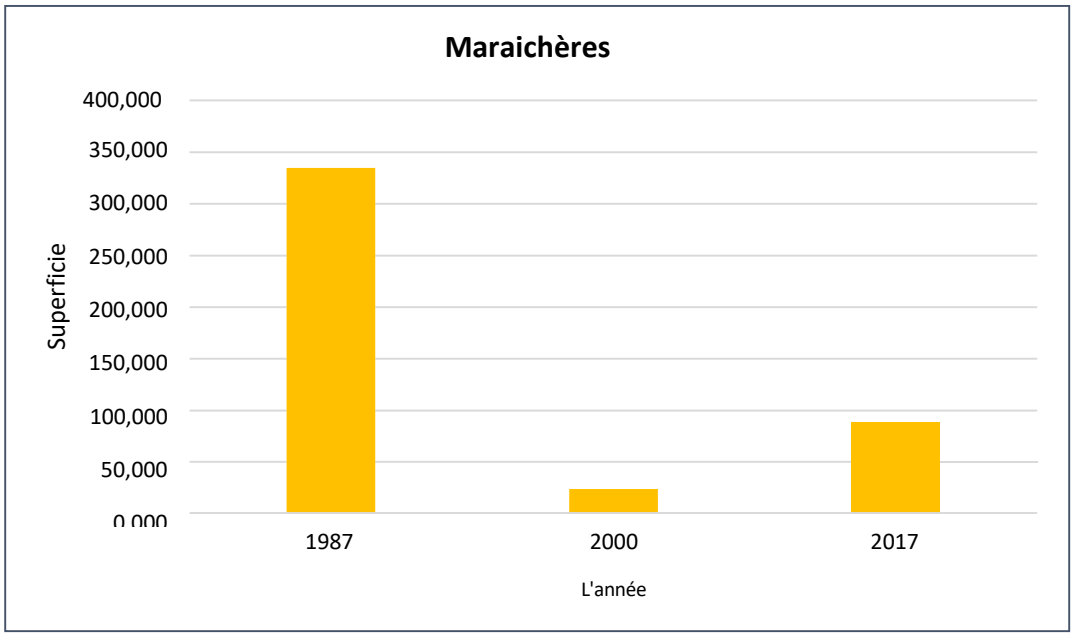
Evolution de la classe « des dunes à dense végétation » durant la période 1987-2017



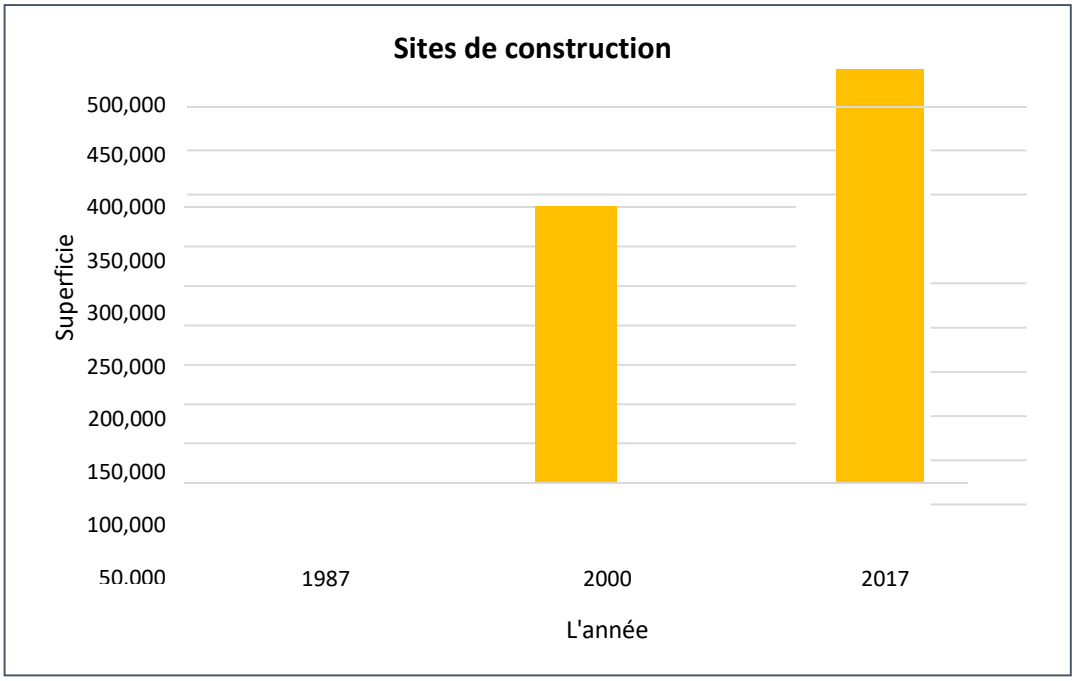
Evolution de la classe des « zones à dense végétation » durant la période1987-2017



Evolution de la classe « Oued Chéliff » durant la période1987-2017



Evolution de la classe « Maraichère » durant la période1987-2017



Evolution de la classe « Sites de construction » durant lapériode1987-2

Annexe 4 : Production scienifique

Artcile publié " GIS-Based Expert Knowledge for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) : Case of Mostaganem Coast District, West of Algeria

sustainability

MDPI

Article

GIS-Based Expert Knowledge for Landslide Susceptibility Mapping (LSM): Case of Mostaganem Coast District, West of Algeria

Rachida Senouci [1], Nasr-Eddine Taibi [1], Ana Cláudia Teodoro [2,3,*], Lia Duarte [2,3], Hamidi Mansour [4] and Rabia Yahia Meddah [5]

[1] Laboratory of Protection and Development of Coastal Marine Resources and Molecular Systematics, Department of Marine Sciences and Aquaculture, Faculty of Natural and Life Sciences, Abdelhamid Ibn Badis, University of Mostaganem, BP 227, National Road N° 11, Kharrouba, Mostaganem 27000, Algeria; rachida.senouci@univ-mosta.dz (R.S.); nasreddine.taibi@univ-mosta.dz (N.-E.T.)
[2] Department of Geosciences, Environment and Land Planning, Faculty of Sciences, University of Porto, 4169-007 Porto, Portugal; liaduarte@fc.up.pt
[3] Earth Sciences Institute (ICT), Pole of the FCUP, University of Porto, 4169-007 Porto, Portugal
[4] Laboratory of Geo Resources, Environments and Natural Risks, Department of Geology, Faculty of Earth Science and the Universe, University of Mohamed Ben Ahmed Oran 2, B.P1 1524 El-M'Naouar, Oran 31000, Algeria; l_mansou_l@yahoo.fr
[5] Laboratory of Geographical Space and Territorial Planning, Department Geography and Land Planning, Faculty of Earth Science and the Universe, University of Mohamed Ben Ahmed Oran 2, B.P1 1524 El-M'Naouar, Oran 31000, Algeria; yahiameddah7rabia@gmail.com
* Correspondence: amteodor@fc.up.pt; Tel.: +351-220402470

Abstract: Landslides are one of the natural disasters that affect socioeconomic wellbeing. Accordingly, this work aimed to realize a landslide susceptibility map in the coastal district of Mostaganem (Western Algeria). For this purpose, we applied a knowledge-driven approach and the Analytical Hierarchy Process (AHP) in a Geographical Information System (GIS) environment. We combined landslide-controlling parameters, such as lithology, slope, aspect, land use, curvature plan, rainfall, and distance to stream and to fault, using two GIS tools: the Raster calculator and the Weighted Overlay Method (WOM). Locations with elevated landslide susceptibility were close the urban nucleus and to a national road (RN11); in both sites, we registered the presence of strong water streams. The quality of the modeled maps has been verified using the ground truth landslide map and the Area Under Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic curve (ROC). The study results confirmed the excellent reliability of the produced maps. In this regard, validation based on the ROC indicates an accuracy of 0.686 for the map produced using a knowledge-driven approach. The map produced using the AHP combined with the WOM showed high accuracy (0.753).

Keywords: controlling-parameters; remote sensing; GIS; knowledge driven approach; analytical hierarchy process; weighted overlay method

check for updates

Citation: Senouci, R.; Taibi, N.-E.; Teodoro, A.C.; Duarte, L.; Mansour, H.; Yahia Meddah, R. GIS-Based Expert Knowledge for Landslide Susceptibility Mapping (LSM): Case of Mostaganem Coast District, West of Algeria. *Sustainability* **2021**, *13*, 630. https://doi.org/10.3390/su13020630

Received: 3 December 2020
Accepted: 5 January 2021
Published: 11 January 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: ©2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Around the world and in the highlands, landslides are considered one of the most complex geomorphological phenomena. They are recognized as one of the main threats to human lives, both economically and environmentally [1–3]. Earth mass movements, resulting from natural conditions linked to topography, geology and hydrogeology, are defined as landslides [4,5]. Natural events, such as heavy rainfall, which increases the amount of pore water in the rocks; earthquakes; and coastal erosion could contribute to landslide triggering [5,6]. The pressure change of the interstitial water may lead to slope instability and therefore to landslides [7,8]. Beyond natural conditions, human activities related to construction, mining and deforestation could also contribute to landslides [9–11]. The East of Algeria is more exposed to landslide hazards than the other parts of the

country. Historically, many important events were recorded, for instance, in the city of Constantine, whose emblematic bridge suffered in 1935 from considerable damage caused by a landslide. The Belouizdad-Kitouni district has also experienced several landslide events. This phenomenon is intensified in Constantine due the chaotic growth of the city. Ain Hammam, a town located in the region of Tizi-Ouzou (central-eastern region of Algerian), is an unstable area of 23 hectares, which presents intense landslide activity due to harsh winters [12,13]. Landslides represent an obstacle for the development of any region since they cause economic losses. Consequently, the prevention of landslide hazards has become an important tool in land use planning and management [14,15]. Landslide susceptibility is known as the spatial prediction of landslide occurrence. Therefore, the preparation of Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) maps is an important tool. This map indicates the areas prone to landslides and the safe zones [16]. The effective utilization of a landslide map can reduce the potential damage of the event [17]. Landslide susceptibility mapping is based on slope knowledge movement and its controlling factors. The reliability of these maps mainly depends on the quantity and the quality of available data, the scale of work, and the choice of the appropriate methodology [14,17–20].

Evaluation and mapping of landslide susceptibility has been developed during the last decades using different methods [21,22]. Accordingly, the involved processes could be categorized into qualitative and quantitative approaches. These techniques have been attempted in order to produce more accurate results [18,23,24]. The qualitative methods (heuristic) are relatively descriptive and subjective; they are based on expert knowledge of landslide susceptibility and hazard mapping [25,26]. The qualitative approach is classified into two groups: (1) the first category is geomorphologic analysis, which is a direct method based on the recognition and experience of scientists in direct landslide susceptibility mapping [27,28]; (2) the second category represents indirect methods, which are semi-quantitative where all the parameters that influence the landslide occurrence are ranked and a weight value is assigned based on expert knowledge. Furthermore, the ratings and weights of the controlling parameters can be estimated using the expert's opinion (knowledge-driven approach) and the analytical hierarchy process (AHP). The AHP is a multi-criteria decision approach that involves a matrix based on the pairwise comparison of landslide-controlling parameters. The Weighted Linear Combination (WLC) method has been used to combine different factors in which each parameter is multiplied by its assigned weight. The results of qualitative approaches mainly depend on expert knowledge. The qualitative method does not require any inventory map for landslide susceptibility mapping [17,20,29,30].

In the quantitative approach, two methods are distinguished: deterministic and statistical. The deterministic method is based on the calculation of safety factors for slope stability studies [31]. It is applied on individual sites due to the difficulty of acquiring the spatial variability of geotechnical and phreatic parameters [32]. Statistical methods, such as bivariate and multivariate statistical methods, Frequency Ratio (FR), Weight of Evidence (WoE), Artificial Neural Network (ANN), and Support Vector Machine (SVM), are based on analysis of the relations between conditioning factors and landslide events distribution [20,33–38]. The selection of an adequate method depends on the scale of the study area, the availability of data, and scientific knowledge [39].

In Algeria, the evaluation of landslide susceptibility is a new field. Some authors have used heuristic and statistical techniques to identify the different sites prone to landslides. The majority of the study cases were located in the East of the country [40–43]. A landslide susceptibility study was carried out in the Arzew sector (North-Western Algeria) [44]. These researchers mostly used statistical techniques [40–44]. Bourenane et al. [40] followed a geomorphological analysis method for landslide susceptibility mapping. The different works are described in Table 1.

Table 1. Different works on landslide susceptibility in Algeria.

	Authors	Study Area	Parameters	Techniques
East of Algeria	Bourenane et al., 2014 [40]	City of Constantine	Slope gradient, slope aspect, lithology, precipitation, distance to stream, land use, distance to road, distance to faults	Geomorphological analysis & SI
	Achour et al., 2017 [42]	Highway section/Constantine province	Lithology, distance to faults, slope gradient, slope aspect, distance from streams, land use, cohesion, internal friction	AHP & IV
	Manchar et al., 2018 [43]	Constantine city	Lithology, slope gradient, slope aspect, elevation, distance to lineaments, distance to stream, rainfall, NDVI	IV, WoE & FR
	Hadji et al., 2018 [16]	Oued Mellah Basin	Lithology, faults, slope, elevation, aspect, streams, roads and precipitation	AHP, LI & LR
West of Algeria	Roukh and Abdelmansour (2018) [44]	Arzew Sector	Slope angle, slope exposure, lithology, distance to streams, land use, distance to road, altitude,	IV & FR
	Current study	Mostaganem coast district	Lithology, slope, land use, slope aspect, plan curvature, rainfall, distance to streams, distance to roads and distance to fault	Knowledge driven approach and AHP combined to WOM

SI: Statistical Index; FR: Frequency Ratio; IV: Information Value; WoE: Weight of Evidence; LI: Linear Indexing; LR: Logistic Regression; NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

Our work assesses landslide susceptibility in the coastal district of Mostaganem (West Algeria). This area is mainly composed of alluvium, consolidated dunes, and beaches features. Although this lithology is brittle, built-up construction projects have been planned without an impact study being required by law. As a result, several landslide cases have been recorded in this area in the last years [45].

In this work, a semi-quantitative approach, based on expert knowledge of landslide susceptibility mapping, was followed. This approach constitutes a bridge between qualitative and quantitative methods by evaluating the importance of different parameters in the generation of landslide susceptibility maps using a knowledge-driven approach and AHP, combined with WOM methods within a GIS environment. The results could be an opportune guideline for land planning in the Mostaganem area [27,46].

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

Mostaganem is a coastal province located in the North-West of Algeria. Its 124 km coastline is made up of ten districts and a river (Oued Cheliff), which divides the province into two parts. The Eastern part is poorly urbanized and has huge beaches, dunes, littoral plains, and forests. The Western part is highly urbanized [47]. As one of the main coastal cities in Algeria, Mostaganem has been intensively urbanized (littoralization) and its sand dunes overexploited for construction needs [48,49]. The necessary preservation of the natural resources led to the introduction of the Littoral Law in February 2002, which stipulates the protection and the valorization of the coastal zone. According to the Littoral Law, built-up activities are consequently prohibited within the 300 m coastal strip. Nevertheless, construction projects have already been initiated with the aim of increasing residential buildings and boosting tourism.

From a morphological point of view, the coastal zone of the Mostaganem province extends over 2120 km^2, where 53% are covered by forest. The study area (Figure 1) represents 52 km^2 and 37.82 km of coastline, covering two districts: Mostaganem (urban nucleus) and Ben Abdelmalek Ramdane. The Western part of the study area is composed of consolidated dunes (cliffs) situated around Mostaganem city. The Eastern part is located

in the zone of Ben Abdelmalek Ramdane, where plains are mainly composed of sand, marl and, in a few locations, alluvium. The valley corresponding to Oued Cheliff separates the study area in two geomorphological units: the shoreline parallel to the Eastern plain and the shelf of Mostaganem; the latter includes mobile dunes, consolidate dunes and beaches [50–53]. Meteorological conditions in the coastal Mostaganem district correspond to a semi-arid Mediterranean climate, characterized by dry, hot summers and rainy winters.

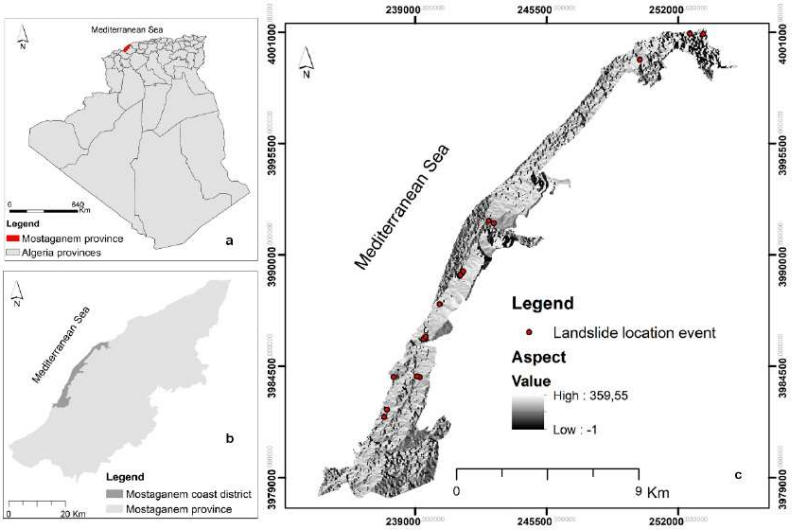


Figure 1. Geographical location of the study area: (**a**) geographical position of Mostaganem province in Algeria; (**b**) position of the coast district in the Mostaganem province; (**c**) Mostaganem coast district location.

Figure 2 describes the methodology followed in this paper. This work was initiated by collecting data from different sources (reports, newspaper, interviews) and Global Navigation Satellite System (GNSS) data to construct a landslide inventory. Then, the different parameters controlling landslides were extracted, considering a GIS environment (ArcGIS 10.5.1). A knowledge-driven approach and (AHP), combined with WOM, was applied to map landslide susceptibility. In order to compare the two produced maps, a Fuzzy Linear membership function (FL) was applied. In the end, the quality of the produced maps was verified.

2.2. Landslide Inventory Map

The landslide inventory map is a key step for landslide susceptibility prediction [54,55]. This map can be used to prevent events that could occur in unstable areas and compare them with the modelled landslide susceptibility map [2,21,56–58]. The landslide inventory map could be produced on local, regional or national scales; its conception basically depends on the scope of the study [19,46,59,60]. In our study area, we identified 17 cases of landslide events during the period between 2016 and 2019 (Figure 1). The compilation of the landslide inventory map was accomplished through a range of interviews with administrative personals such as the National Coastal Commission (Commissariat National du Littoral) and the Directorate of Public Works of Mostaganem province. Interviews with the local residents of Mostaganem were also performed. The use of Google Earth, local newspapers, and some reports published by the Laboratory of Maritime Studies (LEM/Algiers) was also necessary to complete our database. Furthermore, intensive field

surveys were performed for three years (2017–2019) in order to validate the collected data and identify the locations. Based on interviews, reports analysis and field surveys, different geological hazard events that occurred recently were identified (Figure 3). The recorded cases are mainly shallow; they occurred in soils at depths ranging from a few decimeters to a few meters. These events took place close to the urban area, near the network of roads that has been constructed on the consolidated dune system, a feature with high susceptibility to coastal hazards.

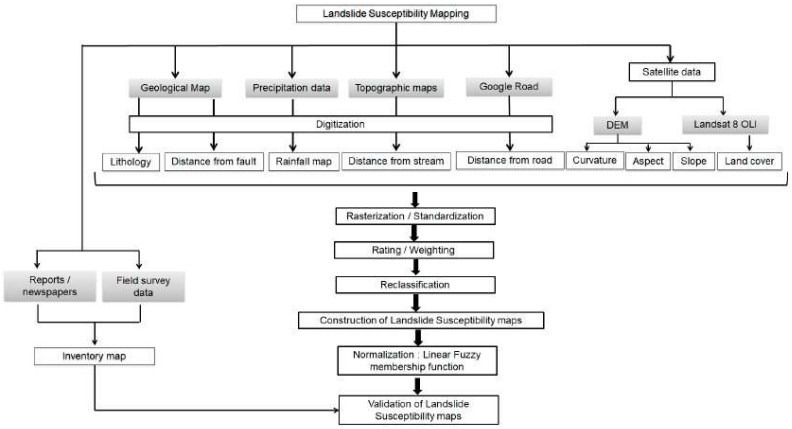


Figure 2. Flowchart showing the different steps followed in this study.

Figure 3. Photographs showing landslide events in the Mostaganem coast district: (**a**) Cliff of Sid El Mejdoub, (**b**) Parking (Mostaganem University/site V), (**c**) Hai Salam, and (**d**) National Road N 11 (combined by ADOBE ILLUSTRATOR).

2.3. Description of Parameters

2.3.1. Lithology

Lithology is an important parameter in landside occurrence and susceptibility mapping [37,43,61,62]. The digitizing of the geological map of Bosquet-Mostaganem (scale: 1/200,000) allowed for the identification of 10 lithological units in the study area (Figure 4a). The main registered rocks belong to Quaternary, Pliocene, and Miocene.

2.3.2. Slope

In landslide susceptibility studies, slope is considered one of the most important parameters of slope failure. It was derived from SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model) with 30 m of spatial resolution, and it was classified into 5 classes (Figure 4b). As is known, the probability of landslide occurrence increases where the slope is steeper compared with gentler ones [63].

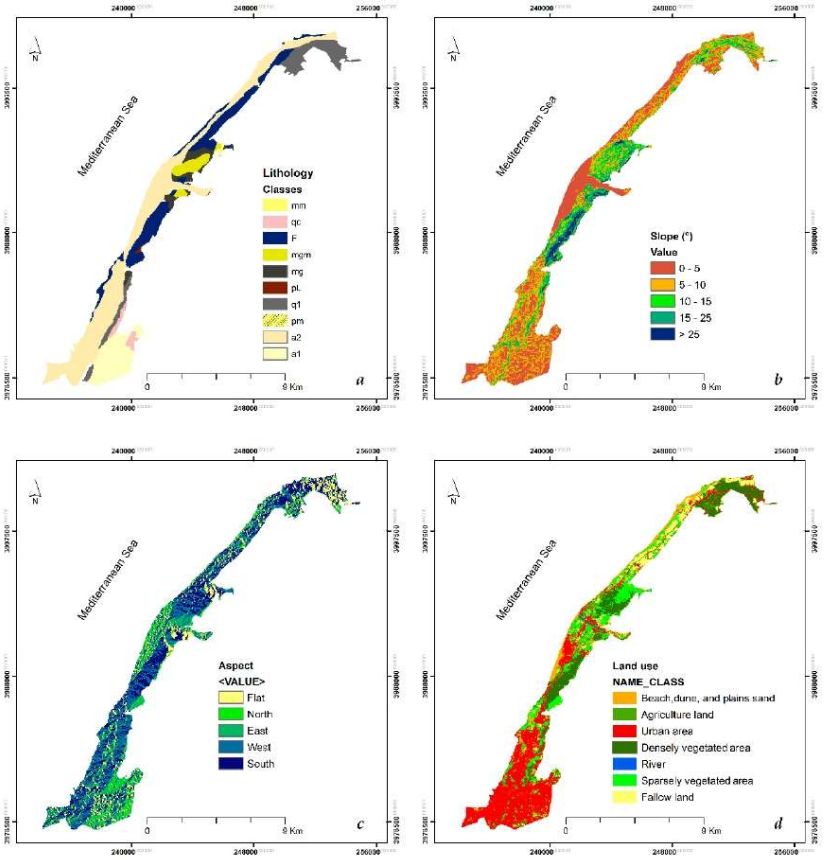


Figure 4. *Cont.*

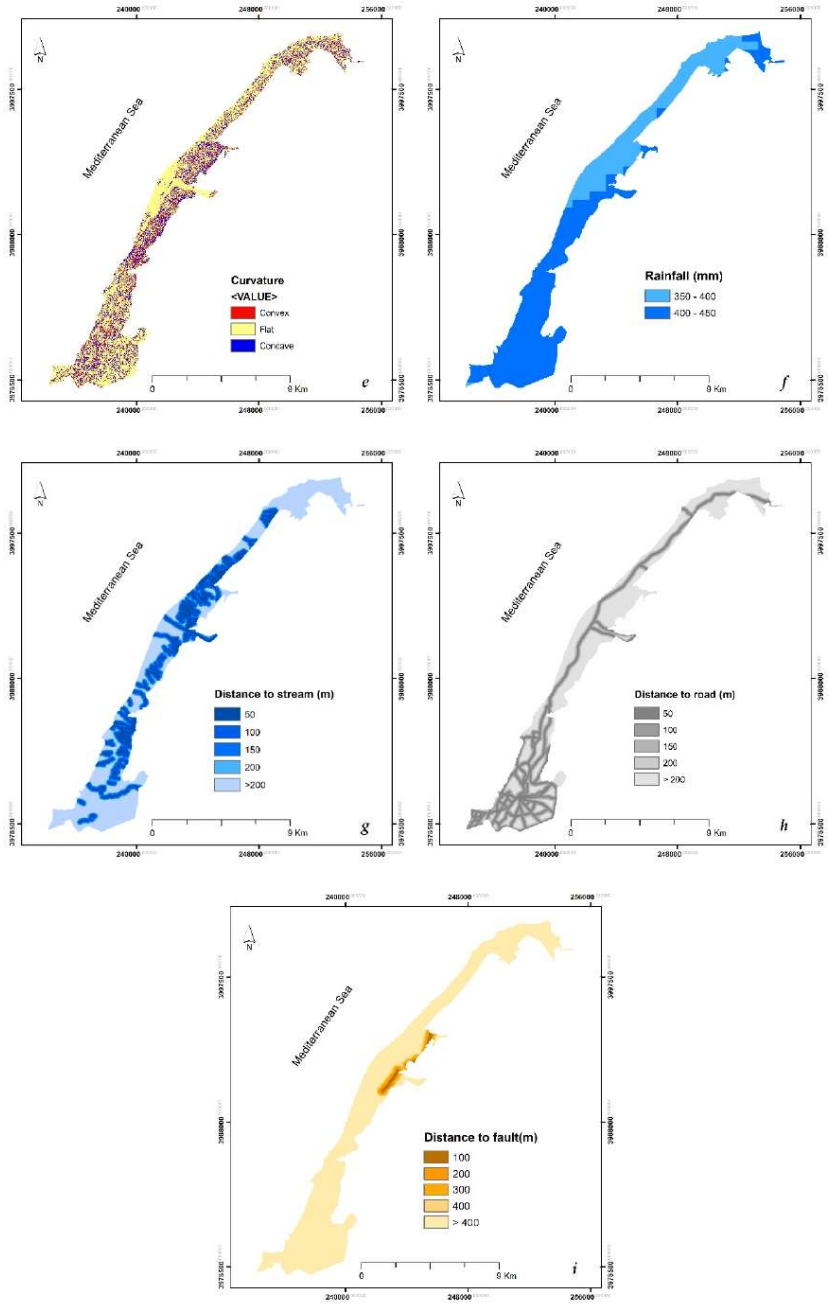


Figure 4. (**a**) Lithology; (**b**) slope; (**c**) land use; (**d**) aspect; (**e**) curvature plan; (**f**) rainfall; (**g**) distance to stream; (**h**) distance to road; and (**i**) distance to fault (Datum reference: WGS 84, UTM Zone 31).

2.3.3. Land Use

Land use is one of the key factors influencing the stability of slopes [64,65]. The non-organized distribution of constructions on brittle and steep terrains could increase landslide occurrence [66,67]. Vegetation coverage also plays a vital role in landslide events reduction due to its root structure, which adds strength to the soil and provides ground solidity, thus mitigating the erosive effect of hydrological agents [36,68]. In this work, the evaluation of the impact of land cover types on landslide occurrence was performed by processing a satellite image from Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) (acquired in October 2017). Furthermore, the Maximum Likelihood (ML) algorithm was applied to the satellite image using ENVI 4.8 software in order to perform a supervised classification [69]. The studied site was divided into 7 classes: urban area, sparsely vegetated area, river, fallow land, densely vegetated area, beach-dune and sand plains, and agriculture land (Figure 4c). The produced map showed an overall accuracy of 94.79%, considering the analysis of the confusion matrix (Figure 4c).

2.3.4. Slope Aspect

The slope aspect is a crucial geomorphological component in landslide investigations, since it has indirect action on slope instability. The slope aspect is mainly related to climatic agents such precipitation, runoff surface, sun exposure, and dry wind, which subsequently influence soil moisture, vegetation and, ultimately, landslide occurrence [68,70–72]. In this work, the slope aspect was derived from SRTM DEM with 30 m of spatial resolution and divided into 5 classes: Flat, North, East, South and West (Figure 4d).

2.3.5. Plane Curvature

The curvature plane, which is defined as the change rate of slope angle or aspect [73,74], can take 3 slope shapes: flat, convex, and concave. High values of the plane curvature correspond to a convex shape of the slope; conversely, low values mean the slope is concave. This factor has a significant influence on the runoff surface. In general, convex areas disperse runoff equally and consequently do not affect slope stability. However, concave surfaces contribute to the accumulation of water in the lowest part, leading to the occurrence of landslides. In this study, the plane curvature was derived from SRTM DEM in a GIS environment (Figure 4e).

2.3.6. Rainfall

Rain is considered one of the most important factors in the occurrence of landslides [75,76]. Rainwater infiltration increases soil moisture and, subsequently, a decrease in shear strength and soil cohesion, which induces its instability [46,77,78]. In the province of Mostaganem, considerable rainfalls occur mainly in December and January [51], since the East of Algeria is rainier than the West. In the current study, we obtained this parameter by digitizing the rainfall map of Algeria (1/200,000) and dividing our area into 2 classes (350–400 mm and 400–450 mm; Figure 4f). For the two approaches we followed, the rank and weight of this parameter were assigned based on expert knowledge.

2.3.7. Distance to Stream

The province of Mostaganem has a significant land aquifer [79,80]. This resource could indicate the high density of streams in the region. The distance to stream plays a crucial role in landslide phenomena. It could affect slope stability where the streams saturate the lower part of the soil, increasing its water level [17,81]. Methodologically, the streams were digitized from a topographic map (1/25,000). Furthermore, a multi-stream buffer was created using GIS software tools and divided into 5 classes with a 50 m interval (Figure 4g).

2.3.8. Distance to Roads

The road network is an important anthropogenic feature that could also affect the stability of the terrain [82]. The RN11 (Route Nationale) is the most important road located

in the study area. Methodologically, we digitized the road network, extracted from Google Road using the Quick Map Services Plugin available in open-source GIS software (QGIS—version 3.8). Furthermore, a multi buffer was created in a GIS environment, in which five classes with 50 m intervals were grouped (Figure 4h).

2.3.9. Distance to Fault

The areas close to active faults are weak, and consequently, their susceptibility to instability increases. In the coastal district of Mostaganem, faults were obtained through the digitization of the geological map of Bosquet-Mostaganem (1/200,000). A multi buffer was computed with an interval of 100 m, using GIS tools. The distances to the fault were grouped into 5 classes (Figure 4i).

2.4. Landslide Susceptibility Analysis

2.4.1. Knowledge-Driven Approach

The knowledge-driven approach is a qualitative method; it can be either direct or indirect. The direct method is based on direct geomorphological mapping of the geological hazard. However, the indirect method is based on assigning ratings and weights depending on the influence of controlling factors for landslide triggering [83,84]. The success of this approach is mainly based on expert knowledge [27]. In this work, a value between 1 to 5 was assigned to the factors. The highest value was assigned to factors and their subclasses with an important influence on landslide occurrence, and vice vera [85,86]. The landslide susceptibility map was produced using the Raster Calculator tool from GIS software according to Equation (1).

$$LSM(K_D) = (W\alpha \times \alpha) + (W\beta \times \beta) + (W\gamma \times \gamma) + (W\delta \times \delta) + (W\varepsilon \times \varepsilon) + (W\lambda \times \lambda) + (W\mu \times \mu) + (W\tau \times \tau) + (W\omega \times \omega) \quad (1)$$

where *LSM* (*K_D*) is the Landslide Susceptibility Map produced according to the knowledge-driven approach; α is the lithology; β is the Slope; γ is the land use; δ is the slope aspect; ε is the curvature plan; λ is the rainfall; μ is the distance to stream; τ is the distance to road; ω is the distance to fault; $W\alpha$ is the weight of lithology factor; $W\beta$ is the weight of slope; $W\gamma$ is the weight of land use; $W\delta$ is the weight of slope aspect; $W\varepsilon$ is the weight of curvature; $W\lambda$ is the weight of rainfall; $W\mu$ is the weight of distance to stream; $W\tau$ is the weight of distance to road; and $W\omega$ is the weight of distance to fault.

2.4.2. Analytical Hierarchy Process (AHP)

The AHP, introduced by Saaty (1980), is a multi-criteria decision-making (MCDM) method, used in various research fields due to its simplicity and flexibility. Therefore, the mapping of landslide susceptibility is one of the domains that most uses the AHP [17]. This process, which consists of assigning weights to landslide-controlling factors [8,87], makes its application possible. Generally, the AHP method comprises 3 steps: (1) decomposition of the problem into different hierarchical levels, in which high levels represent the main objectives of decision-making; (2) comparative judgment through the pairwise comparison of factors; and (3) synthesis of the proprieties according to the importance of each factor, based on the literature and expert knowledge. Furthermore, in order to describe the relationship existing between different factors, a numerical value based on the AHP was assigned to each factor (Table 2). The pairwise comparison matrix was created through dual comparison between different factors. Weights were determined based on the normalization of the eigenvector, which corresponds to the largest eigenvalue of the ratio matrix. With reference to the comparison, different judgments could be reached by experts.

Table 2. Scale of preference between two parameters in the Analytical Hierarchy Process (AHP) [29].

Intensity of Factors	Degree of Intensity	Explanation
1	Equal importance	The two parameters contribute to the same objective
3	Moderate Importance	The experience or judgment slightly favours one parameter over another
5	Strong importance	A parameter is favoured strongly over another
7	Very strong importance	A parameter is favoured very strongly over another, and it shows in practice
9	Extreme importance	The evidence of favouring one parameter over another is of the highest degree possible to affirm
2, 4, 6, 8	Intermediate value between two adjacent judgments	Used to represent the comprises between the preference scores 1, 3, 5, 7 and 9
Reciprocals	Opposites	Used for inverse comparisons

The Consistency Ratio (*CR*) was computed to describe the quality of judgments according to Equation (2).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

RI is the Random Index depending on the order of matrix given in Table 3 [29]. *CI* is the Consistency index, computed using Equation (3):

$$CI = \frac{(\lambda max - n)}{(n-1)} \quad (3)$$

where λmax is the maximum eigenvalue of matrix, and n is the order of matrix.

Table 3. Random consistency index (RI).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

If the CR value is lower than 10%, it means the assigned weights of the factors are consistent [81]. If the CR is higher than 10%, it indicates that the comparisons are not consistent, which consequently requires a revision. In our work, the AHP was applied in order to determine the ranking and weights of each class. Regarding the precipitation parameter, the ranking of classes was given directly based on expert knowledge.

2.4.3. Weighted Overlay Method (WOM)

The WOM is a simple, direct and adequate tool available in GIS environments that is used widely to solve multi-criteria problems, such as landslide susceptibility [87,88]. This method consists of a combination of different factors considering its given weights [84,89]. In this study, ranking values and parameter weights have been determined using AHP. In order to produce the predicting landslide susceptibility map, all the parameters were integrated in a WOM tool within a GIS environment. The summation of weights must be equal to 100. Accordingly, each weight was multiplied by its assigned factor according to Equation (4).

$$LSM = \Sigma(X_i \times W_i) \quad (4)$$

where X_i is the ranking of each class, and W_i is the weight of the controlling-parameter.

2.4.4. Normalization

Zadeh (1965) [90] introduced fuzzy set logic for the first time, and it has been widely applied in different research areas and on distinct measurement due to its straight forwardness [91,92]. In this logic, all objects are considered as elements of a set. In fuzzy theory,

each element can take a value ranging from 0 to 1 [74,93]. According to this method, many researchers have combined it with AHP in order to improve the accuracy of the assessment of landslide susceptibility mapping [17,94–96].

In this work, we produced two different maps in terms of scale value (the value classes), applying two methods: the knowledge-driven approach and the AHP combined with WOM. Considering this, it was possible to compare both maps and eliminate uncertain values. Furthermore, the fuzzy linear membership function was applied with the aim to convert the input data linearly on the 0 to 1 scale, in which the value 0 is assigned to the lowest input data and value 1 to the highest input value; normalization was processed in GIS software.

3. Results

3.1. Knowledge-Driven Approach

Based on the knowledge-driven approach, the evaluation integrated several parameters such as lithology, slope, land cover, aspect, curvature, rainfall, distance to stream, distance to road and distance to fault. All the factors were ranked and weighted based on their importance. A numerical scale (1–5) from low to high influencing was applied. The most influential factors were: lithology, slope, land cover, and aspect. Curvature plane, rainfall, distance to stream, and distance to road are equally important with respect to slope instability. Distance from faults increases the likelihood of landslide occurrence [37]. However, in this study case, this factor does not contribute much to landslide triggering. To produce the landslide susceptibility map (Figure 5a), the sum of each parameter multiplied by its correspondent weight was performed in the Raster Calculator tool, considering Equation (1).

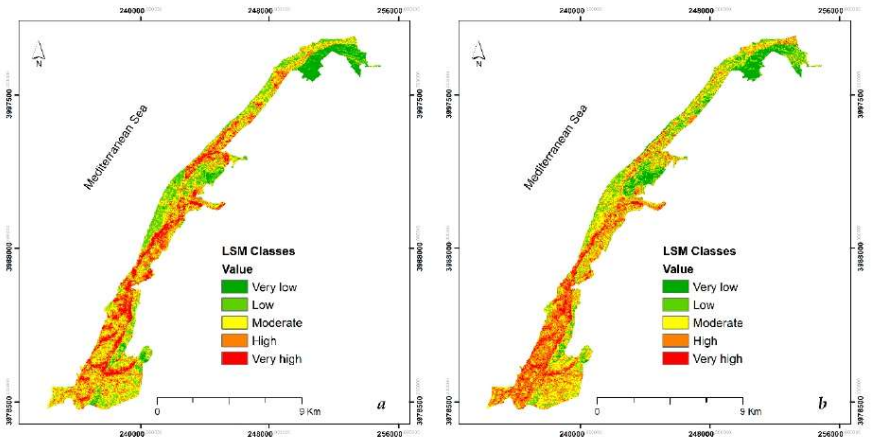


Figure 5. Landslide susceptibility map of (**a**) the knowledge-driven approach and (**b**) the AHP method combined with WOM.

3.2. Analytical Hierarchy Process Weights

The AHP was applied to estimate the weights and ratings for class factors: lithology, slope, aspect, land; both can be obtained from the pair wise comparison matrix. The matrix was applied on two levels: (i) to assess the class rating of each parameter and (ii) to estimate the weights parameter through Python scripts in GIS software. As illustrated in Table 4, lithology was the most influential parameter, with a value of 0.280. The classes quaternary continental alluvium and sand presented ranking values of 0.29 and 0.26, respectively;

these classes make the lithological factor more influential for landslide triggering. They presented values of 0.29 and 0.26, respectively. The slope also had a considerable value of 0.164, followed by land use, with 0.154, and curvature plane, with 0.111. The factors distance to stream, distance to road, and rainfall were less important. However, the distance to fault was of minor influence.

Table 4. Estimation of ratings and weights based on the knowledge-driven approach and AHP process.

		Knowledge Driven Approach		AHP Method	
Parameter	**Classes**	**Rating**	**Weight**	**Rating**	**Weight**
Lithology					
	a^1	5	5	0.260	0.280
	a^2	5		0.290	
	F	4		0.120	
	m^m	3		0.090	
	p^m	3		0.100	
	m^g	2		0.030	
	m^{gm}	2		0.030	
	q^c	2		0.030	
	p^L	1		0.024	
	q^l	2		0.026	
Slope (°)					
	0–5	1	4	0.073	0.164
	05–10	2		0.110	
	10–15	3		0.161	
	15–25	4		0.259	
	>25	5		0.395	
Land cover					
	Sparsely vegetated area	5	3	0.368	0.154
	Built-up area	4		0.319	
	Beach, Dune and sand plains	3		0.097	
	Fallow land	3		0.098	
	Agriculture land	2		0.046	
	Forest	2		0.045	
	River	1		0.033	
Aspect					
	Flat	1	3	0.062	0.111
	North	2		0.114	
	East	3		0.171	
	South	4		0.146	
	West	5		0.504	
Curvature plane					
	Concave	5	2	0.619	0.086
	Flat	1		0.096	
	Convex	3		0.284	
Rainfall (mm)					
	350–400	2	2	0.250	0.057
	400–450	3		0.750	

Table 4. *Cont.*

		Knowledge Driven Approach		AHP Method	
Parameter	**Classes**	**Rating**	**Weight**	**Rating**	**Weight**
Distance to stream (m)					
	50	5	2	0.552	0.077
	100	4		0.189	
	150	3		0.137	
	200	2		0.077	
	>200	1		0.041	
Distance to road (m)					
	50	5	2	0.537	0.043
	100	4		0.202	
	150	3		0.129	
	200	2		0.081	
	>200	1		0.052	
Distance to fault (m)					
	100	5	1	0.480	0.028
	200	4		0.229	
	300	3		0.161	
	400	2		0.089	
	>400	1		0.041	
				Consistency Ratio (CR) = 0.088	

Note: a^1: quaternary continental sand; a^2: quaternary continental alluvium; F: flysch slick (thitonian upper cretaceous); m^m: blue marl (à cénirite); p^m: plaisancian marl blue; m^g: sandstone, conglomerate with red clay; m^{gm}: sandstone and sand (sedra—tliouanet level); q^c: post-villafranchian: calcareous carapace; p^L: plaisancian calcareous lithothamnium; q^1: calcareous lumachel standstone (calabrian).

The values of the CR were less than 10% (Table 4), which is in accordance with the consistency of the pair-wise comparison. Consequently, these results confirm the validity of the factors' ratings and weights [17]. Accordingly, several parameters were integrated into the GIS environment using a WOM tool, and each parameter was multiplied by its assigned weight to generate the landslide susceptibility map (Figure 5b) according to Equation (4).

3.3. Landslide Susceptibility Analysis

LSM showed different ranges of CVs (value classes); LSM based on the knowledge-driven approach showed a CV comprised between (30, 112) (Figure 5a), while LSM produced using the AHP weight combined with the WOM had a CV ranging from (6, 39) (Figure 5b).

In order to compare the results, the CV of the output layers was normalized on the numerical scale (0, 1), using a fuzzy linear membership function and the Natural Breaks classification (Jenks), which is simple and based on natural groupings inherent in the data. Class Breaks enable the grouping of similar values and maximize the differences between classes [70,78].

The LSM maps were grouped into 5 classes: very low, low, moderate, high and very high (Figure 5). The very low areas susceptible to landslides cover 3.823 km^2 (Figure 5a); they are mainly located in densely vegetated areas. Plant roots provide high stability to the soil, and consequently no landslide event has been recorded in this class (Figure 6a). The zone with low susceptibility to landslides covers 11.484 km^2. These areas belong to the beach, dune, and sand class corresponding to a very low slope (0–5°). The moderate class covers an extended area of 16.329 km^2. The high and very high sites were located near the urban nucleus and close to the national road (RN11), and they cover a sector of 13.249 km^2 and 6.834 km^2, respectively. A very high landslide density is observed near these anthropogenic features (Figure 6). The high and very high classes were located mainly in the Western part; they were estimated as 72.24% (9.604 km^2) and 79.19% (5.142 km^2).

The Eastern part records a high susceptible area of 3.689 km^2 (27.75%). The very high class covers an area of 1.422 km^2 (20.80%), and these dangerous sites are mostly situated in the fallow land class.

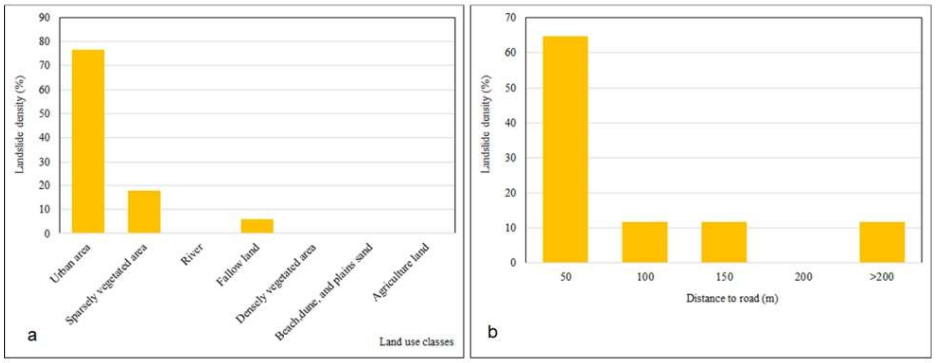


Figure 6. Landslide density: (**a**) Land Use (LU) map and (**b**) distance to road.

LSM, utilizing the knowledge-driven approach, was comparable to that drawn by means of the AHP method (Figure 5b). With respect to this, the very low class corresponds to the forests, which occupy an area of 4.05 km^2 (7.82%). However, regions with low landslide susceptibility are located in the coastal sand features, of which the class covers 10.63 km^2 (20.53%). The moderate zones, mainly located in the Western part of the province, cover an area of 15.84 km^2 (30.6%). Finally, the high and very high susceptibility classes, predominant in the Western urban zone, cover extended areas of 16.197 km^2 (31.29%) and 5.047 km^2 (9.75%), respectively.

Zones with a very low susceptibility to landslides were registered in areas with dense vegetation. Vegetation plays an important role in enhancing slope stability and reducing landslide susceptibility [97]. Zones with the lowest landslide susceptibility are located along beaches, mobile dunes, and sand plains (Figure 5). Generally, these zones are flat and do not register any event in this land cover class. The regions with moderate landslide susceptibility were identified close to built-up areas and in fallow land. Due to the predominance of streams, the zones with high and very high susceptibility were recorded in the urban nucleus and close to the national road (RN11). In the coastal district of Mostaganem, most human settlements were constructed in the quaternary continental alluvium and sand classes. Both lithological types have weak shear strength when hydrogeological conditions are favourable, leading to an increase in landslide susceptibility. In this respect, the quaternary continental alluvium recorded high landslide event density, which has been estimated at about 52.94% (Figure 7). The results obtained show clearly that the density of landslide events increases with the susceptibility degree (Table 5). The current situation in Mostaganem is due to unplanned and uncontrolled use of this area. Since 2000, the landscape of the Mostaganem coast district has undergone an important alteration due to the excessive exploitation of natural resources and uncontrolled expansion of residential buildings, regardless of environmental impacts (slope cutting, floods) and in spite of the Littoral Law, which should protect the coastal zone [98]. The situation in the Mostaganem coast district reflects a major lack of planning during the urbanization process [45,99].

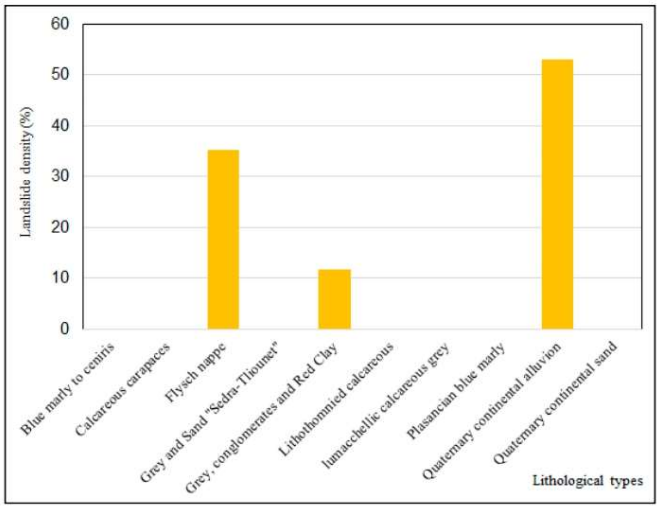


Figure 7. Landslide density extracted from the lithology map.

Table 5. Landslide susceptibility classes area.

Susceptibility Classes	Knowledge Driven Approach		AHP Method	
	Area (km^2)	L.D (%)	Area (km^2)	L. D (%)
Very low	3.823	0	4.05	0
Low	11.484	5.882	10.63	11.765
Moderate	16.329	11.765	15.84	11.765
High	13.294	35.294	16.197	23.529
Very high	6.834	47.059	5.047	52.941

L.D: landslide density per class.

3.4. Validation of Landslide Susceptibility Maps

Evaluation of the quality of predictive landslide maps represents a primary step in this field. Therefore, different methods were attempted, such as landslide density analysis (L_d), Prediction Rate Curve (PRC), and Area Under Curve (AUC) of Receiver Operating Characteristic curve (ROC) [100]. In this work, two methods were applied. The first method is based on the utilization of the ground truth map of landslides with the aim to compare the produced landslide susceptibility maps. The quality of these maps was concluded in comparison to the ground truth map (Figure 5). In order to achieve the objective of this method, a numerical scale (1–5) has been assigned to the predictive map classes. The lowest value corresponds to zones with lower susceptibility to landslides; the highest value corresponds to areas with higher susceptibility to landslides (Table 6). Furthermore, two assumptions based on the location of the landslide event on the ground truth map of the landslide were taken:

1. The landslide event is located in the same susceptibility class (Figure 5), the result is outstanding, and the choice of the model was correct.
2. The landslide event is located in two different susceptibility classes (degree), and two hypotheses could be considered:
   - If the difference between the classes of the two predictive maps is one (1), the choice of the model is accepted.
   - If the difference is higher than one (>1), the model should be revised.

Table 6. Assignment of numerical scale to landslide susceptibility classes.

Landslide Susceptibility Classes	Numerical Scale
Very low	1
Low	2
Moderate	3
High	4
Very high	5

Based on the comparison (Table 7), 59% of the landslide events are located in the same landslide susceptibility degree, which means that the choice of the models was correct. In contrast, 41% of cases indicate that they belong to two distinct classes with a difference equal to one (1). This analysis reflects the acceptable choice of the models.

Table 7. Comparison of the event location for the two methods.

Landslide Events	Knowledge Driven Approach	AHP_WOM Method	Diff M1/M2
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			

Low Moderate High Very high Good Acceptable

The second method was the Receiver Operating Characteristic curve (ROC), which is a static technique used by researchers to validate predictive results [101]. In this case, a graphical plot that provides analysis based on true-positive and false-positive rates (sensitivity = f (specificity)) represented the ROC. When this method is applied, the generated Area Under Curve (AUC), of which the value could change in different cases, shows the reliability of the model used. Accordingly, values ranging from 0.5 to 1 indicate that the model is correct; values < 0.5 indicate a random fit. In this work, we calculated the AUC using XLSTAT software (version 2015). The results of the predictive maps show that the layer, based on the knowledge-driven approach, has an accuracy of AUC = 0.686. For the map based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) combined with WO, the ROC showed a better accuracy (AUC = 0.753) (Figure 8). These values indicate that the used models are suitable for landslide susceptibility mapping. Based on the techniques used, the landslide predictive maps of landslides show acceptable results.

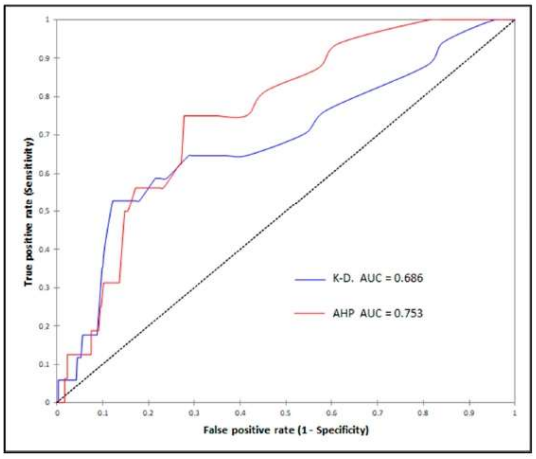


Figure 8. Receiver Operating Characteristic (ROC) curve assessment of two methods applied.

4. Conclusions

Landslide hazards impose enormous constraints on socioeconomic development. Many methods have been attempted for landslide zonation, including qualitative and quantitative approaches. In this research, we used a semi-quantitative method, applying the analytical hierarchy process (AHP) and knowledge-driven approaches; the two produced layers presented common points. In effect, we identified zones with low and very low landslide susceptibility in densely vegetated sites, as well as beach and coastal dune areas. However, zones with high and very high susceptibility were registered in the urban nucleus and close to the national road, RN11; strong water streams characterized both places. Regarding the distance to fault, the values confirmed that this parameter has a weak influence on landslide occurrence. The predictive landslide susceptibility maps were evaluated using the ground truth map of landslide and the Receiver Operating Characteristic curve (ROC). The ground truth map of landslides confirmed that the modelled maps present outstanding reliability, considering the location of the landslide events. Meanwhile, validation based on the ROC indicates an accuracy of 0.686 (AUC = 0.686) regarding the map produced using the knowledge-driven approach. The realized map using the AHP combined with the weighted overlay method showed a higher accuracy (AUC = 0.753). Both techniques proved that the achieved results are scientifically correct compared with other works. The landscape of the Mostaganem province is mainly formed by a brittle lithology. Many construction projects have been launched in the vulnerable sandy coastal features, regardless of the Algerian littoral law that prohibits it. Poorly planned construction projects in low resilience areas, realized without adequate grading of slopes and control of the hydrographic network, contribute to landslides triggering. The realized maps could be used to monitor the spread of landslides and prevent possible natural disaster. The local authorities of Mostaganem have set an economic development program until 2030. In this regard, the landslide susceptibility map could help decision makers to better design future construction projects and avoid building in highly susceptible zones.

Author Contributions: R.S. contributed to the article by conceptualization, literature review, investigation, data collection, modeling, validation, visualization, and writing the original draft; N.E.-T. planned and supervised the field work activities, interpreted the data and reviewed the final draft of the manuscript; A.C.T. and L.D. supervised the methodological activities, provided the valuable comments in writing this paper and reviewed the final draft of manuscript; H.M. provided a valu-

able comment in landslide phenomenon; R.Y.M. contributed conception to the geo database and the reviewed the final draft. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was funded as a part of Erasmus project between the University of Mostaganem (Algeria) and the University of Porto (Portugal), and by the National Funds through FCT—Foundation for Science and Technology under the project UIDB/04683/2020.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: We thank the General Directorate for Scientific Research and Technological Development, we thank too as well the National Coastal Commission (Commissariat National du Littoral) of Mostaganem, the Directorate of Public Works of Mostaganem and the map library (cartothèque) of the University of Oran. We would like thank too William Edmonson for revising the paper and providing the valuable comments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Amod, D.S.; Takaaki, A.; Masamu, A. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: An investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2000**, *66*, 981–989.
2. Galli, M.; Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* **2008**, *94*, 268–289. [CrossRef]
3. Shanmugam, G.; Wang, Y. The landslide problem. *J. Palaeogeogr.* **2015**, *4*, 109–166. [CrossRef]
4. Rahamana, S.A.; Aruchamy, S.; Jegankumar, R. Geospatial Approach on Landslide Hazard Zonation Mapping Using Multicriteria Decision Analysis: A Study on Coonoor and Ooty, Part of Kallar Watershed, The Nilgiris, Tamil Nadu. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2014**, 1417–1422. [CrossRef]
5. Pham, B.T.; Shirzadi, A.; Shahabi, H.; Omidvar, E.; Singh, S.K.; Sahana, M.; Asl, D.T.; Ahmad, B.B.; Quoc, N.K.; Lee, S. Landslide Susceptibility Assessment by Novel Hybrid Machine Learning Algorithms. *Sustainability* **2019**, *11*, 4386. [CrossRef]
6. Calcaterra, D.; Parise, M. Landslide types and their relationships with weathering in a Calabrian basin, southern Italy. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* **2005**, *64*, 193–207. [CrossRef]
7. Froude, M.J.; Petley, D.N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2018**, *18*, 2161–2181. [CrossRef]
8. Ali, S.; Biermanns, P.; Haider, R.; Reicherter, K. Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China–Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2019**, *19*, 999–1022. [CrossRef]
9. Hidalgo, C.; Vega, J.A.; Obando, M.P. Effect of the Rainfall Infiltration Processes on the Landslide Hazard Assessment of Unsaturated Soils in Tropical Mountainous Regions. In *Engineering and Mathematical Topics in Rainfall*; IntechOpen: London, UK, 2018.
10. Prakash, N.; Manconi, A.; Loew, S. Mapping Landslides on EO Data: Performance of Deep Learning Models vs. Traditional Machine Learning Models. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 346. [CrossRef]
11. Wang, Q.; Wang, D.; Huang, Y.; Wang, Z.; Zhang, L.; Guo, Q.; Chen, W.; Chen, W.; Sang, M. Landslide Susceptibility Mapping Based on Selected Optimal Combination of Landslide Predisposing Factors in a Large Catchment. *Sustainability* **2015**, *7*, 16653–16669. [CrossRef]
12. Machane, D.; Bouhadad, Y.; Cheikhlounis, G.; Chatelain, J.L.; Oubaiche, E.H.; Abbès, K.; Guillier, B.; Bensalem, R. Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria. *Nat. Hazards* **2008**, *45*, 295–308. [CrossRef]
13. Djerbal, L. Analyse des Mécanismes de déFormation et de la Rupture Progressive du Versant Instable d'Ain El Hammam. Ph.D. Thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algeria, 2013.
14. Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* **1999**, *31*, 181–216. [CrossRef]
15. Hadmoko, D.S.; Lavigne, F.; Sartohadi, J.; Hadi, P.; Winaryo, P. Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. *Nat. Hazards* **2010**, *54*, 623–642. [CrossRef]
16. Hadji, R.; Achour, Y.; Hamed, Y. Using GIS and RS for Slope Movement Susceptibility Mapping: Comparing AHP, LI and LR Methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria. In *Collaboration and Integration in Construction, Engineering, Management and Technology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 1853–1856.
17. Pourghasemi, H.R.; Pradhan, B.; Gokceoglu, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Nat. Hazards* **2012**, *63*, 965–996. [CrossRef]
18. Soeters, R.; Van Westen, C.J. Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides Investig. Mitig.* **1996**, *247*, 129–177.

19. Aleotti, P.; Baldelli, P.; Polloni, G. Landsliding and Flooding Event Triggered by Heavy Rains in the Tanaro Basin (Italy). 1996. Available online: http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/1996_1_435.pdf (accessed on 11 January 2021).
20. Ayalew, L.; Yamagishi, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* **2005**, *65*, 15–31. [CrossRef]
21. Pardeshi, S.D.; Autade, S.E.; Pardeshi, S.S. Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques. *SpringerPlus* **2013**, *2*. [CrossRef]
22. Mahalingam, R.; Olsen, M.J.; O'Banion, M.S. Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study). *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2016**, *7*, 1884–1907. [CrossRef]
23. Lee, S. Landslide susceptibility mapping using an artificial neural network in the Gangneung area, Korea. *Int. J. Remote Sens.* **2007**, *28*, 4763–4783. [CrossRef]
24. Thiery, Y.; Terrier, M. Évaluation de l'aléa glissements de terrain: État de l'art et perspectives pour la cartographie réglementaire en France. *Revue Française Géotechnique* **2019**, *156*. [CrossRef]
25. Saadatkhah, N.; Kassim, A.; Lee, L.M. Qualitative and quantitative landslide susceptibility assessments in Hulu Kelang area Malaysia. *Electron. J. Geotech. Eng.* **2014**, *19*, 545–563.
26. Mandaglio, M.C.; Gioffrè, D.; Pitasi, A.; Moraci, N. Qualitative Landslide Susceptibility Assessment in Small Areas. *Procedia Eng.* **2016**, *158*, 440–445. [CrossRef]
27. Van Westen, C.J.; Rengers, N.; Soeters, R. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Nat. Hazards* **2003**, *30*, 399–419. [CrossRef]
28. Gupta, S.K.; Shukla, D.P.; Thakur, M. Selection of weightages for causative factors used in preparation of landslide susceptibility zonation (LSZ). *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2018**, *9*, 471–487. [CrossRef]
29. Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.
30. Vakhshoori, V.; Pourghasemi, H.R.; Zare, M.; Blaschke, T. Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-Based Data Mining Algorithms. *Water* **2019**, *11*, 2292. [CrossRef]
31. Zhou, G.; Esaki, T.; Mitani, Y.; Xie, M.; Mori, J. Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Eng. Geol.* **2003**, *68*, 373–386. [CrossRef]
32. Van Westen, C.J.; Rengers, N.; Terlien, M.T.J.; Soeters, R. Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation. *Acta Diabetol.* **1997**, *86*, 404–414. [CrossRef]
33. Lee, S.; Min, K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environ. Earth Sci.* **2001**, *40*, 1095–1113. [CrossRef]
34. Yesilnacar, E.; Topal, T. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Eng. Geol.* **2005**, *79*, 251–266. [CrossRef]
35. Nefeslioglu, H.A.; Gokceoglu, C.; Sonmez, H. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Eng. Geol.* **2008**, *97*, 171–191. [CrossRef]
36. Choi, J.; Oh, H.J.; Lee, H.J.; Lee, C.; Lee, S. Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Eng. Geol.* **2012**, *124*, 12–23. [CrossRef]
37. Pradhan, B.; Lee, S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environ. Model. Softw.* **2010**, *25*, 747–759. [CrossRef]
38. Yalcin, A.; Reis, S.; Aydinoglu, A.; Yomralioglu, T. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* **2011**, *85*, 274–287. [CrossRef]
39. Vakhshoori, V.; Zare, M. Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2016**, *7*, 1731–1752. [CrossRef]
40. Bourenane, H.; Bouhadad, Y.; Guettouche, M.S.; Braham, M. GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* **2014**, *74*, 337–355. [CrossRef]
41. Dahoua, L.; Yakovitch, S.; Hadji, R.H. GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: A bivariate approach for A1 East-west highway, North Algeria. *Min. Sci.* **2017**, *24*. [CrossRef]
42. Achour, Y.; Boumezbeur, A.; Hadji, R.; Chouabbi, A.; Cavaleiro, V.; Bendaoud, E.A. Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arab. J. Geosci.* **2017**, *10*, 194. [CrossRef]
43. Manchar, N.; Benabbas, C.; Hadji, R.; Bouaicha, F.; Grecu, F. Landslide Susceptibility Assessment in Constantine Region (NE Algeria) By Means of Statistical Models. *Stud. Geotech. Mech.* **2018**, *40*, 208–219. [CrossRef]
44. Roukh, Z.E.A.; Abdelmansour, N. Landslide susceptibility mapping using information value and frequency ratio for the Arzew sector (North-Western of Algeria). *Bull. Miner. Res. Explor.* **2018**, 1–10. [CrossRef]
45. Senouci, R.; Taibi, N.E. Impact of the Urbanization on Coastal Dune: Case of Kharrouba, West of Algeria. *J. Sediment. Environ.* **2019**, *4*, 90–98. [CrossRef]
46. Bourenane, H.; Guettouche, M.S.; Bouhadad, Y.; Braham, M. Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. *Arab. J. Geosci.* **2016**, *9*, 1–24. [CrossRef]

47. Agence Nationale d'Aménagement de Territoire. *Plan d'Aménagement Côtier*; Rapport; ANAT: Kouba, Algérie, 2005.
48. Taibi, N.E. Conflict between Coastal Tourism Development and Sustainability: Case of Mostaganem, Western Algeria. *Eur. J. Sustain. Dev.* **2016**, *5*, 13–24. [CrossRef]
49. Godbani, T. Environnement et Littoralisation de l'Ouest Algérien. Ph.D. Thesis, Université d'Oran 2, Oran, Algeria, 2009.
50. Caïd, N.; Chachoua, M.; Berrichi, F. Analyse spatiale diachronique de l'occupation du vignoble algérien depuis 60 ans: Cas de la wilaya de Mostaganem. *Physio-Géo Géographie Physique Environ.* **2019**, *13*, 53–74. [CrossRef]
51. Megherbi, W. L'ensablement, Un Risque Négligé en Zone Tellienne Littorale Cas de la Région Mostaganem. Master's Thesis, Université d'Oran 2, Oran, Algeria, 2015.
52. Zaoui, M. Système D'information Géographique et Méthodologie Multicritère pour le Choix de Sites de Retenues Collinaires: Application pour la Wilaya de Mostaganem, Algérie. Ph.D. Thesis, Université de Mostaganem, Mostaganem, Algeria, 2015.
53. Senouci, M.; Trache, A.E.H. *Etude de la Vulnérabilité aux Changement Climatiques de la Wilaya de Mostaganem*; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Ageria, Algeria, 2014.
54. Del Ventisette, C.; Righini, G.; Moretti, S.; Casagli, N. Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2014**, *30*, 238–246. [CrossRef]
55. Moosavi, V.; Talebi, A.; Shirmohammadi, B. Producing a landslide inventory map using pixel-based and object-oriented approaches optimized by Taguchi method. *Geomorphology* **2014**, *204*, 646–656. [CrossRef]
56. Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* **2005**, *72*, 272–299. [CrossRef]
57. Van Westen, C.J.; Van Asch, T.W.J.; Soeters, R. Landslide hazard and risk zonation—Why is it still so difficult? *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2006**, *65*, 167–184. [CrossRef]
58. Guri, P.K.; Ray, P.K.C.; Patel, R.C. Spatial prediction of landslide susceptibility in parts of Garhwal Himalaya, India, using the weight of evidence modelling. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187*, 1–25. [CrossRef]
59. Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Antonini, G.; Galli, M.; Cacciano, M.; Castellani, M.; Salvati, P. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2002**, *2*, 57–72. [CrossRef]
60. Igwe, O. The geotechnical characteristics of landslides on the sedimentary and metamorphic terrains of South-East Nigeria, West Africa. *Geoenviron. Disasters* **2015**, *2*, 1. [CrossRef]
61. Kouli, M.; Loupasakis, C.; Soupios, P.; Vallianatos, F. Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Nat. Hazards* **2009**, *52*, 599–621. [CrossRef]
62. Awawdeh, M.; Elmughrabi, M.A.; Atallah, M.Y. Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: A case study from North Jordan. *Environ. Earth Sci.* **2018**, *77*, 732. [CrossRef]
63. Pham, B.T.; Bui, D.T.; Dholakia, M.; Prakash, I.; Pham, H.V.; Mehmood, K.; Le, H.Q. A novel ensemble classifier of rotation forest and Naïve Bayer for landslide susceptibility assessment at the Luc Yen district, Yen Bai Province (Viet Nam) using GIS. *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2016**, *8*, 649–671. [CrossRef]
64. Gokceoglu, M.E.C. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environ. Geol.* **2002**, *41*, 720–730. [CrossRef]
65. Glade, T. Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand. *Catena* **2003**, *51*, 297–314. [CrossRef]
66. Hong, H.; Pradhan, B.; Bui, D.T.; Xu, C.; Youssef, A.M.; Pourghasemi, H.R. Comparison of four kernel functions used in support vector machines for landslide susceptibility mapping: A case study at Suichuan area (China). *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2017**, *8*, 544–569. [CrossRef]
67. Perera, E.N.C.; Jayawardana, D.T.; Jayasinghe, P.; Bandara, R.M.S.; Alahakoon, N. Direct impacts of landslides on socio-economic systems: A case study from Aranayake, Sri Lanka. *Geoenviron. Disasters* **2018**, *5*, 11. [CrossRef]
68. Saha, A.K.; Gupta, R.P.; Arora, M.K. GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *Int. J. Remote Sens.* **2002**, *23*, 357–369. [CrossRef]
69. Teodoro, A.C.; Pais-Barbosa, J.; Gonçalves, H.; Veloso-Gomes, F.; Taveira-Pinto, F. Identification of beach hydromorphological patterns/forms through image classification techniques applied to remotely sensed data. *Int. J. Remote Sens.* **2011**, *32*, 7399–7422. [CrossRef]
70. Kayastha, P.; Dhital, M.; De Smedt, F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Comput. Geosci.* **2013**, *52*, 398–408. [CrossRef]
71. Roşian, G.; Csaba, H.; Kinga-Olga, R.; Boţan, C.N.; Gavrilă, I.G. Assessing landslide vulnerability using bivariate statistical analysis and the frequency ratio model. Case study: Transylvanian Plain (Romania). *Z. Geomorphol.* **2016**, *60*, 359–371. [CrossRef]
72. Sifa, S.F.; Mahmud, T.; Tarin, M.A.; Haque, D.M.E. Event-based landslide susceptibility mapping using weights of evidence (WoE) and modified frequency ratio (MFR) model: A case study of Rangamati district in Bangladesh. *Geol. Ecol. Landsc.* **2019**, 1–14. [CrossRef]
73. Wilson, J.P.; Gallant, J.C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2000.
74. Zhu, A.X.; Wang, R.; Qiao, J.; Qin, C.Z.; Chen, Y.; Liu, J.; Du, F.; Lin, Y.; Zhu, T. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology* **2014**, *214*, 128–138. [CrossRef]

75. Bălteanu, D.; Chendeş, V.; Sima, M.; Enciu, P. A country-wide spatial assessment of landslide susceptibility in Romania. *Geomorphology* **2010**, *124*, 102–112. [CrossRef]
76. Anis, Z.; Wissem, G.; Vali, V.; Smida, H.; Essghaier, G.M. GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. *Open Geosci.* **2019**, *11*, 708–726. [CrossRef]
77. Mousavi, S.Z.; Kavian, A.; Soleimani, K.; Mousavi, S.R.; Shirzadi, A. GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model. *Geomatics Nat. Hazards Risk* **2011**, *2*, 33–50. [CrossRef]
78. Wang, F.; Xu, P.; Wang, C.M.; Wang, N.; Jiang, N. Application of a GIS-Based Slope Unit Method for Landslide Susceptibility Mapping along the Longzi River, Southeastern Tibetan Plateau, China. *ISPRS Int. J. GeoInformation* **2017**, *6*, 172. [CrossRef]
79. Baiche, A.; Mohamed, H.S.; Ablaoui, H. Surexploitation des ressources en eau de l'aquifere du plateau de Mostaganem. *LARHYSS J.l* **2015**, *22*, 153–165.
80. Saibi, H. *Etude Hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (Nord-ouest Algérien): Géologie, Géophysique, Climatologie, Hydrodynamisme, Hydrochimie et Vulnérabilité des Eaux Souterraines à la Pollution par la Méthode DRASTIC*; Éditions Universitaires Européennes: Saarbrücken, Germany, 2010.
81. Chen, C.Y.; Huang, W.L. Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environ. Monit. Assess.* **2012**, *185*, 4125–4139. [CrossRef]
82. Arca, D.; Kutoglu, S.H.; Becek, K. Landslide susceptibility mapping in an area of underground mining using the multicriteria decision analysis method. *Environ. Monit. Assess.* **2018**, *190*, 1–14. [CrossRef]
83. Ghosh, S.; Das, R.; Goswami, B. Developing GIS-based techniques for application of knowledge and data-driven methods of landslide susceptibility mapping. *Indian J. Geosci.* **2013**, *67*, 249–272.
84. Kaur, H.; Gupta, S.; Parkash, S.; Thapa, R. Knowledge-driven method: A tool for landslide susceptibility zonation (LSZ). *Geol. Ecol. Landscapes* **2018**, 1–15. [CrossRef]
85. Rabehi, W.; Guerfi, M.; Mahi, H. Cartographie de la Vulnérabilité des Communes de la Baie d'Alger. Approche Socio-économique et Physique de la côte. *Mediterranee*. 2018. Available online: https://journals.openedition.org/mediterranee/8625 (accessed on 11 January 2021).
86. Michael, E.A.; Samanta, S. Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Model. Earth Syst. Environ.* **2016**, *2*, 1–15. [CrossRef]
87. Shit, P.K.; Bhunia, G.S.; Maiti, R. Potential landslide susceptibility mapping using weighted overlay model (WOM). *Model. Earth Syst. Environ.* **2016**, *2*, 1–10. [CrossRef]
88. Ahmed, M.F.; Rogers, J.D.; Ismail, E.H. A regional level preliminary landslide susceptibility study of the upper Indus river basin. *Eur. J. Remote Sens.* **2014**, *47*, 343–373. [CrossRef]
89. Basharat, M.; Shah, H.R.; Hameed, N. Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: A case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arab. J. Geosci.* **2016**, *9*, 1–19. [CrossRef]
90. Zadeh, L.A. Information and control. *Fuzzy Sets* **1965**, *8*, 338–353.
91. Zimmermann, H.J. Fuzzy set theory. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* **2010**, *2*, 317–332. [CrossRef]
92. Carranza, E.J.M.; Hale, M. Geologically Constrained Fuzzy Mapping of Gold Mineralization Potential, Baguio District, Philippines. *Nat. Resour. Res.* **2001**, *10*, 125–136. [CrossRef]
93. Ilanloo, M. A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2011**, *19*, 668–676. [CrossRef]
94. Feizizadeh, B.; Roodposhti, M.S.; Jankowski, P.; Blaschke, T. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Comput. Geosci.* **2014**, *73*, 208–221. [CrossRef] [PubMed]
95. Mijani, N.; Samani, N.N. Comparison of Fuzzy-based Models in Landslide Hazard Mapping. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2017**, 407–416. [CrossRef]
96. Mokarram, M.; Zarei, A.R. Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy-AHP. *Geotech. Geol. Eng.* **2018**, *36*, 3931–3943. [CrossRef]
97. Miles, S.B.; Keefer, D.K. *Comprehensive Areal Model of Earthquake-Induced Landslides: Technical Specification and User Guide*; Open File Report; USGS: Reston, VA, USA, 2007.
98. Akgun, A.; Kıncal, C.; Pradhan, B. Application of remote sensing data and GIS for landslide risk assessment as an environmental threat to Izmir city (west Turkey). *Environ. Monit. Assess.* **2012**, *184*, 5453–5470. [CrossRef]
99. Karsli, F.; Atasoy, M.; Yalcin, A.; Reis, S.; Demir, O.; Gokceoglu, C. Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey). *Environ. Monit. Assess.* **2008**, *156*, 241–255. [CrossRef]
100. Vakhshoori, V.; Zare, M. Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps? *Geomat. Nat. Hazards Risk* **2018**, *9*, 249–266. [CrossRef]
101. Lin, L.; Lin, Q.; Wang, Y. Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2017**, *17*, 1411–1424. [CrossRef]

Article publié “Impact of urbanization impact on coastal dune : Case of Kharrouba, West of Algeria”

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

IMPACT OF THE URBANIZATION ON COASTAL DUNE: CASE OF KHARROUBA, WEST OF ALGERIA

RACHIDA SENOUCI[1,2] AND NASR-EDDINE TAIBI[1]*

1 Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Laboratoire, Protection, Valorisation et Gestion des Ressources Marines et Littorales & Systématique Moléculaire, Mostaganem, Algeria
2 Université d'Oran 2, EGEAT, Espace Géographique et Aménagement du Territoire, Oran, Algeria

* CORRESPONDING AUTHOR, nasreddine.taibi@univ-mosta.dz

Received on 29 January 2019
Received in revised form on 5 February 2019
Accepted on 5 February 2019

Citation:
Senouci, R., Taibi, N., 2019. Impact of the urbanization on coastal dune: Case of Kharrouba, west of Algeria. Journal of Sedimentary Environments, 4 (1): 90-98.

Editor: Maria Virginia Alves Martins, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brazil

Abstract

Despite the coming into force of the Algerian Littoral Law 02/2002, which aimed the protection of the coast and a sustainable use of its resources, construction projects have been authorized on brittle unstable lithology. Relating to this, Kharrouba experienced a tremendous change during the period 2004-2012 due to a massive urbanization. Accordingly, expert's reports concerning the sustainability of construction projects as required by the Law 01-03-2003, were not sufficient. In this work, we analyzed the morphological coastal transformation of Kharrouba between 1989 and 2016 with particular interest in the decline of the dune due to a strong urban growth. For this purpose, a topographic map and Google Earth Pro pictures were used and processed in a geographical information system (SIG). The results of the diachronic analysis and the evolution of the coastal dune showed that the dune surface increased 23.82 % between 1989 and 2004; a period marked by a low construction activity. On the other hand, the surface of the dune regressed 59.67% during the period 2004-2012 that coincided with a major flat construction for the local population and secondary for the tourism. In addition to the environmental impact, the degradation of the dune led to more erosion, sediment balance disturbance of the beach, and coastal risk susceptibility. Moreover, the study area already experienced two landslides between 2012 and 2014 with negative socioeconomic consequences. A sustainable development of the coastal zone in Kharrouba and the province of Mostaganem should consider the environment and its protection as inevitable conditions for long-term economic activities. Therefore, the stakeholder of this region should comply with the existing laws regarding the preservation of the dune and the respect of the legally fixed distance between the coastline and a planned construction project.

Keywords: Algeria. Coast. Dune. Impact. Urbanization. SIG.

1. Introduction

Coastal areas present a complex geomorphology, which is constituted by rocky and sandy features. According to Kim et al. (2009) and Martínez et al. (2013) marine and atmospheric forces influence the morphology of the beach and the fore dune. The littoral dune, being the extreme seaward edge of all terrestrial existence, plays a key role in the protection of the near land against the storm (Jenks, 2014; Muller et al., 2016); it is as well a reserve of sediment for the beach nourishment.

Coastal dune around the world undergoes many morphological changes as a consequence of anthropogenic pressure. Many authors report that sand loss, construction of harbors for commercial purposes and touristic infrastructure seem to be the most important disturbing factors (Williams et al., 2001; Scarelli et al., 2017; Duffy et al., 2018;), which led to the decline of coastal dunes (Paskoff, 1994; Ghodbani, 2005).

In Algeria, 2/3 of the population is concentrated at the coast, which represents 5% of the country area (Bouroumi, 2014). From the seventies, this country knew a significant built-up development, especially in Algiers, Oran and Annaba cities, where the sandy coastal features have been transformed massively by the construction. Consequently, the Algerian legislation introduced the Littoral Law 02/2002 aiming to protect and to assess the

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

coast as a natural resource (Ghodbani and Berrahi-Midoun, 2013; Taibi, 2016).

The present study is focused on Mostaganem, located in the north-western of Algeria. Due to the urbanization, tourism activities, and an excessive sand extraction for the construction, this area experienced a beach regression and disturbance in its sediment budget. The monitoring of the dune changes is an important task in order to understand the evolution of the coastal zone, its management, the loss of biodiversity and hazard assessment (Andrews et al., 2002; Falcucci et al., 2007).

This work aims to identify, and to quantify morphological changes of the coastal features in Kharrouba between 1987 and 2016. For this task, the applied methodology is based on the integration of geographical techniques such as the integration of historical cartographic documents treated and analyzed in a geographic information system (GIS). Last one is a powerful tool used as a monitoring of the spatiotemporal evolution of land use/land cover, landslide hazard assessment (Abdikan et al., 2016).

2. Material and Methods

2.1. Study area

This study was focused on the coast of Kharrouba, an agglomeration located in the province of Mostaganem, in the northwest of Algeria (Fig. 1). Accordingly, its morphology comprised cliffs, beaches, and extended dune that represents a significant landscape feature. Geologically, Kharrouba showed two distinct formations, Upper Cretaceous rocky cliffs in the northeast and quaternary sandy beaches, dune and alluvium in the southwest. The coastal area is built by mobile dune close to the beach and consolidated dune (Paleo dune) in the supra littoral zone.

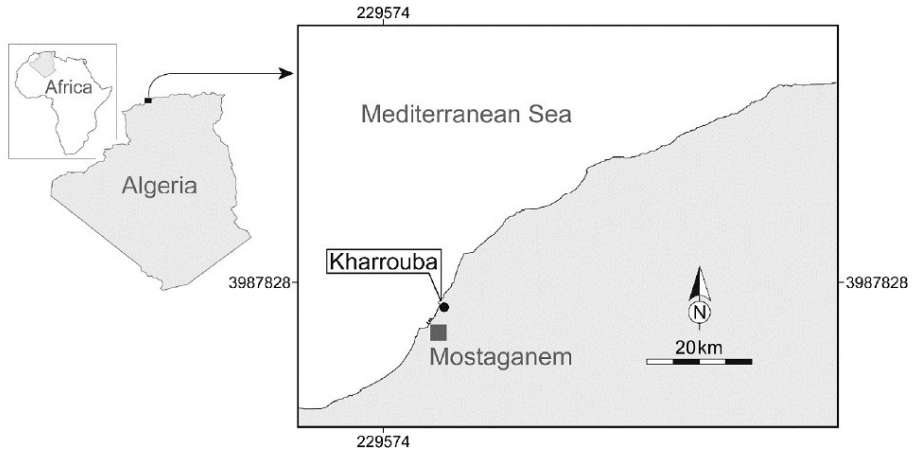


Fig. 1. Geographical setting of the study area.

2.2. Methodology

Different data and methods as historical maps, aerial photographs, satellite data processing, unmanned aerial vehicle (UAV), airborne Photogrammetry, GPS, DGPS and field survey are useful tolls to identify different transformations that occurred in the coastal area (Faye Ibrahima et al., 2008; Cohen et al., 2018). Kaliraj et al. (2017) used remote sensing and GIS techniques in order to monitor the different changes in the coast of Kanyakumari/India. Chaibi et al. (2013) identified changes in the littoral of El Djadida (Morocco) by means of aerial photography. Antso et al. (2013) used topographic map and field works to identify different pressures at coastal zones in Estonia. The present study aimed to identify and to quantify the evolution of the coastal dune of Kharrouba using Geographical Information system techniques (GIS). Generally, coastal dune changes frequently its shape because it is vulnerable to wind, wave and storms (Andrews et al., 2002). For this reason, we based on the vegetal cover as an indicator in order to delineate the coastal dune morphology and limit.

For this task, we used a 1/25000-scaled topographic map and images extracted from Google Earth Pro related to the periods 2004, 2012 and 2016. Cartographic data have been geometrically corrected and digitized; the area of the affected coastal features has been calculated using a GIS. Furthermore, the evolution of the dune and the consequences of the urbanization have been analyzed and mapped. In order to characterize the different surveyed

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

dunes and its vegetal cover, we used the Corine Land Cover nomenclature, which is a computerized inventory to describe a land cover at a scale of 1/100000 and using 44 classes (Bossard et al., 2000; Feranec et al., 2007; Samaali, 2011). This nomenclature is structured in 3 levels regarding the resolution and this study goal (Acosta et al., 2005). The landslide event occurred in 2012 in Kharrouba has been analyzed using the report provided by the Directory of public works located in Mostaganem (DPW, 2012).

3. Results

The cartographic and GIS data on the spatiotemporal evolution of the coastal dune in Kharrouba let distinguish changes in the Paleo dune and the recent dune during the period 1989-2004, and drastic transformation between 2004 and 2012 (Fig. 2). The high demand on residential habitations for the local population led to massive construction among the dune or close to it twelve years long (2004-2016, Fig. 3). Consequently, the coastal environment experienced a considerable transformation, impacting the natural features formed by the recent dune and the consolidated dune (Paleo dune, Fig. 4). Whereas, the changes related to the built-up development occurred between 1989 and 2004 are minor than those registered in the period 2004-2012. The lost or gain resulting from the changes of the features is given in comparison to the total area of Kharrouba (Tables 1-3).

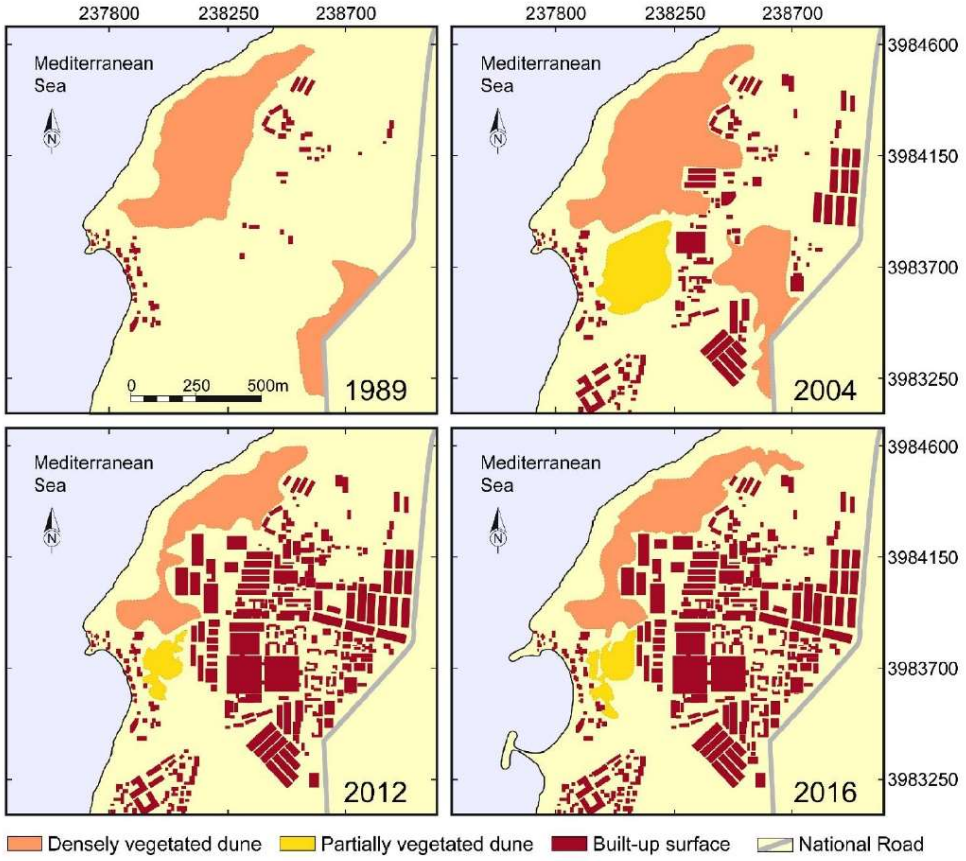


Fig. 2. Land cover changes in the coast of Kharrouba during the period 1989-2016.

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

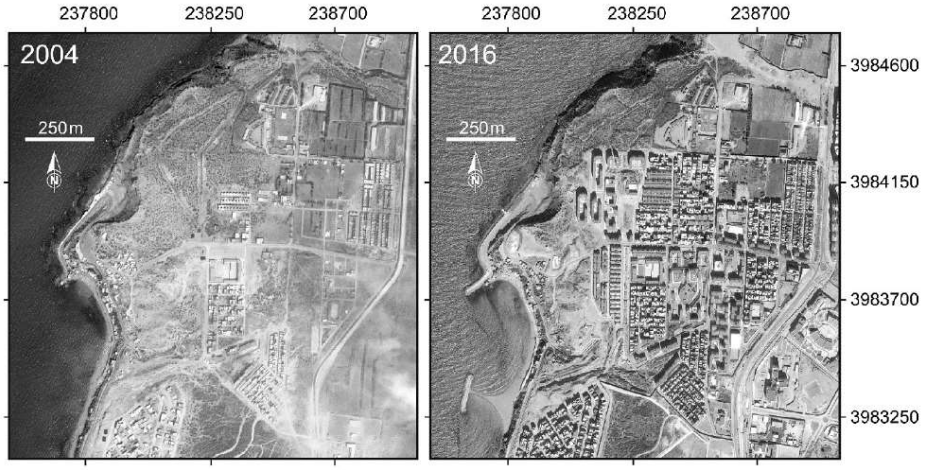


Fig. 3. Land cover changes in Kharrouba during the period 2004-2016 (Google Earth 2018).

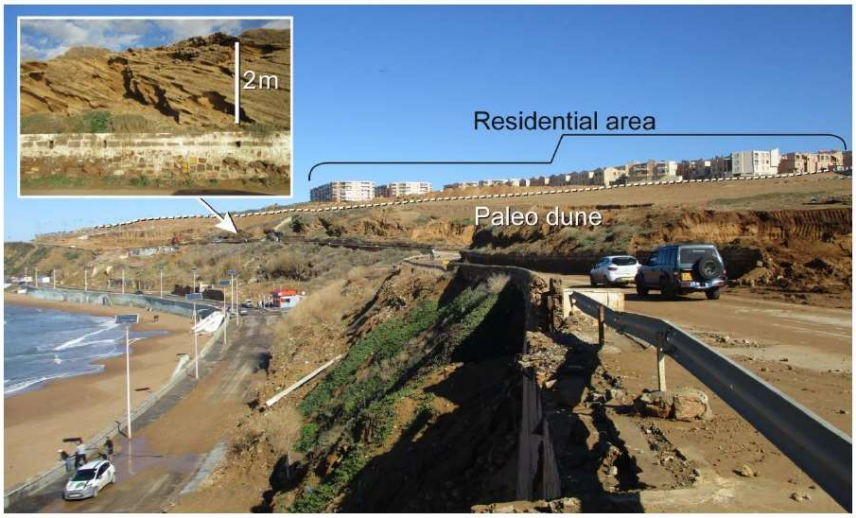


Fig. 4. Kharrouba is formed mainly by Paleo dune (NE-oriented photograph).

3.1. Period 1989 - 2004

The field survey showed that the sandy coast of Kharrouba is mainly occupied by recent dunes. Accordingly, this class presented a sporadic vegetal cover, which contributed to its identification.

Historically, the morphological situation in 1989 of the dunes had not been reported on the available topographic maps at that time. As an alternative, we used, a corresponding image extracted from Google Earth Pro.

During the period 1989-2004, the coast of Kharrouba enrolled a change in favor to the growth of densely vegetated dune. This feature represented 16 % of the total area in 1989 and went up to 23.8 % in 2004. The drastic change was registered in the built-up area, which increased 71.3 % between 1989 and 2004 (Table 1).

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

3.2. Period 2004-2012

During the period 2004-2012, the coast of Kharrouba experienced a crucial transformation that led to the urbanization of 32 % of the total area as a response to the high demand for residential flats, stores and tourism structures. The coastal patterns underwent a significant alteration in this period despite the existing Littoral Law 02/2002, which aimed to protect the coastal natural resources.

In 2004, the surface loss of the densely vegetated dune was 60 % in ratio to the total study area. In the same period, partially vegetated dune suffered as well the construction activities; this class decreased about 67.4 % of the total area (Fig. 5). Consequently, the built-up area increased 216.9 % compared to its initial surface (Table 2).

3.3. Period 2012-2016

This period showed an irrelevant transformation because 2.2 % of the total area of Kharrouba experienced changes. Accordingly, densely vegetated dunes increased 8.6 %; partially vegetated dune registered a gain of 23.9 %, and the built-up area 4.7 % (Table 3); both classes of dune increased together 32.5 % in ratio to the initial dune area. According to the field surveys, the situation of Kharrouba reflected the application of the Littoral Law 02/2002 and the awareness of the local authorities regarding the environmental impact of the urbanization on the society.

4. Discussion

4.1. Morphologic changes caused by the urbanization

The morphologic and environmental changes occurred in Kharrouba as a result of an intense urbanization forced by a rapid growing population are not an isolated case.

Accordingly, Ghodbani (2009) reported a comparable issue that occurred in mean coastal cities of Algeria as a consequence of the permanent growing population. Bouroumi (2014), Cheruto et al. (2016) and Li et al. (2017) connected the land cover change in coastal areas with the population growth, tourism, and industrial development. According to the National Statistics Office (2010), Mostaganem town, including the coast of Kharrouba registered a rapid population growth between 1998 and 2008. The tourism activities also registered an increase of the visitant number that reached 11 million in the summer 2012 (Taibi, 2016).

Tab. 1. Coastal features change during the period 1989-2004. Legend: 1 Surface of densely vegetated dune; 2 Surface of partially vegetated dune; 3 Artificial surfaces.

	1989 (m^2)	2004 (m^2)	Affected area (m^2)	Affected area (%)
DVD_1	296 043	366 565	70 522	23.8
PDV_2	-	75 834	-	-
AR_3	18 042	146 757	128 715	71.34

Tab. 2. Coastal features change during the period 2004-2012. Legend: 1 Surface of densely vegetated dune; 2 Surface of partially vegetated dune; 3 Artificial surfaces.

	2004 (m^2)	2012 (m^2)	Affected area (m^2)	Affected area (%)
DVD_1	366 565	147 830	-218 735	-59.7
PDV_2	75 834	24 746	-51 088	-67.4
AR_3	146 757	465 098	318 341	216.9

Tab. 3. Coastal features change during the period 2012-2016. Legend: 1 Surface of densely vegetated dune; 2 Surface of partially vegetated dune; 3 Artificial surfaces.

	2012 (m^2)	2016 (m^2)	Affected area (m^2)	Affected area (%)
DVD_1	147 830	160 529	12 699	8.6
PDV_2	24 746	30 671	5 925	23.9
AR_3	465 098	486 916	21 818	4.7

Compared with other regions of the Mediterranean context, the actual situation of the Province of Mostaganem reflects the socioeconomic development (Alonso et al, 2002; Megherbi, 2015; Ghodbani et al., 2016; Taibi, 2016). The Algerian Ministry of Land-use Planning, Tourism, and Handicraft (2015) mentioned that the available host accommodation in 2014 could satisfy the demand of 11000 tourists whereas the

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

Province of Mostaganem registered in the same year 10 million visitors during the summer. Consequently, the inadequacy between tourism demand and offer would probably lead the decision maker to build more host structure close to the shore, that would mean a progressive dune destruction in favor to the urbanization (Paskoff, 1994; Scarelli et al., 2017; Kim et al., 2017). In this period (2012-2016), two breakwaters have been constructed with the aim to protect the beach of Sidi Medjdoub, the most popular bathing site of Kharrouba, against the marine erosion; according to Rizzi et al. (2015), such a protection presented a weak resilience against storms and rainfalls.

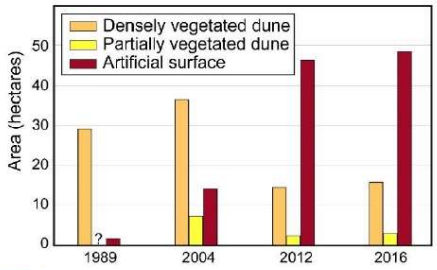


Fig. 5. Pattern evolution registered during the period 1989-2016 (Kharrouba).

The experience of the Spanish Mediterranean coast showed the impact caused by an intense urbanization close to the coastline that led to beach erosion and dune system regression. Garcia-Lozano et al. (2018) studied the historical transformation occurred in the coastal dune in Catalonia during the period 1890 to 1960. In this sense, the results evidenced the dunes disappearance or the advanced regression of those that remain today; 60% of the dunes disappeared and 30% of them retreated in size. In this context, the region of Barcelona was the most affected zone because 80% of the beaches lost their dunes. Furthermore, Girona and Tarragona enrolled, respectively, a loss of 60% and 40% of their dunes; nowadays, 10 % of this feature remained pristine on the littoral of Catalonia. In the Northeast of the Italian Mediterranean Sea, Malavasi et al. (2013) focused their study on the evolution of the Landscape formed by coastal dunes and noted that 44% of the littoral morphology changed during the period 1954-1984 due to agriculture, afforestation and urbanization. However, Molise experienced a lower change (26%) between 1984 and 2006. Long-term surveys highlighted the impact due to the transformation of a vulnerable feature such as dune and beach; different socioeconomic activities carried out close to the shoreline led to the alteration, and in extreme situations, to the definitive disappearance of the coastal dune. The Ministry of Land-use Planning, Tourism, and Handicraft created in the province of Mostaganem 16 tourist extension zones with the aim to develop seaside tourism activities; Kharrouba, being a coastal zone, will irremediably undergo this ruling. The construction of the necessary host accommodation to satisfy the tourism demand will continue to alter the dunes and to increase the landslide hazard.

4.2. Coastal erosion and risk susceptibility in strong urbanized areas

In order to improve the socioeconomic situation, the construction of host structures for the seaside tourism was the most valuable activity in different Mediterranean countries and this contributed to the disturbance of the coastal dune (Taibi, 2014; Comor et al., 2007; Toubes et al. 2017); accordingly, the coast of Kharrouba experienced the same issue. Consequently, the monitoring of the coastal evolution is a primordial tool for the stakeholder by making decisions on territory planning (Carboni et al., 2009). The anthropic alteration of the dune could change the balance of the sediment budget and lead to beach erosion. Since the eastern part of Kharrouba is strongly urbanized, the sediment transfer between the beach and the dune could not occur, and consequently increased the erosion process that affected the stability of the steep coastal slope; in January 2012, a landslide occurred producing socio-economic damages (Fig. 6), and two years later, another landslide has been registered in the same place producing the road subsidence (Fig. 7). These repetitive events showed obviously the vulnerability of the coast of Kharrouba in terms of static stability. Consequently, extreme weather conditions could generate in future other landslides combined with subsidence, especially the erosive action of the water flow within the sediment layer.

5. Conclusion

The use of a geographic information system (GIS) to monitor the morphological changes in the study area was a powerful tool that provided an evaluation of the natural surface lost during the period 1989-2016. In 27 years, the dune surface of Kharrouba retreated 39% due to an intense urbanization. Accordingly, it was necessary to satisfy the high demand on residential structures for the local population, however, it was the wrong decision to build among the dune owing to its vulnerability.

Despite the Algerian law, 01-03-2003 that regards the environmental feasibility of projects supposed to be carried out in a natural site or close to it, build-up activities happened and impacted the sandy coast. The same issue occured in reference to the Algerian Littoral Law 02-2002 that aimed to protect the coastal zone against any activity with environmental damage. With respect to this, the

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

terrain reality demonstrated that the control of the construction feasibility was unreliable in the province of Mostaganem. In addition to the environmental impact, the intense urbanization realized in Kharrouba on vulnerable terrain led to ground instability that produced landslides and road subsidence in 2012 and 2014; these repetitive events showed how difficult is to ensure the construction durability on the dune.

Fig. 6. Landslide in Kharrouba occurred in 2012 (DPW, 2012, NE-oriented photograph).

Fig. 7. Subsidence of the road produced by landslide (photograph taken on 17th April 2014).

The acquired study data can serve the stakeholder and the decision makers to handle adequately in terms of territory management, and rational use of the coastal resources. The development of the coast of Kharrouba should consider the (paleo) dune vulnerability to secure long-term economic activities and population safety.

In future, it is recommended to program the construction beyond the 300 m distance from the coastline as stipulated by the Algerian Littoral Law 02/2002.

Acknowledgment

We thank the Directory of public works of the province of Mostaganem for it support.

References

Abdikan, S., Sanli, F.B., Ustuner, M., Calò, F., 2016. Land Cover Mapping Using Sentinel-1 SAR Data, Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing Spatial Inf. Sci., XLI-B7, 757-761. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-757-2016

Acosta, A., Carranza, M.L, Izzi, C.F., 2005. Combining land cover mapping of coastal dunes with vegetation analysis. Applied Vegetation Science 8, 133-138. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2005.tb00638.x

Algerian Ministry of Land-use Planning, Tourism, and Handicraft 2015. Available at: http://www.okbob.net/article-le-site-officiel-du-ministeredu-tourisme-et-de-l-artisanat-algerie 89361166.html

Alonso, J. Alcántara-Carrió, Cabrera, L., 2002. Tourist Resorts and their Impact on Beach Erosion at Sotavento Beaches, Fuerteventura, Spain. Journal of Coastal Research: Special Issue 36 - International Coastal Symposium (ICS 2002): pp. 1 – 7. https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.1

Andrews, B., Gares, P.A., Colby, J.D., 2002. Techniques for GIS Modeling of Coastal Dunes. Geomorphology 48, 289-308. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00186-1

Antso, K., Kont, A., Palginõmm, V., Ratas, U., Rivis, R., Tõnisson, H., 2013. Changing natural and human impacts on the development of coastal land cover in Estonia. Journal of Coastal Research: Special Issue 65 - International Coastal Symposium, Volume 1, pp. 862 – 867. https://doi.org/10.2112/SI65-146.1

Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J., 2000. CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. Technical Report N 40, 105p. URL: http://www.geography.sav.sk/documents/2000-feranec-corine.pdf

Bouroumi, M.T., 2014. Impact de l'urbanisation sur l'évolution du littoral Cas de la commune de Ain el Turk. Thèse de Magistère, 150 p., Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

Carboni, M., Carranza, M.L., Acosta, A., 2009. Assessing conservation status on coastal dunes: A multiscale approach. Landscape and Urban Planning 91, 17–25. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.004

Chaibi, M., Ait Malek, H., Charif, A., Ayt Ougougdal, M., Maanan, M., 2013. Étude de l'évolution du littoral de la baie d'El Jadida (Maroc) par photo interprétation. Afrique Science 09 (2), 23.34. URL: https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/112057

Cheruto M.C., Kauti M.K., Kisangau P.D., Kariuki P., 2016. Assessment of land use and land cover change using GIS and Remote Sensing Techniques: A case study of Makueni County, Kenya. Journal of Remote Sensing & GIS 5, 175.

Cohen, O., Cartier, A., Ruz, M.-H., 2018. Mapping coastal dunes morphology and habitats evolution using UAV and ultra-high spatial resolution photogrammetry. International workshop "Management of coastal dunes and sandy beaches" 1-19. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19609.11360

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

JSE
RESEARCH PAPER

Comor, M., Orgeas, J., Ponel, P., Rolando, C., Delettre, Y.R., 2007. Impact of anthropogenic disturbances on beetle communities of French Mediterranean coastal dunes. Biodiversity and Conservation 17 (8), 1837–1852. doi.org/10.1007/s10531-007-9290-3

DPW (Directorate of Public Works), 2012. Album photo of Kharrouba landslide. URL: https://www.gettyimages.pt/fotos/landslide?sort=mostpopular&mediatype=photography&phrase=landslide

Duffy, J.M., Shutler, J.D., Witt, M.J., DeBell, L., Anderson, K., 2018. Tracking fine-scale structural changes in coastal dune morphology using kite aerial photography and uncertainty-assessed structure-from-motion photogrammetry. Remote Sensing 10 (9), 1494, 1-21. https://doi.org/10.3390/rs10091494

Falcucci, A., Maiorano, L., Boitani, L., 2007. Changes in land use/land cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. Landscape Ecology 22, 617–631 p. https://doi.org/10.1007/s10980-006-9056-4

Faye Ibrahima, B. ND., Henaff, A., Gourmelon, F., Amadou, T.D., 2008. Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. https://doi.org/10.4000/norois.2146

Feranec, J., Hazeu, G., Christensen, S., Jaffrain, G., 2007. Corine land cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia). Land Use Policy 24, 234-247. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.02.002

Garcia-Lozano, C., Pintó, J., Daunis-i-Estadella, P., 2018. Changes in coastal dune systems on the Catalan shoreline (Spain, NW Mediterranean Sea). Comparing dune landscapes between 1890 and 1960 with their current status, Estuarine, Coastal and Shelf Science 208, 235–247. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.05.004

Ghodbani, T., Kansab, O., Kouti.A., 2016. Développement du tourisme balnéaire en Algérie face à la problématique de protection des espaces littoraux. Le cas des côtes mostaganemoises. Tourisme et ressources naturelles. Etudes Caribéennes.https://journals.openedition.org/etudescaribeennes/9305

Ghodbani, T., Berrahi-Midoun, F., 2013. La littoralisation dans l'Ouest algérien: analyse multi scalaire des interactions hommes-espaces écosystèmes. Espace Populations Sociétés (ISSN: 2104-3752), p. 231-243.

Ghodbani, T., 2009. Environnement et littoralisation de l'Ouest algérien. PhD Thesis in Geography. 306 p., Université d'Oran ES-SENIA, Agérie, Université de PARIS 8 Vincennes Saint-Denis, FRANCE.

Ghodbani, T., 2005. Rechgoun, un espace à protéger sur le littoral ouest de l'Algérie, *Méditerranée*, https://doi.org/10.4000/mediterranee.350

Jenks, G., 2014. Affecting the functional capacity of coastal dune ecosystems 1 - utilizing New Zealand coastal dune degradation records as a proxy for analogous global impacts. A CLIM systems Technical Report. 20 p. URL: Http://Documents.Climsystems.Com/Publications/Affecting_The_Functional_Capacity_Of_Coastal_Dune_Ecosystems_Utilising_New_Zealand_Coastal_Dune_Degradation_Records_As_A_Proxy_For_A.Pdf. (Accessed On 14 January 2019)

Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Ramachandran, K.K.., Srinivas, Y., Saravanan, S., 2017. Coastal land use and land cover change and transformations of Kanyakumari coast, India using remote sensing and GIS. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 20 (2017) 18, 169–185. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.003

Kim, Y., Park, N-W., Lee, K-D., 2017. Self-Learning Based Land-Cover Classification Using Sequential Class Patterns from Past Land-Cover Maps. Remote Sensing 9(9), 921. https://doi.org/10.3390/rs9090921.

Kim, D., Yu, K.B., 2009. A conceptual model of coastal dune ecology synthesizing spatial gradients of vegetation, soil, and geomorphology. Plant Ecology 202, 135-148. https://doi.org/10.1007/s11258-008-9456-4

Li, X., Chen, G., Liu, X., Liang, X., Wang, S., Chen, Y., Pei, F., Xu, X., 2017. A new global land-use and land-cover change product at a 1 km resolution for 2010 to 2100 based on human–environment interactions. Annals of the American Association of Geographers, https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1303357

Littoral Law 02-2002 Loi relative à la Valorisation et la Protection du littoral. 5 février 2002, 7 p. Available at: http://www.ijel-archeo.123.fr/droit_algerien/loi_dz/loi0202.htm (Accessed on November, 15th 2015)

Malavasi, M., Santoro, R., Acosta, A.T.R., Carranza, M.L., 2013. What has happened to coastal dunes in the last half century? A multitemporal coastal landscape analysis in Central Italy. Landscape and Urban Planning 119, 54–63. http://dx.do0i.org/10.1016/j.landurbplan.2013.06.012

Martínez, M.L., Hesp, P.A., Gallego-Fernández, J.B., 2013. Coastal Dunes: Human Impact and Need for Restoration. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33445-0_1

Megherbi, W., 2015. L'ensablement, un risque négligé en zone tellienne littorale Cas de la région Mostaganem. Thèse de Magistère. Université d'Oran 02.

Muller, H., Rooijen A.V., Idier, D., Pedreros, R., Rohmer, J., 2016. Assessing Storm Impact on a French Coastal Dune System Using Morphodynamic Modeling. Journal of Coastal Research 33 82), 254-273 (2016). https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00102

National office of Statistic 2010. Recensement Général de Population et de l'Habitat (RGPH) 1987, 1998 et 2008, Collection statistique n° 87, wilaya de: Oran, AïnTémouchent, Relizane, Mostaganem, Tiaret, Saïda, Mascara, Sidi Bel Abbes, Tlemcen, documents non publiés.

Paskoff, R., 1994. Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Paris, Masson, 2e édition, 256 p. (ISBN 2-225-84324-4)

Rizzi, J., Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Gana, S., Marcomini, A., 2015. Regional Risk Assessment addressing the impacts of climate change in the coastal area of the Gulf of Gabes (Tunisia). Sustainability Science 11, 455–476. https://doi.org/10.1007/s11625-015-0344-2

Samaali, H., 2011. Etude de l'evolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG. PhD Thesis in Cartography. Université de Tunis.

Scarelli, M.F., Sistillia, F., Fabbri, S., Cantellia, L., Barbozac, E.G., Gabbianelli, G., 2017. Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys to apply in the ICZM on the Ravenna coast (Emilia-

Journal of Sedimentary Environments
Published by Universidade do Estado do Rio de Janeiro
4 (1): 91-98. January-March, 2019
doi: 10.12957/jse.2019.39951

RESEARCH PAPER

Romagna, Italy). Remote Sensing Applications: Society and Environment 7, 27-39. http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.003

Taibi, N., 2016. Conflict between Coastal Tourism Development and Sustainability: case of Mostaganem, Western Algeria. European Journal of Sustainable Development 5 (4), 13-24. https://doi.org/10.14207/ejsd.2016.v5n4p13

Taibi, N., 2014. Impacts du tourisme de masse sur les plages – Expérience de l'Espagne (Méditerranée). MarineScor Journal 1, 39-55.

Toubes, D.R., Gössling, S., Michael Hall, C., Scott, D., 2017. Vulnerability of Coastal Beach Tourism to Flooding: A Case Study of Galicia, Spain. Environments 4 (4), 83; https://doi.org/10.3390/environments4040083

Williams, A.T., Alveirinho Dias, J., Novo Garcia, F., Garcia-Mora, J., Currd, R., Pereira, A., 2001. Integrated coastal dune management: checklists. Continental Shelf Research 21, 1937–1960. https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00036-X

Article publié “ Estimation of landslide risk map considering landslide vulnerability : Case of Algerian Western coasts”

PROCEEDINGS OF SPIE

SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

Estimation of landslide risk map considering landslide vulnerability: Case of Algerian Western coasts

R. Senouci, N-E. Taibi, A. C. Teodoro, L. Duarte, R. Yahia Meddah

R. Senouci, N-E. Taibi, A. C. Teodoro, L. Duarte, R. Yahia Meddah, "Estimation of landslide risk map considering landslide vulnerability: Case of Algerian Western coasts," Proc. SPIE 11534, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XI, 115340U (20 September 2020); doi: 10.1117/12.2573165

SPIE.

Event: SPIE Remote Sensing, 2020, Online Only

Downloaded From: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie on 20 Jun 2022 Terms of Use: https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use

Résumé

Durant les trois dernières décennies (1987-2017), le littoral de Mostaganem a subi une transformation en terme de constructions pour satisfaire les besoins en logements, commerces, industrie et structures d'accueil et de récréation pour les touristes. Les terres cultivées n'ont également pas été épargnées par la littoralisation qui s'est produite principalement sur des terrains fragiles. L'intense utilisation de ce milieu a entrainé une multiplication des risques côtiers tels que l'érosion, le glissement, l'affaissement et les inondations. L'objectif de ce travail est d'établir une cartographie détaillée sur les changements spatiotemporels de l'occupation du sol durant la période 1987-2017. L'identification et l'analyse des sites susceptibles et présentant un risque aux glissements de terrain ont aussi été considérées dans ce travail. La méthodologie qui a permis d'atteindre ces objectifs consiste en l'évaluation des changements de l'occupation du sol intégrant le traitement des images satellitaires *Landsat* TM, ETM et OLI pour les années 1987, 2000 et 2017. L'analyse en composante principale (ACP) combinée avec l'algorithme *Maximum likelihood* a été appliquée aux images satellitaires. L'analyse de la susceptibilité au glissement de terrain à Mostaganem intègre l'utilisation de la géomatique. Neufs paramètres à savoir la lithologie, la pente, l'occupation du sol, l'aspect de pente, le plan de courbure, les précipitations, la distance aux cours d'eau, la distance aux réseaux routiers et la distance aux failles ont été pondérés selon deux méthodes la Combinaison de Carte d'Index (CCI) et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). En appliquant les outils du SIG, ces paramètres ont été combinés afin de produire des cartes de susceptibilité. L'analyse du risque au glissement de terrain a été réalisée en combinant la susceptibilité avec la vulnérabilité ; l'estimation de la vulnérabilité a considéré l'aspect physique, environnemental et social. L'analyse des changements de l'occupation du sol a montré que les classes « surface bâtie » et « sites de constructions » ont enregistré un gain estimé respectivement à 68.29% et 31.25%. Cette intense urbanisation du littoral s'est accompagnée d'une forte dégradation de la classe « plage, dunes, plaines formées de sable » et de la classe « dunes à dense végétation ». La régression de la surface de ces deux classes est estimée respectivement à 83.64% et 60.97%. La lithologie du littoral de Mostaganem, la densité de ses cours d'eau et la pente de ses terrains favorisent l'occurrence des glissements de terrain. L'analyse de la susceptibilité au glissement de terrain du littoral de Mostaganem montre que les sites les plus susceptibles se situent au niveau du noyau urbain près de la route nationale RN11. Quant à l'analyse du risque de glissement, il est à noter que le domaine littoral de Mostaganem présente un degré élevé de risque. Ce fait est justifié par l'importance des enjeux socioéconomiques existants et ceux projetés sur des terrains fragiles. Cette étude pourrait être utile pour les décideurs locaux du littoral de Mostaganem.

Mots clés : Géomatique, image satellitaire, susceptibilité, glissement de terrain, Mostaganem.