

DEPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

N°...../SNV/2019

THÈSE

Présentée par

SAHNOUNI Razika

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Ecosystèmes méditerranéens et géomatique appliquée

THÈME

**ÉVALUATION DU PHÉNOMÈNE DE LA DÉSERTIFICATION
DANS LA RÉGION DU HODNA**

Soutenue publiquement le 07/07/2020

DEVANT LE JURY

Président

BERTELLA Nabil

MCA. Université Batna 2

Rapporteur

ABDESSELAM Salah

Pr. Université Batna 1

Examineurs

BENMESSAOUD Hassen

Pr. Université Batna 1

MERADSI Fouad

MCA. Université Batna 2

Année universitaire : 2019/2020

DEPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

N°...../SNV/2019

THÈSE

Présentée par

SAHNOUNI Razika

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Ecosystèmes méditerranéens et géomatique appliquée

THÈME

**ÉVALUATION DU PHÉNOMÈNE DE LA DÉSERTIFICATION
DANS LA RÉGION DU HODNA**

Soutenue publiquement le 07/07/2020

DEVANT LE JURY

Président

BERTELLA Nabil

MCA. Université Batna 2

Rapporteur

ABDESSELAM Salah

Pr. Université Batna 1

Examineurs

BENMESSAOUD Hassen

Pr. Université Batna 1

MERADSI Fouad

MCA. Université Batna 2

Année universitaire : 2019/2020

Dédicace

À la mémoire de mon père.

À ma mère.

À mes frères et sœurs.

À mes neveux et mes nièces.

Remerciements

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui m'ont apporté leurs aides, leurs conseils et leurs encouragements tout au long de mon travail.

Il m'est très agréable de remercier, en premier lieu, **Monsieur ABDESSELAM Salah**, professeur au département des sciences agronomiques à l'université de Batna1 d'avoir bien voulu diriger mes travaux de recherche. Je le remercie profondément pour ces orientations, sa patience, de son bel humanisme et sa grande sagesse, ses précieux conseils et son aide à différents niveaux durant toute la période de travail. Je le prie de trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait **Monsieur BERTELLA Nabil**, Maître de conférences A «MCA» à l'université de Batna 2 qui, malgré ses lourdes tâches, a accepté de présider le jury. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Je remercie **Monsieur BENMESSAOUD Hassen**, professeur à l'université de Batna 1, et responsable du CFD « Écosystèmes Méditerranéens et Géomatique Appliquée », d'avoir bien voulu examiner cette thèse. Je le remercie infiniment pour ses encouragements, ses conseils et pour sa gestion exemplaire de notre formation doctorale.

Mes remerciements vont également à **Monsieur MERADSI Fouad**, Maître de conférences A «MCA» à l'université de Batna 2, d'avoir accordé un intérêt à mes travaux et accepter d'examiner cette thèse. Qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

La préparation d'une thèse nécessite aussi un environnement agréable. À ce titre, je pense à tous les collègues et les doctorants de la formation doctorale LMD «Écosystèmes Méditerranéens et Géomatique Appliquée ». Je remercie aussi le laboratoire de recherche LAPAPEZA et tout son personnel pour les aides de tous les jours.

Je ne saurais oublier de remercier Mme ZEROUAL Meriem, Mlle ATHMANI Sara et Mlle FERAHTIA Amel, pour leurs encouragements et soutien moral que j'ai ressenti tout le long de mon parcours de thésard.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des abréviations

AHP :	The Analytic Hierarchy Process.
AMCD :	Analyse MultiCritère de décision.
ANAT :	Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire.
ASAL :	Agence Spatiale Algérienne.
CNUED :	La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement.
CNULCD :	La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.
CPR :	Les Chantiers Populaires de Reboisement.
CRBT :	Centre de Recherches sur les Ressources Biologiques et Terrestres.
CSFD :	Comité Scientifique Français de la Désertification.
CTS :	Centre des Techniques Spatiales.
DEM :	Digital Elevation Model.
DGF :	Direction Générale des Forêts.
DI :	Desertification Index.
DN :	Digital Numbers.
DSA :	Direction Des Services Agricoles.
EEM :	Évaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire.
EMI :	Eolian Mapping Index.
ENVI :	Environment for Visualizing Images.
ESRI :	Environmental Systems Research Institute.
ETM :	Enhanced Thematic Mapper.
FAO :	Food and Agriculture Organisation.
FLDDPS :	Le Fonds de Lutte Contre la Désertification et de Développement du Pastoralisme et de la Steppe.
GPS :	Global Positioning System.
HCDS :	Haut-Commissariat au Développement de la Steppe.
IMDPA :	The Iranian Model of Desertification Potential Assessment.
CNTS :	Centre National des Techniques Spatiales.
IR :	Infrared.

MADR :	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
MARA :	Ministère de l'Agriculture et de la Révolution Agraire.
MEDALUS :	Mediterranean Desertification and Land Use.
NDSI :	Normalized Difference Salinity Index.
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index.
NIR :	Near-Infrared.
NMDI :	Normalized Multi-band Drought Index.
OLI :	Operational Land Imager.
OSS :	L'Observatoire du Sahara et du Sahel.
PAN-LCD :	Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification.
PNDA :	Le Plan National de Développement Agricole.
PNDAR :	Le Plan National de Développement Agricole et Rural.
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
PPDRI :	Projets de Proximité de Développement Rural Intégré.
REM :	Le rayonnement électromagnétique.
RGB :	Red-Green-Bleue.
ROSELT :	Le Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme.
SIG :	Système d'Information Géographique.
TM :	Thematic Mapper.
UNCCD :	United Nations Convention to Combat Desertification.
UNESCO :	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture.
URBT :	Unité de Recherche sur les Ressources Biologiques Terrestres.
USGS :	United States Geological Survey.
UTM :	Universal Transverse Mercator.
UV :	Le rayonnement ultraviolet.
WGS :	World Geodetic System.

Table des matières

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre I

Revue bibliographique

1. La question de la désertification

Introduction	05
1.1 Définition de la désertification.....	05
1.2 Les zones touchées par la désertification.....	07
1.3 La désertification en Algérie.....	08
1.3.1 La désertification dans la steppe algérienne.....	08
1.3.2 Présentation de la steppe algérienne.....	09
1.3.2.1 Situation de la steppe algérienne.....	09
1.3.2.2 Le climat.....	10
1.3.2.3 Le sol.....	10
1.3.2.4 La végétation.....	10
1.3.2.5 La population.....	11
1.4 Les causes de la désertification.....	11
1.4.1 La sécheresse.....	12
1.4.2 Le surpâturage.....	13
1.4.3 Evolution de la population steppique.....	13
1.4.4 Le défrichage.....	14
1.4.5 La mauvaise gestion des terres irriguées.....	14
1.5 La lutte contre la désertification en Algérie.....	14
1.5.1 Stratégie de lutte contre la désertification.....	14
1.5.2 Les politiques de lutte contre la désertification en Algérie.....	15
1.6 Les différentes études menées sur la steppe algérienne.....	17

2. Principes de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG)	
Introduction	18
2.1 Principe de système d'information géographique	19
2.1.1 Structure d'un SIG.....	19
2.1.2 Principe de Fonctionnement des SIG	20
2.1.3 Le cycle de vie de l'information géographique dans un SIG.....	20
2.1.4 Les données intégrées dans un SIG.....	21
2.1.4.1 Les images.....	21
2.1.4.2 Les données vecteurs.....	21
2.1.5 L'analyse spatiale dans le SIG.....	22
2.2 La télédétection	
2.2.1 Définition de la télédétection.....	23
2.2.2 Eléments essentiels en télédétection.....	23
2.2.3 Processus de télédétection.....	24
2.2.4 Principes physiques de la télédétection.....	25
2.2.4.1 Le rayonnement électromagnétique.....	25
2.2.4.2 Le Spectre électromagnétique.....	26
2.2.5 Interactions rayonnement et surfaces terrestres.....	27
2.2.6 Les signatures spectrales.....	27
2.2.7 Intégration de la télédétection et du SIG.....	28
2.2.7.1 Contributions de la télédétection au SIG.....	28
2.2.7.2 Contributions du SIG à la télédétection.....	29
2.2.7.3 La télédétection et les SIG sont utilisés conjointement pour la modélisation et l'analyse. Cas de la désertification.....	29
Conclusion	30

Chapitre II

Présentation de la région d'étude

Introduction	31
1 Aspect géographique et administratif	31
1.1 Présentation du bassin versant du Hodna	31
1.2 Localisation de la région d'étude	33
2 Aspect physique	35
2.1 Géologie	35
2.1.1 Stratigraphie	35
2.2 Hydrogéologie	35
2.2.1 Les eaux superficielles	35
2.2.2 Les eaux souterraines	36
2.2.2.1 Nappe phréatique	36
2.2.2.2 Nappe captive	36
2.3 Géomorphologie	36
2.3.1 Le système montagneux au nord	36
2.3.2 Le système de piémont	36
2.3.3 Le système de dépression au sud	36
2.4 La végétation	37
2.5 Les sols	39
3. Aspect climatologique	40
3.1 Données climatiques	41
3.1.1 La pluviométrie	41
3.1.1.1 Régime mensuel des pluies	41
3.1.1.2 Irrégularité des précipitations	42
3.1.2 La température	43
3.1.2.1 Température moyenne mensuelle	43
3.1.2.2 Température moyenne annuelle	44
3.1.3 Vitesse de vent	44
4. Synthèse climatique	45
4.1 Indice d'aridité de De Martonne	45

4. 2 Diagramme Pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN	45
4 .3 Quotient pluviométrique d'EMBERGER	46

Chapitre III

Analyse de la désertification sur la base de changement d'occupation/ utilisation des terres

Introduction	49
1. Approche méthodologique	50
2. Acquisition des données	52
2. 1 Données de télédétection	52
2. 1.1 Les images satellitaires Landsat.....	52
2. 2 Données auxiliaires	54
2. 2.1 Enquête de terrain	54
2. 2. 2 Les cartes topographiques.....	56
2. 2. 3 Images Google Earth.....	56
3. Prétraitement des images satellitaires	56
3.1 Géo-référencement d'images.....	56
3.2 Calibration radiométrique et correction atmosphérique.....	56
3.3 Assemblage des bandes	59
3.4 Composition colorée	59
3.5 Extraction de la zone d'étude	59
4. Traitement des images	59
4.1 Classification supervisé	59
4.2 Evaluation la précision de la classification.....	60
5. Détection des changements	60
5.1 Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol.....	60
5.2 La détection de changement global d'occupation et d'utilisation du sol	61
5.2.1 La technique de changement post-classification.....	61
5.2.2 Application de la technique.....	61
5. 3 Analyse de l'intensité de changement	61
5. 3.1 Matrice de transition.....	61
5. 3.2 Analyse de l'intensité du changement de l'occupation du sol.....	62
5. 3.3 Analyse de l'intensité au niveau d'intervalle.....	62

5.3.4 Analyse de l'intensité de changement au niveau de la catégorie.....	62
5.3.5 Analyse de l'intensité au niveau de transition.....	63
5.4 Trajectoire de changement d'occupation et d'utilisation du sol vers la désertification	64
6 Résultat et discussion	64
6.1 Cartographie de la distribution de l'occupation et de l'utilisation du sol	64
6.1.1 Interprétation des cartes d'occupation et d'utilisation de sol.....	65
6.2 Détection de changement global entre 1995 et 2016	71
6.2.1 Conversion de l'agriculture	73
6.2.2 Conversion des parcours dégradés.....	73
6.2.3 Conversion de parcours	73
6.2.4 Conversion des dunes de sable.....	73
6.3 Analyse de l'intensité de changement d'occupation et d'utilisation des terres.....	75
6.3.1 Au niveau de l'intervalle.....	75
6.3.2 Analyse de l'intensité par catégorie.....	75
6.3.2.1 Les pertes de parcours dégradés	76
6.3.2.2 La catégorie d'agriculture	76
6.3.2.3 Les parcours	76
6.3.2.4 La catégorie de sable dunaire	77
6.4 Analyse de niveau de transition de changement.....	79
6.4.1 Cas des parcours	79
6.4.2 Cas de parcours dégradés.....	80
6.4.3 Cas de l'agriculture.....	80
6.4.4 Cas de sable dunaires	81
6.5 Analyse de trajectoires du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol vers la désertification entre 1995 -2016.....	83
Conclusion.....	87

Chapitre IV

Evaluation de la sensibilité à la désertification à l'aide d'un SIG et d'une analyse multicritère de décision

Introduction	89
1. Démarche méthodologique	90
2. Description du modèle AMCD-SIG technique.....	92
2.1 Le processus analytique de hiérarchie.....	92
2.1.1 Comment fonctionne l'AHP ?.....	93
2.1.1.1 Étape 1 : Modélisation du problème.....	93
2.1.1.2 Etape 2 : Détermination des priorités parmi les éléments de décision de la hiérarchie.....	93
2.1.1.3 Étape 3 : Calcul des poids relatifs globaux des éléments de décision.....	94
2.1.1.4 Étapes 4 et 5 : Vérification de la cohérence des jugements et tirage des conclusions en fonction des résultats	94
3. Données utilisées.....	95
3.1 Choix des images satellitaires.....	95
3.2 Prétraitement des images satellitaires.....	95
3.3 Description des indices spectraux utilisés.....	95
3.3.1 L'Albedo terrestre	95
3.3.2 Indice de salinité par différence normalisée (NDSI).....	96
3.3.3 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI).....	96
3.3.4 Indice de sécheresse multi-bande normalisé (NMDI).....	96
3.3.5 Indice de cartographie éolien (EMI).....	97
3.3.6 Occupation des terres.....	97
4. Reclassification des indices.....	97
5. Evaluation de la désertification.....	98
6. Détermination de niveau de la désertification.....	98
7. Détection de changement	98
8. Validation du résultat de la cartographie de la désertification avec le terrain.....	99
9. Résultats et discussion.....	99
9.1 Cartographie des indices.....	99

9.2 Reclassification des indices selon la sensibilité à la désertification.....	103
9.2.1 L'Albédo terrestre	103
9.2.2 NDSI	104
9.2.3 NDVI.....	105
9.2.4 NDMI	107
9.2.5 EMI	108
9.2.6 Occupation des terres.....	108
10. Détermination des priorités parmi les éléments de décision	111
10.1 Calcul des poids relatifs globaux des éléments de décision.....	111
10.2 Vérification de la cohérence des jugements.....	112
10.3 Evaluation de la sensibilité à la désertification.....	112
10.4 Analyse de changement de la désertification.....	116
10.5 Evaluation des conversions des classes de sensibilité à la désertification.....	119
10.5.1 Conversion de classe de désertification très élevée.....	120
10.5.2 Conversion de classe de désertification élevée.....	120
10.5.3 Conversion de classe de désertification moyenne.....	120
10.5.4 Conversion de classe de désertification faible	121
10.5.5 Conversion de classe de désertification très faible	121
a- Augmentation de la désertification	121
b- Diminution de la désertification.....	121
c- Les zones inchangées	121
10.6 Validation du résultat de la cartographie de la désertification avec le terrain	122
Conclusion.....	124

Chapitre V

Facteurs influençant le phénomène de la désertification

Introduction.....	126
1. Données utilisées.....	126
1.1 Les données climatiques	126
1.2 Les données socioéconomiques.....	126
2. Analyse des facteurs influençant le phénomène de la désertification	127
2.1 Facteurs climatiques	127
2.2 Facteurs anthropiques	128

2.2.1 Augmentation de la population	128
2.2.1.1 Densité de la population	128
2.2.2 Le surpâturage	129
2.2.2.1 Le nomadisme dans le sud de Hodna	130
2.2.2.2 Intensité de pâturage	130
2.2.3 Les politiques agricoles.....	131
3. Analyse des données.....	134
4. Résultats et discussion	134
4.1 Influence des facteurs anthropiques sur la désertification.....	134
4.1.1 Cas des surfaces agricoles	134
4.1.2 Cas de population	134
4.1.3 Cas de cheptel.....	134
4.2 Influence des facteurs climatiques sur la désertification.....	137
4.2.1 Cas de température	137
4.2.2. Cas de précipitation.....	137
4.2.3 Cas de vitesse du vent	137
Conclusion.....	142
Conclusion générale	143
Références bibliographiques	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	



Introduction générale

Introduction générale

Le terme « Désertification » désigne la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines (UNCCD, 1994). Elle se confirme chaque jour comme étant un problème d'envergure mondiale et se classant parmi les défis environnementaux les plus importants d'aujourd'hui (Sinave, 2010).

Tous les continents sont affectés par la désertification, cependant, les ampleurs sont différentes d'un continent à l'autre. Les zones africaines à fortes contraintes de sécheresse sont caractérisées par des sociétés rurales en mutations sociales et démographiques. Leurs systèmes écologiques fragiles et à faible résilience supportent depuis des décennies des perturbations anthropiques fortes et une accentuation des phénomènes de sécheresse qui aboutit à la dégradation des terres (Loireau *et al.*, 2007).

En Algérie, les écosystèmes steppiques arides, sont marqués par une grande diversité paysagère en relation avec une grande variabilité des facteurs écologiques. Régions à tradition pastorale, la population est composée essentiellement de pasteurs-éleveurs, anciennement nomades pour la plupart, avec une forte tendance à la sédentarisation aujourd'hui (Nedjraoui et Bedrani, 2008).

Suite à l'accroissement démographique et à la sédentarisation d'une partie croissante de la population, la steppe algérienne assiste actuellement à une extension rapide de l'agriculture au détriment des meilleures zones pastorales dont la végétation naturelle est détruite par des moyens mécaniques de plus en plus puissants. Cette destruction est également aggravée par l'accroissement de la pression animale sur les surfaces pastorales et par le prélèvement des produits ligneux destinés à la satisfaction des besoins en combustibles (Floret *et al.*, 1992).

Plusieurs travaux menés sur les milieux steppiques en Algérie ont révélé une amplification de la dégradation de cet écosystème (MARA, 1974 ; Mimoune, 1995 ; Bedrani et Bensouiah, 2000 ; Mouhous, 2005 ; Bouchetata et Bouchetata, 2005 ; Bensaïd, 2006 ; Benslimane *et al.*, 2008 ; Hadeid, 2008 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Abdesselam, 2013).

Les politiques de lutte contre la désertification ont été nombreuses et diversifiées ; en effet depuis 1962, des actions ont été entreprises par les autorités telles que « le Barrage Vert », les mises en place de coopératives pastorales, la promulgation du Code pastoral et des programmes de mises en valeur des terres (DGF, 2004). Ces politiques n'ont donné que peu de

résultats probants en raison de l'incapacité de l'administration à trouver des formules de participation des pasteurs et des agro-pasteurs à la gestion des parcours. Aujourd'hui, il semblerait que les actions du Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS), en charge des programmes de développement de la steppe (intensification de l'offre fourragère par les mises en défens et les plantations pastorales, mobilisation des eaux superficielles, introduction d'énergies renouvelables), aient trouvé plus d'adhésion auprès de la population (Kacimi, 1996 ; MADR, 2007).

Les outils d'aide à la décision sont devenus une nécessité pour les gestionnaires de l'espace et contribuent à la sensibilisation aux problèmes d'occupation et d'exploitation des espaces. En matière de lutte contre la désertification, contre les inondations, les incendies, l'urbanisation et la protection des ressources naturelles, ces outils donnent des orientations pour l'aménagement et la gestion des territoires (Benguerai, 2011).

La télédétection et les SIG ont fait l'objet, à ce jour, de nombreuses considérations quant à leur utilisation dans le suivi et la surveillance des écosystèmes arides. La validité de la méthode a souvent été testée avec d'autres données récoltées sur le terrain (mesurées et/ou observées).

Les utilisateurs ont vu dans l'outil géomatique soit une méthode "magique" permettant d'obtenir des résultats à partir d'un échantillonnage plus ou moins satisfaisant, soit un moyen de confirmation d'une interprétation des données de terrain (Regagba, 2012). Ce qui aide les décideurs à assurer un développement durable et à comprendre la dynamique de notre environnement en mutation.

La détection du changement d'occupation/utilisation des terres joue un rôle important dans la compréhension des relations et des interactions entre les phénomènes humains et naturels, afin de gérer et d'améliorer pleinement le processus de prise de décision (Lu *et al.*, 2004). Singh (1989) a défini la détection de changement comme « le processus d'identification des différences dans l'état d'un objet, d'une surface ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents ». Plusieurs publications ont présenté des revues exhaustives sur de nombreux algorithmes de détection de changement et sur leur développement, et ils ont été testés et utilisés dans des études de changement d'occupation/utilisation des terres (Singh, 1989 ; Coppin *et al.*, 2004 ; Lu *et al.*, 2004).

De nombreux problèmes liés aux considérations géo-spatiales ont été résolus à l'aide de l'analyse multicritères de décision basée sur des systèmes d'informations géographiques (AMCD_SIG) (Malczewski, 2006). Le couplage SIG et AMCD dans l'évaluation des situations

sensibles au risque de la désertification facilite la prise de décision en permettant la localisation spatiale des zones prioritaires de planification des projets de lutte contre ce risque majeur.

Peu d'études ont été réalisées sur le milieu steppique en Algérie et traitant le processus de la désertification en utilisant les techniques de la télédétection et du SIG. Des cartes de sensibilité à la désertification de l'Algérie du Nord ont été élaborées (Oussedik *et al.*, 2003 ; Benslimane *et al.*, 2008 ; Salamani *et al.*, 2013). D'autres études plus localisées ont été aussi menées dans plusieurs sites du milieu steppique (Bensaïd, 2006 ; Haddouche, 2009 ; Benmessaoud, 2009 ; Benguerai, 2011 ; Bouzekri, 2015 ; Boultif, 2018 ; Bouacha, 2018 ; Sahnouni et Abdesselam, 2018).

Le Hodna, localisé au cœur même de cette steppe connaît une situation défavorisée résultante non seulement de l'inclémence du milieu, mais surtout d'une évolution désastreuse des rapports entre l'homme et son environnement sous le double effet de la colonisation et des structures socio-économiques mises en place par elle et d'une démographie marquée par un fort accroissement de la population (Sebhi, 1987). Le Sud du Hodna destinée essentiellement aux pacages, est devenu aujourd'hui le siège de production végétale par la mise en valeur en irrigué en exploitant les eaux de la nappe profonde (Abdesselam, 2013). En outre, cette portion du Hodna, réputée autrefois par ses riches parcours n'a pas fait d'objet de travaux de recherche sur le phénomène de la désertification à l'exception du travail de thèse de Mimoune (1995) sur la gestion des sols salés et la désertification au sud du Hodna.

Face à une carence en matière d'études et de recherches sur cette zone très sensible à la dégradation, un constat sur le changement spatio-temporel d'occupation/utilisation des terres d'une part, et sur l'évaluation de la sensibilité à la désertification et la compréhension des facteurs influençant ce phénomène d'autre part, serait particulièrement indispensable, afin de cerner les problèmes de dégradation de ce milieu, et de focaliser les efforts sur la lutte et la conservation des ressources naturelles dans une perspective de développement durable de cette région.

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse dont l'objectif général est d'évaluer le phénomène de la désertification dans le sud du Hodna en intégrant des données satellitaires et des techniques d'information géographique.

La méthodologie adoptée tient compte aux éléments de réponses relatifs aux questions suivantes :

- Quelle est l'impact de l'anthropisation sur l'occupation des terres dans le sud du Hodna ?

- Quelles sont les méthodes les plus appropriées pour le suivre du phénomène de la désertification au sud du Hodna ?
- Comment évaluer la sensibilité à la désertification de ce milieu ?
- Quelle est la part des facteurs climatiques et anthropiques sur le processus de la désertification dans le sud du Hodna ?

La réponse à ces questions s'appuie sur le choix de plusieurs approches convergentes comportant les étapes suivantes :

- Sélection des données satellitaires en fonction de considérations importantes, telles que les résolutions d'échelle, spatiale, temporelle et spectrale des capteurs, ainsi que les coûts.
- Prétraitement et amélioration des images.
- Détection des changements spatio-temporels de l'occupation/utilisation des terres.
- Intégration du SIG et de l'analyse hiérarchique multicritère pour évaluer la sensibilité à la désertification en utilisant des indices spectraux de la télédétection.
- Utilisation des données climatiques, socioéconomiques et des résultats de l'évaluation de la sensibilité à la désertification afin de déterminer les différents facteurs influençant l'évolution de ce phénomène.

Le présent document est scindé en cinq chapitres, il est structuré de la manière suivante :

- Une introduction générale.
- Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique.
- Le deuxième chapitre comporte la présentation de la zone d'étude.
- Le troisième chapitre fournit une analyse détaillée de la désertification sur la base de changement d'occupation/utilisation des terres.
- Le quatrième chapitre aborde l'évaluation de la sensibilité à la désertification à l'aide d'un SIG et d'une approche décisionnelle multicritères.
- Le cinquième chapitre examine les facteurs influençant le phénomène de la désertification.
- Nous terminons enfin par une conclusion générale.

Chapitre I



Revue bibliographique

Chapitre I

Revue bibliographique

Dans ce chapitre sera présenté, dans un premier temps, un aperçu sur le phénomène de la désertification, puis par la suite, l'état de la désertification en Algérie et les actions de lutte menées contre ce phénomène.

Dans un deuxième temps, nous exposons le principe de système d'information géographique (SIG) et de la télédétection, ainsi que leur intégration pour l'étude de la désertification.

1. La question de la désertification

Introduction

La désertification se confirme chaque jour comme étant un problème d'envergure mondiale et se classe parmi les défis environnementaux les plus importants d'aujourd'hui. Selon la littérature, la désertification menace présentement un tiers de la superficie terrestre du globe et les moyens de subsistance d'environ un milliard de personnes vivant dans plus de 100 pays répartis sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique (Safriel *et al.*, 2005). Si rien ne se fait pour remédier à cette menace, la désertification peut rendre des terres inutilisables et engendrer de nombreux problèmes, comme l'insécurité alimentaire, la pauvreté rurale et l'exode de réfugiés environnementaux. Chaque année, des millions de personnes qui habitent dans les régions touchées subissent les effets néfastes de la désertification, du déclin de la productivité agricole à la pauvreté (Safriel *et al.*, 2005).

L'augmentation des besoins humains dans la steppe algérienne, qui se traduit par la conquête de nouveaux espaces naturels (urbanisation), la mise en culture, le surpâturage, la déforestation, combinés avec les changements climatiques conduisent au déclenchement du phénomène de la désertification (Aidoud et Touffet, 1996).

Dans cette partie, et après avoir présenté les définitions de la désertification, nous aborderons l'état de la désertification en l'Algérie notamment dans les écosystèmes steppiques.

1.1 Définition de la désertification

La définition de la désertification est relativement ancienne et le terme a été utilisé depuis assez longtemps (Lavauden, 1927 ; Aubreville, 1949 ; Tricart, 1954 ; Le Houérou, 1968). Cependant, l'idée que la désertification n'est pas une extension des déserts existants mais

résulte d'une transformation du milieu liée à l'action de l'homme, ne s'est développée qu'au cours de ces dernières décennies (Bentz et Jouve, 2002).

Les définitions se sont alors succédé, différant aussi bien sur les causes et les impacts du phénomène, que sur son extension géographique (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Exemples de définitions de la désertification (Katyal et Vlek, 2000).

Aire géographique	Causes	Impacts	Référence
Aride et semi-aride	Action humaine ou changement climatique	Diffusion et conditions désertiques, avancées du désert	Rapp, 1977
Terres sèches	Processus naturel et anthropique	Développement de conditions désertiques et déclin durable du rendement des principales cultures	Warren et maizels, 1977
Aride, semi-aride et subhumide	Action humaine	Changement des caractéristiques des terres allant vers des conditions plus désertiques, un écosystème appauvri ; productivité réduite et une détérioration accélérée des sols et système de production associés.	Mabutt, 1984
Tous les écosystèmes	Action humaine	Productivité réduite des cultures, altération de la biomasse et de la biodiversité, érosion accélérée du sol et accroissement des risques liés à l'occupation humaine	Dregne, 1978
Aride, semi-aride et subhumide	Action humaine et processus naturel	Changement irréversible du sol et de la végétation, avec une diminution de la productivité biologique, pouvant aboutir à	Rozanov, 1982

		l'extrême a la formation d'un désert	
Aride, semi-aride et subhumide	Action humaine et variation climatique	Développement de terres improductives et réduction de la productivité biologique	Ahmed et Kassas, 1988
Aride, semi-aride et subhumide	Action humaine	Dégradation durable des terres entraînant un déclin du potentiel de production difficilement réversible	Nelson, 1988
Aride, semi-aride et subhumide sec	Action humaine	Dégradation des terres	Dregne <i>et al.</i> 1991
Zone de sécheresse	Action humaine et processus naturel	Déclin irréversible ou destruction du potentiel biologique des terres et de leur capacité à supporter les populations	Mainguet, 1944

La définition de référence adoptée actuellement est celle-ci donnée par La Convention des Nations Unies pour la Lutte contre la Désertification (UNCCD, 1994), qui stipule que « le terme désertification désigne la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ». Cette définition est aujourd'hui reconnue et utilisée à l'échelle internationale.

1.2 Les zones touchées par la désertification

La dégradation des terres se produit partout dans le monde, mais elle s'avère d'autant plus dommageable dans les régions arides (Figure I.1) qui couvrent 41 % de la surface terrestre et où habitent plus de deux milliards de personnes (34 % de la population du monde) (PNUE, 2007). Ces terres arides ne sont pas réparties de façon égale entre les pays, 72 % des secteurs arides se retrouvent dans les pays en voie de développement et seulement 28 % se retrouvent dans les pays industrialisés (Safriel *et al.*, 2005).

Conséquemment, la majorité (90 %) des peuples habitant les terres arides vit dans les pays en voie de développement. Ces populations dépendent fortement des biens et des services qu'offrent ces types d'écosystème (PNUE, 2007).

Ces secteurs du monde sont enclins à la désertification par leurs sols fragiles, leur végétation clairsemée et leur climat imprévisible. Une caractéristique importante qui rend les sols des terres arides, particulièrement vulnérables à la dégradation est la lenteur de leur rétablissement après une perturbation, autrement dit, leur faible résilience (Middleton et Thomas, 1992).

Par ailleurs, les régions hyperarides sont exclues de la CNUCLD sous prétexte que ces régions ont une productivité naturellement faible et ne peuvent donc pas être plus désertifiées qu'elles le sont déjà. Pourtant, la désertification est observée dans certains endroits hyperarides, et des populations dépendent des services que peuvent offrir ces écosystèmes (Kishk, 1986).

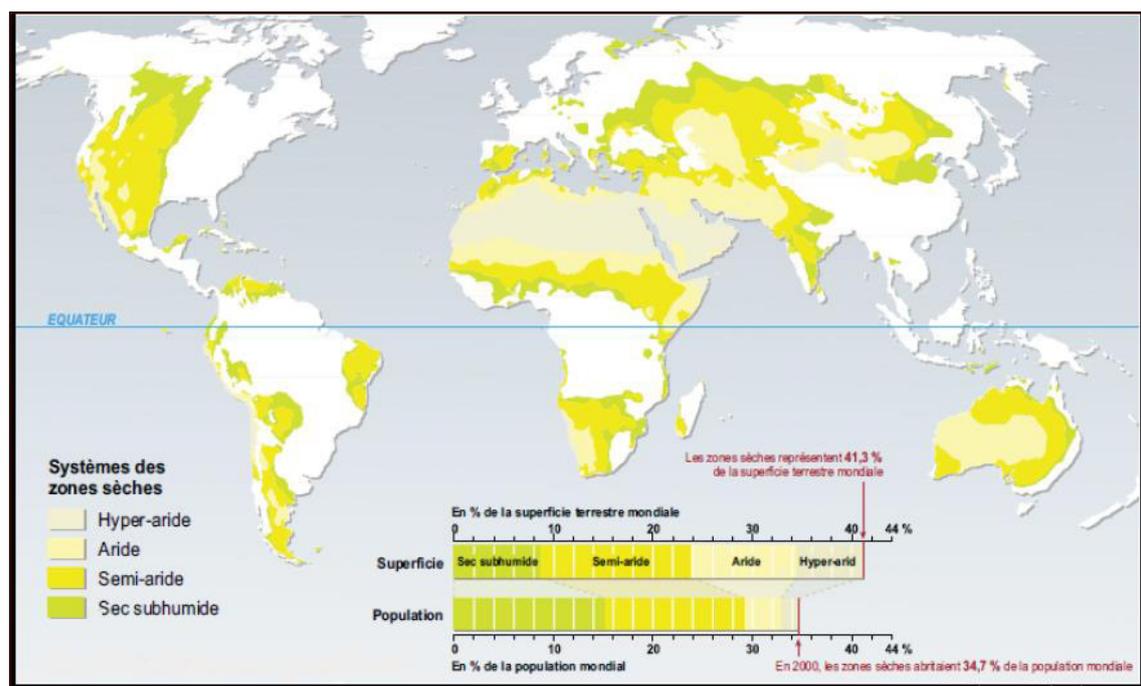


Figure I.1 : Localisation des zones sèches au niveau mondial et leurs Catégories (EEM, 2005).

1.3 La désertification en Algérie

1.3.1 La désertification dans la steppe algérienne

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semi-arides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif. Ces parcours naturels, qui jouent un rôle fondamental dans l'économie agricole du pays, sont soumis à des

sécheresses récurrentes et à une pression anthropique croissante : surpâturage, exploitation de terres impropres aux cultures...etc.

Depuis plus d'une trentaine d'années, ces parcours connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de l'écosystème (flore, couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat) (Le Houérou, 1985 ; Aidoud et Touffet, 1996 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; El Zerey *et al.*, 2009). Cette dégradation des terres et la désertification qui en est le stade le plus avancé, se traduisent par la réduction du potentiel biologique et par la rupture des équilibres écologiques et socio-économiques (Le Houérou, 1985 ; Bedrani, 1999).

D'après Amaouche (2010), le niveau de dégradation des parcours steppiques a été évalué par plusieurs institutions et montre un seuil très alarmant :

- 70 % par le CNTS (Centre National des Techniques Spatiales) en 2003 et le HCDS (Haut-Commissariat du Développement de la Steppe) en 2001 ;
- 55 % par le Ministère de l'Environnement en 2005 ;
- 74,81 % par la DGF (Direction Générale des Forêt) et l'ASAL (Agence Spatiale Algérienne) en 2009.

1.3.2 Présentation de la steppe algérienne

1.3.2.1 Situation de la steppe algérienne

Les steppes algériennes, situées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud (Figure I.2), couvrent une superficie globale de 20 millions d'hectares. Elles sont limitées au Nord par l'isohyète 400 mm qui coïncide avec l'extension des cultures céréalières en sec et au Sud, par l'isohyète 100 mm qui représente la limite méridionale de l'extension de l'alfa (*Stipa tenacissima*) (MARA, 1974 ; Djebaili, 1978 ; Djellouli, 1990).

Selon Nedjraoui (2003), cet espace se compose de deux grands ensembles :

- **Les steppes occidentales**, qui sont constituées des Hautes Plaines Sud Oranaises et Sud Algéroises, dont l'altitude décroît du Djebel Mzi à l'Ouest (1200 m) à la dépression salée du Hodna au centre occupée par des dépôts détritiques.
- **Les steppes orientales à l'Est du Hodna**, qui sont formées par les Hautes Plaines du Sud Constantinois où domine le Crétacé de nature calcaire et dolomitique. Ces Hautes Plaines sont bordées par le Massif des Aurès et des Némemchas.

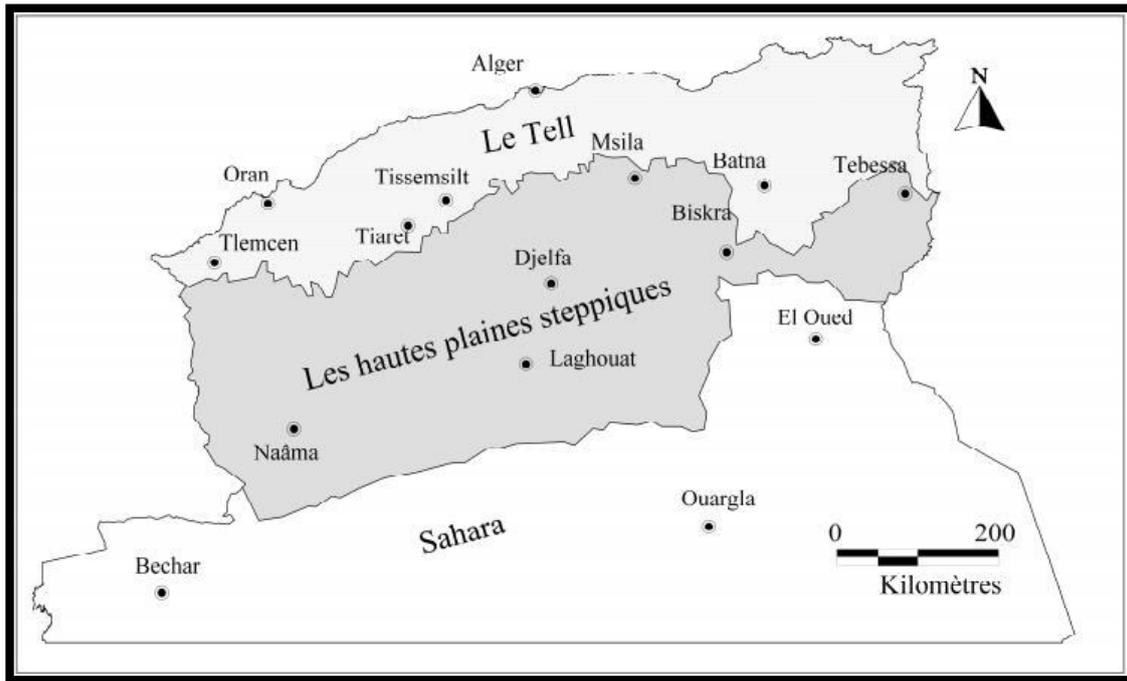


Figure I.2 : Limites de la steppe algérienne (ANAT, 2004).

1.3.2.2 Le climat

La steppe algérienne a un climat de type méditerranéen avec une saison estivale sèche et chaude alternant avec une saison hivernale pluvieuse, fraîche ou froide. Elle se caractérise par une irrégularité accrue des pluviosités, augmentation des températures et de la longueur des périodes de sécheresse estivale rendant encore plus difficiles les conditions de développement des plantes avec un bilan hydrique déficitaire (Houérou, 1995).

Selon Djebaili (1984), la steppe algérienne est limitée au plan pluviométrique entre 400 mm et 100 mm de précipitation moyenne.

1.3.2.3 Le sol

Les sols steppiques sont pauvres et fragiles à cause de la rareté de l'humus et de leur très faible profondeur « Adaptés au régime climatique aride », ils sont généralement peu évolués, moins profonds et parfois inexistantes. Ils sont caractérisés par une évolution beaucoup plus régressive que l'inverse, c'est-à-dire la morphogenèse qui l'emporte sur la pédogenèse » (Haddouche, 2009).

1.3.2.4 La végétation

Djebaili (1984) a classé la végétation steppique selon les facteurs pédoclimatiques et sa répartition spatiale en trois types :

➤ **La steppe Graminiéenne à base d'Alfa** (*Stipa tenacissima*) et / ou **de sparte** (*Lygeum spartum*) qui se trouve dans les sols argileux à texture plus fine. Sur les sols sableux, c'est la steppe à Drinn (*Aristida pungens*) ;

➤ **La steppe à chamaephytes** représentées par l'armoise blanche (*Artemisia herba alba*) qui occupe les sols à texture fine ;

➤ **La steppe à Halophyte ou crassuléscentes** qui occupe les terrains salés aux alentours des chotts, avec la présence de *Atriples halimus*, *Salsola vermiculata* et *Suaeda fruticosa*.

1.3.2.5 La population

Selon (Nedjraoui et Bédrani, 2008), la croissance démographique des zones steppiques est plus forte que celle enregistrée dans le reste du pays et a concerné aussi bien la population agglomérée que la population éparse (Figure I.3).

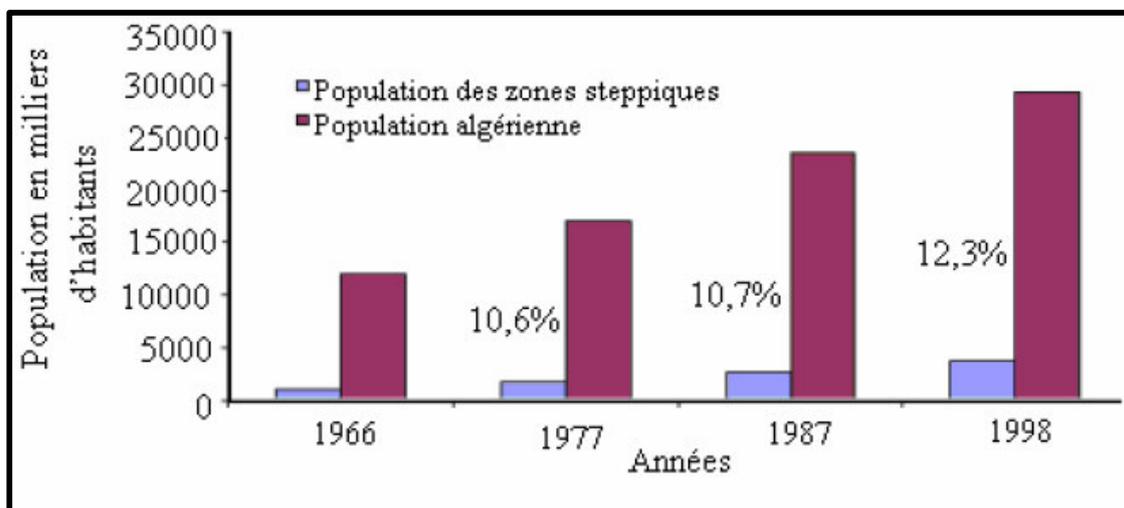


Figure I.3 : Évolution de la population steppique par rapport à la population totale (Nedjraoui et Bédrani, 2008).

Cependant, on note une importante régression du nomadisme qui ne subsiste que de façon marginale, les déplacements de grande amplitude ne concernant plus qu'environ 5 % de la population steppique. Les pasteurs ont modifié leur système de production en associant quasi systématiquement culture céréalière et élevage (Boukhobza, 1982 ; Bedrani, 2001).

1.4 Les causes de la désertification

Les causes de la désertification sont nombreuses. La cause naturelle principale est bien connue : la sécheresse. Les causes anthropiques (démographie, surpâturage, défrichage des parcours et leurs causes) le sont moins. En particulier, les causes qui relèvent des effets des politiques économiques d'ensemble (politiques monétaires, sociales, du commerce extérieur, politique des investissements publics et privés) sont peu abordées (Bédrani, 1997).

1.4.1 La sécheresse

Les steppes algériennes sont marquées par une grande variabilité interannuelle des précipitations. En outre, les dernières décennies ont connu une diminution notable de la pluviosité annuelle, avec parfois plusieurs années consécutives de sécheresse persistante. (Nedjraoui et Bedrani, 2008).

Les travaux de Hirche *et al.* (2007) portant sur une analyse statistique de l'évolution de la pluviosité de plusieurs stations steppiques, montrent que les steppes algériennes se caractérisent par une aridité croissante, cette tendance est plus prononcée pour les steppes occidentales que les steppes orientales.

La figure I.4 montre que la répétition des années de sécheresse dans la wilaya steppique de Djelfa entre 1975 et 2014 par rapport à la référence de l'année humide qui est égale à 324 mm, il ressort du graphe la répétition des années sèches, cette situation est accentuée après l'année 1998 (Fodil, 2018).

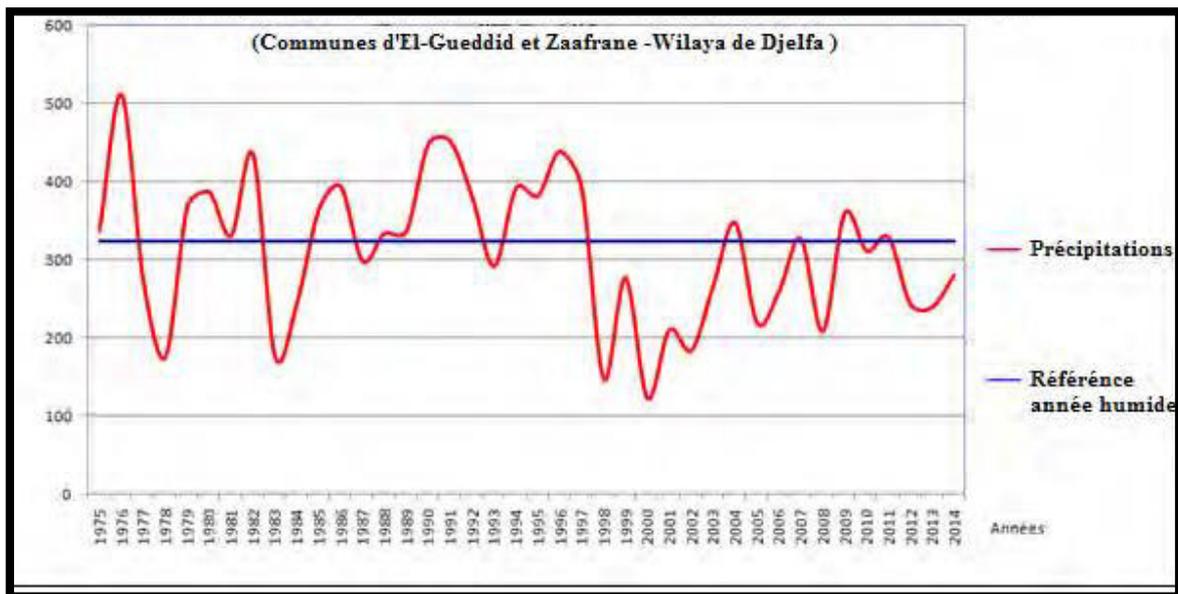


Figure I.4 : Évolution des moyennes des précipitations annuelles en fonction de la référence année humide (Communes El-Gueddid et Zaafrane-Wilaya de Djelfa).

Il a été convenu pour un ensemble des auteurs que l'accentuation des phénomènes de sécheresse n'est pas à l'origine de la désertification, mais elle constitue un facteur important d'aggravation de l'effet anthropique sur la dégradation des terres en zones sèches (Le Houérou, 1995). En effet, la végétation et les sols des régions arides se sont adaptés à des conditions de sécheresses récurrentes au cours des siècles et des millénaires passés acquérant une capacité à récupérer leurs caractéristiques après perturbation (Le Houérou, 1995).

1.4.2 Le surpâturage

La désertification dans la steppe algérienne est essentiellement liée à une surcharge animale et un surpâturage de ces zones sans temps de repos suffisant pour leur permettre de se régénérer (Bentz et Jouve, 2002). Aujourd'hui, c'est bien évidemment que le surpâturage est la principale cause de la dégradation des terres dans la steppe algérienne par le maintien d'un effectif trop important de troupeaux par rapport aux disponibilités fourragères réelles de la steppe (Bencherif, 2011).

Depuis le constat amer effectué en 1970, où la steppe ne pouvait supporter plus de 4 millions de têtes d'ovins, les effectifs ont continué d'augmenter passant de 5,6 millions (7,89 millions éq-ov) en 1968, à 8,5 millions en 1978, à 12 millions en 1988, à 16,32 millions (19, 17 éq-ov) en 1998 (Fodil, 2018).

Le surpâturage résulte de deux causes jouant soit séparément, soit cumulativement (MARA, 1974) :

- C'est d'abord le maintien trop long d'un troupeau sur une aire pâturée dont la charge était normale au début de l'attaque par les animaux ;
- C'est encore l'entrée sur l'aire pâturée d'un effectif trop lourd pour la densité de végétation palatable.

Selon Nedjraoui et Bedrani (2008), cet état des choses résulte de la demande soutenue et croissante de la viande ovine en relation avec la croissance démographique, par la haute rentabilité de l'élevage en zones steppiques du fait de la gratuité des fourrages.

1.4.3 Evolution de la population steppique

L'évolution de la population steppique engendre une compétition autour de cet espace, la transhumance ou déplacement de grande amplitude (Achaba ; transhumance d'été vers les chaumes des zones telliennes ou Azaba ; transhumance d'hiver vers les piémonts Nord de l'Atlas Saharien) qui permettait dans le passé une utilisation rationnelle des ressources naturelles, ne concerne plus que cinq (5 %) de la population steppique (Nedjimi *et al.*, 2008). Le reste de la population est devenu semi-sédentaire. Les pasteurs ont modifié leur système de production en associant culture céréalière, élevage et sédentarisation (Khaldoun, 2000). Il ressort que, la croissance démographique et la sédentarisation de plus en plus importante ont eu comme conséquence l'augmentation de la pression sur les ressources et l'intervention anarchique de l'homme. D'autre part l'intensification des besoins engendrés par la croissance démographique qui n'a pas été accompagnée par une création d'emplois suffisamment conséquente pour absorber la main-d'œuvre excédentaire par rapport aux besoins d'une exploitation raisonnable des parcours naturels (Bedrani, 1998).

1.4.4 Le défrichage

Selon Senoussi *et al.* (2014), le défrichage des parcours pour mise en culture de céréales (avoine, orge et blé) est une autre cause majeure qui altère les parcours en réduisant leurs surfaces. Le défrichement est l'un des indicateurs de la dégradation des ressources végétales. Ces dernières se manifestent surtout à travers la diminution du taux de recouvrement et le changement du cortège floristique. Les faciès que l'on retrouve sont modifiés tant sur le plan de la densité du couvert végétal que sur le plan de leur valeur pastorale.

1.4.5 La mauvaise gestion des terres irriguées

L'importance de l'irrigation dans les zones arides et semi-arides tient notamment à la productivité remarquable qu'elle permet, l'irrigation dans ces zones est appelée à jouer un rôle essentiel dans la satisfaction des besoins alimentaires en particulier dans les zones sèches. Cependant, l'irrigation a introduit dans les écosystèmes arides et semi-arides des changements de régime : sol, eau, atmosphère, qui risquent d'avoir des effets défavorables, générateurs de désertification, si la gestion de l'eau n'est pas adéquate (Nahal, 2004).

1.5 La lutte contre la désertification en Algérie

1.5.1 Stratégie de lutte contre la désertification

La Convention Internationale sur la Désertification, adoptée à Paris en Juin 1994, conformément à l'esprit de l'Agenda 21, adopté par la CNUED à Rio en 1992, cette convention a été ratifiée par l'Algérie le 14 Octobre 1994 et est entrée en vigueur le 26 Décembre 1996. Le principal objectif de cette Convention est de :

- Lutter contre la désertification réside dans une utilisation rationnelle du milieu dans le cadre de plans de développement intégrés ;
- D'atténuer les effets de la sécheresse et de la désertification par une approche participative et intégrée.

En Algérie, la mise en œuvre de la Convention des Nations Unies sur la lutte Contre la Désertification est prise en charge par :

- Le Ministère de l'Agriculture, institution focale de cette convention ;
- La Direction Générale des Forêts représentée par le Directeur Général des Forêts, point focal national de cette convention.

L'application et la mise en œuvre de la convention des Nations Unies sur la Lutte contre la désertification est coordonnée par l'Organe National de Coordination sur la lutte contre la désertification mis en place par arrêté du ministre de l'Agriculture. Cet organe est abrité par la Direction Générale des Forêts et présidé par le Directeur Général des Forêts (DGF, 2002).

1.5.2 Les politiques de lutte contre la désertification en Algérie

Depuis l'indépendance, l'Algérie a entrepris un grand nombre d'actions. Dans les premières années, seule la dimension de reboisement était retenue pour la régénération des terres perdues lors d'incendies et l'exploitation forestière non contrôlée, la protection des bassins-versants contre l'érosion hydrique et le développement de l'activité économique sylvicole (DGF, 2004).

Parmi les actions également menées, il est important de mentionner "le barrage vert", la mise en place de coopératives pastorales, la promulgation du code pastoral et les programmes d'aménagement du territoire (DGF, 2002).

Par ailleurs, le Haut Commissariat au développement de la steppe (HCDS), responsable des programmes de développement de la steppe a également mené différentes actions dans cet écosystème. La plupart de ces projets sont financés par le Fonds de lutte contre la désertification et le développement du pastoralisme et la steppe (FLDDPS).

Les principaux programmes de lutte contre la désertification ont été intervertis au niveau des steppes algériennes sont résumés dans le tableau suivant (Tableau I.2) :

Tableau I.2 : Les principaux programmes de lutte contre la désertification (DGF, 2002 ; Ikhlef, 2012 ; MADR, 2014).

Intitulé	Périodes	Types d'actions en rapport avec le reboisement et/ou la désertification
-Chantiers populaires de reboisement CPR	1962-1967	-Reboisement dans les régions à fort taux de chômage.
-Plan triennal	1967-1969	-Relance de l'activité forestière.
-Premier plan quadriennal	1970-1973	-Reboisement productif et barrage vert contre la désertification.
-Deuxième plan quadriennal	1974-1977	-Renforcement du plan précédent.
-Premier plan quinquennal	1980-1984	-Reboisement et aménagement de bassins versants.
-Deuxième plan quinquennal	1985-1989	-Reboisement avec une plus grande diversification des espèces.

-Le barrage vert	1971-1990	-Reboisement systématique puis aménagement intégré agro-sylvo-pastoral des territoires y compris entre les isohyètes 200 et 300 mm.
-Le plan National de lutte contre la désertification	Dès 1987	-Intensification et extension du barrage vert avec une approche agro-sylvo-pastorale.
-Haut-Commissariat au Développement de la Steppe	1987	-Développement intégré de la steppe
-Programme des grands travaux	Dès 1994	-Développement et entretien du patrimoine forestier, consolidation et extension du barrage vert, protection et aménagement des bassins versants.
-Plan National de Développement Agricole (PNDA)	Dès 2000	-Valorisation du produit forestier désenclavement des populations et lutte contre le chômage.
-Plan National de Développement Agricole et Rural (PNDAR)	2002	- 9 sous-programmes dont 5 ont trait à la préservation et le développement des espaces naturels ainsi que la création d'emploi en particulier par le reboisement, la mise en valeur des terres, la protection et le développement des zones steppiques et de l'espace oasien.
-Plan d'Action National de Lutte Contre la Désertification (PANLCD).	2003	

-La Politique du Renouveau Agricole et Rural (PRAR)	2008	-Démarche participative en vue de développer l'agriculture et l'élevage, stabiliser et repeupler le milieu naturel.
-PPDRI	2009-2012	<ul style="list-style-type: none"> - Constitue le principal outil dans la lutte contre le phénomène de la désertification. -Approche novatrice de développement Rural par les PPDRI. -Lancement de 1886 Projets de Proximité de Développement Rural par le MADR.

1.6 Les différentes études menées sur la steppe algérienne

La steppe n'a pas beaucoup intéressé les décideurs en matière de recherche. A la fin des années soixante-dix, un important travail a été réalisé par le ministère de l'agriculture qui a décrit minutieusement l'ensemble des zones steppiques à la fois sur le plan physique, agricole, phytoécologique et humain (MARA, 1974). Cette étude reste le seul travail de référence sur la steppe qui n'a jamais été mise à jour (Nedjraoui et Bedrani, 2008).

Depuis une cinquantaine d'années, ces régions ont fait l'objet de nombreuses études tant sur le plan socioéconomique (Boukhobza, 1982 ; Khaldoun, 2000 ; Bédrani, 2006), que sur le plan écologique (Djebaili, 1978 ; Djellouli, 1981 ; Le Houerou, 1985 ; Aidoud, 1989 ; Djellouli, 1990 ; Boughani, 1995 ; Kadi-Hanifi, 1998 ; Nedjraoui, 2002 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Hirche *et al.*, 2011), pour l'étude des sols, élément-clé des études écologiques des régions steppiques, on peut citer les travaux suivants (Dekkiche, 1974 ; Pouget, 1980 ; Halitim, 1988 ; Abdesselam, 2013).

Le suivi à long terme, dans ces régions, qui a débuté dès les années 1970 et s'est poursuivi par la suite (CRBT, 1978 ; URBT, 1994 ; Programme ROSELT/OSS/Algérie, 2001-2005) dans des stations installées dans différentes zones steppiques, a permis d'évaluer et de cartographier leur potentialité, de quantifier l'intensité de leur dégradation et d'identifier les facteurs qui en sont responsables.

Le suivi de la sensibilité à la désertification de la steppe a été réalisé par Oussedik *et al.* (2003) dans son travail intitulé « Réalisation de la carte de sensibilité à la désertification du nord d'Algérie », qui a permis d'avoir une vision synoptique de la zone steppique, mettant en

évidence que plus de la moitié de la zone étudiée (53 %) est constituée des classes « très sensible » et « sensible » à la désertification. Le travail de Benslimane *et al.* (2008) a abouti à la carte de sensibilité à la désertification et leurs résultats montrent que 74,81 % des parcours steppiques sont au seuil de la désertification. Par la suite, Salamani *et al.* (2013) ont élaboré une autre carte de sensibilité à la désertification et leur résultat indique dans son travail que 87 % de la superficie cartographiée est très fortement à fortement sensible à la désertification.

Ces cartes constituent un moyen d'évaluation de l'évolution spatio-temporel de la dégradation des milieux steppiques et révèlent une dégradation en continu dans le temps.

Une étude récente portant sur la réalisation de la carte nationale de sensibilité à la désertification, par l'utilisation des données satellitaires et les systèmes d'informations géographiques a été élaborée par le Centre des Techniques Spatiales d'Arzew (CTS/ASAL), en partenariat avec la Direction Générale des Forêts dont la zone d'étude s'étalant sur 27 millions 435 mille hectares a concerné les douze (12) wilayas steppiques suivantes : Naama, Tlemcen, El-Bayadh, Saïda, Tiaret, Laghouat, Djelfa, M'sila, Batna, Biskra, Khenchela, Tébessa. L'étude s'est concrétisée par une cartographie au 1/200.000^{ème} et elle constitue un outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'un plan d'action de lutte contre la désertification pour le programme quinquennal 2010 – 2014.

Au cours des dernières décennies, d'autres études plus localisées ont été réalisées sur l'évaluation de l'occupation des terres et la dégradation des milieux steppiques de l'Algérie (Bensaid, 2006 ; Labani et Benabdeli, 2006 ; Benmessaoud, 2009 ; Benguerai, 2011 ; Bouzekri, 2015 ; Boultif, 2018 ; Bouacha, 2018 ; Sahnouni et Abdesselam, 2018). Les résultats de ces travaux sont en accord avec les cartes déjà citées et démontrent une dégradation importante des parcours steppiques.

2. Principes de la télédétection et de système d'information géographique (SIG)

Introduction

Le système d'information géographique (SIG) et la télédétection, sont des techniques très efficaces utilisées de plus en plus pour aider à la gestion des différents problèmes liés à l'environnement. Dans cette partie de chapitre, nous allons essayer de donner un aperçu général sur le système d'information géographique (SIG) et de la télédétection qui lui sont généralement associés, et de discuter l'application de la télédétection et le SIG dans le cadre de l'étude de la désertification.

2.1 Principe de système d'information géographique

L'apparition des systèmes d'information géographique (SIG) au milieu des années 60 reflète les progrès de la technologie informatique et l'influence de la révolution quantitative en géographie. D'un logiciel de cartographie et de gestion de données automatisées, les SIG ont évolué de manière spectaculaire pour devenir une technologie performante de traitement et d'analyse des données spatiales et plus récemment, pour la science de l'information géographique (SIG). Le succès commercial enregistré depuis le début des années 80 a permis au SIG d'être de plus en plus appliqué largement (Weng, 2010).

Un consensus de définitions montre que les SIG ne peuvent être considérés comme de simples logiciels de traitement de données spatialisées. Parmi ces définitions, celle de De Blomac *et al.* (1994) « Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnels capables de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées ».

Selon Konecny (2002), « Un SIG, dans une définition étroite, est un système informatique pour la saisie, la manipulation, le stockage et la visualisation des données spatiales numériques ». Dans une définition plus large, c'est est un système numérique d'acquisition, de gestion, d'analyse, de modélisation et de visualisation de données spatiales aux fins de la planification, l'administration et le contrôle de l'environnement naturel ».

2.1.1 Structure d'un SIG

Malczewski (1999) a dégagé quatre composantes fonctionnelles principales des SIG (Figure I.5) :

- Entrée/Sortie des données.
- Stockage et gestion des données.
- Manipulation et analyse des données.
- Interface dialogue avec l'utilisateur.

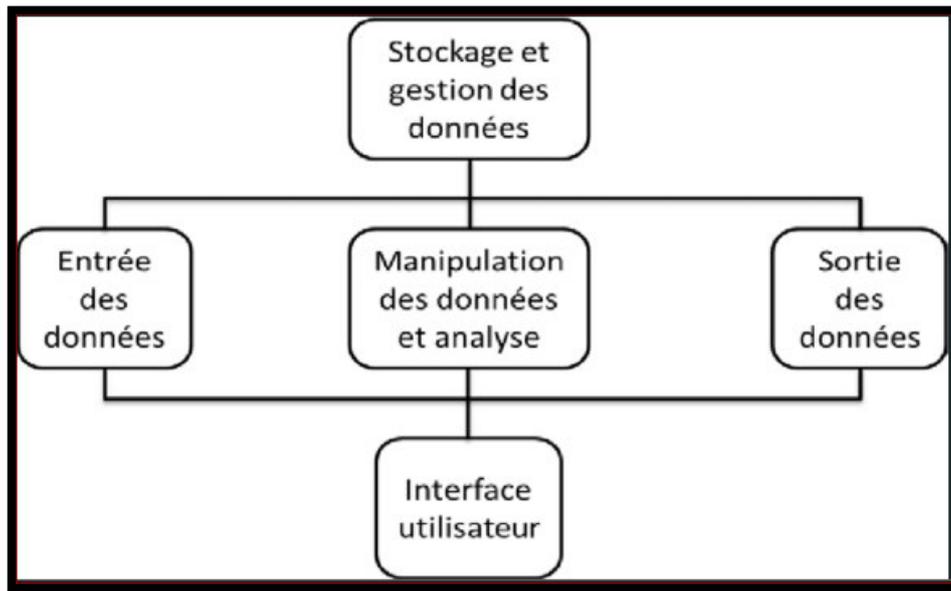


Figure I.5 : Structure d'un SIG (Malczewski, 1999).

2.1.2 Principe de fonctionnement des SIG

Dans les SIG, les données géographiques suivent un cycle de vie itératif, elles sont organisées sous forme de couches et elles sont représentées selon deux différents modes (vecteur et raster).

2.1.3 Le cycle de vie de l'information géographique dans un SIG

Le cycle de vie de l'information géographique reflète sa dynamique, ce cycle est itératif, quand on passe une étape, on est susceptible d'y revenir à chaque moment, ce qui explique la forme circulaire de la figure I.6. Ce cycle montre le fait qu'un SIG n'est pas établi une fois pour toutes et doit être adapté à toute transformation de l'espace géographique (Caloz et Collet, 2011).

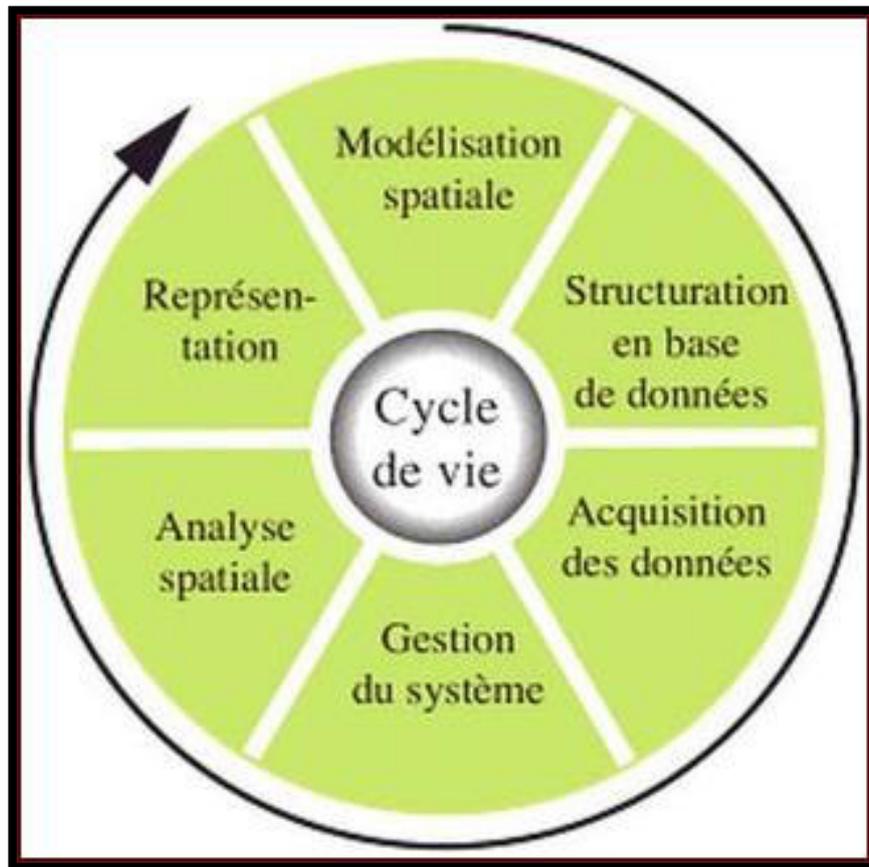


Figure I.6 : Le cycle de vie de l'information géographique dans un SIG.

2.1.4 Les données intégrées dans un SIG

Fernandez-Falcon *et al.* (1993) estiment que 80 % des données possédant une référence spatiale. Techniquement, ces données peuvent être de deux natures : les images et les vecteurs.

2.1.4.1 Les images ; également appelées rasters, sont constituées d'une matrice de pixels géoréférencés auxquels sont attribuées des valeurs radiométriques de couleur. Les photographies aériennes et les cartes topographiques sont des exemples de rasters couramment utilisés.

2.1.4.2 Les données vecteurs sont composées d'objets géographiques de forme élémentaire. Les points sont des coordonnées XY, les lignes sont une succession de points de coordonnées XY, et les polygones sont une succession de points de coordonnées XY délimitant une surface fermée (Figure I.7).

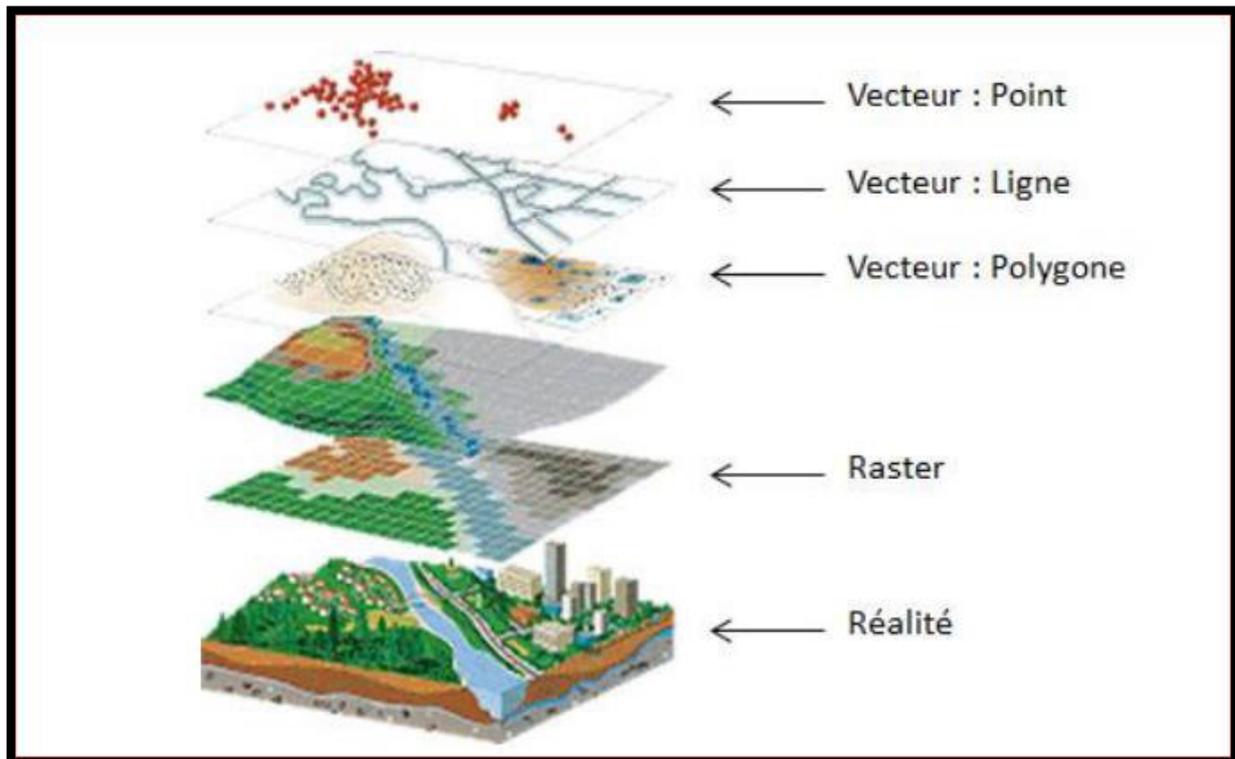


Figure I.7 : Couches d'informations spatialisées au sein d'un SIG (modifié à partir d'ESRI, 2014).

2.1.5 L'analyse spatiale dans le SIG

« Analyse spatiale » fait référence à l'analyse d'un phénomène distribué dans l'espace qui possède également des dimensions physiques (la localisation, la proximité, l'orientation, etc.) (Bimonte, 2007). L'analyse spatiale vise à l'estimation, la prédiction, l'interprétation et la compréhension des phénomènes du monde réel, en mettant en évidence des structures et des formes récurrentes d'organisation spatiales. Elle s'applique à plusieurs domaines comme les problèmes environnementaux, le marketing, les sciences humaines, etc.

L'analyse spatiale pour les sciences environnementales et les SIG est une opération intellectuelle qui consiste à décomposer un phénomène de l'espace en ses éléments essentiels afin d'en saisir les rapports et de donner un modèle de l'ensemble (Caloz et Collet, 2011).

Mitchell (2005) formule le processus d'analyse spatiale comme un processus itératif qui consiste à :

- Identifier le problème et les buts de l'analyse ;
- Identifier les problématiques spatiales et les outils pour les résoudre ;
- Identifier les données et leur préparation pour les opérations spatiales ;
- Créer un plan d'analyse (les fonctions et les opérations spatiales peuvent être appliquées

séquentiellement, en d'autres termes leur résultat peut être l'entrée d'une ou plusieurs fonctions et/ou opérations spatiales) ;

- Exécuter le plan ;
- Visualiser les résultats.

2.2 La télédétection

2.2.1 Définition de la télédétection

La télédétection spatiale « Remote Sensing » est une discipline scientifique qui intègre un large éventail de compétences et de technologies utilisées pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des phénomènes terrestres et atmosphériques. Ses principales sources sont les mesures et les images obtenues à l'aide de plates-formes aériennes et spatiales.

Trois définitions de la télédétection sont données ci-dessous :

- La télédétection est la science consistant à acquérir, traiter et interpréter des images qui enregistrent l'interaction entre l'énergie électromagnétique et la matière (Sabins, 1996).
- La télédétection est la science et l'art d'obtenir des informations sur un objet, une zone ou un phénomène grâce à l'analyse de données acquises par un dispositif qui n'est pas en contact avec l'objet, la zone ou le phénomène à l'étude (Thomas, 1997).
- La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'image, permet d'obtenir l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information (Kluser, 2000).

Les trois définitions ont en commun le fait que les données des caractéristiques de la surface de la Terre sont acquises par un appareil qui n'est pas en contact avec les objets à mesurer. Le résultat est généralement stocké sous forme des images.

2.2.2 Eléments essentiels en télédétection

La télédétection est une méthode qui permet d'obtenir des informations sur des objets en recueillant et en analysant des données sans contact direct entre l'instrument utilisé et l'objet analysé (Girard et Girard, 1999). Les éléments essentiels en télédétection sont :

- Une plate-forme pour tenir l'instrument ;
- Un objet cible à observer ;
- Un instrument ou capteur pour observer la cible ;

Lorsque les scientifiques parlent de télédétection, l'objet observé est la terre. En général pour eux, la télédétection est un moyen pour observer la terre, sa surface terrestre, ses océans, son atmosphère et sa dynamique depuis l'espace (Girard et Girard, 1999).

Désormais, quand le terme de télédétection sera utilisé, il sera au sens que lui donnent les scientifiques qui observent la terre. La télédétection est une technologie qui a pour objectif principal de découvrir et d'observer le système « terre », l'environnement et sa dynamique à différentes échelles (Girard et Girard, 1999).

2.2.3 Processus de télédétection

Lorsqu'un rayonnement entre en contact avec un objet, sa trajectoire est perturbée, car la matière a la triple propriété de pouvoir : Absorber, Réfléchir ou Transmettre la lumière.

Les trois caractéristiques de la lumière lors de son contact avec la matière se mesurent par rapport à la quantité de lumière qui a frappé l'objet (lumière incidente) : L'absorption (α), la réflectance (τ), et la transmittance (ρ) avec $(\alpha) + (\tau) + (\rho) = 1$

La télédétection spatiale utilise des moyens d'instruments appelés capteurs qui enregistrent le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les objets de la surface terrestre ou de l'atmosphère (Figure I.8).

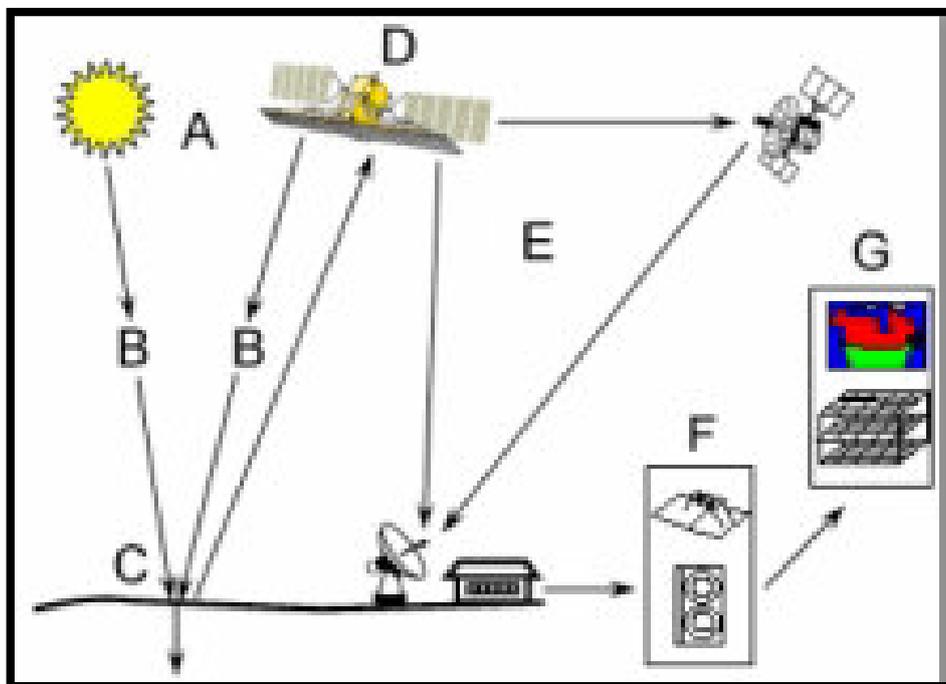


Figure I.8 : La réflexion et l'émission du rayonnement (Kluser, 2000).

Légende de la figure ci-dessus :

- Source d'énergie ou d'illumination (A).
- Rayonnement et atmosphère (B). Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, et entre la cible et le capteur, le rayonnement interagit avec l'atmosphère.
- Interaction avec la cible (C).
- Enregistrement de l'énergie par le capteur (D). Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible pour être enfin enregistrée.
- Transmission, réception et traitement (E). L'énergie enregistrée par le système d'acquisition est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- Interprétation et analyse (F). Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- Application (G). La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible.

2.2.4 Principes physiques de la télédétection

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la cible, donc une bonne connaissance de la physique élémentaire du rayonnement est indispensable à l'interprétation des résultats de la télédétection.

2.2.4.1 Le rayonnement électromagnétique

En télédétection, on utilise les propriétés physiques des objets observés, en particulier leurs propriétés optiques, pour acquérir de l'information sur la nature de ces objets. Cette information est portée vers le système d'observation à l'aide d'un rayonnement électromagnétique, comme la lumière, qui est la manifestation visible de ce rayonnement. Le système d'observation reçoit ce rayonnement et le traduit en éléments compréhensibles par l'utilisateur comme des images ou des données chiffrées (Bonn et Rochon, 1992).

Une onde électromagnétique est représentée par deux vecteurs perpendiculaires indissociables, dont l'amplitude varie périodiquement avec le temps : le champ électrique E et le champ magnétique H . La direction de propagation de cette onde est perpendiculaire au plan défini par ces deux vecteurs (Figure I.9).

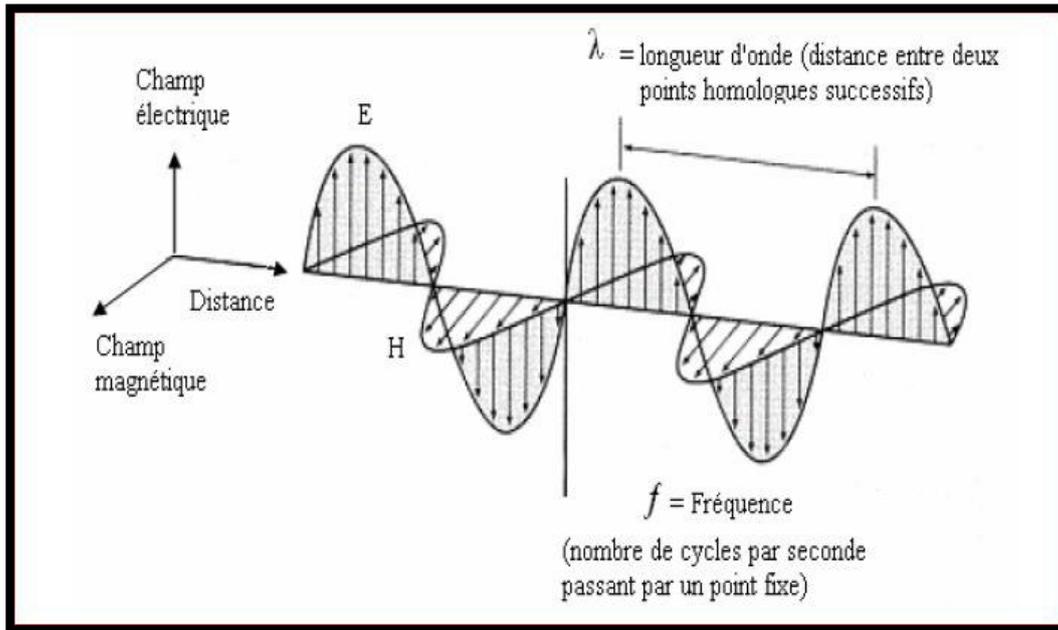


Figure I.9 : Représentation schématique d'une onde électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).

Le rayonnement électromagnétique se caractérise par :

- La période qui est le temps (T) pendant lequel l'onde effectue une oscillation complète.
- La fréquence ν est l'inverse de la période ($1/T$).
- La longueur d'onde λ qui est la distance entre deux points homologues sur l'onde.
- La vitesse v de propagation de l'onde dans l'espace, dans le vide, et à peu de chose près, dans l'air, cette vitesse est : $c = 300 \cdot 10^3$ km/s.

dans l'air, cette vitesse est : $c = 300 \cdot 10^3$ km/s.

La relation entre vitesse, longueur d'onde et fréquence est : $\lambda = c/\nu$.

2.2.4.2 Le Spectre électromagnétique

D'après (Weng, 2010), tout le Rayonnement Electromagnétique (REM) de spectre électromagnétique et bien qu'il soit considéré comme un continuum de longueurs d'onde et de fréquences, il peut être décomposé en ondes sinusoïdales élémentaires qu'on appelle composantes spectrales du rayonnement. Les longueurs d'onde sont données par la figure I.10.

Les principales divisions du spectre électromagnétique, allant des ondes courtes et hautes fréquences aux ondes longues et basses, comprennent les rayons gamma, les rayons X, le rayonnement ultraviolet (UV), la lumière visible, le rayonnement infrarouge (IR), rayonnement micro-ondes et ondes radio.

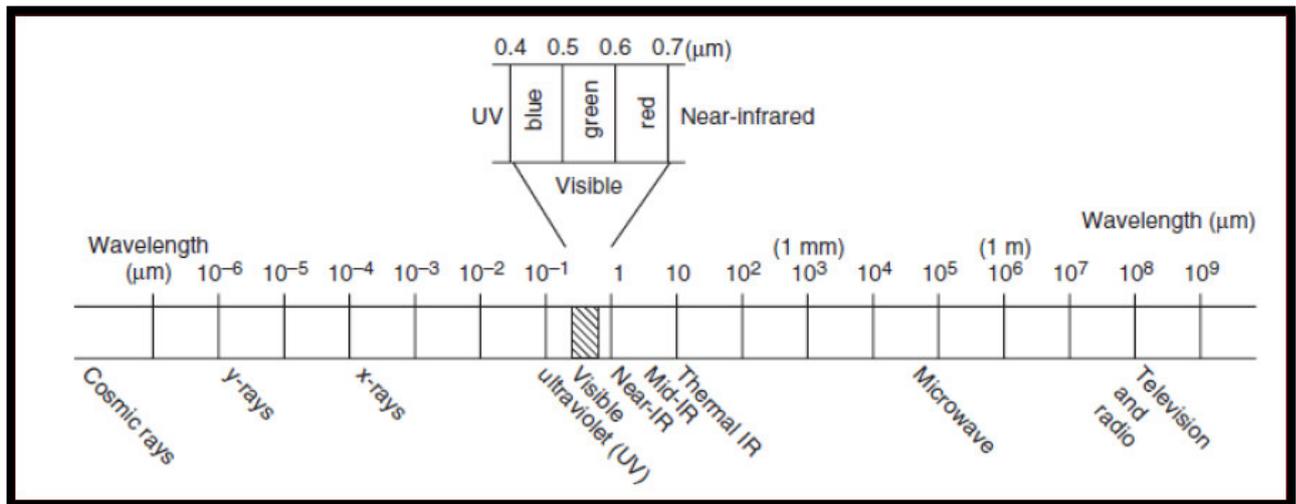


Figure I.10 : Les principales divisions du spectre électromagnétique (Weng, 2010).

2.2.5 Interactions rayonnement et surfaces terrestres

Au niveau de la cible, le rayonnement électromagnétique est réfléchi, absorbé et transmis dans des proportions variables. Lorsqu'on s'intéresse à une longueur d'onde spécifique, le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident est appelée réflectance ($\rho\lambda$). De la même manière, on définit l'absorption ($\alpha\lambda$) et la transmittance ($\tau\lambda$). Les capteurs utilisés en télédétection mesurent le rayonnement réfléchi et donc on s'intéresse à la réflectance des objets. La réflexion d'une onde incidente sur la surface terrestre dépend des caractéristiques de l'onde (longueur d'onde, polarisation, angle d'incidence, etc.) et des caractéristiques de la surface (matériau, pente, rugosité, humidité, etc.) (Polidori, 2002). La variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde est appelée signature spectrale.

2.2.6 Les signatures spectrales

Selon Navulur (2006), la notion de signature est à la base de la télédétection, car elle permet de discerner entre les différents objets vu qu'ils ont des propriétés différentes affectant leurs signatures. Le phénomène prépondérant dans le visible et le proche infrarouge est la réflexion dans l'infrarouge thermique et les hyperfréquences : l'émission naturelle des objets.

Les surfaces qu'on rencontre en télédétection peuvent être regroupées en trois ensembles (Figure I.11) : surfaces minérales (roches, sols, routes, etc.), surfaces végétales et surfaces aquatiques.

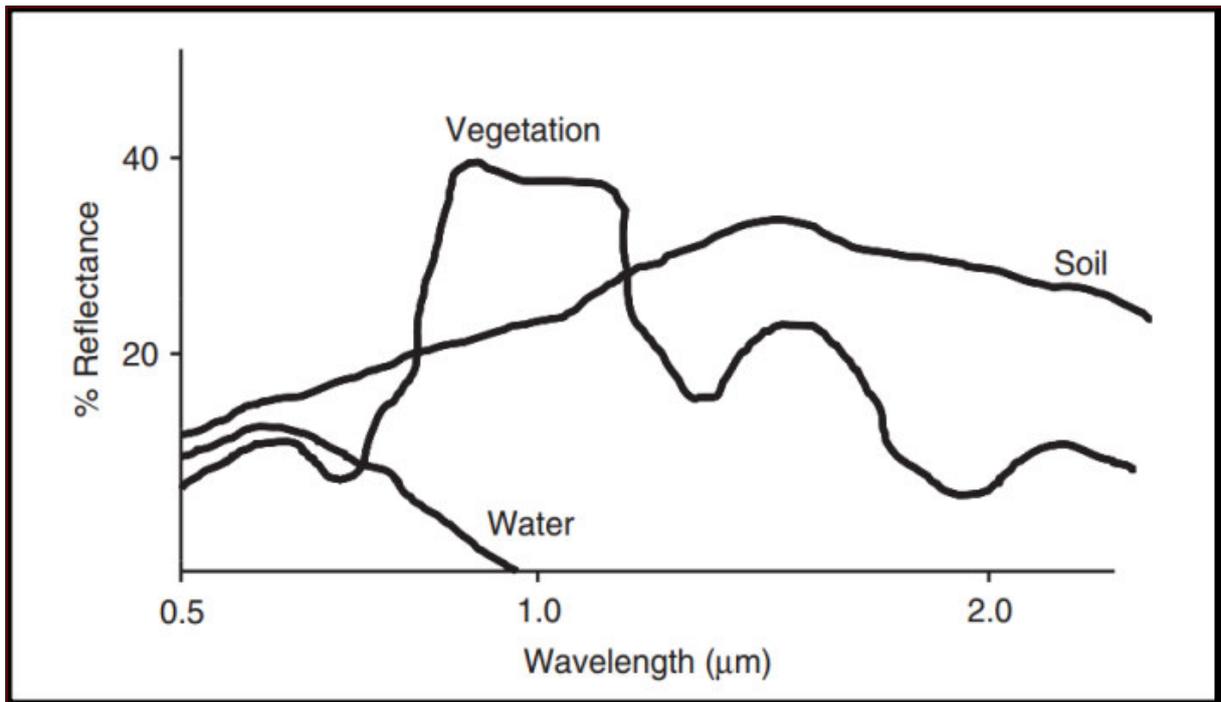


Figure I.11 : Signature spectrale de l'eau, de la végétation et du sol (Weng, 2010).

2.2.7 Intégration de la télédétection et du SIG

Wilkinson (1996) a résumé trois manières principales de combiner la télédétection et les technologies SIG pour se renforcer mutuellement :

- La télédétection est utilisée comme outil de collecte de données à utiliser dans les SIG ;
- Les données SIG sont utilisées comme informations auxiliaires pour améliorer les produits dérivés de la télédétection ;
- La télédétection et les SIG sont utilisés conjointement pour la modélisation et l'analyse.

2.2.7.1 Contribution de la télédétection au SIG

On peut citer les points suivants :

- Les données de télédétection peuvent être utilisées pour extraire des informations thématiques afin de créer des couches SIG (Campbell, 2007).
- Les images satellitaires de télédétection produisent des cartes décrivant les limites entre un ensemble de catégories thématiques (par exemple, des classes d'occupation ou d'utilisation des terres). Ces limites sont ensuite numérisées pour fournir des fichiers numériques pouvant être intégrés au SIG.
- Les données de télédétection numériques sont analysées ou classifiées à l'aide de méthodes automatisées afin de produire des cartes et des images qui peuvent être entrées dans les SIG.
- L'extraction automatisée des informations cartographiques est une autre application majeure de l'imagerie de télédétection en tant qu'entrée de données dans les SIG.

➤ La visualisation de terrain à l'aide des images satellitaires en association avec des modèles numériques d'élévation (MNE) a longtemps été explorée en tant qu'outil prometteur dans les études environnementales (Gugan et Dowman, 1988).

2.2.7.2 Contributions du SIG à la télédétection

On peut énumérer les points suivants :

➤ Les données SIG peuvent être utilisées pour améliorer les fonctions de traitement des images de télédétection par utilisation des données auxiliaires qui doivent être intégrées à l'analyse de manière structurée, directement reliée à l'analyse des données de télédétection (Campbell, 2007). Par exemple sélection de la zone d'intérêt pour le prétraitement, le traitement et la classification des images.

➤ Les données SIG telles que les points vectoriels, les données de surface et le MNE sont de plus en plus utilisées pour la rectification d'image « la correction géométrique et radiométrique » (Hinton, 1996).

➤ L'utilisation de polygones vectoriels pour limiter la surface d'une image à traiter, permet des opérations de masquage sans masques de trame, ce qui rend le traitement des images beaucoup plus efficace grâce à des temps de traitement plus courts.

➤ En plus d'améliorer les fonctions de traitement des images de télédétection à différentes étapes, la technologie SIG offre un environnement flexible pour la saisie, l'analyse, la gestion et l'affichage de données numériques provenant des diverses sources nécessaires aux applications de télédétection.

2.2.7.3 La télédétection et les SIG sont utilisés conjointement pour la modélisation et l'analyse. Cas de la désertification

En raison du coût élevé de la désertification, la lutte contre la désertification est devenue une priorité importante. Il est essentiel de déterminer avec le maximum de précision possible l'étendue des zones affectées et de délimiter à l'intérieur de celles-ci les différents degrés de sensibilité. Les données satellitaires et le système d'information géographique constituent, en général, un outil des plus utiles et efficace pour l'évaluation et la surveillance de la désertification (Le Houérou, 1993). Ces technologies sont d'autant plus utiles lorsqu'on dispose d'une connaissance détaillée du risque, la fréquence attendue, le caractère et l'intensité des événements dans une région. Les images satellitaires donnent une vue globale et fournissent des informations très utiles sur l'environnement, pour une grande gamme d'échelles, depuis les continents entiers jusqu'aux détails de quelques mètres (Belhadj-Aissa *et al.*, 2006). D'autre part, l'élaboration d'un système d'information pour l'étude de la désertification est pour mieux

cerner les changements intervenus dans un contexte spatial et temporel donné afin de faciliter la prise de décision (El Zerey *et al.*, 2009).

En Algérie, les travaux ayant porté sur l'étude de la désertification, la dégradation des terres et l'ensablement dans les zones arides et semi arides en intégrant les systèmes d'information géographiques et la télédétection ont fourni des résultats satisfaisants qui pourraient être utilisés par les décideurs dans les plans d'aménagement régional et la lutte contre la désertification. L'intérêt réel de ces travaux incite la communauté scientifique à multiplier les efforts de collaboration dans le cadre d'un développement durable de ces régions.

Conclusion

La désertification est devenue un sujet très préoccupant pour l'Algérie. Depuis l'indépendance, les institutions algériennes se sont engagées dans divers projets de lutte contre la désertification, tels que le barrage vert et les plans d'action nationaux. La connaissance détaillée des composantes de l'environnement steppique par des moyens détaillés et surtout applicables à la diversité et aux spécificités de la steppe algérienne est nécessaire pour développer une base de données à partir duquel tous les aspects du problème seront identifiés et permettant la projection de stratégies à moyen et long terme dans un contexte planifié.

Le développement de la télédétection et de système d'information géographique offre une aide pour l'étude de l'état des écosystèmes fragiles et des phénomènes à évolution rapide. Par conséquent, l'utilisation des données de la télédétection à différentes dates et échelles et l'intégration dans un système d'information géographique facilitent la cartographie et le suivi de la dynamique du phénomène de la désertification.

Chapitre II



Présentation de la zone d'étude

Chapitre II

Présentation de la région d'étude

Introduction

Dans ce chapitre, et après la localisation de la zone d'étude, on présentera les éléments du milieu physique à savoir la géologie, l'hydrogéologie, la géomorphologie, la végétation, les sols et le climat.

1. Aspect géographique et administratif

1.1 Présentation du bassin versant du Hodna

Le bassin versant du Hodna (Figure II. 1) est situé au Sud-Est de la capitale Alger, c'est un bassin endoréique dont le Chott El Hodna constitue son exutoire naturel constituant le 3^{ème} plus grand Chott d'Algérie avec une superficie de 362,000 ha après le Chott Chergui (855,500 ha) et Chott Melghir (551,500 ha).

Les principaux oueds de ce bassin qui s'écoulent du nord vers le Chott sont : les oueds M'sila, K'Sob, El Ham, Soubella, Barika et Bitam. Les oueds Boussaâda et M'cif sont les principaux oueds s'écoulant du sud vers le chott.

Le bassin du Hodna est situé approximativement dans les fourchettes de coordonnées géographiques suivantes :

- **Longitude** : 4°15' Est et 5°06' Est ;
- **Latitude** : 35°18' Nord et 35°32' Nord.

Le bassin du Hodna constitue soit 54 % de la superficie totale du bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam, il couvre 07 wilayas en parties : Batna ; M'sila ; Bordj Bouariridj ; Média ; Sétif, Bouira et El Djelfa.

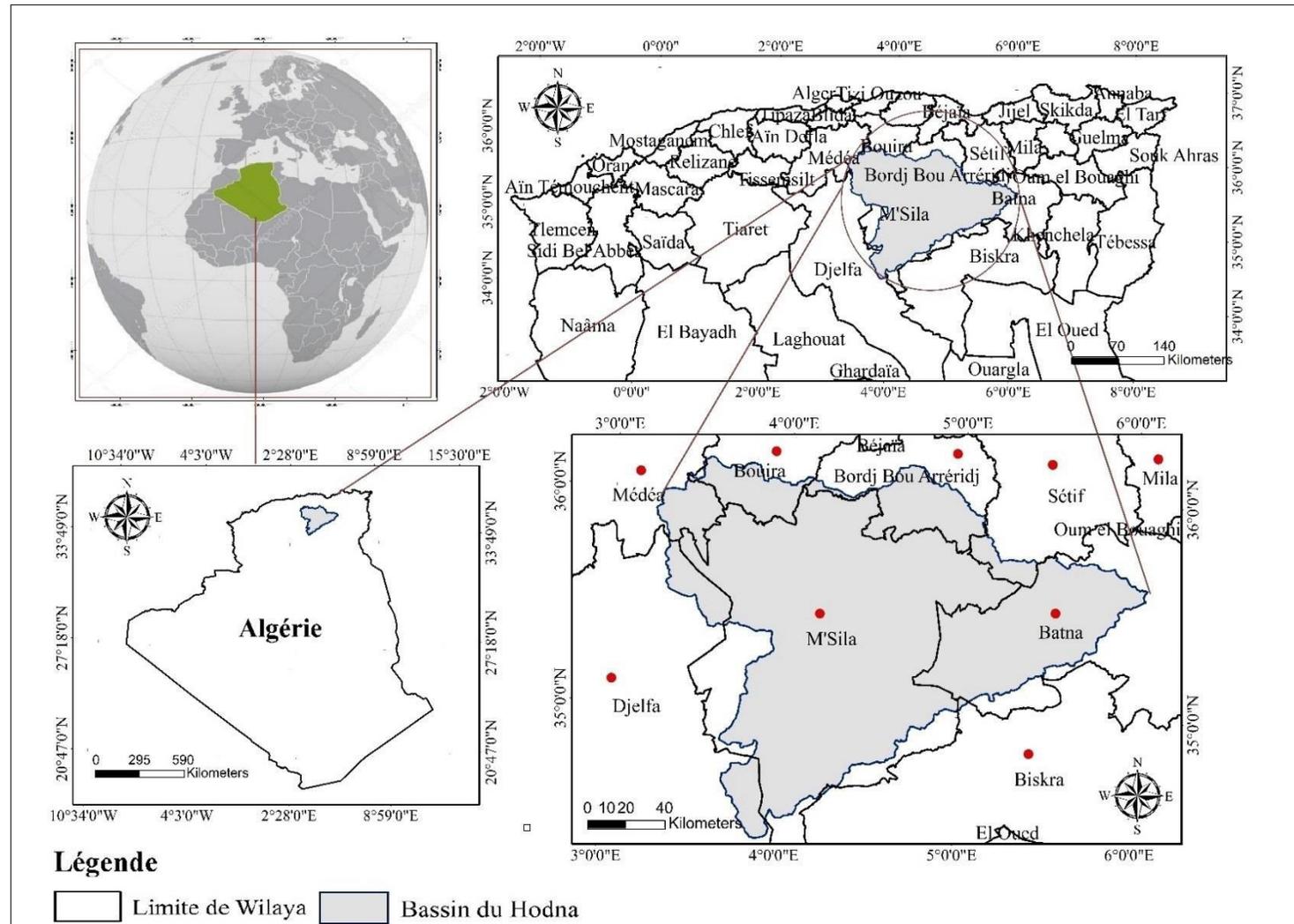


Figure II.1 : Localisation du Bassin du Hodna.

1.2 Localisation de la région d'étude

Le sud du Hodna

La région d'étude est située dans la plaine de sud du Hodna, à des latitudes comprises entre $4^{\circ} 12' 12''$ et $4^{\circ} 52' 6''$ N et entre les longitudes $35^{\circ} 12' 47''$ et $35^{\circ} 25' 18''$ E (Figure II. 2) avec une superficie d'environ 800 km². Elle se caractérise par la nature sableuse de ses sols d'où son nom de R'mel (Mimoune, 1995).

La région d'étude est un vaste ensemble de plis formés de calcaire, marnes et grés principalement jurassique et crétacé. L'altération et l'érosion des grés barrémiens et albiens qui affleurent donne naissance à des dunes de sable appelées erg ou zbar.

Dans cette zone, on ne trouve que deux oueds importants :

- Oued Bousâada et son affluent Maitar, son régime est temporaire ;
- Oued Melah ou oued M'Cif plus en aval, rejoint le chott à l'ouest de Guelalia.

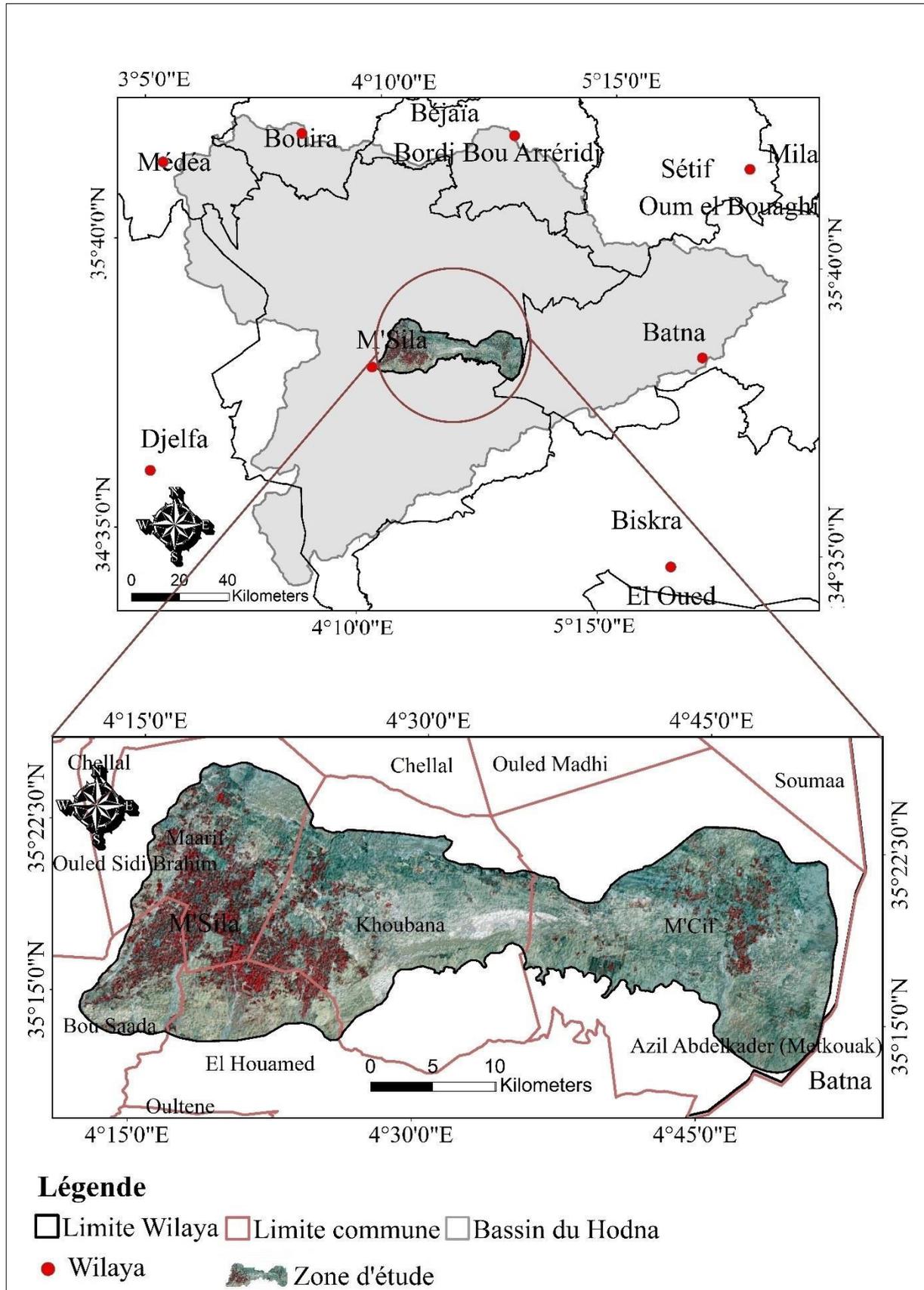


Figure II.2 : Localisation de la zone d'étude.

2. Aspect physique

2.1 Géologie

2.1.1 Stratigraphie

La géologie du Hodna est assez complexe en raison de la position de la cuvette au contact des Atlas tellien et saharien. L'Atlas Saharien et l'Atlas Tellien, après leur choc frontal au niveau des Aurès, ont engendré une cuvette au début du Miocène, laquelle, à la fin de cette période et pendant le Quaternaire a subi un remplissage par les cours d'eau, constituant une plaine alluviale (Grine, 2009). Les séries sont presque complètes et vont du Trias au Quaternaire ancien, récent et actuel (Figure II. 3) (FAO, 1968 ; Guiraud, 1990 ; GRINE, 2009).

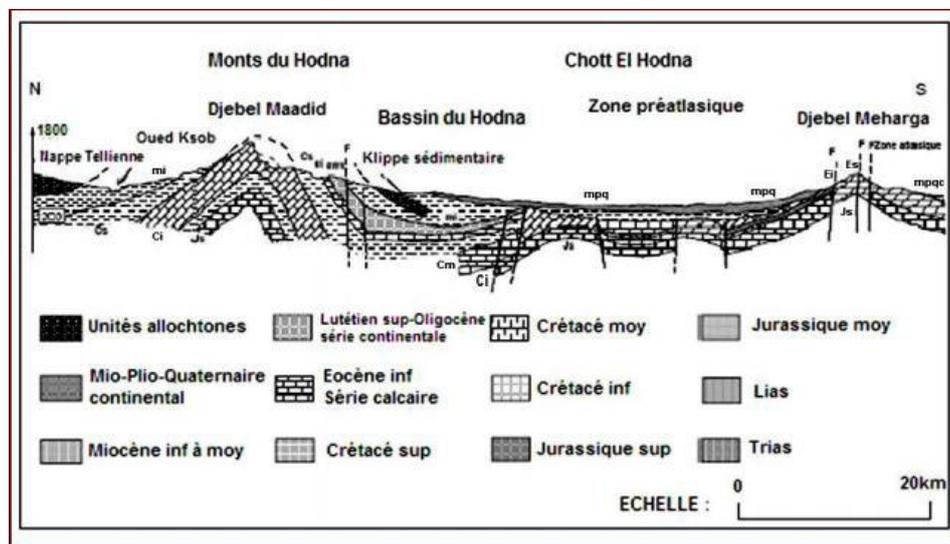


Figure II.3 : Coupe géologique schématique à travers le Hodna (Guiraud, 1969).

2.2 Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, la région du Hodna présente des réseaux hydrographiques souterrains et superficiels :

2.2.1 Les eaux superficielles

Le réseau hydrographique est très dense. Pour la majorité, ce sont des oueds à écoulement pérenne, dont les plus importants sont :

- Oued Ksob sur lequel existe un important barrage construit en 1939 à 15 Km en amont de M'Sila. Son régime est permanent ;
- Oued Leham, dont le bassin présent 1/5 ou 1/6 de la totalité du bassin hydrologique du Hodna. Il draine les terrains gypso-salins du nord-ouest du bassin. L'eau de l'oued de Targa, l'un de ses affluents est particulièrement salée. Le régime de cet Oued est permanent ;
- Oued Boussaâda et son affluent Maitar. Son régime est temporaire ;

➤ Oued M'Cif plus en aval rejoint le chott à l'Ouest de Guelalia, son régime est permanent.

2.2.2 Les eaux souterraines

Les formations aquifères existantes affleurent plus ou moins largement sur les reliefs entourant le bassin du Hodna, elles se localisent autour du Chott.

2.2.2.1 Nappe phréatique, cette aquifère est constitué par des alluvions quaternaires. Elle est formée de plusieurs nappes : nappe de M'sila, nappe de Selmane, nappe de Magra, nappe de Guelalia et la nappe de Bousâada ;

2.2.2.2 Nappe captive, cette aquifère est constitué par des conglomérats du Mio-Pliocène situé au Sud du Chott, ses eaux sont moins salées.

2.3 Géomorphologie

Les ensembles morpho-structuraux se regroupent en trois systèmes (Guettouche, 2003) (Figure II.4).

2.3.1 Le système montagneux au nord, représenté par le versant méridional des monts du Hodna. Ce secteur est formé de terrains et de styles tectoniques variés et se caractérise par la présence de plusieurs unités morphologiques qui peuvent être distinguées aisément dans les paysages.

2.3.2 Le système de piémont, aménagé dans une structure synclinale, de terrains tertiaires interrompus localement par des terrains allochtones. Ce système se caractérise par une morphologie étendue et très variée spatialement.

2.3.3 Le système de dépression au sud, Celui-ci est matérialisé par des dépôts gypso-salins et des dépôts éoliens surtout sur la bordure sud (c'est le cas de notre zone d'étude).

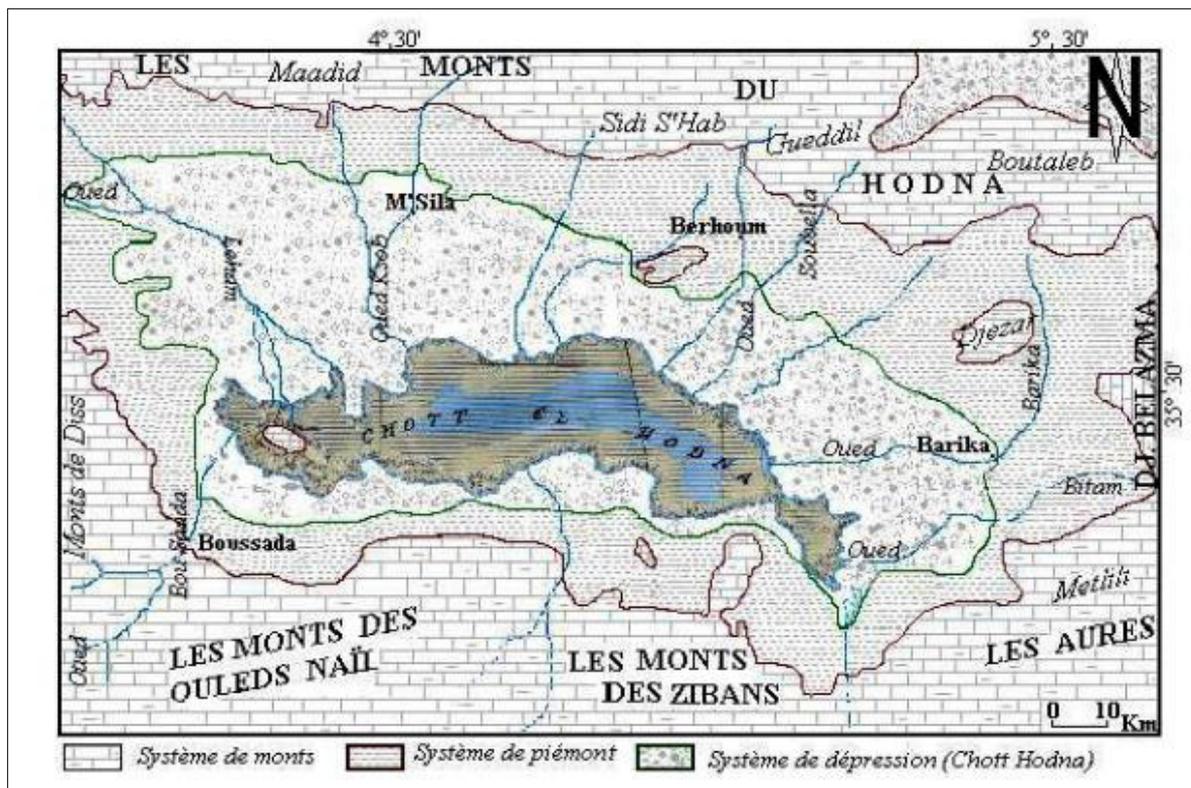


Figure II.4 : Principaux systèmes morphologiques du Hodna (Guettouche, 2003).

2.4 La végétation

La carte de végétation du Hodna a été réalisée par le Houérou et ces collaborateurs (Le Houérou *et al.*, 1975) (Figure II.5).

Dans le sud du Hodna (Zone d'étude), on trouve des psammophiles : *Aristidapungens*, *Eremobium oegyptiacum*, *Retama retam* en association avec d'autres groupements : *Limonia strumguyonianum*, *Atriplex halimus*, *Tamarix gallica*.

Au niveau du Djebel Meharga (Sud du chott) et de son piémont (glacis récent), des groupements psammophiles (*Aristida pungens*), des groupements calcicoles (*Artemisia herbaalba* et *Stippa tenacissima*), *Juniperus phoenicea* (genévrier) en associations avec d'autre groupements : *Olea europea*, *Peganum harmala*, *Anabasis articulata*, *Thymeria hirsita*, *Rhustripartita*, *Lavandula multifida* (lavande), *Erigeron bonariensis* (vergerette), *Frankenia thymifolia*, *Lavatera albia* (lavatère), *Thapsia garnica* (Derias), *Liceum sp* (liciate), *Maribium vulgare* (marube), *Erodium triangulare* (bec de grue), et *Ziziphus lotus* (surtout au niveau du piémont du djebel Meharga) (Mimoune, 1995).

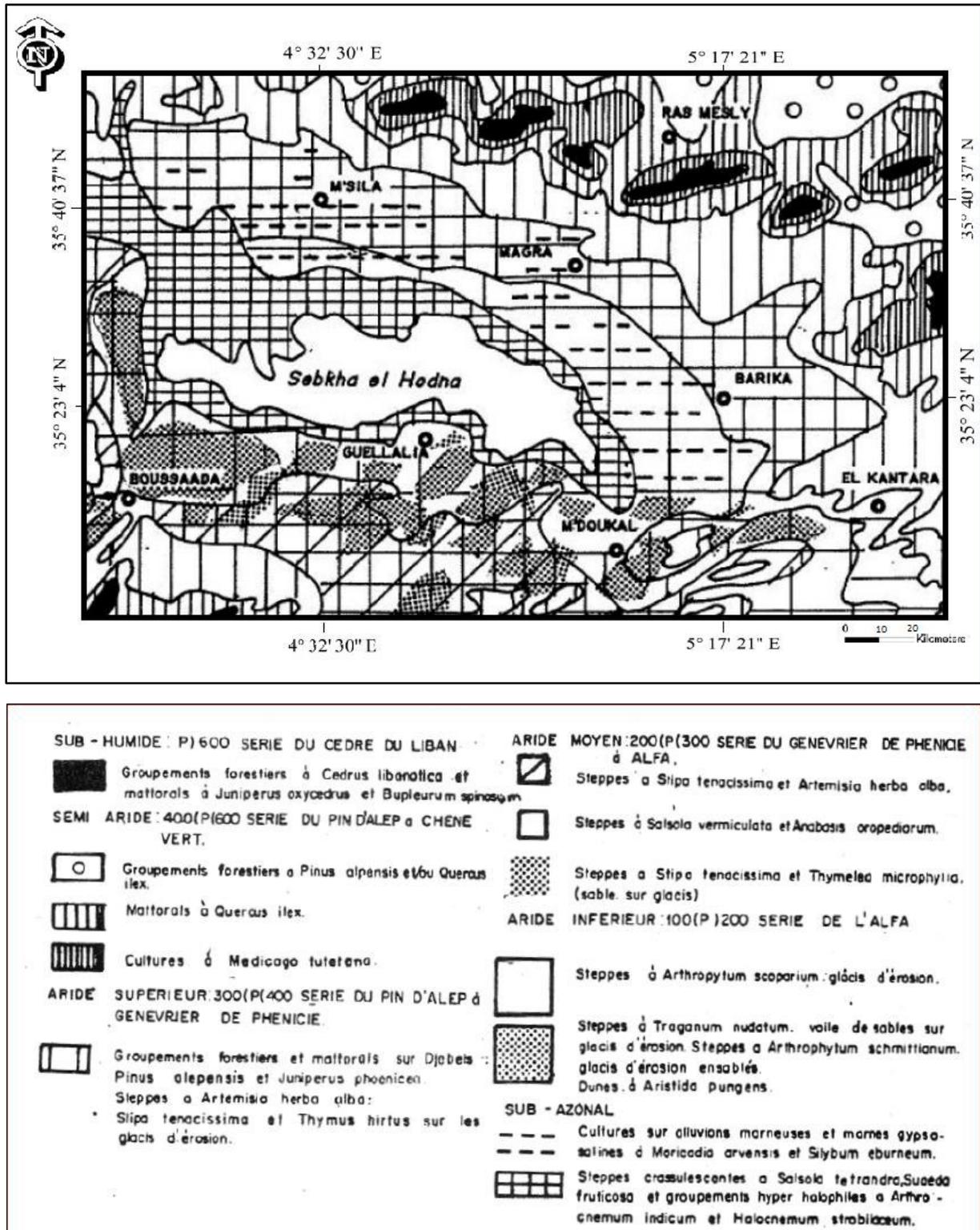


Figure II.5 : Carte phyto-écologique du Hodna (Le Houérou *et al.*, 1975).

2.5 Les sols

En général et dans notre région, les sols se caractérisent par une texture sableuse. L'halomorphie et la gypsomorphie sont les phénomènes pédologiques majeurs qui affectent dans ce milieu, les sols hydromorphes à encroûtement gypseux, ces sols sont en mosaïque avec les sols halomorphes et les sols minéraux bruts d'apport éoliens, dunes de sables grossiers actuels ou de sables fins anciens (Figure II. 6).

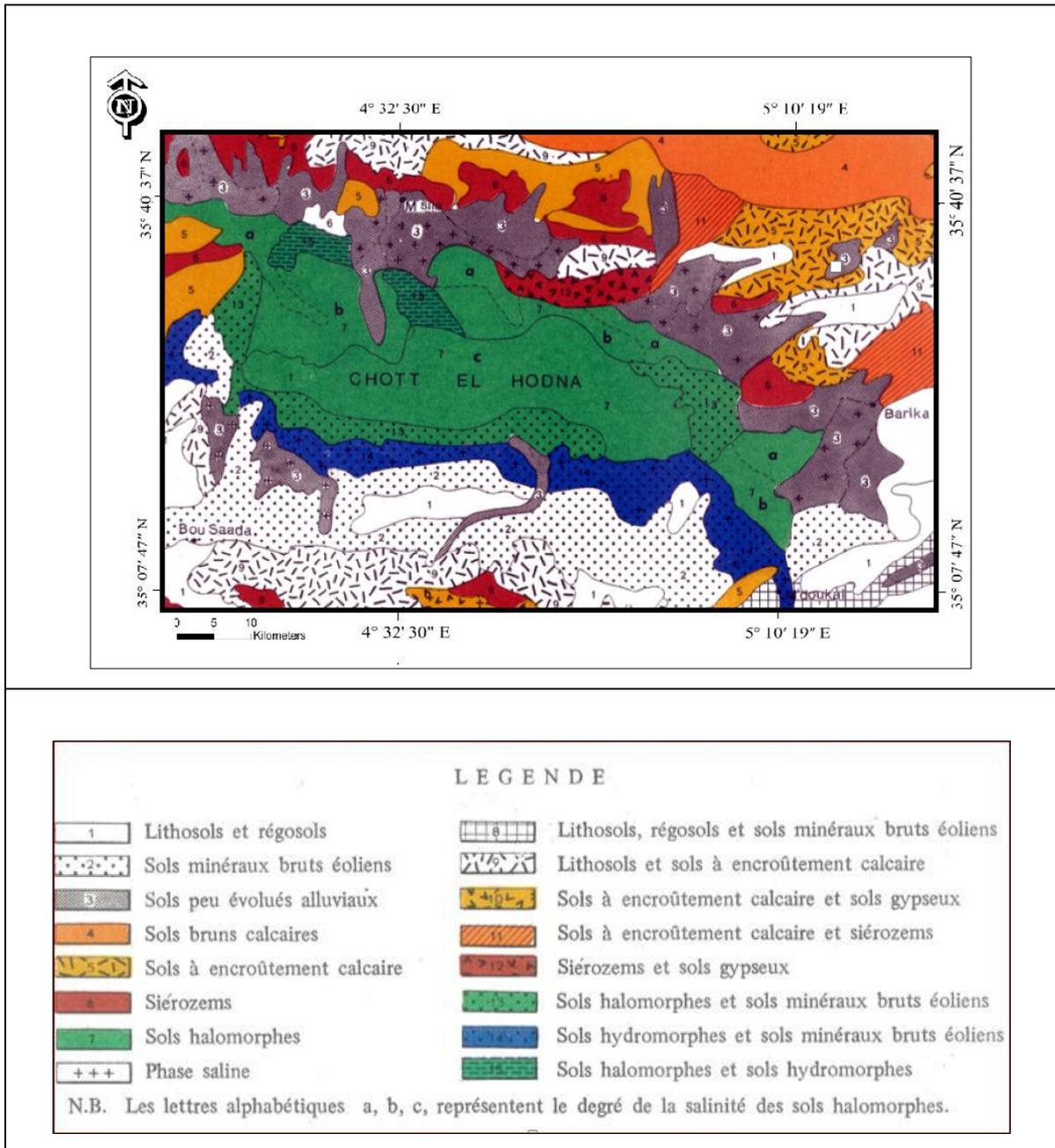


Figure II.6 : Carte pédologique du Hodna (F.A.O, 1975).

3. Aspect climatologique

Avec ces principaux paramètres, le climat reste l'élément le plus important dans la caractérisation des écosystèmes.

Au Nord, la barrière montagneuse formée par les monts du Hodna et du Titteri (1500-1800 m) perpendiculaire à la circulation atmosphérique générale, empêche la région hodnéenne, qui est située en contrebas (400-700 m), de bénéficier régulièrement de l'humidité d'origine méditerranéenne. Elle subit encore plus durement l'action desséchante du désert en se trouvant plus ouvert aux infiltrations d'air chaud et sec du Sahara du fait de la faible vigueur de l'Atlas saharien assez peu élevé, particulièrement au niveau des monts du Zab.

La carte des bioclimats dressée par la FAO illustre cette situation du climat du Hodna (Sebhi, 1987) (Figure II.7).

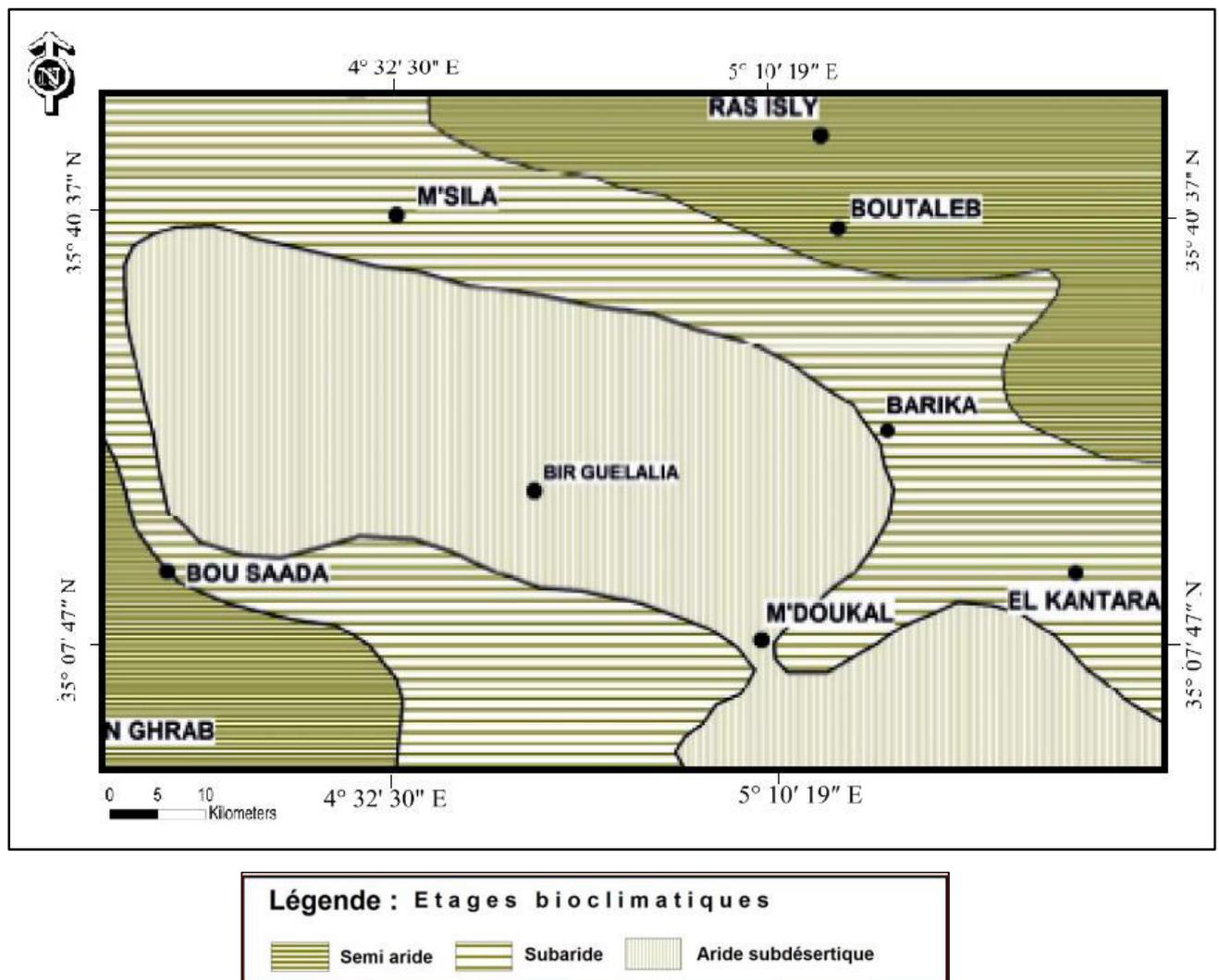


Figure II.7 : Les zones climatiques du Hodna (Sebhi, 1987).

Mimoune (1995) a considéré le climat comme le principal facteur de cet environnement, car il régit presque tous les facteurs de dégradation des terres. En effet, dans les régions arides et semi-arides, la température, les précipitations et le vent sont des facteurs climatiques importants de la dégradation des sols et de la désertification.

Pour l'analyse de ces facteurs climatiques, nous avons utilisé les données climatiques de la station météorologique de Bousâada (1995-2016).

3.1 Données climatiques

Cette station, située à environ 20 km au sud de notre zone d'étude, présente une Latitude de 35.33' N, une Longitude de 4.2' Est et une Altitude de 461 m (Tableau II.1).

Les paramètres climatiques retenus sont présentés dans le tableau II.2

- Les précipitations P (mm)
- Les températures T (°C)
- La vitesse du vent (m/s).

Tableau II. 1 : Caractéristiques géographiques de la station météorologique de Boussaâda.

Station	Coordonnées		Altitude
Boussaâda	35°33' N	04°2'E	461 m

Tableau II.2 : Données Climatiques de la station météorologique de Boussaâda.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
P (mm)	13,19	11,53	13,51	21,47	18,32	9,67	6,05	11,45	25,85	22,42	13,61	15,94
T (C°)	10,02	11,4	15,24	19,25	24,50	30,12	34,06	33,17	26,08	21,64	14,85	10,64
VV (m/s)	3,43	4,10	4,14	4,26	3,91	3,20	2,86	2,37	2,38	1,97	3,13	2,95

3.1.1 La pluviométrie

3.1.1.1 Régime mensuel des précipitations

Le régime mensuel des précipitations, pour la région d'étude, a atteint 183,01 mm durant la période allant de 1995 à 2016, avec un maximum de 25,85 mm durant le mois de Sept et un minimum de 6,05 mm durant le mois de juillet (Figure II.8).

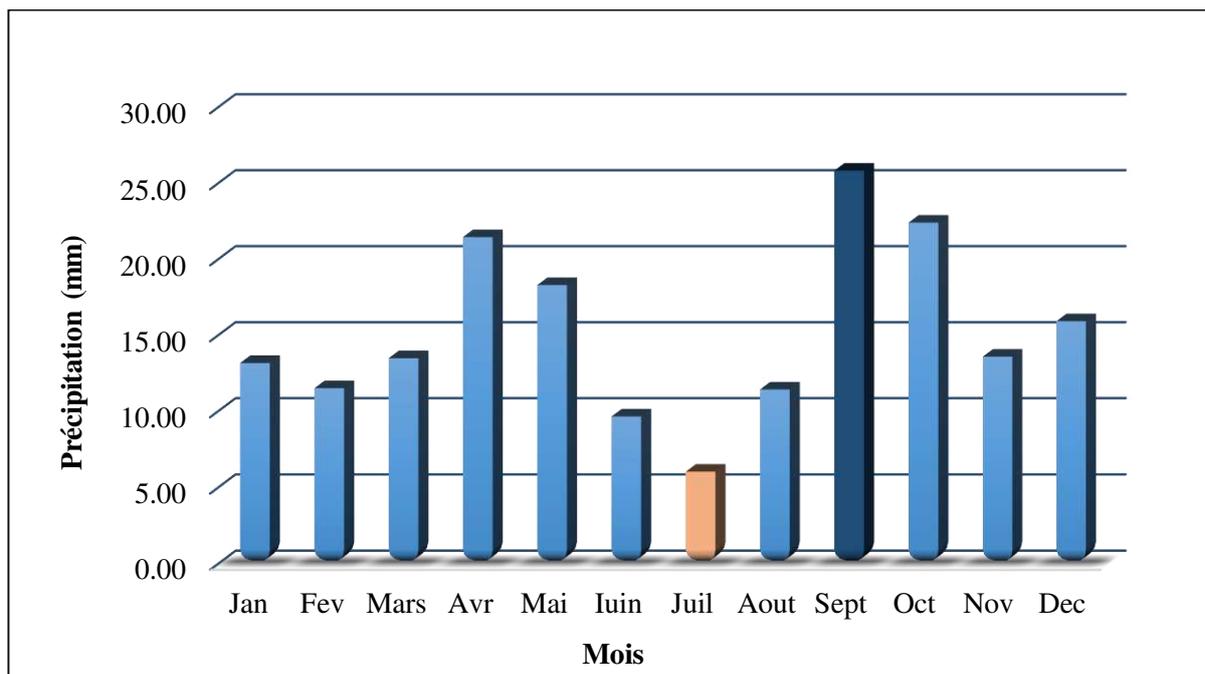


Figure II.8 : Précipitation moyenne mensuelle de la période allant de 1995 à 2016.

3.1.1.2 Irrégularité des précipitations

L'irrégularité des précipitations durant la période (1995-2016) se traduit manifestement par la fluctuation des précipitations annuelles (Figure II.9) :

- Un minimum de 78 mm pour l'année 2002 ;
- Un maximum de 316 mm pour l'année 2003.

Cette irrégularité est caractéristique des zones steppiques, et ce constat est confirmé dans divers travaux (Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Fodil, 2018).

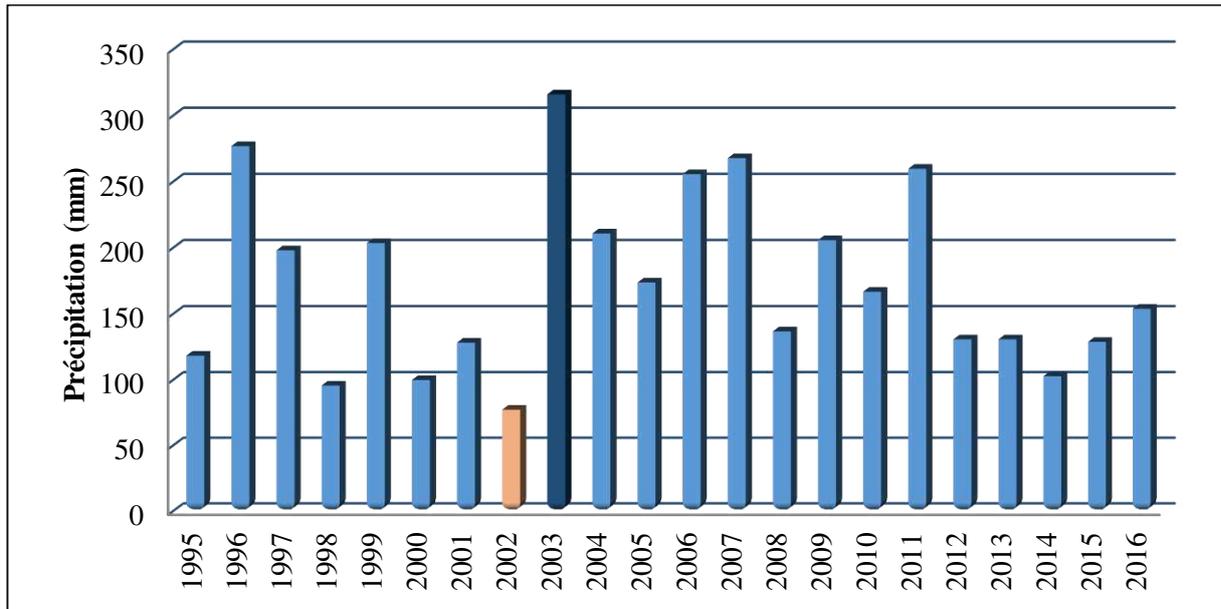


Figure II.9 : Précipitation moyenne annuelle de la période allant de 1995 à 2016.

3.1.2 La température

3.1.2.1 Température moyenne mensuelle

La température moyenne mensuelle pour la région d'étude, a atteint (20,91 °C) durant la période allant de 1995 à 2016, avec un maximum de 34,6 °C durant le mois de Juillet et un minimum de 10,02 °C durant le mois de Janvier (Figure II.10).

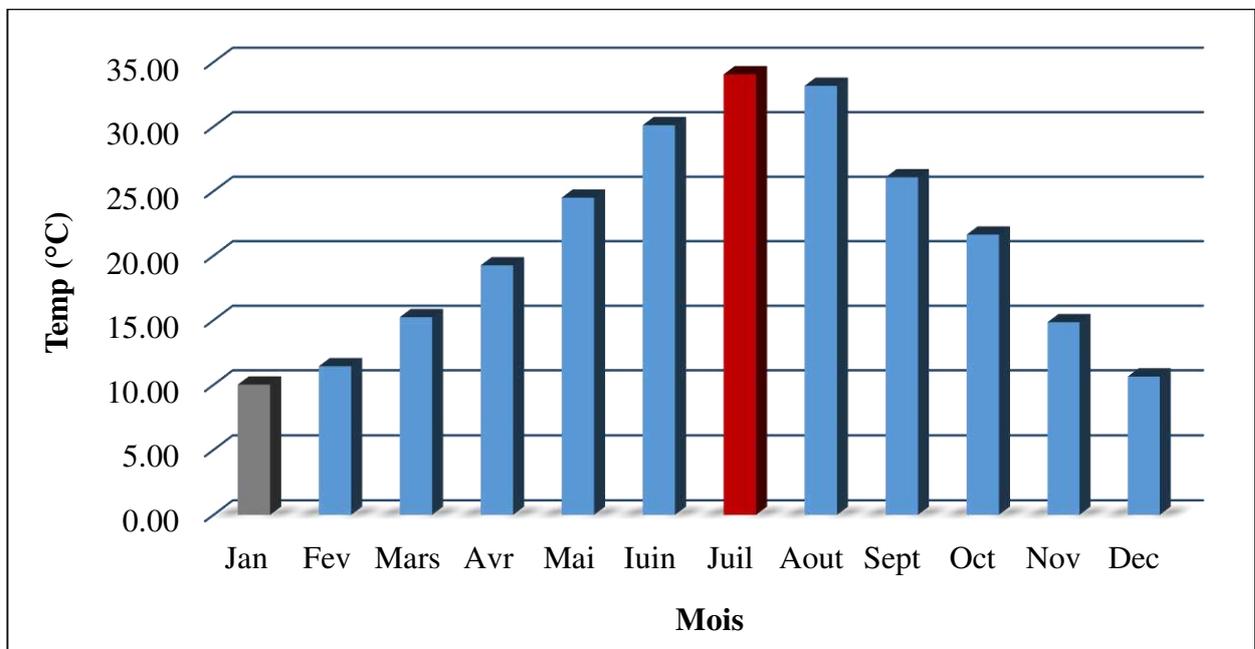


Figure II.10 : Température moyenne mensuelle de la période allant de 1995 à 2016.

3.1.2.2 Température moyenne annuelle

La température moyenne annuelle de la période (1995-2016) a enregistré un maximum de 22,25°C pour l'année 2016 et un minimum de 18,09 °C pour l'année 1999 (Figure II.11).

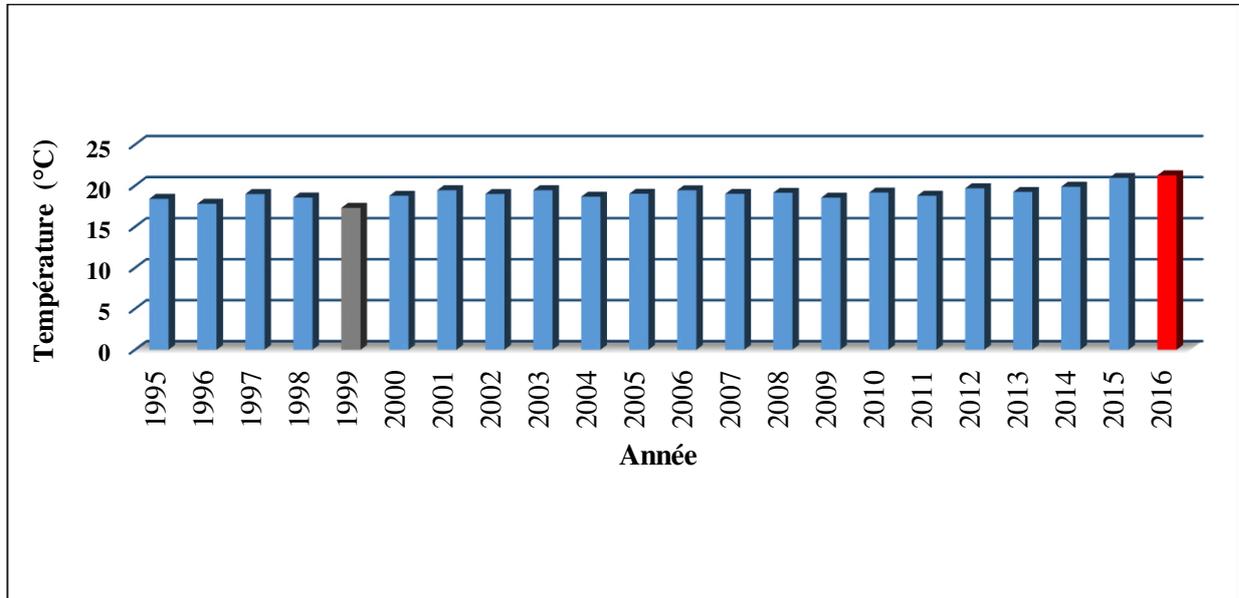


Figure II.11 : Température moyenne annuelle de la période allant de 1995 à 2016.

À l'opposé des précipitations qui connaissent une évolution irrégulière, les températures manifestent une tendance à la hausse.

3.1.3 Vitesse du vent

Les vents dominants qui soufflent dans la région de Hodna sont :

- **Le vent d'ouest (W)**, dit « DAHRAOUI » est le plus pluvieux, il est fréquent en Automne, en hiver et au printemps.
- **Le vent de nord (N)**, dit « BAHRI » est moins fréquent, il est froid et sec.
- **Les vents à directions variables (Var)**, qui soufflent surtout pendant les saisons sèches.
- **Le sirocco** ; vent chaud et sec, souffle en général du sud, il entrave le développement des cultures. Il constitue la cause du faible tapis végétal dans la wilaya de M'Sila par ce que les vents chauds et secs accentuent les dessèchements du substrat et limitent l'installation de la végétation (Dekkiche, 1974).

Les vents du Nord sont fréquents pendant l'hiver, alors que ceux du Nord-est, bien répartis sur toute l'année accèdent facilement dans la cuvette du Hodna par la vallée de l'Oued Barika. Ceux du Sud n'atteignent le Hodna qu'en été, période durant laquelle ils soufflent avec des rafales brûlantes (Figure II.12).

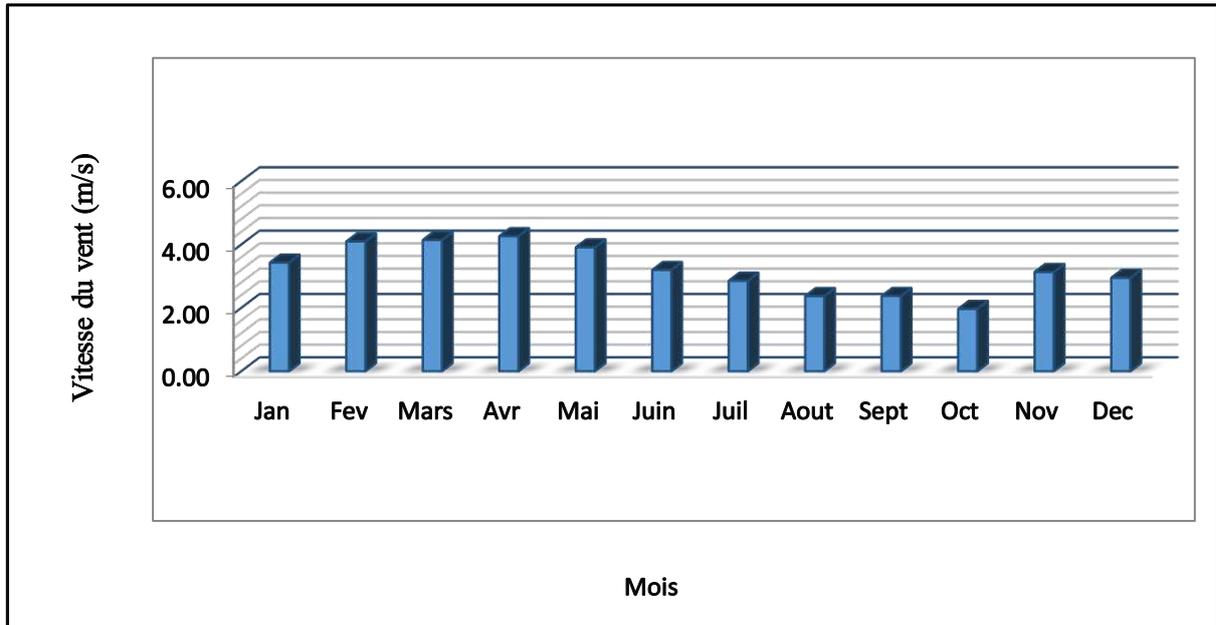


Figure II.12 : Vitesse moyenne du vent en m/s de la période allant de 1995 à 2016.

4. Synthèse climatique

4.1 Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne prend pour formule :

$$IA = \frac{P}{T + 10} \text{ ou,}$$

- **P** : Pluviosité annuelle moyenne (mm).
- **T** : Température annuelle moyenne (°C).

Le calcul pour notre station donne un indice d'aridité de 5,92 d'où l'abaque de De Martonne qui considère ce climat comme aride.

4. 2 Diagramme Pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Une comparaison évolutive entre la température et les précipitations permet de comprendre le comportement du climat dans notre région. Bagnouls et Gausсен (1953) considèrent qu'un mois est sec quand le total de précipitation exprimé en mm est égal ou inférieur au double de la température (T) exprimé en degrés centigrades (P inférieur ou égale 2T) (Gounot, 1969).

La Figure II.13, illustre le Diagramme ombrothermique de la région d'étude durant la période allant de 1995 à 2016. D'un point de vue globale, on remarque que la période sèche

pour l'ensemble de la période d'observation s'étend sur 05 mois, à partir du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre.

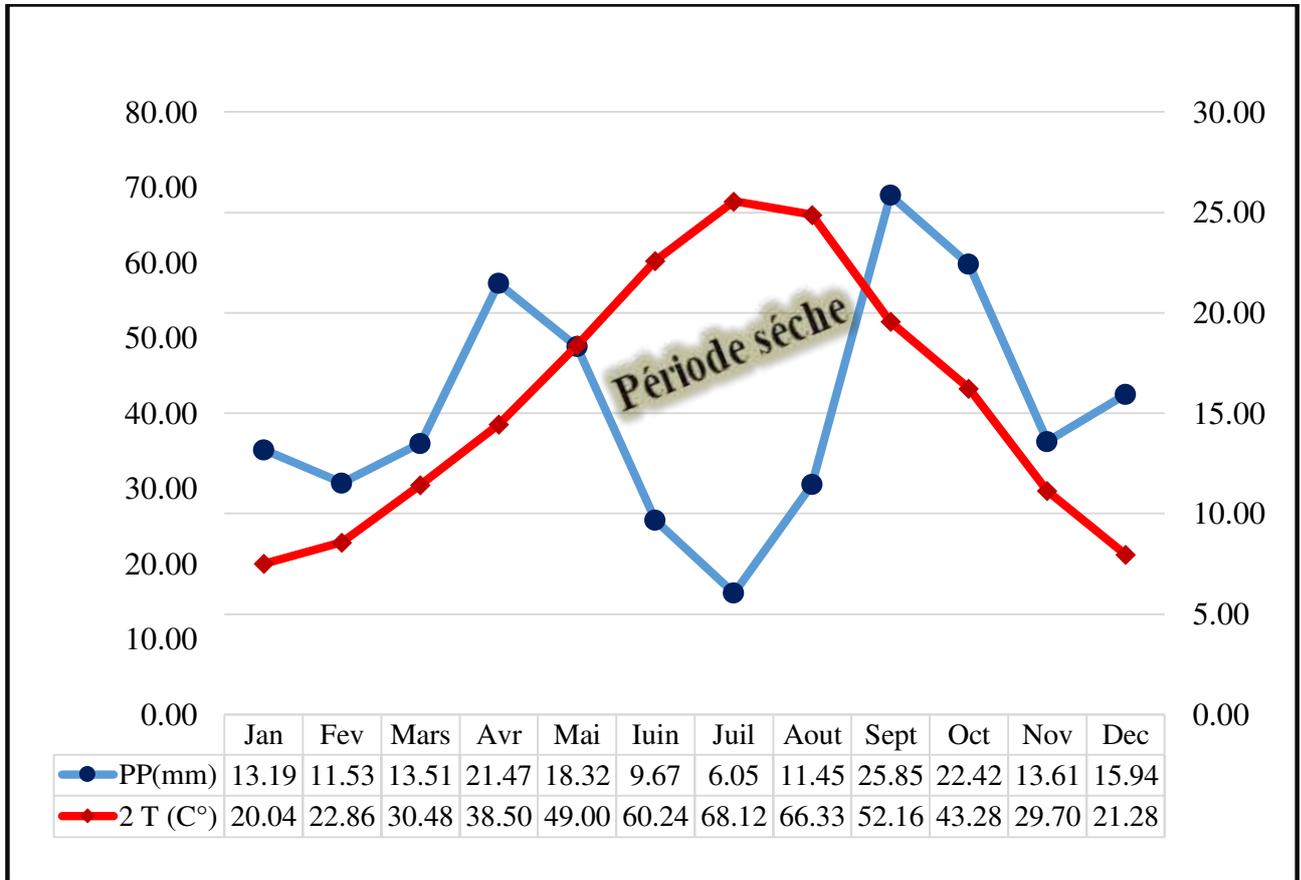


Figure II.13 : Diagramme Ombrothermique de la période allant de 1995 à 2016.

4.3 Quotient pluviométrique d'EMBERGER

D'après Dajoz (1973), le climagramme d'Emberger permet la classification des différents climats méditerranéens, grâce au calcul d'un quotient Q_2 qui est donné par la formule suivante :

$$\frac{1000 P}{(M+m/2)(M-m)} \quad \text{Ou :}$$

- **P** : Précipitation annuelle en mm.
- **(M + m)/2** : Moyenne des températures annuelles.
- **(M – m)** : Amplitude thermique extrême en °K.
- **M** : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en °K.
- **m** : Moyenne des minima du mois le plus froid en °K.
- **°K** : Degré kelvin.

Stewart (1968) simplifia la formule précédente en proposant le quotient suivant :

$$Q_2 = 3.43 \frac{P}{M-m}$$

- **P** : Pluviométrie annuelle en mm ;
- **M** : Moyenne des maximums du mois le plus chaud (°C) ;
- **m** : Moyenne des maximums du mois le plus froid (°C).

- Pour la station de Boussaâda :

- **P**= 183,01 mm
- **M**= 39,56 + 273=312,56 °K
- **m**= 4,47+273=277,47 °K
- **Q₂**= 17,88

Dans la région d'étude, les étages bioclimatiques sont représentés comme suit (Figure II.14).

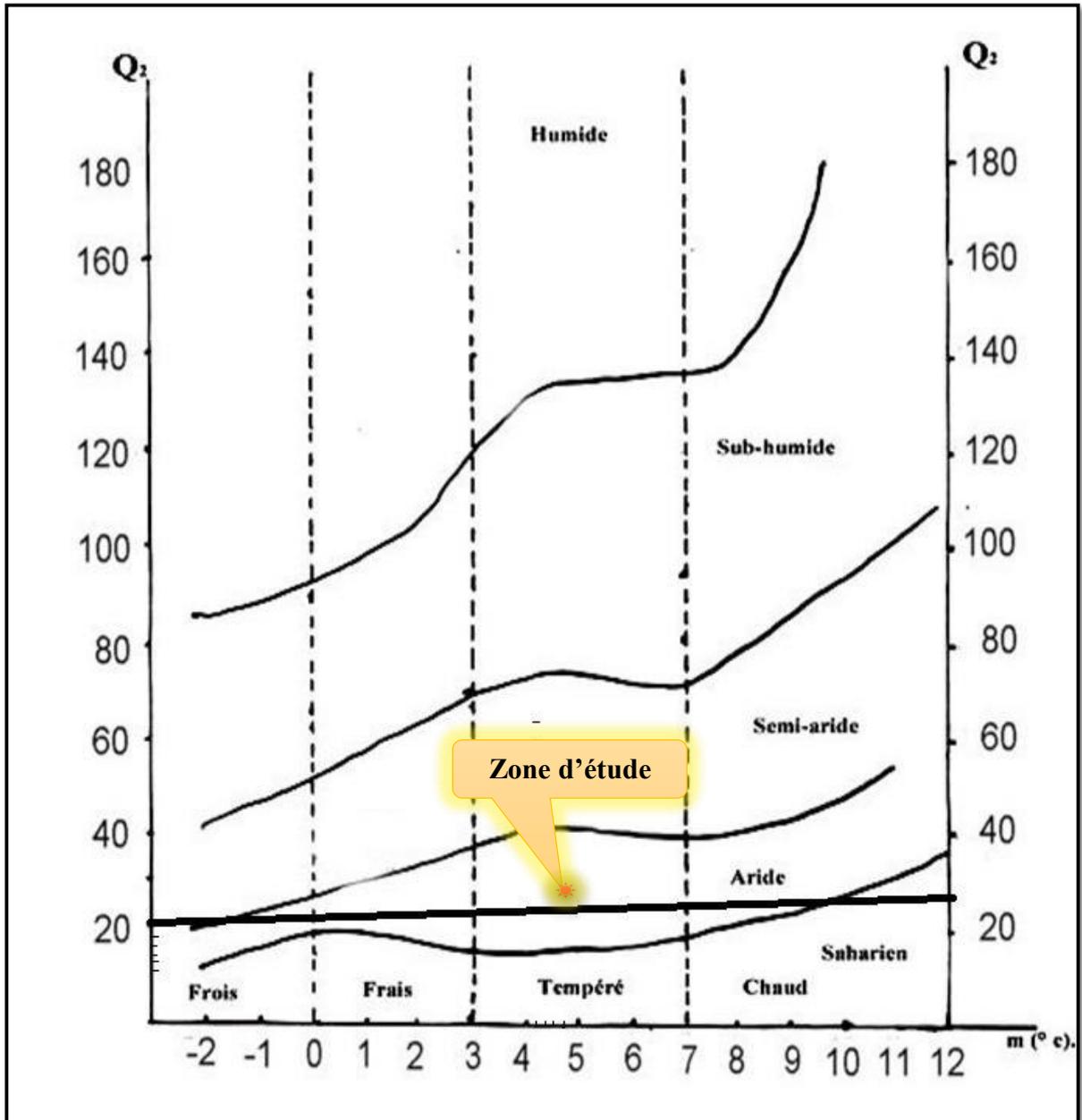


Figure II.14 : Positionnement de la station de Boussaâda dans le climagramme d'Emberger durant la période (1995-2016).

L'analyse climatique montre que la zone d'étude se caractérise par un régime thermique aride avec un écoulement temporaire, elle se caractérise par des conditions climatiques très sévères, surtout pendant la saison estivale, ce qui est dû à l'augmentation des valeurs de la température.

Chapitre III

Analyse de la désertification sur la base de changement d'occupation/utilisation des terres

Chapitre III

Analyse de la désertification sur la base de changement d'occupation/utilisation des terres

Introduction

Les hautes plaines steppiques algériennes sont des régions à vocation essentiellement pastorale. Aujourd'hui, ils sont confrontés à une forte tension de dégradation, qui se traduit par la réduction du potentiel biologique et la dégradation des équilibres écologiques et socio-économiques (Le Houérou, 1985 ; Aidoud et Touffet, 1996 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008).

De nombreuses études ont révélé une dégradation de l'environnement steppique, qui entraîne la désertification et la réduction de la végétation (MARA, 1974 ; Bedrani et Bensouiah, 2000 ; Benslimane *et al.*, 2008).

Le Hodna méridional, situé au cœur de cette steppe, a subi des changements notables dans l'occupation/utilisation des terres. Ces transformations du paysage dans cette région, jugées très considérables et très rapides, ont en outre contribué à la dégradation des pâturages (Sahnouni et Abdesselam, 2018). Malgré les mutations profondes qu'a connues cette région, très peu d'études en relation avec la dégradation des terres et la désertification ont été consacrées à cette portion du Hodna (Sebhi, 1987 ; Mimoune, 1995 ; Abdesselam, 2013 ; Sahnouni et Abdesselam, 2018). Ainsi, cette étude a pour objet de détecter les changements spatiotemporels d'occupation/utilisation des terres ayant affecté cette région.

L'utilisation des techniques récentes de cartographie et le recours aux données de télédétection semble être primordial afin de dresser des bilans et des hypothèses fiables sur la dégradation des parcours. De même, certaines techniques, basées sur l'analyse de la matrice de transition et l'intensité de changement, seront adoptées pour mettre en lumière les causes sous-jacentes et les processus de transformations fondamentales.

En effet, Aldwaik et Pontius (2012) ont proposé une analyse d'intensité permettant de calculer l'intensité de changement d'occupation des terres à différents intervalles de temps.

Cette analyse peut être utilisée pour répondre aux trois questions suivantes :

- Pendant un certain laps de temps, le changement annuel total d'occupation/utilisation des terres est-il rapide ou lent ?

- Sur la base de la réponse ci-dessus, les différents niveaux de changement d'occupation/utilisation des terres sont-ils actifs ou inactifs ?
- Laquelle des deux réponses précédentes est dominante dans le processus de transformation mutuelle des différentes catégories d'occupation/utilisation des terres ?

A travers ce qui a été dit, ce chapitre aura pour objectif d'étudier le changement dans l'espace et dans le temps d'occupation/utilisation des terres au sud du Hodna par le biais des techniques de la télédétection et des SIG, et ceci afin de détecter le changement survenu durant quatre périodes différentes de 1995 à 2016 et en conséquence d'examiner la trajectoire de changement vers la désertification.

1. Approche méthodologique

La méthodologie retenue dans ce chapitre est basée principalement sur le traitement des images satellitaires Landsat.

Les sorties finalisées de ce travail consistent essentiellement ; une cartographie de l'occupation des terres et une détection de changement, leur ampleur, leur intensité, leur transition et leur trajectoire (Figure III. 1).

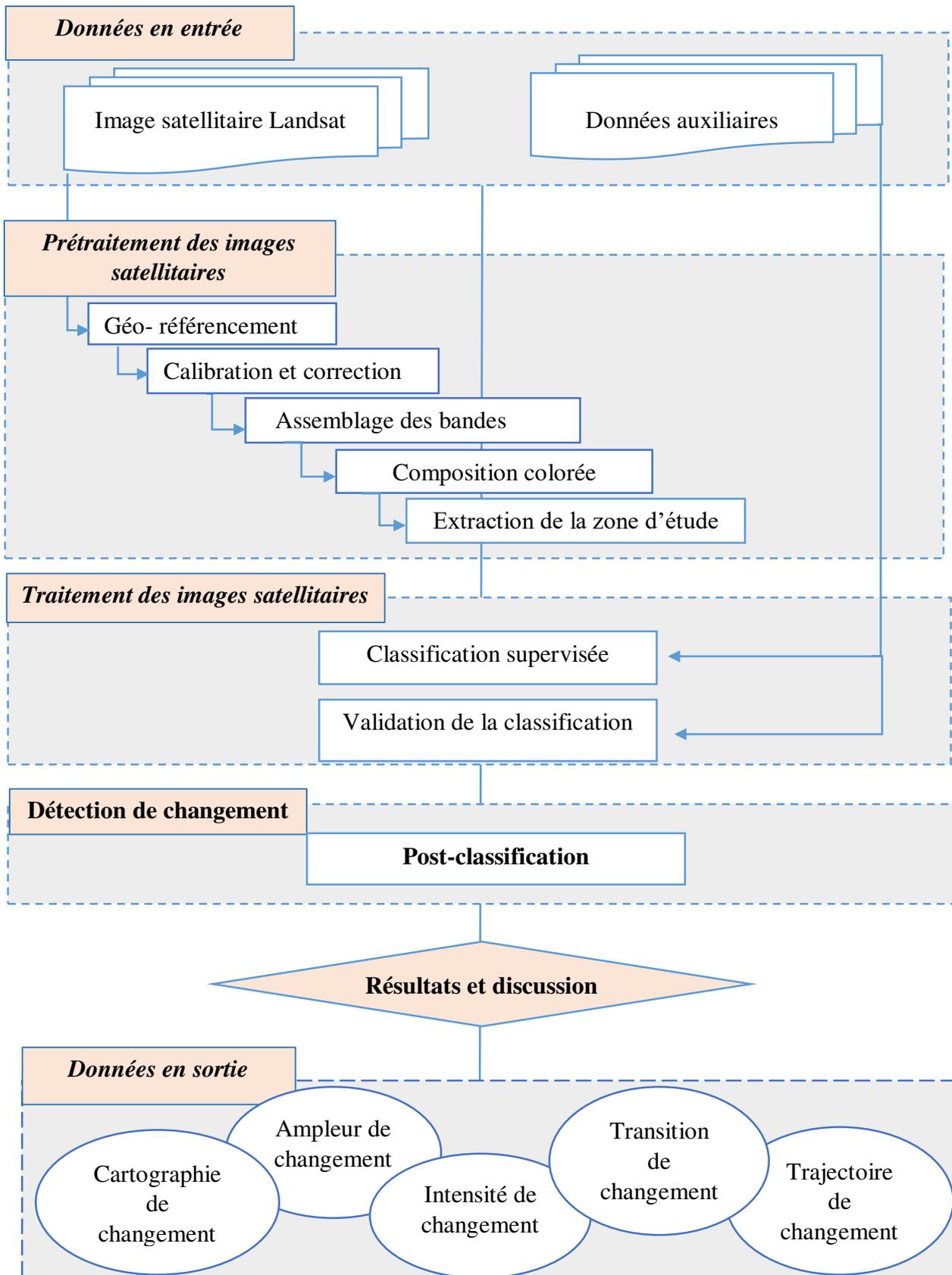


Figure III.1 : Organigramme synthétique de l'approche méthodologique.

2. Acquisition des données

2.1 Données de télédétection

Les images satellitaires constituent un outil important pour la cartographie de l'occupation des terres ainsi que pour la planification et la gestion des ressources naturelles ; elles sont descriptives et apportent une information spatiale et spectrale beaucoup plus importante par rapport aux autres sources d'information (Pouchin, 2001).

2.1.1 Les images satellitaires «Landsat»

Le suivi de la dynamique de l'occupation des terres dans le sud Hodna a été mis en place à partir des images satellitaires issues du satellite à moyenne résolution spatiale (30 mètre) «Landsat». En effet, ce dernier permet de bénéficier d'un large corpus de données disponibles gratuitement à la disposition du public sur Internet (<http://glovis.usgs.gov/>) ou bien (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), ce qui facilite l'acquisition et l'utilisation de grands volumes d'images multi-temporelles pour la surveillance de l'évolution de l'occupation des terres (Woodcock *et al.*, 2008 ; Huang *et al.*, 2010).

Les images utilisées dans cette étude couvrent une scène dont la région d'étude est incluse (Path : 195, Row : 35).

Nous avons travaillé sur des images issues de 3 capteurs de la série Landsat TM, ETM+ et OLI dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Caractéristiques des capteurs Landsat TM, ETM+ et OLI.

Images utilisées	Date d'acquisition	Bandes spectrales	Longueur d'ondes
Landsat 5 TM	1)19-05-1995 2)22-04-2000 3)14-05-2005	Bande 1 (Bleu) Bande 2 (Vert) Bande 3 (Rouge) Bande 4 (Infra rouge) Bande 5 (Moyen infrarouge 1) Bande 6 (Infrarouge thermique) Bande 7 (Moyen Infrarouge 2)	0,45- 0,52µm 0,52- 0,60 µm 0,63- 0,69 µm 0,76- 0,90 µm 1,55-1,75 µm 10,42-12,50 µm 2,08-2,35 µm
Landsat 7 ETM+	4)13-04-2011	Bande 1 (Bleu) Bande 2 (Vert) Bande 3 (Rouge) Bande 4 (Infra rouge) Bande 5 (Moyen infrarouge 1) Bande 6 (Infrarouge thermique) Bande 7 (Moyen Infrarouge 2) Bande 8 (Panchromatique)	0,45- 0,515 µm 0,52- 0,605 µm 0,63- 0,69 µm 0,76- 0,90 µm 1,55- 1,75 µm 10,42-12,50 µm 2,09- 2,35 µm 0,50- 0,90 µm
Landsat 8 OLI	5) 25-03-2016	Bande 1 (Aérosol) Bande 2 (Bleu) Bande 3 (Vert) Bande 4 (Rouge) Bande 5 (Infrarouge) Bande 6 (Moyen Infrarouge 1) Bande 7 (Moyen Infrarouge 2) Bande 8 (Panchromatique) Bande 9 (Cirrus) Bande 10 (IR Thermique TIRS1) Bande 11 (IR Thermique TIRS2)	0,435-0,451 µm 0,452- 0,512 µm 0,533- 0,590 µm 0,636- 0,673 µm 0,851- 0,879 µm 1,566- 1,651 µm 2,107- 2,294 µm 0,503-0,676 µm 1,363- 1,384 µm 10,60-11,19 µm 11.50-12.51 µm

2. 2 Données auxiliaires

2. 2.1 Enquête de terrain

L'acquisition de données de terrain est indispensable pour réaliser une classification supervisée des images de télédétection.

Des enquêtes de terrain sur la région d'étude ont été menées pendant le mois de mars et d'avril de l'année 2016.

Le matériel utilisé pour cette étude comporte :

➤ Un récepteur GPS Garmin pour la prise de coordonnées de point d'observations au sein des différentes thématiques d'occupation des terres. Il s'agit en particulier de 130 points acquis sur terrain.

➤ Fiches de relevés pour la description de l'occupation des terres et la notation des informations utiles.

➤ Un appareil photographique numérique pour les prises de vues.

Deux objectifs ont été poursuivis.

➤ Une prise de contact avec le terrain pour délimiter la zone d'étude.

➤ Délimitation des régions d'intérêts nécessaires pour élaboration des cartes de classification.

➤ Connaissance des modes d'occupation/utilisation des terres.

➤ Détermination des coordonnées des points contrôle GPS pour valider les classifications.

Une dizaine de photos numériques ont été prises, dont le but est de disposer d'un référentiel visuel commun pour l'établissement de la nomenclature et l'implémentation des classes de la classification (Figure III.2).

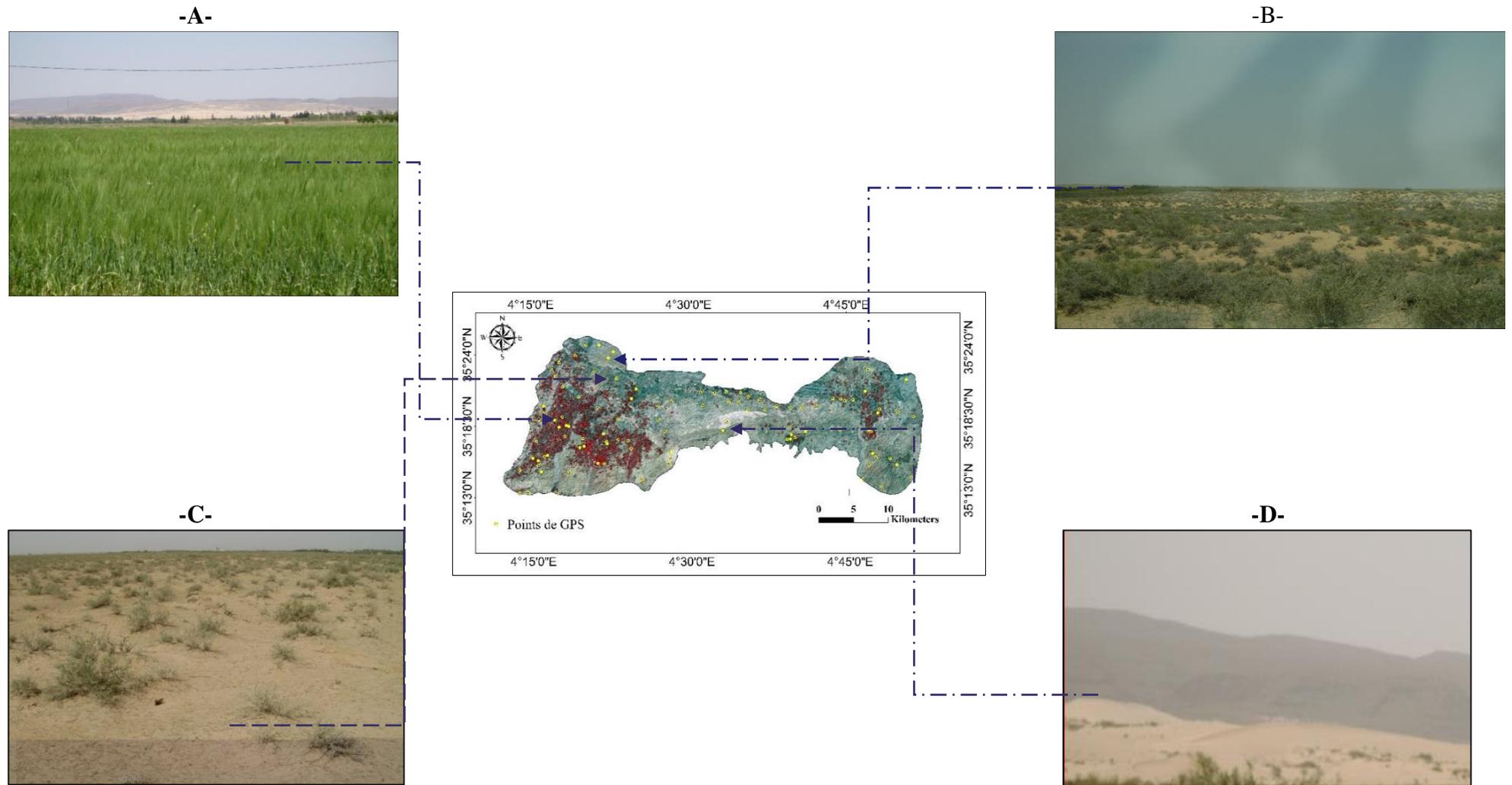


Figure III.2 : Photos de la zone d'étude A) Agriculture ; B) Parcours ; C) Parcours dégradés ; et D) Dunes de sable

2. 2. 2 Les cartes topographiques

Les cartes topographiques suivantes ont été utilisées :

- Carte topographique de M'Sila (échelle, 1/ 200 000) ;
- Carte topographique de Barika (échelle, 1/ 200 000) ;
- Carte topographique de Boussaâda (échelle, 1/ 200 000).

2. 2. 3 Images Google Earth

Un troisième jeu de données a été utilisé pour la mise en place de la cartographie diachronique de l'occupation des terres pour les dates les plus récentes. En effet, les images satellitaires de Google Earth ont permis de bien identifier les différents types d'occupation des terres et de faire la correspondance avec leur réponse spectrale sur les images satellitaires Landsat, ainsi, ils ont servis pour la validation de classification.

3. Prétraitement des images satellitaires

Le prétraitement des images satellitaires avant la classification des images et la détection de changement est important en raison des erreurs radiométriques et géométriques (Vermote et Kotchenova, 2008).

Ce prétraitement comprend généralement un certain nombre d'opérations séquentiel, qui ont été réalisées dans l'ENVI (ENvironment for Visualizing Images) avec la version 5.3 selon les étapes suivantes :

3.1 Géo-référencement d'images

La correction géométrique est la première étape de traitement d'image réalisée lorsque les données de télédétection ne sont pas géo-rectifiées (Lillesand *et al.*, 2004). Plusieurs points de contrôle ont été sélectionnés pour géoréférencer chaque scène avec l'image de référence. Les images ont été projetées dans la grille Universal Transverse Mercator (UTM, 31 Nord).

3.2 Calibration radiométrique et correction atmosphérique

La correction des images de télédétection des effets atmosphériques est faite sous environnement ENVI 5.3 par le module *FLAASH Atmospheric Correction Model*.

Dans un premier temps, on doit commencer par la conversion des valeurs nature *Digital Numbers* (DN) des lignes des bandes de l'image Landsat en radiances calibrées et le format des bandes en sortie est de type band-interleaved-by-line (BIL), le module *Radiometric calibration* – a permis la conversion.

Dans un deuxième temps, on applique le modèle atmosphérique pour toutes les images.

On prend l'exemple de l'image « LC81950352016085LGN00 du 25 mars 2016 » (Figure III.3).

Le résultat est une image en *réflectance* non pondérée, et pour rendre les valeurs de la réflectance comprise entre 0 et 1, on applique une équation de pondération par le module *Band Math* dans le menu Toolbox, on remplace b1 par chaque bande.

Equation de pondération :

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1) / 10000$$

Les images avant et après les corrections sont présentées dans la figure III.4.

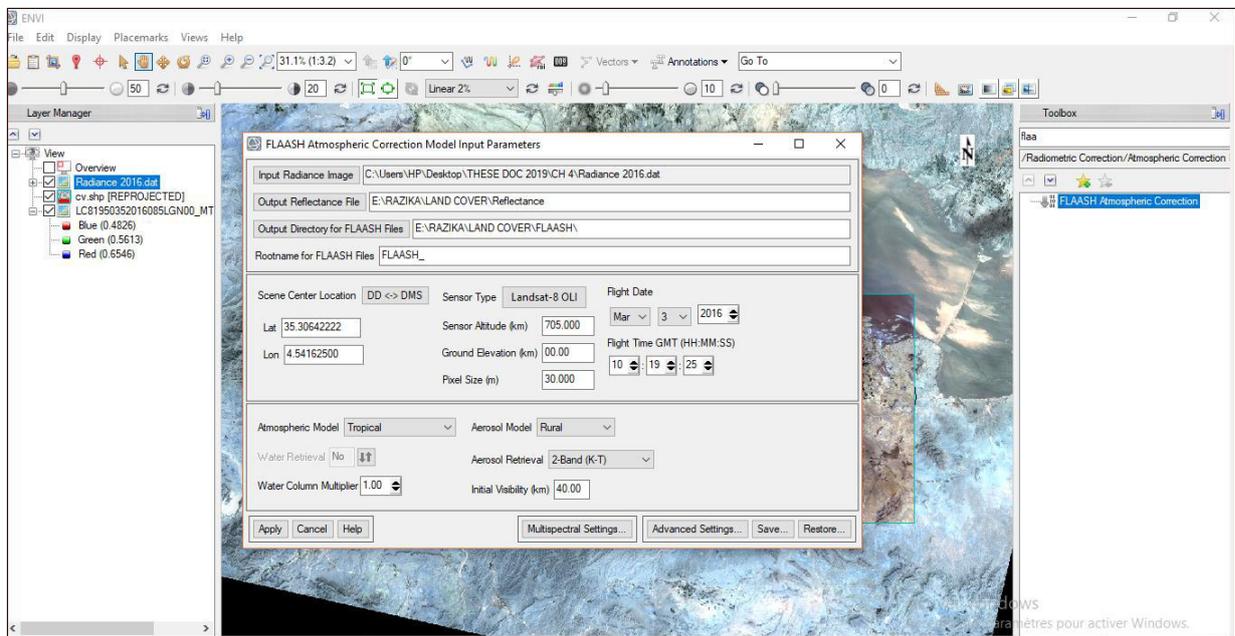
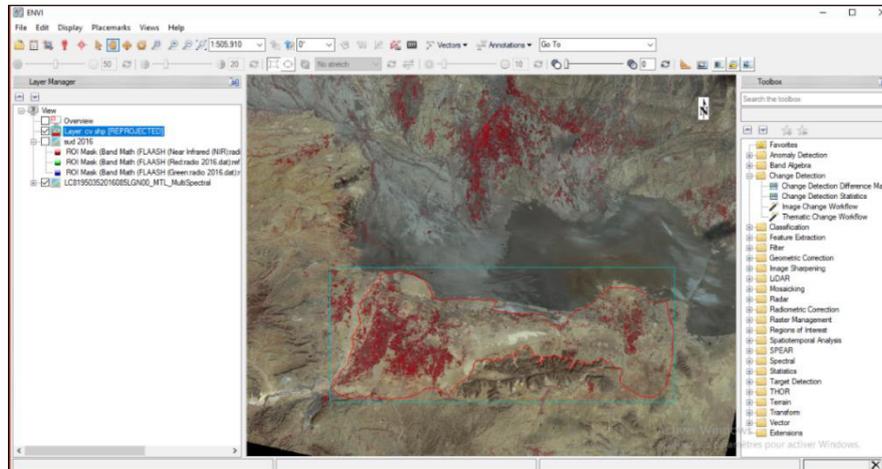
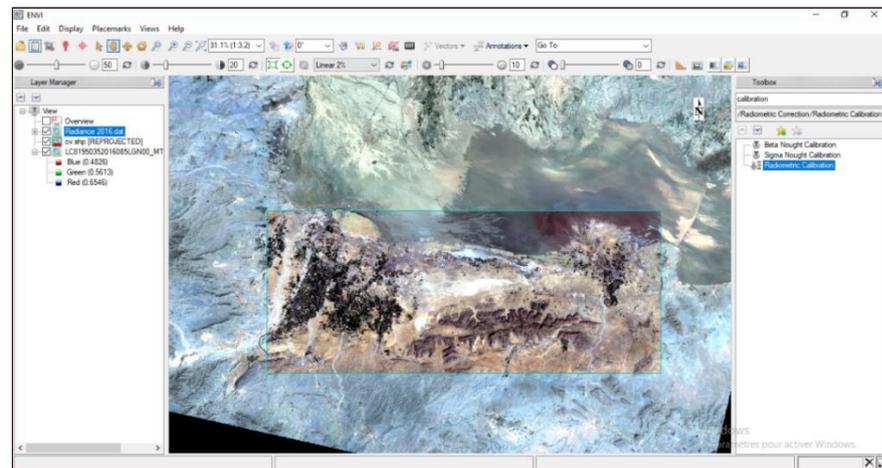


Figure III.3 : Fenêtre du module correction atmosphérique (Cas de l'image Landsat LC81950352016085LGN00).

A



B



C

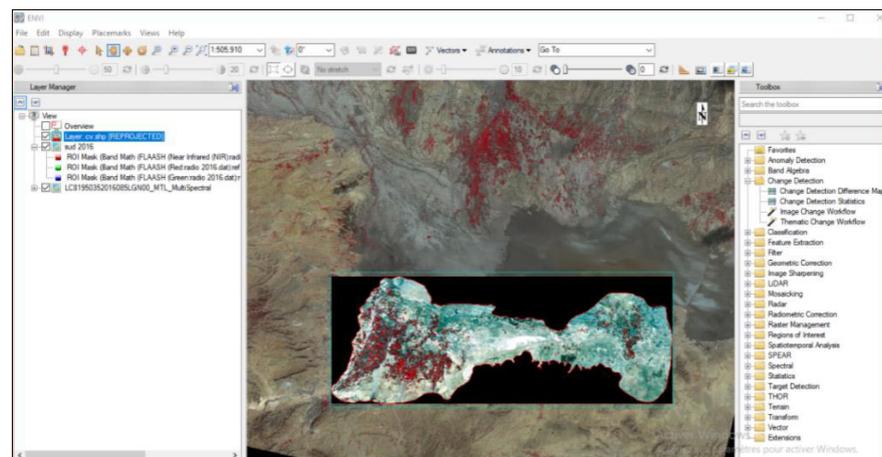


Figure III.4 : Résultats des corrections sur l'image Landsat OLI 8 (25/03/2016).

3.3 Assemblage des bandes

Après l'acquisition des images Landsat sous format Zip, une première étape consiste à les dézipper. Après la correction atmosphérique, on observe alors la présence de plusieurs fichiers (des bandes). L'étape suivante exige de rassembler ces bandes pour procéder à des traitements sur l'image. L'outil Layer Stack de ENVI 5.3 est utilisé pour cette opération ceci a permet d'empiler les bandes pour avoir comme fichier sortie une seule image multi-bandes.

3.4 Composition colorée

La composition colorée consiste à combiner des informations que contiennent trois bandes en les affichant simultanément dans les trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu). L'objectif de cette opération est d'avoir une synthèse d'informations en vue de faire une bonne discrimination des classes d'occupation des terres.

Au terme de plusieurs combinaisons, la composition colorée TM et ETM+ (5-4-3) a été choisie, car elle présente les meilleures discriminations des types d'occupation des terres (Girard et Girard, 1999).

3.5 Extraction de la zone d'étude

Avant d'effectuer la classification des images, nous avons procédé à l'extraction de la partie qui couvre notre zone d'étude. L'extraction des images est faite selon un shapefile couvrant une partie des communes de Maarif, Khoubana, M'Cif, Boussaâda et El Houamed. Cette démarche a été réalisée sous le logiciel ENVI 5.3.

4. Traitement des images

4.1 Classification supervisée

Compte tenu de la connaissance préalable de la zone d'étude, des données disponibles et du travail de prospection sur terrain, la classification supervisée a été adoptée à l'aide de l'algorithme de vraisemblance maximale pour classifier nos images d'étude. La classification supervisée nécessite des zones d'entraînement pour chaque catégorie. Nous avons utilisé ces zones pour chaque catégorie d'occupation et d'utilisation des terres afin de définir leur modèle de réflectance spectrale. Ensuite, les pixels ayant les mêmes motifs spectraux seraient regroupés dans une certaine catégorie en utilisant les signatures spectrales de la classification étudiée.

Ces zones ont été créés pour chaque catégorie à l'aide d'une analyse visuelle des images au moyen de l'affichage RGB, des données auxiliaires tirées des points vérifiés sur terrain, la connaissance préalable de la zone ou par les images de Google Earth pour les endroits

inaccessibles. Les classes ainsi définies comportent : l'agriculture, les parcours, les parcours dégradés et les dunes de sable.

4.2 Evaluation de la précision de la classification

La qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion qui sont la précision globale et le coefficient Kappa (Congalton, 1991 ; Girard et Girard, 1999).

La matrice de confusion est un tableau affichant les statistiques de la précision de la classification d'une image, notamment le degré de la classification erronée parmi les diverses classes. Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage.

Une méthode aléatoire stratifiée a été utilisée dans le logiciel Envi 5.3 à l'aide des régions d'intérêt basé sur des pixels qui ont été vérifiés à l'aide des points GPS.

5. Détection des changements

Cinq approches convergentes ont été adoptées pour le suivi des changements :

- Cartographie de la distribution d'occupation/utilisation des terres ;
- La détection des changements globaux d'occupation/utilisation des terres ;
- Analyse de l'intensité de changement au niveau de l'intervalle de temps et au niveau de la catégorie ;
- Analyse de l'intensité de changement au niveau de transition ;
- Trajectoire de changement de l'occupation des terres vers la désertification.

5.1 Cartographie de l'occupation/utilisation des terres

Les résultats de la classification supervisée des images satellitaires Landsat permettent d'analyser la distribution des classes d'occupation/utilisation des terres pendant la période étudiée (1995, 2000, 2005, 2011 et 2016) avec une précision globale de 97.64% , 95.75%, 90.64% , 91.85% et 99.83%, et un indice statistique de kappa de 0.96, 0.94, 0.87, 0.89 et 0.99, respectivement .

Selon Lea et Curtis (2010), cette précision totale est assez bonne et acceptable pour la détection de changement.

5.2 La détection de changement global d'occupation/utilisation des terres.

5.2.1 La technique de détection de changement

De nombreuses techniques ont été développées et utilisées pour la détection de changement afin de surveiller les changements de l'occupation/utilisation des terres en utilisant des données de télédétection.

La comparaison post-classification s'est révélée être la procédure la plus précise selon diverses études, car elle offrait l'avantage de représenter la nature des changements survenus (Singh, 1989 ; Mas, 1999). Elle compare les classifications d'images de différentes dates, qui sont produites indépendamment afin de détecter les changements de la couverture terrestre (Yuan *et al.*, 2005). Ainsi, l'utilisation de la méthode « post-classification comparaison » minimise les problèmes associés aux images multi-temporelles enregistrées dans différentes conditions atmosphériques et environnementales. Elle classe séparément les données de différentes dates et par conséquent, ces données multi-dates ne nécessitent aucun ajustement pour la comparaison directe (Singh, 1989 ; Zhou *et al.*, 2008).

5.2.2 Application de la technique

Dans notre étude, la technique « post-classification » a été utilisée pour la détection de changement global pour la période 1995-2016.

Dans un premier temps, les deux images classifiées 1995 et 2016 ont été comparées, pour ce faire, les statistiques de changement ont été calculées en comparant les taux de surface d'un ensemble de données avec le taux correspondant du deuxième ensemble de données.

Par la suite, le travail consiste à définir les quantités de conversions d'une classe d'occupation/utilisation des terres donnée à une autre et à une date ultérieure en utilisant la tabulation croisée qui permet d'obtenir la matrice de changement (Alphan *et al.*, 2009).

Des cartes de changement distinctes ont été ensuite réalisées à l'aide de logiciel ArcGis 10.3 des classes d'occupation/utilisation des terres (Une image pour chaque classe).

5. 3 Analyse de l'intensité de changement

5. 3.1 Matrice de transition

La première étape de l'analyse de l'intensité est de calculer les matrices de transition en termes de pourcentage de la zone d'étude sur les quatre intervalles de temps : 1995-2000, 2000-2005, 2005-2011 et 2011-2016.

5. 3.2 Analyse de l'intensité de changement d'occupation des terres

La méthode d'analyse de l'intensité a été proposée par Aldwaik et Pontius (2012) afin d'analyser quantitativement l'intensité de changements de l'occupation des terres (Aldwaik et Pontius, 2012 ; Huang *et al.*, 2012 ; Aldwaik et Pontius, 2013 ; Pontius *et al.*, 2013 ; Mallinis *et al.*, 2014).

5. 3.3 Analyse de l'intensité au niveau d'intervalle

L'analyse de l'intensité de changement au niveau d'intervalle examine comment le pourcentage de changement annuel St pendant chaque intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ varie par rapport à un pourcentage de changement annuel uniforme U pendant la période temporelle $[Y_1, Y_T]$ (Pontius *et al.*, 2013 ; Mallinis *et al.*, 2014).

Si $St < U$, alors St est lent, ce qui signifie que l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ connaît des changements plus lents que si les changements au cours de tous les intervalles de temps étaient répartis uniformément pendant l'étendue temporelle $[Y_1, Y_T]$.

Si $St > U$, alors St est rapide, c'est-à-dire que l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ change plus rapidement que si les changements au cours de tous les intervalles de temps étaient répartis uniformément pendant l'étendue temporelle $[Y_1, Y_T]$.

L'équation. (1) donne St et L'équation. (2) donne U :

$$St = \frac{(\text{Ampleur du changement } [Y_t, Y_{t+1}])100\%}{(\text{Etendue spatiale})(\text{durée de tous les intervalles } [Y_t, Y_{t+1}])} \quad (1)$$

$$U = \frac{(\text{Ampleur du changement durant tous les intervalles})100\%}{(\text{Etendue spatiale})(\text{durée de tous les intervalles})} \quad (2)$$

5. 3.4 Analyse de l'intensité de changement au niveau de catégorie

L'analyse de l'intensité au niveau de chaque catégorie examine comment l'intensité de perte L_{ti} de la catégorie i et l'intensité du gain G_{tj} par rapport à la catégorie j se comparent à une intensité uniforme St pendant chaque intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Si $L_{ti} < St$, alors L_{ti} est inactive ou dormant, ce qui signifie que la catégorie i subit une perte de manière moins intense que si le changement au cours de l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ était distribué uniformément dans l'étendue spatiale.

Si $L_{ti} > St$, alors L_{ti} est active, ce qui signifie que la catégorie i subit une perte de manière plus intense que si le changement au cours de l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ était distribué uniformément dans l'étendue spatiale (Huang *et al.*, 2012 ; Pontius *et al.*, 2013 ; Mallinis *et al.*, 2014).

De même, si $G_{tj} < St$, alors G_{tj} est inactive, et si $G_{tj} > St$, alors G_{tj} est active.

L'équation. (3) donne L_{ti} et l'équation. (4) donne G_{tj} .

$$L_{ti} = \frac{(\text{Ampleur de la perte } i \text{ pendant } [Y_t, Y_{t+1}])100\%}{(\text{Ampleur de } i \text{ en } Y_t)(\text{durée de } [Y_t, Y_{t+1}])} \quad (3)$$

$$G_{tj} = \frac{(\text{Ampleur du gain de } j \text{ durant } [Y_t, Y_{t+1}])100\%}{(\text{Ampleur de } i \text{ en } Y_{t+1})(\text{durée de } [Y_t, Y_{t+1}])} \quad (4)$$

5.3.5 Analyse de l'intensité au niveau de transition

L'analyse de l'intensité au niveau de la transition examine comment l'intensité de transition R_{tij} de la catégorie i à la catégorie j se compare à une intensité de transition uniforme W_{tj} compte tenu du gain de la catégorie j au cours de l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Si $R_{tij} < W_{tj}$, alors le gain de j évite i , c'est-à-dire que le gain de j passe de i moins intensément pendant l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ que si le gain de j devait être passé uniformément de l'espace qui n'est pas j à l'heure Y_t .

Si $R_{tij} > W_{tj}$, alors le gain de j cible i , c'est-à-dire le gain de j passe de i plus intensément au cours de l'intervalle de temps $[Y_t, Y_{t+1}]$ que si le gain de j était passé uniformément de l'espace qui n'est pas j à l'heure Y_t .

L'équation. (5) donne R_{tij} et L'équation. (6) donne W_{tj} .

L'ordre des indices j et i dans C_{tji} au dénominateur de l'équation. (6) est intentionnel, de sorte que la somme sur i soustrait la catégorie j à l'instant initial Y_t .

$$R_{tij} = \frac{(\text{Ampleur de transition de } i \text{ à } j \text{ durant } [Y_t, Y_{t+1}])100\%}{(\text{Ampleur de } i \text{ en } Y_t)(\text{durée de } [Y_t, Y_{t+1}])} \quad (5)$$

$$W_{tj} = \frac{(\text{Ampleur du gain de } j \text{ durant } [Y_t, Y_{t+1}])100\%}{(\text{Ampleur de } j \text{ en } Y_t)(\text{durée de } [Y_t, Y_{t+1}])} \quad (6)$$

5.4 Trajectoire de changement d'occupation/utilisation des terres vers la désertification

La détection de changement d'occupation/utilisation des terres est un domaine de recherche actif (Roy et Tomar, 2001). L'analyse de trajectoire temporelle de changement est l'une des approches de détection de changement (Coppin *et al.*, 2004), leur concept et méthodologie ont été développés par plusieurs auteurs (Mertens et Lambin, 2000 ; Petit *et al.*, 2001, Liu et Zhou, 2004).

Dans cette étude, le terme « trajectoire de changement d'occupation des terres » désigne les successions des types d'occupation des terres pour une surface donnée sur plus de deux observations (époques) afin de voir la trajectoire de l'évolution de ce changement vers la désertification.

Les mesures de changement sont basées sur l'échelle de temps «à deux époques», c'est-à-dire la comparaison entre deux dates. Même si les informations sur l'occupation des terres sont parfois acquises pendant plus de deux époques, les changements sont toujours mesurés sur la base de paires de dates.

Dans notre étude, l'analyse de trajectoire temporelle et de la configuration spatiale de l'évolution d'occupation des terres a été effectuée pour la période de 1995 à 2016.

6. Résultat et discussion

Les résultats seront présentés dans cinq sous-sections.

- Cartographie de l'occupation des terres dans la zone d'étude.
- Analyse de changement global durant la période (1995-2016).
- Analyse de l'intensité de changement au niveau de l'intervalle et au niveau de catégorie.
- Analyse de la transition de changement entre les catégories de l'occupation des terres.
- Analyse de la trajectoire de changement.

6.1 Cartographie de l'occupation/utilisation des terres

En utilisant des images satellitaires Landsat, on a fait ressortir cinq cartes d'occupation /utilisation des terres respectivement de 1995, 2000, 2005, 2011 et 2016, ainsi que les statistiques respectives de toutes les classes d'occupation/utilisation des terres pour les cinq dates.

Ces résultats issus des cinq classifications ont permis de faire une analyse diachronique afin de comprendre l'évolution de l'occupation/utilisation des terres entre les différentes dates étudiées.

6.1.1 Interprétation des cartes d'occupation/utilisation des terres

Les figures III (5, 7, 9, 11 et 13) représentées par les graphes III (6, 8, 10, 12 et 14) illustrent de façon plus détaillée les superficies d'occupation/utilisation des terres.

Pour toute la période de 1995 à 2016, et si on prend uniquement les statistiques des parcours en particulier, on constate que cette classe est en déclin continu. Si on compare avec les autres classes, elle occupe une surface importante d'environ 487,34 Km² et 417,22 Km² durant les années 1995 et 2000 respectivement. Au cours de l'année 2005, elle atteint 353,25 Km² puis 298,79 Km² en 2011, elle continue de diminuer pour atteindre 180,29 Km² en 2016. Il s'avère ainsi que plus de la moitié de cette classe est en voie de dégradation durant cette période.

En revanche, on a constaté une augmentation de la classe de parcours dégradés de 131,93 Km² en 1995 à 190,77 Km² en 2000. Par la suite, elle atteint 230,11 Km² en 2005 et 278,23 Km² en 2011 puis 317,4 Km² en 2016.

Concernant la superficie des zones agricoles, par rapport à la superficie totale de sud du Hodna, on a trouvé les surfaces suivantes : pour l'année 1995 (133,07 Km²) ; pour l'année 2000 (137,81 Km²), et elle a continué d'augmenter jusqu'à elle atteint 199,8 Km² en 2016.

Quand on observe l'évolution des surfaces des dunes de sable, on remarque une augmentation de façon continue pendant la période de 1995 à 2016. On a enregistré 37,62 Km² en 1995, 71,16 Km² en 2011, et en 2016, la surface atteinte est de 92,46 Km².

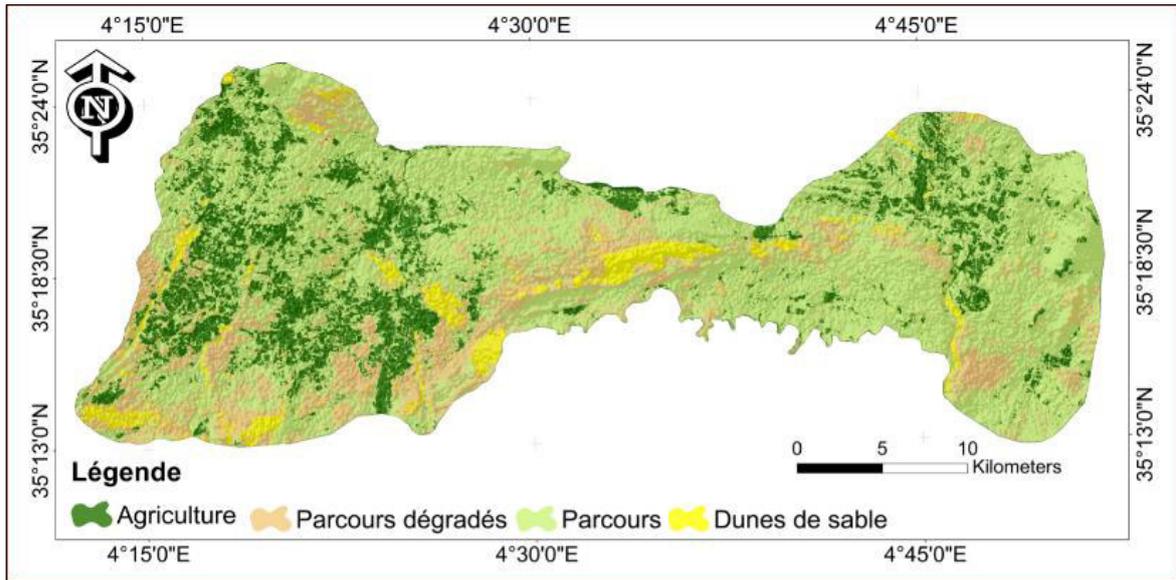


Figure III.5 : Carte d'occupation/utilisation des terres (1995).

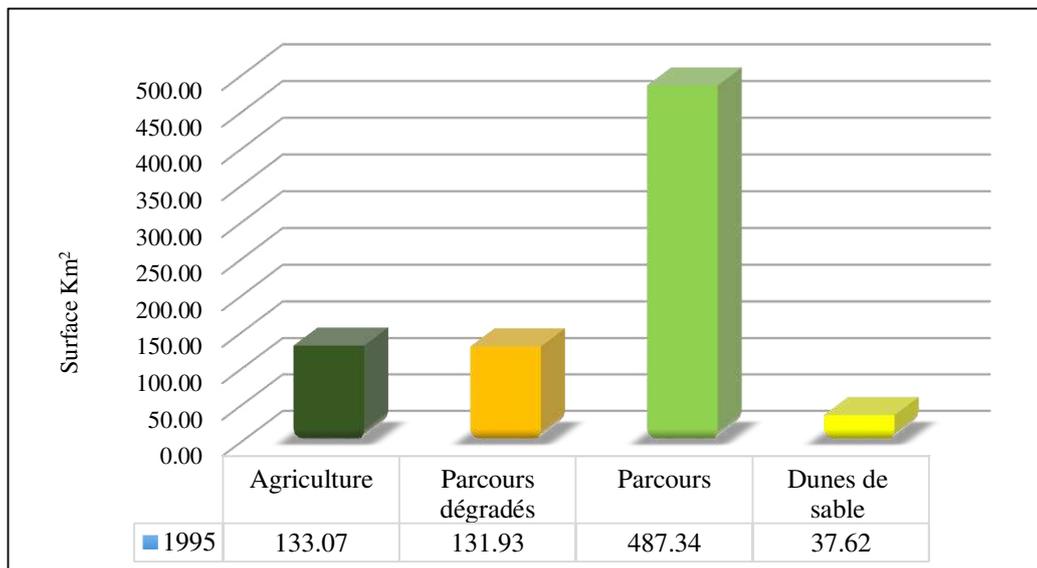


Figure III.6 : Représentation graphique des classes d'occupation/utilisation des terres (1995).

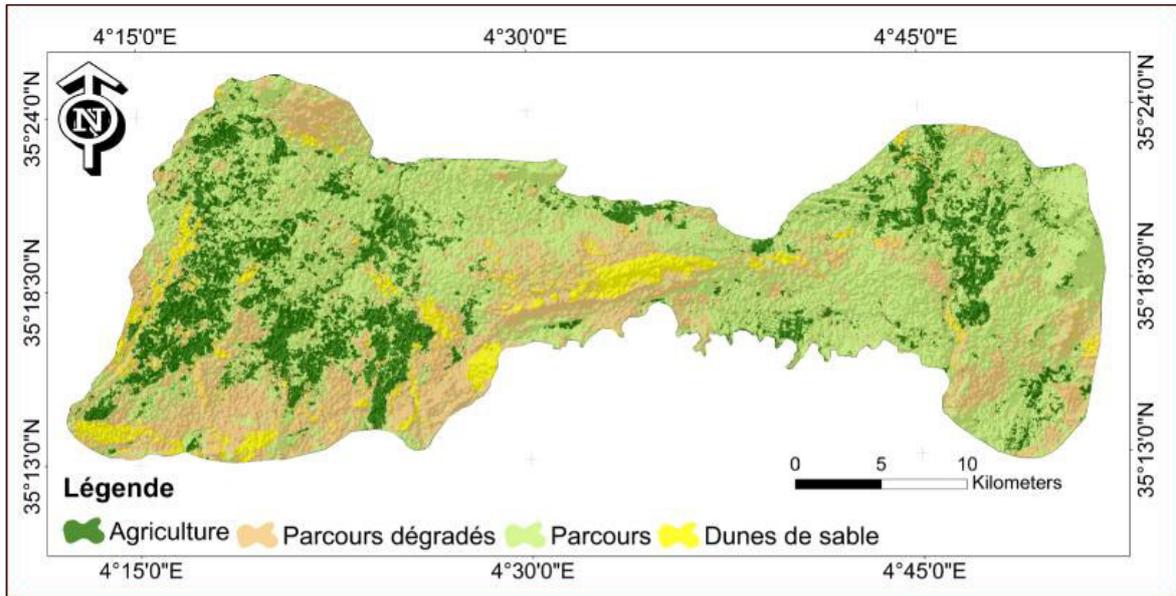


Figure III.7 : Carte d'occupation/utilisation des terres (2000).

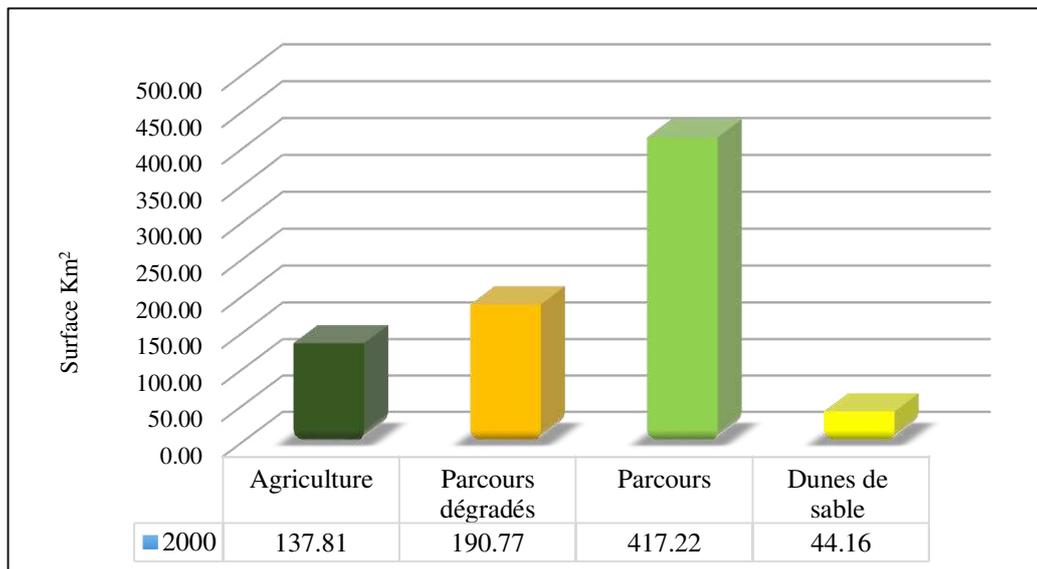


Figure III.8 : Représentation graphique des classes d'occupation/utilisation des terres (2000).

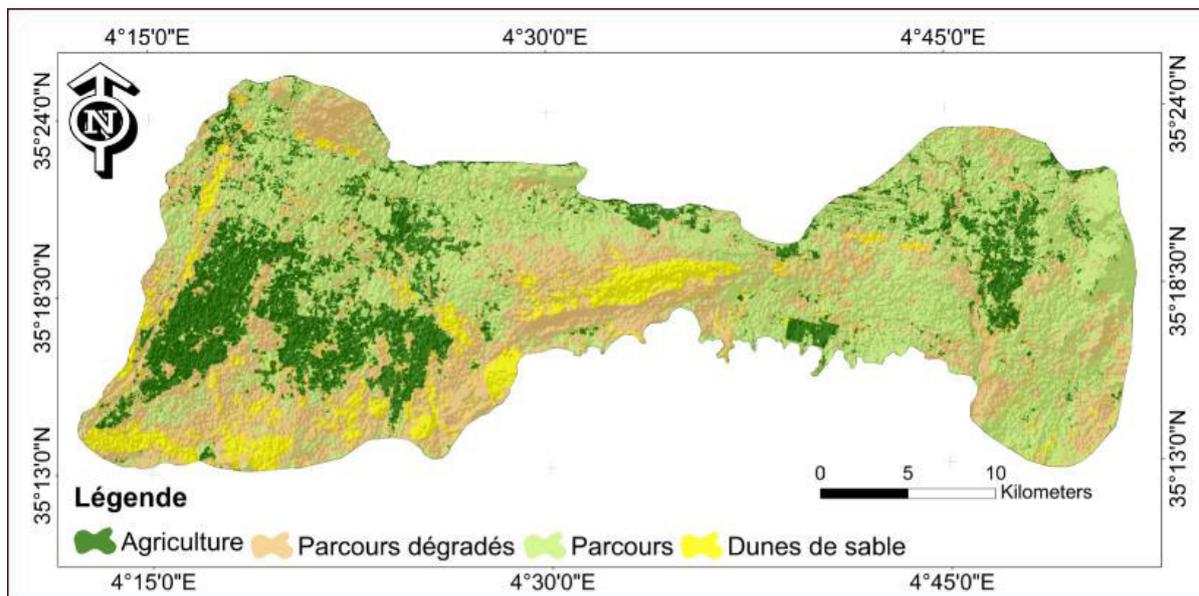


Figure III.9 : Carte d'occupation/utilisation des terres (2005).

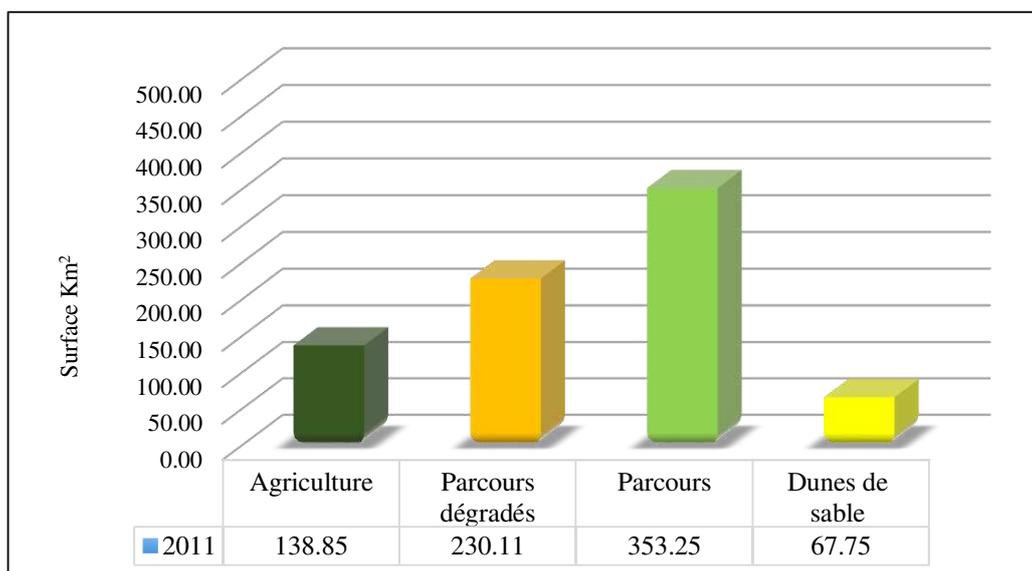


Figure III. 10 : Représentation graphique des classes d'occupation/utilisation des terres- (2005).

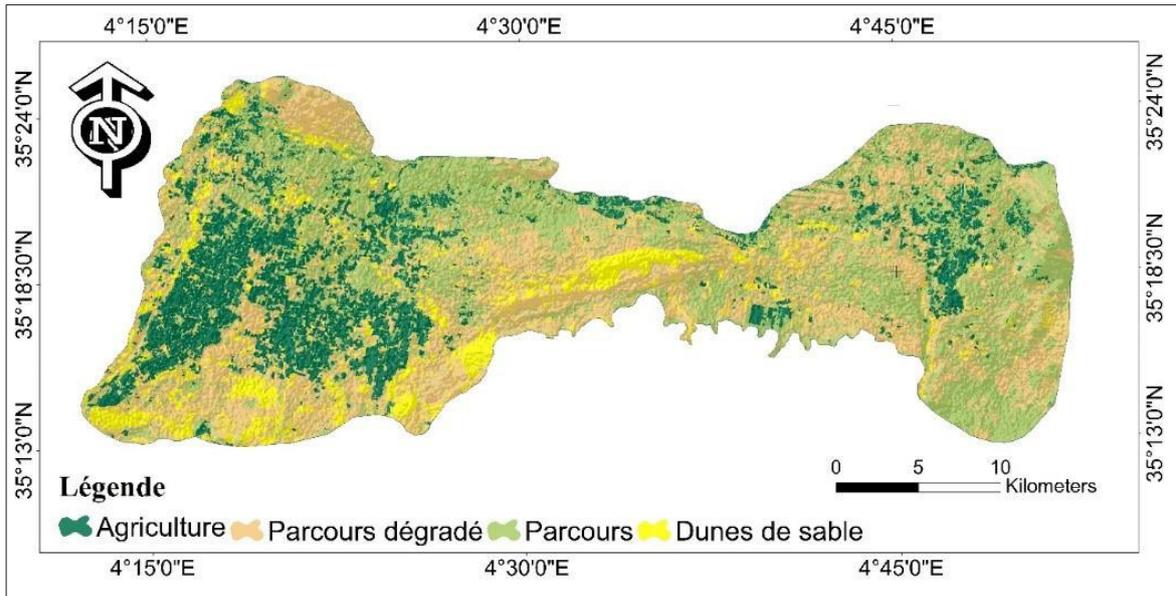


Figure III.11 : Carte d'occupation/utilisation des terres (2011).

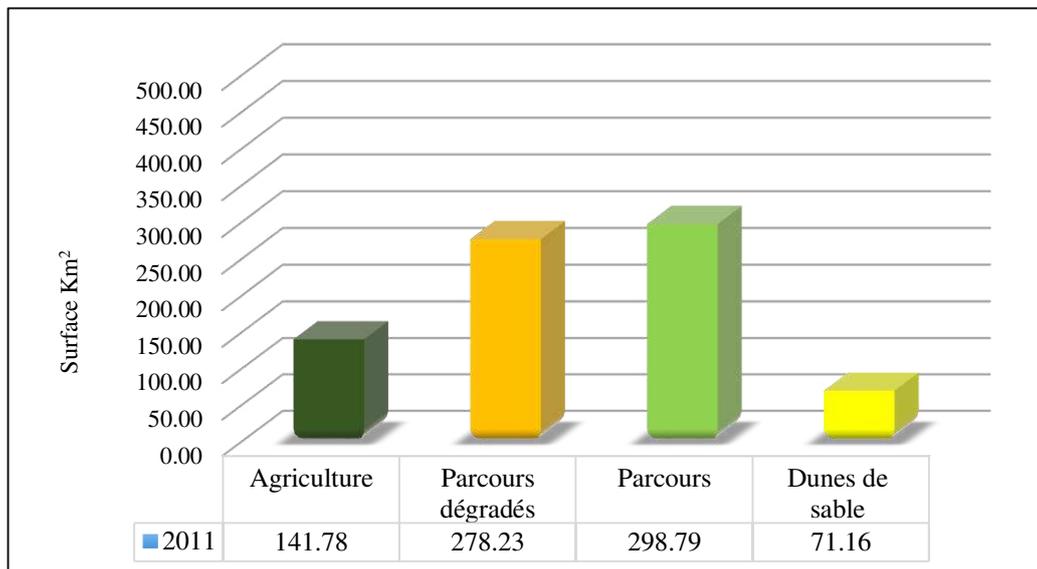


Figure III.12 : Représentation graphique des classes d'occupation/utilisation des terres- (2011).

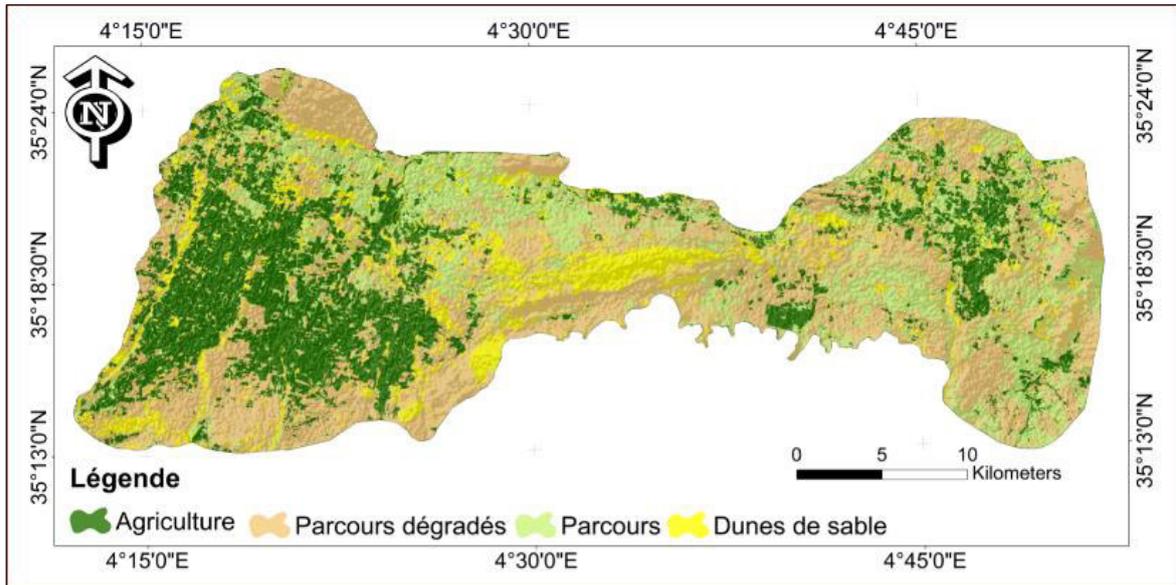


Figure III.13 : Carte d'occupation/utilisation des terres (2016).

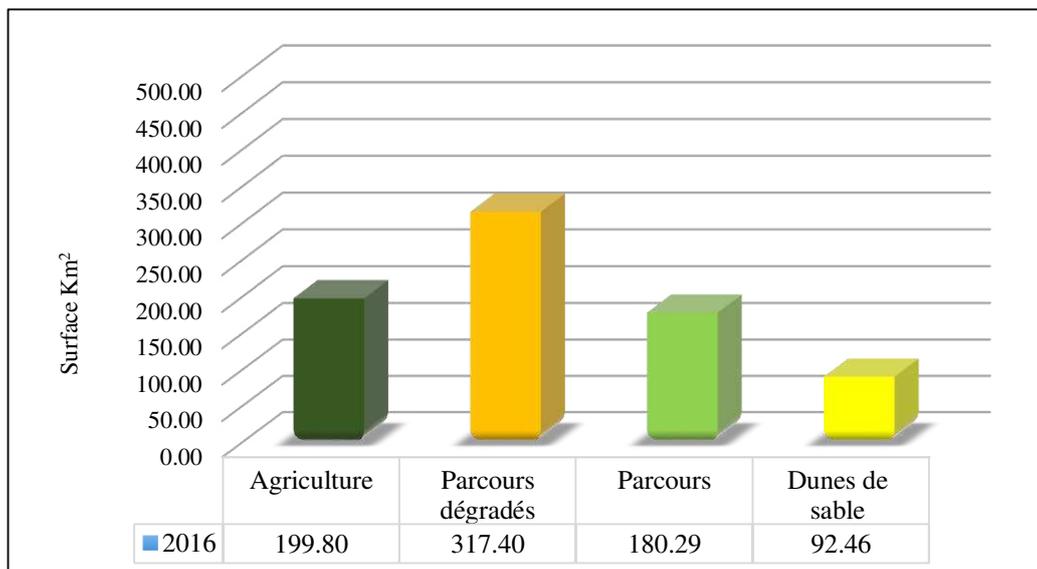


Figure III.14 : Représentation graphique des classes d'occupation/utilisation des terres (2016).

6.2 Détection de changement global entre 1995 et 2016

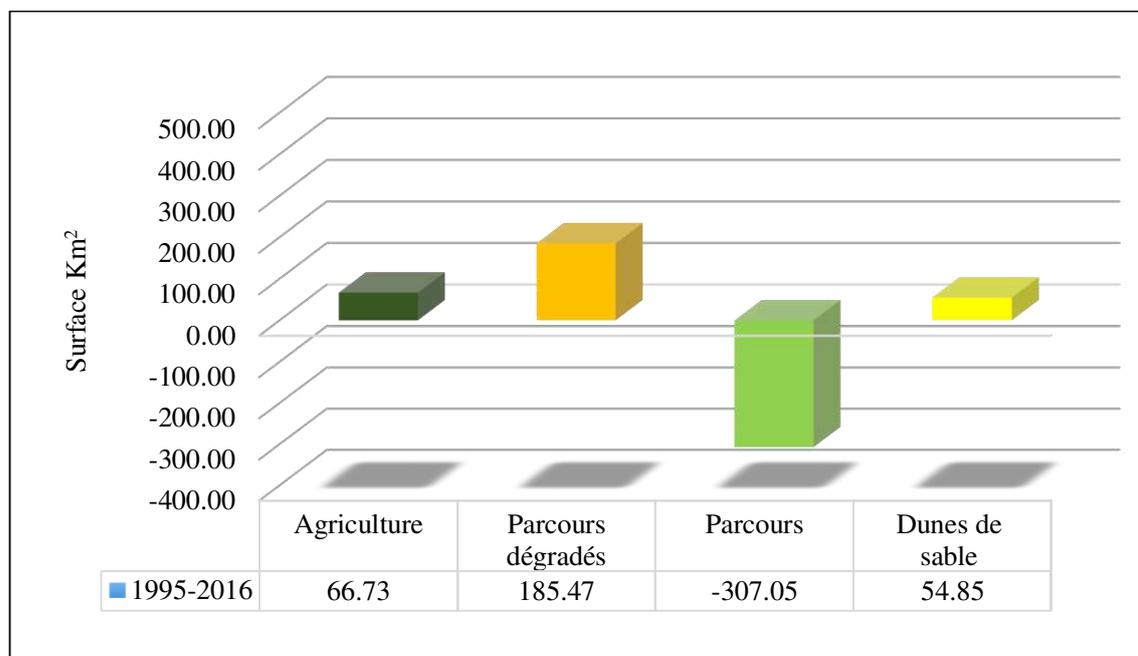
La comparaison des deux classes d'occupation des terres entre les dates 1995 et 2016 a montré qu'il y a eu un changement très marqué de l'occupation/utilisation des terres pendant la période d'étude de 21 ans (Tableau III.2) et (Figure III. 15). Les résultats ont montré que les parcours ont régressés de 487,34 km² (61,69%) en 1995 à 180,29 Km² (22,82%) en 2016 en raison de sa transformation en terres agricoles, de parcours dégradés et de dunes de sable. Les trois autres classes ont subi une augmentation de leur surface totale. Le principal accroissement a eu lieu dans les parcours dégradés, en effet, cette surface est passée de 131,93 km² (16,70%) en 1995 à 317,40 km² (40,18%) en 2016. Mis à part les conditions climatiques très sévères, l'augmentation de cette classe est principalement due au surpâturage.

Les résultats obtenus concordent avec plusieurs travaux réalisés sur les steppes algériennes (Nedjraoui, 1981 ; Slimani *et al.*, 2010 ; Senoussi *et al.*, 2011) qui ont montré que la dégradation des parcours est principalement due au surpâturage qui entraîne la réduction de la végétation et la valeur pastorale.

En conséquence des politiques agricoles adoptées pendant les dernières décennies, la superficie agricole montre une nette progression ; elle est passée de 133,07 km² (16,85%) en 1995 à 199,80 Km² (25,29%) en 2016. Cette augmentation de la superficie agricole a été favorisée notamment par l'exploitation de l'aquifère profond pour l'irrigation depuis quelques décennies et surtout dans les terrains de passage des crues d'oueds qui enrichissent le sol en éléments fins (Abdesslam, 2013). On a également observé des changements assez importants dans la classe des dunes de sable dans le sud du Hodna. Cette classe, en augmentation constante, elle est passée de 37,62 Km² (4,76%) en 1995 à 92,46 Km² (11,70%) en 2016. Dans ce secteur, le sol est pauvre et est dominé par la texture grossière (Bouahmed et Abdesslam, 2010). L'extension du dépôt de sable dans ce type d'environnement semble avoir contribué à la dégradation des parcours jusqu'à la désertification (Oussedik *et al.*, 2003 ; Slimani et Aidoud, 2004).

Tableau III.2 : Changement d'occupation//utilisation des terres entre 1995 et 2016.

Classes d'occupation/utilisation des terres	1995		2016		Changement entre 1995-2016	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Agriculture	133.07	16.85	199.80	25.29	66.73	8.45
Parcours	487.34	61.69	180.29	22.82	-307.05	-38.87
Parcours dégradés	131.93	16.70	317.40	40.18	185.47	23.48
Dunes de sable	37.62	4.76	92.46	11.70	54.85	6.94

**Figure III.15** : Evolution des superficies des classes d'occupation/utilisation des terres entre 1995 et 2016.

Pour obtenir les conversions de chaque classe à l'aide d'un SIG, la matrice de tabulation croisée entre les deux dates a été établie (Tableau III.3). Les deux cartes classées (1995-2016) ont été superposées pour produire une carte de changement pour chaque classe (Figure III. 16).

Tableau III.3 : Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres entre 1995 et 2016 (Superficie en Km²).

		Occupation/utilisation des terres 2016				
		Agriculture	Parcours dégradés	Parcours	Dunes de sable	Total
Occupation/utilisation des terres 1995	Agriculture	90.06	15.78	21.93	5.30	133.07
	Parcours dégradés	13.36	86.50	8.55	23.52	131.93
	Parcours	94.62	204.06	148.48	40.17	487.34
	Dunes de sable	1.76	11.06	1.33	23.47	37.62
	Total	199.80	317.40	180.29	92.46	789.96

6.2.1 Conversion de l'agriculture

Les terres agricoles, dont la surface était de 133,07 km² en 1995, ont subi les conversions suivantes : 90,06 km² sont restés des terres agricoles en 2016, mais 15,78 km² ont été convertis en parcours dégradés, 21,93 km² en terres de parcours et 5,30 km² en dunes de sable.

6.2.2 Conversion des parcours dégradés

Les parcours dégradés, dont la superficie était 131,93 km² en 1995, ont subi les conversions suivantes : 86,50 km² sont restés des parcours dégradés en 2016, mais 13,36 km² à été converti en terres agricoles, 23,52 km² en dunes de sable et le reste en parcours.

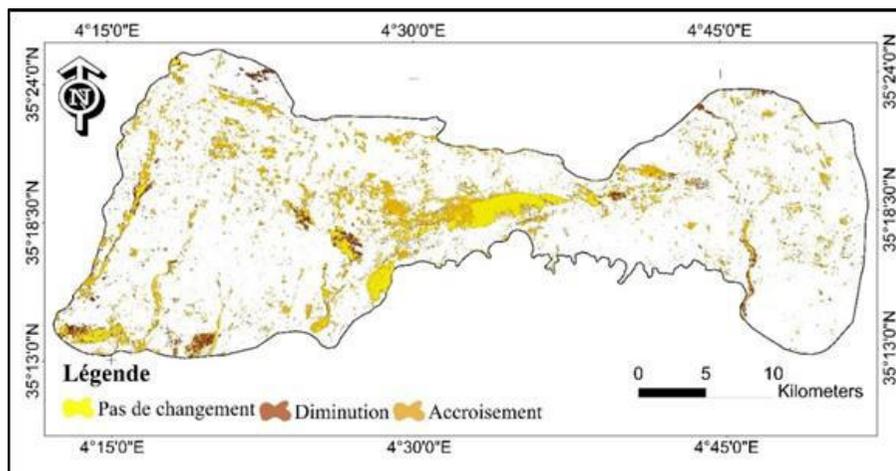
6.2.3 Conversion de parcours

Les parcours, dont la superficie était de 487,34 km² en 1995, ont subi les conversions suivantes : 148,48 km² sont maintenues comme parcours en 2016, néanmoins, 94,62 km² ont été convertis en terres agricoles, 40,17 km² en dunes de sable et 204,06 km² en parcours dégradés.

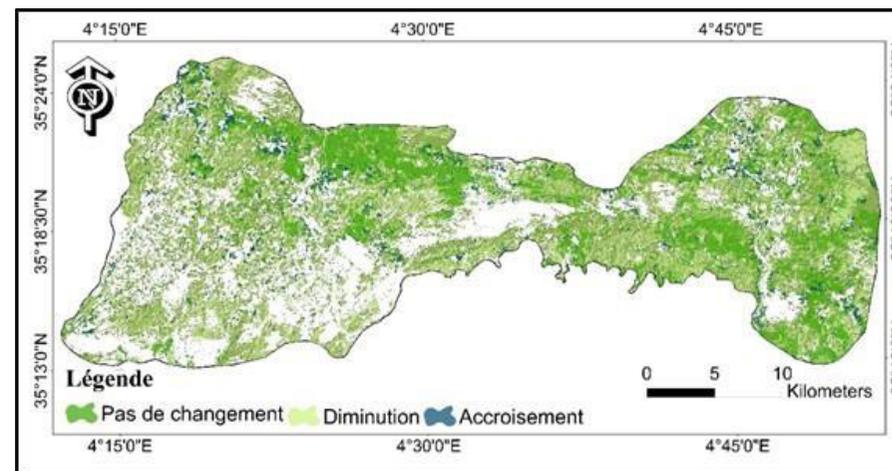
6.2.4 Conversion des dunes de sable

Estimée à 37,62 km² en 1995, la superficie des dunes de sable enregistré en 2016 est de 23,47 km², le reste de la surface a été convertie en terres de parcours dégradés.

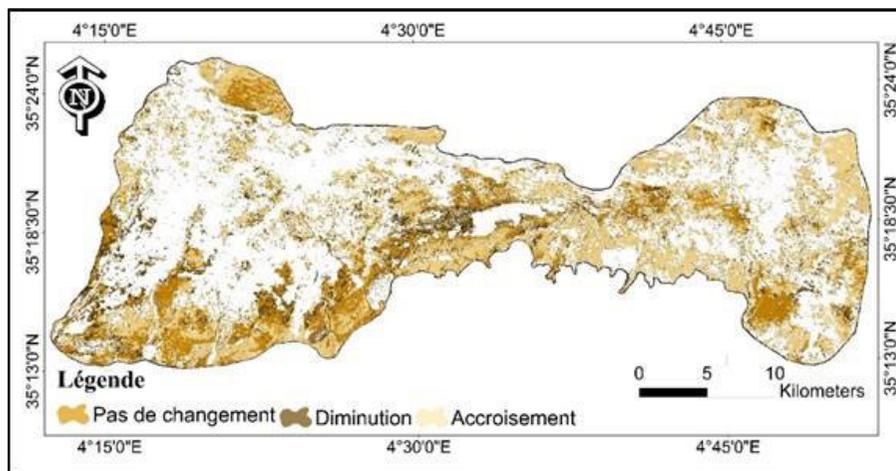
-A-



-B-



-C-



-D-

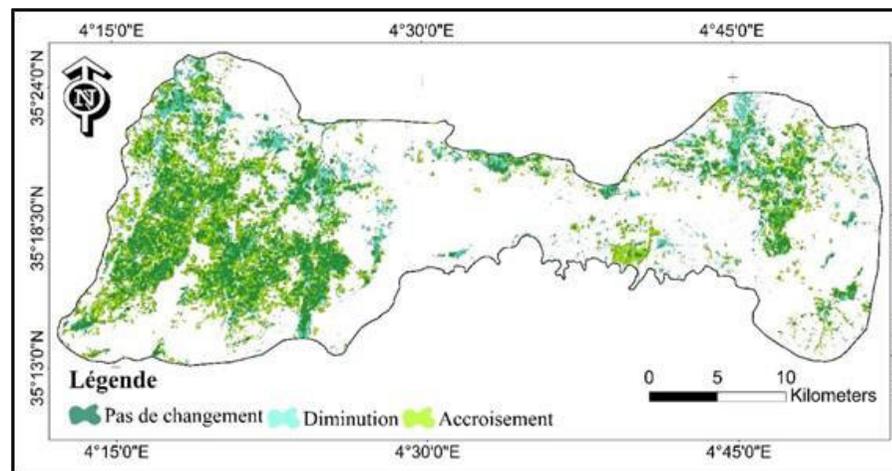


Figure III.16 : Cartes de perte et de gains des classes d'occupation des terres entre 1995 et 2016 (A : Dunes de sable, B : Parcours, C : Parcours dégradés, D : Agriculture).

6.3 Analyse de l'intensité de changement d'occupation/utilisation des terres

6.3.1 Au niveau de l'intervalle

Les résultats de l'analyse de l'intensité de changement sont illustrés dans la figure III.17 dans laquelle les barres à droite représentent l'échelle globale de la variation de l'utilisation des terres pour chaque intervalle de temps, tandis que les barres à gauche représentent l'intensité temporelle obtenue à l'aide de l'équation (2) (Cf. matériel et méthode). La ligne pointillée est la ligne d'intensité uniforme (obtenue à l'aide de l'équation (1) (Cf. matériel et méthode). L'interprétation de la figure se fait de la manière suivante :

Si la barre dépasse la ligne d'intensité uniforme, le changement d'utilisation des terres dans cet intervalle de temps a été relativement rapide ; dans le cas contraire, le changement d'utilisation des terres dans cet intervalle de temps a été relativement lent (Zhou *et al.*, 2014). La figure III.17 indique, d'une part, que le taux de variation entre 1995-2000, 2000-2005 et 2005-2011 étaient relativement lents puisqu'il n'a pas dépassé la ligne d'intensité uniforme. Cependant, le changement de l'utilisation des terres en 2011-2016 a été plus rapide que celui des autres intervalles. Cela signifie que les changements n'étaient pas immobiles au cours des intervalles analysés mais varie en intensité selon les périodes.

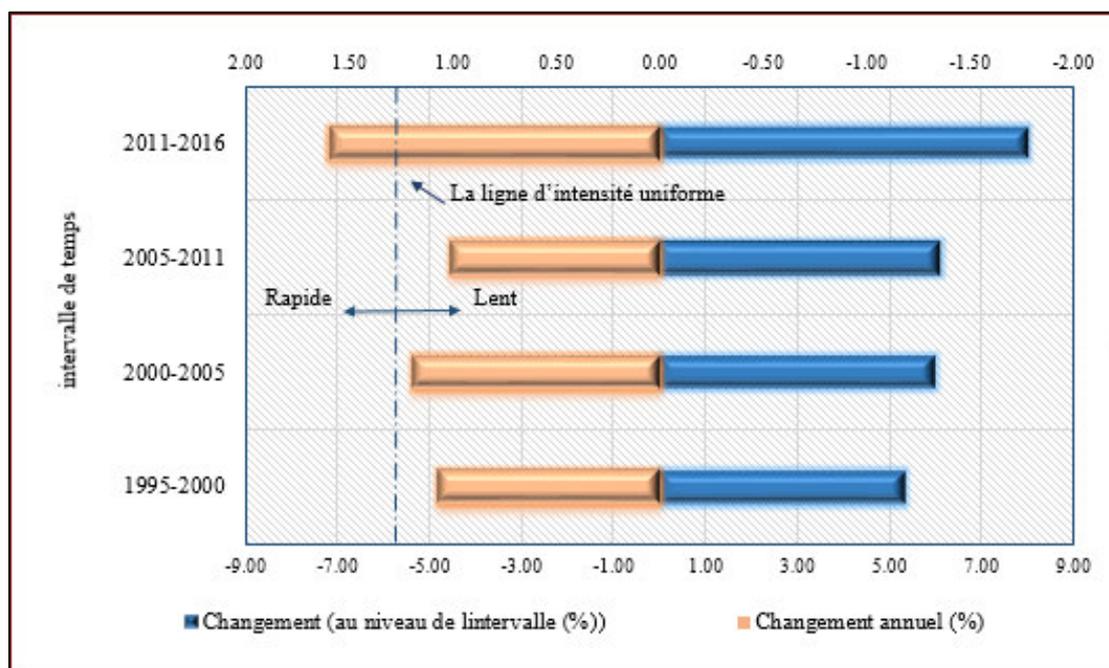


Figure III.17 : Analyse de l'intensité de changement d'occupation des terres pour les quatre intervalles de temps (1995-2000, 2000-2005, 2005-2011 et 2011-2016).

6.3.2 Analyse de l'intensité de changement par catégorie

L'analyse de l'intensité de changement par catégorie peut répondre à la question suivante : «Quelles catégories de changements d'occupation/utilisation des terres sont relativement actives et quelles catégories sont relativement inactives au cours d'une période donnée?».

Les résultats sont illustrés dans la figure III.18. Les deux panneaux de chaque figure représentent, respectivement, les gains et les pertes de chaque catégorie, calculés à l'aide des équations (3) et (4) (Cf. matériel et méthodes). L'axe vertical indique l'intensité de changement au cours de l'intervalle de temps en pourcentage de la catégorie. La ligne horizontale indique l'intensité uniforme de changement annuel pour l'ensemble de la zone d'étude ; si une barre dépasse la ligne d'intensité uniforme, le changement de catégorie d'utilisation des terres serait relativement actif dans l'intervalle de temps donné ; sinon, il serait relativement inactif.

Les valeurs de l'intensité uniforme de changement pour le premier, deuxième, troisième et quatrième intervalle de temps étaient respectivement de 3,38 - 3,76 - 4,6 et 5,05 % (Figure III.18).

6.3.2.1 Les pertes de parcours dégradés sont inactives durant tous les intervalles de la période de 1995 à 2016, par contre, les gains profitant à cette catégorie sont actifs durant toute la période, et le gain le plus important dans cette catégorie est celui enregistré pendant le premier intervalle.

6.3.2.2 La catégorie d'agriculture a enregistré des pertes actives pendant l'intervalle 1995-2000, et 2000 -2005, et des pertes inactives pendant 2005-2011 et 2011-2016. Les gains profitant à cette catégorie de l'agriculture pendant la période (2005-2011) sont inactifs par rapport aux valeurs d'intensité uniforme de changement. Par contre les gains dans les autres intervalles sont actifs.

6.3.2.3 Les parcours enregistrent des pertes actives pendant tous les intervalles, les plus importants sont ceux enregistrés dans la période de 2011 à 2016 ce que justifie l'intensité de changement de cet intervalle (partie précédente). Les gains profitant à cette catégorie sont inactifs durant les intervalles (1995-2005) et (2011-2016).

Ces résultats montrent que la catégorie de parcours perd activement de la surface dans toute la période étudiée, cela confirme les résultats de la partie précédente en ce qui concerne la dégradation des parcours de la zone de sud du Honda et la conversion de sa moitié de surface en autres classes.

6.3.2.4 La catégorie de dunes de sable, les pertes actives sont enregistrées pendant les deux périodes de 2005 à 2011 et de 2011 à 2016, par contre, elles sont inactives dans les premiers deux intervalles. Concernant les gains, cette catégorie enregistre des gains actifs pendant toute la période étudiée de 1995 à 2016 par rapport aux valeurs de ligne d'intensité uniforme. Ces résultats indiquent que la catégorie de sable acquis activement de la surface (Ensablement).

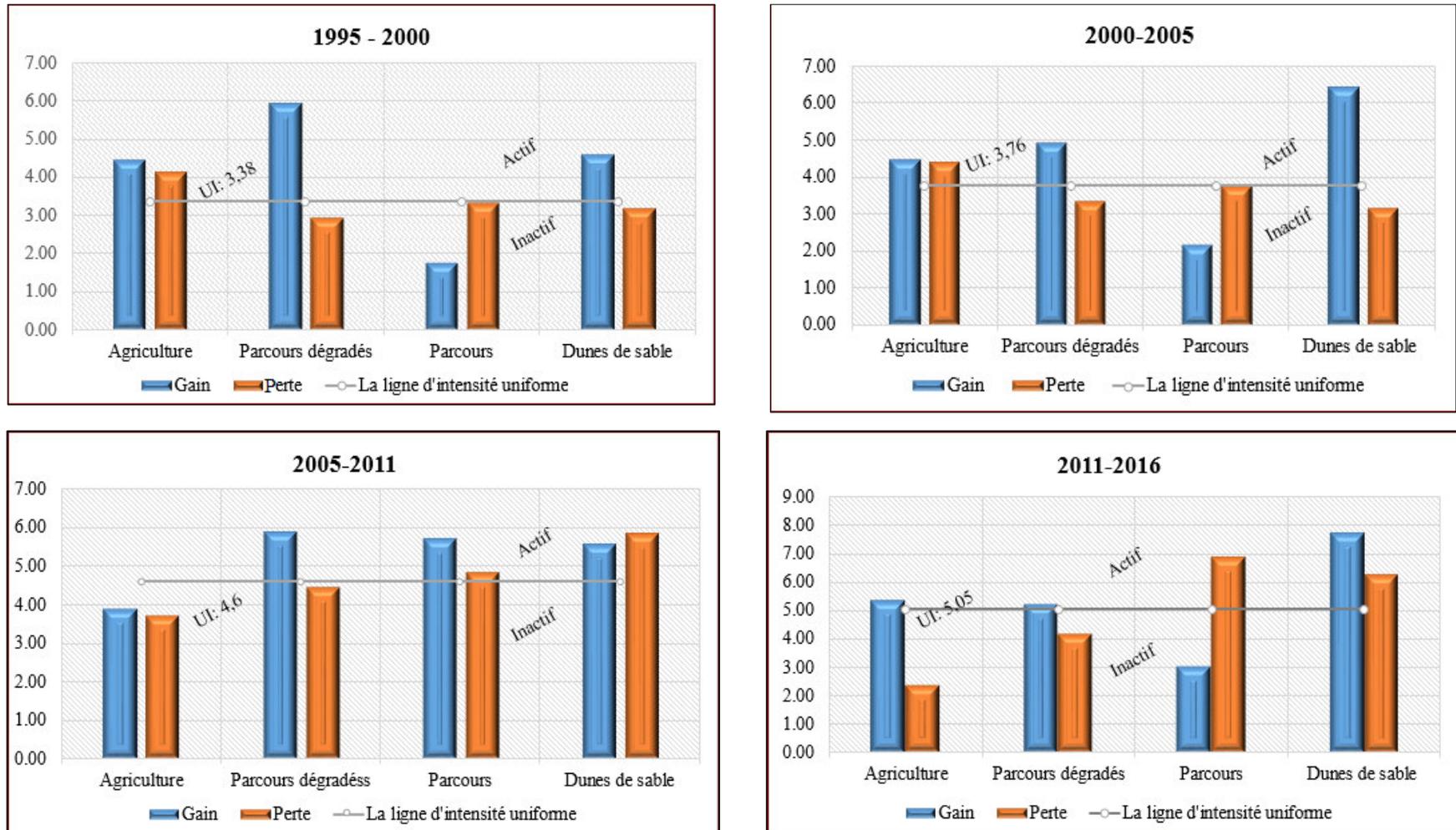


Figure III.18 : Analyse de l'intensité de changement par catégorie d'occupation des terres (1995-2016).

6.4 Analyse de l'intensité de changement au niveau de transition

Au cours du siècle dernier, la région de sud du Hodna a connu un processus de migration de population et de changement d'utilisation des terres (Sebhi, 1987 ; Abdesselam, 2013) révélant par voie de conséquence un changement dramatique de l'occupation des terres. Ainsi, compte tenu de l'influence essentielle des activités humaines sur l'utilisation des terres et le changement de la couverture végétale, nous aborderons dans ce qui suit la transition des catégories de terres entre eux. Nous mettrons un accent particulier sur l'analyse de la transition des parcours vers une désertification.

La figure III.19 illustre la transition des parcours, agriculture, parcours dégradés et les dunes de sable dans les quatre intervalles de temps.

Le niveau de transition examine dans quelle mesure la taille et l'intensité de la transition d'une catégorie varient d'une catégorie à l'autre. Dans les quatre rangées de graphiques suivants (A – D) de la figure III.19, la ligne pointillée horizontale représente la ligne d'intensité uniforme. Si une barre d'intensité se termine au-dessous de la ligne d'intensité uniforme ; la transition évite systématiquement cette catégorie. Si une barre d'intensité dépasse la ligne d'intensité uniforme ; la transition cible systématiquement cette catégorie.

6.4.1 Cas de parcours

La figure III. 19 (A) montre la transition de parcours vers d'autres classe d'occupation des terres. Pour les intervalles de temps 1995-2000, 2000-2005, 2005-2011 et 2011-2016 ; les valeurs de l'intensité uniforme sont de 2,4%, 1,4%, 1,42% et 0,59 % respectivement.

Les résultats montrent que la transition des parcours a ciblé l'agriculture pour les quatre intervalles de temps. Cette transition de parcours vers l'agriculture semble être en relation avec l'extension des zones agricoles suite à l'utilisation de l'aquifère profond en irrigation d'une part et au surpâturage d'autre part. Ce résultat est en accord en partie avec les résultats de Seto et Fragkias (2005) qui ont conclu que la transition de parcours vers l'agriculture est dû principalement à l'utilisation de la majeure partie de la région pour l'agriculture ; par conséquent, l'expansion spatiale de la superficie agricole se produit principalement aux dépens des pâturages.

La transition des parcours vers les dunes de sable est stationnaire entre 0,3 et 1, et elle ne dépasse pas l'intensité uniforme, ce qui montre que la transition de parcours évite le sable dunaire dans la période d'étude.

La transition de parcours vers les parcours dégradés dans la période de 1995-2000 ne dépasse pas l'intensité uniforme, elle est aussi stationnaire dans cette période, par contre et dans les autres intervalles de temps elle dépasse l'intensité uniforme et elle varie entre 1 et 2,5 ; la transition est donc progressive.

6.4.2 Cas de parcours dégradés

L'observation de la figure III. 19 (B) nous permet de faire les constatations suivantes :

- La transition de parcours dégradés vers l'agriculture est stationnaire dans les quatre intervalles de 1995 à 2016, elle ne dépasse pas l'amplitude d'intensité uniforme (0,1 à 0,5).
- La transition de parcours dégradés vers le sable dunaire a dépassé l'intensité uniforme (2,2 et 4,5), elle est donc progressive dans le temps.
- La transition de la classe de parcours dégradés vers les parcours a dépassé l'intensité uniforme dans les quatre intervalles de temps (2 et 9,8), elle est donc progressive dans le temps.

6.4.3 Cas de l'agriculture

L'examen de la figure III. 19 (C) montre les faits suivants :

- La transition de l'agriculture vers les parcours est progressive dans les quatre intervalles de temps.
- La transition de l'agriculture vers le sable dunaire dans la période de 1995-2000 et 2000-2005 ne dépasse pas l'intensité uniforme, elle est donc stationnaire, par contre dans le troisième et le quatrième intervalle la transition de l'agriculture cible le sable.
- La transition de l'agriculture vers les parcours dégradés est stationnaire dans la période de 1995-2005 et progressive dans la période de 2005-2016.

6. 4.4 Cas de dunes de sable

De la figure III. 19 (D) on peut tirer les conclusions suivantes :

- La transition de la classe de dunes de sable vers les parcours dégradés est progressive dans les quatre intervalles de temps.
- La transition vers l'agriculture est progressive dans les intervalles de 2000 à 2005 et de 2011 à 2016 et stationnaire dans les intervalles de 1995 à 2000 et de 2005 à 2016.
- La transition vers les parcours est progressive dans les intervalles de 2005 à 2011 et de 2011 à 2016.

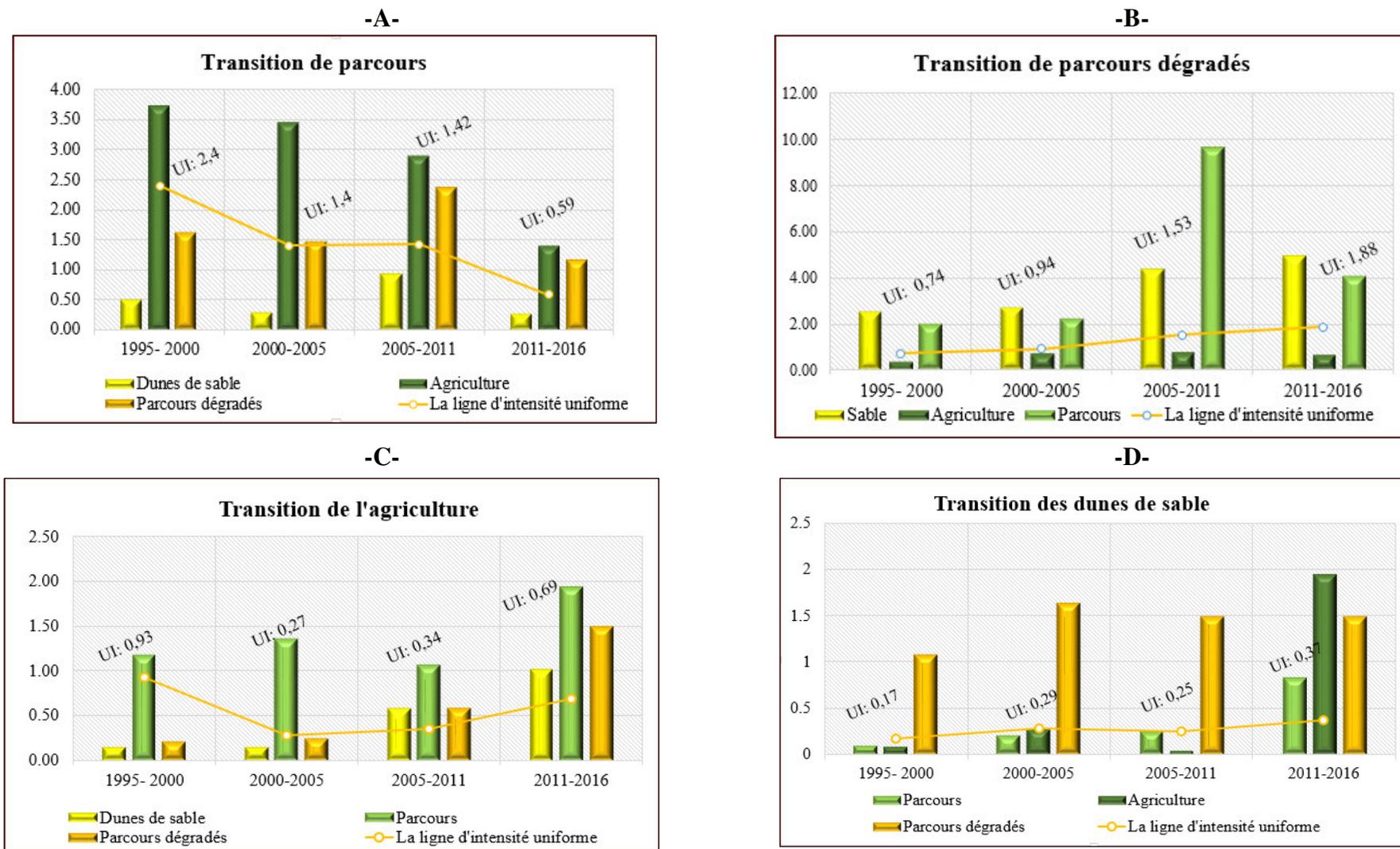


Figure III.19 : Analyse de l'intensité de transition par catégorie d'occupation des terres (A : Parcours ; B : Parcours dégradés ; C : Agriculture ; D : Dunes de sable) entre 1995 et 2016.

6.5 Analyse de trajectoire de changement entre 1995 -2016

Les résultats très pertinents trouvés lors de l'étude de changement spatio-temporel de l'occupation des terres nous ont incités à détailler les modalités des changements pour établir une trajectoire de changements au cours de la période étudiée.

Pour établir la trajectoire de changement, toutes les images classifiées ont été intégrées dans un SIG en utilisant le modèle « **Intersection** » dans le logiciel ArcGIS basées sur les tableaux croisés (Tableau III.5, 6, 7 et 8).

La figure III. 20 montre la trajectoire de changement des classes d'occupation des terres et son évolution au cours de la période étudiée.

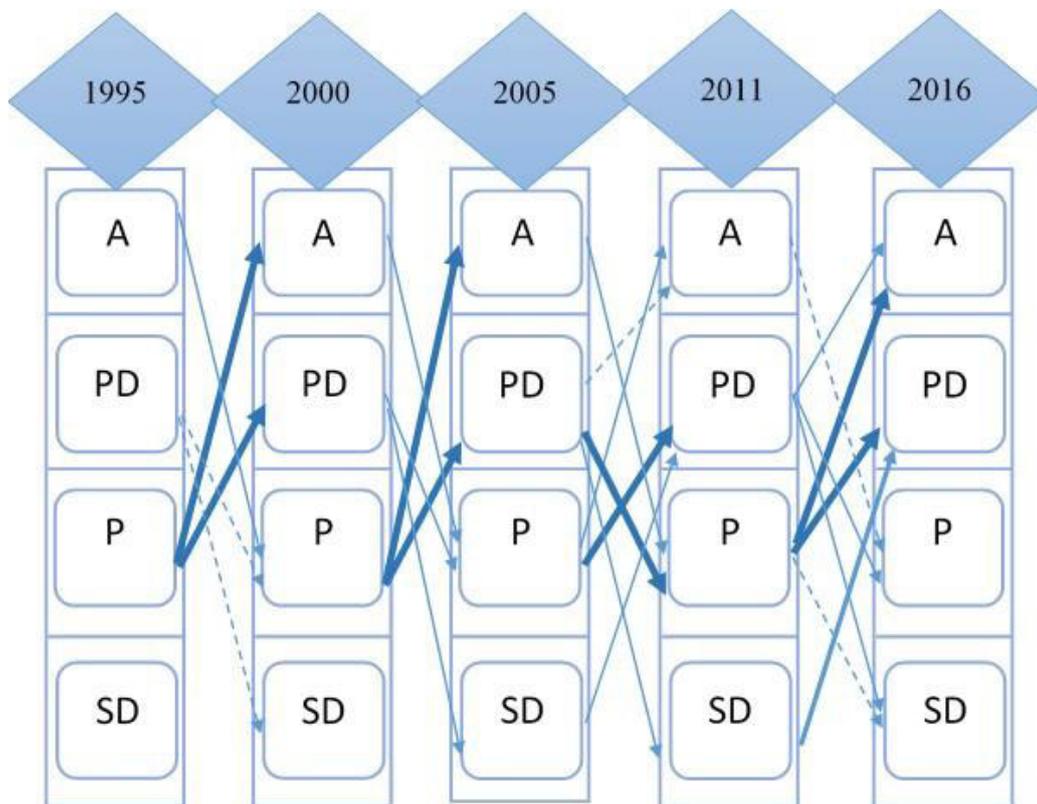


Figure III.20 : Trajectoires de changement d'occupation des terres majeur identifiées pour la zone d'étude, A= Agriculture ; PD= Parcours dégradés ; P=Parcours ; SD= Sable dunaire. (Les lignes épaisses correspondent à une variation nette > 40 Km², les lignes intermédiaires correspondent à des variations nettes comprises entre 20- 40 Km² et les lignes fines correspondent à une variation nette < 20 km². (Seules les surfaces de conversion > 10 km² sont représentées).

Pour analyser la trajectoire de l'occupation des terres vers la désertification ; toutes les trajectoires possibles de changement sont illustrées (Tableau III.4). Nous avons classé les trajectoires dans trois classes génériques, à savoir inchangé, changement dite négatif qui pourraient potentiellement conduire à la désertification et changement dite positif qui ne sembleraient pas l'engendrer.

➤ **Les modifications attribuées à la catégorie, dite "négatif"**

- Augmentation des parcours dégradés ;
- Evolution des zones sableuses.

➤ **Les modifications attribuées à la catégorie, dénommée "positif"**

- Augmentation de la zone agricole ;
- Augmentation des parcours.

Il convient de noter que les principales contributions au changement net étaient la conversion des parcours en parcours dégradés et de terre agricole dans la période entre 1995 et 2016. La conversion de cette classe était P -> PD par environ 204,06 Km² et de P -> A par environ 94,62 Km².

En conséquent, un grand nombre de changements appartenait à la catégorie de changement négatif (40 %). Environ 289,68 Km² des zones changées ayant entraîné la désertification de la région d'étude.

Tableau III.4 : Trajectoire de changement des classes d'occupation des terres (1995-2016).

Description de classe	Exemple de trajectoire	Surface
Pas de changement	P → P	148,48
Pas de changement	A → A	90,06
Pas de changement	SD → SD	23,47
Pas de changement	PD → PD	86,5
Changement positif	S → PD	11,06
Changement positif	PD → P	8,55
Changement positif	PD → A	13,36
Changement positif	P → A	94,62
Changement négatif	PD → S	23,52
Changement négatif	P → PD	204,06
Changement négatif	P → S	40,17
Changement négatif	A → P	21,93

Tableau III.5 : Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (1995-2000).

		Occupation/utilisation des terres 2000				
		Agriculture	Parcours dégradés	Parcours	Dunes de sable	Total
Occupation/ utilisation des terres 1995	Agriculture	89,60	3,64	38,90	0,92	133,07
	Parcours dégradés	2,31	101,60	16,84	11,18	131,93
	Parcours	45,44	78,12	359,94	3,85	487,34
	Dunes de sable	0,46	7,41	1,55	28,20	37,62
	Total	137,81	190,77	417,22	44,16	789,96

Tableau III.6 : Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2000-2005).

		Occupation/utilisation des terres 2005				
		Agriculture	Parcours dégradés	Parcours	Dunes de sable	Total
Occupation /utilisation des terres 2000	Agriculture	89,65	7,58	37,50	3,08	137,81
	Parcours dégradés	3,90	139,96	22,27	24,64	190,77
	Parcours	44,74	73,18	292,44	6,87	417,22
	Dunes de sable	0,56	9,40	1,04	33,15	44,16
	Total	138,85	230,11	353,25	67,75	789,96

Tableau III.7 : Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2005-2011).

		Occupation/utilisation des terres 2011				
		Agriculture	Parcours dégradés	Parcours	Dunes de sable	Total
Occupation/ utilisation des terres 2005	Agriculture	98,28	8,27	31,77	0,52	138,85
	Parcours dégradés	10,62	149,37	43,03	27,10	230,11
	Parcours	29,76	97,42	218,98	7,10	353,25
	Dunes de sable	3,12	23,17	5,01	36,44	67,75
	Total	141,78	278,23	298,79	71,16	789,96

Tableau III.8 : Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2011-2016).

		Occupation/utilisation des terres 2016				
		Agriculture	Parcours dégradés	Parcours	Dunes de sable	Total
Occupation /utilisation des terres 2011	Agriculture	115,61	6,72	15,83	3,62	141,78
	Parcours dégradés	32,63	186,53	25,88	33,20	278,23
	Parcours	45,80	96,39	136,95	19,64	298,79
	Dunes de sable	5,76	27,76	1,64	36,00	71,16
	Total	199,80	317,40	180,29	92,46	789,96

Conclusion

Ce chapitre est consacré principalement à l'intégration des données satellitaires au sein d'un système d'information géographique pour la détection des changements d'occupation/utilisation des terres dans le sud du Hodna pendant une période de 21 ans. L'étude a utilisé une comparaison post-classification après la préparation des cartes classifiées à l'aide du logiciel ENVI 5.3.

Les principales conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- Plus de la moitié des parcours de sud du Hodna ont été dégradés ; les causes de cette dégradation sont en relation directe avec l'anthropisation de ce milieu (extension de l'agriculture et le surpâturage) qui amplifient les facteurs naturels ou climatiques (sécheresse, aridité).
- Les zones agricoles ont continué d'augmenter en raison des politiques agricoles des dernières décennies.
- Le phénomène de l'ensablement a augmenté ces dernières années avec un changement profond de l'écosystème steppique, ce qui explique l'augmentation des surfaces sableuses.
- Les résultats de l'analyse de l'intensité montrent que le taux de variation de l'utilisation des terres de 2011 à 2016 a été plus rapide que les taux des autres intervalles.
- Les gains des parcours dégradés ont été importants entre 1995-2011 alors que les gains de sable dunaire ont été importants entre 2000-2016.
- Les pertes des parcours et de sable ont été importantes entre 2005-2011 et entre 2011-2016.
- La transition de parcours vers l'agriculture est très importante pendant toute la période étudiée.
- Les principales contributions au changement net étaient la conversion des parcours en parcours dégradés et de terre d'agriculture dans la période entre 1995 et 2016.
- Cette étude a montré l'efficacité des images Landsat et des techniques du SIG dans la détection des changements intervenus dans le sud du Hodna.
- La détection et le suivi des changements d'occupation/utilisation des terres aident à comprendre l'impact des politiques passées et le rôle de nombreux facteurs tels que les activités humaines dans les changements environnementaux. D'un autre côté, cela

pourrait également contribuer à l'avenir en améliorant la gestion et la planification des politiques dans cette région.

➤ Les résultats de l'analyse de changement et les cartes réalisées constituent un support de base pour les études d'aménagement dans le milieu steppique.

Chapitre IV

**Evaluation de la
sensibilité à la
désertification à l'aide
d'un SIG et d'une
analyse multicritère de
décision**

Chapitre IV

Evaluation de la sensibilité à la désertification à l'aide d'un SIG et d'une analyse multicritère de décision

Introduction

Les steppes algériennes sont soumises à des pressions anthropiques importantes dont dépendent fortement les phénomènes, parfois irréversibles, de désertification et de dégradation des terres. La carte de sensibilité à la désertification de cet espace établie par la Direction Générale des Forêt en 1997 indique que 5 % de la superficie est désertifiée, 15 % très sensible, 25 % sensible à la désertification, soit un total de 45 % de terres dans un processus de dégradation assez avancée et souvent irréversible. Ce constat assez alarmant incite à un contrôle et un suivi de l'évolution de la désertification.

Le sud du Hodna est considéré comme une zone représentative des problèmes environnementaux typiques du milieu steppique, et elle nécessite un suivi permanent à travers l'élaboration d'une cartographie rapide permettant de faire des bilans quantitatifs et qualitatifs du milieu.

Afin d'augmenter les capacités d'analyse spatiale et décisionnelle dans un SIG, plusieurs chercheurs adoptent des modèles pour cartographier la sensibilité à la désertification. Les progrès technologiques dans les données spectrales de la Seconde Guerre mondiale jusqu'au milieu des années 1960 ont incité les scientifiques à utiliser ces données et à explorer leurs applications (Cohen et Goward, 2004).

Dans ce chapitre, l'approche d'intégration des méthodes d'analyse multicritères et les systèmes d'information géographique à utilisé pour évaluer les situations critiques au risque de la désertification dans le sud du Hodna en utilisant des indices spectraux des images satellitaires Landsat. Cette approche constitue un outil d'aide à la décision en permettant la localisation spatiale des zones prioritaires de planification des projets de lutte contre ce risque majeur. Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- Utiliser les techniques d'analyse multicritères (AMCD) pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification basée sur des indices spectraux des données satellitaires ;
- Déterminer la distribution spatiale de la désertification ;
- Analyser l'évolution spatio-temporelle de la désertification ;

- Faire une vérification de l'exactitude en se référant aux données de terrain.

1. Démarche méthodologique

Récemment, les indicateurs physiques et biophysiques ont été intégrés pour l'évaluation quantitative de la sensibilité à la désertification (Pan et Li, 2013). Dans ce cadre, notre démarche repose sur l'utilisation des indices spectraux de la télédétection pour une analyse multicritères de décision intégrée aux systèmes d'information géographique (Figure IV.1).

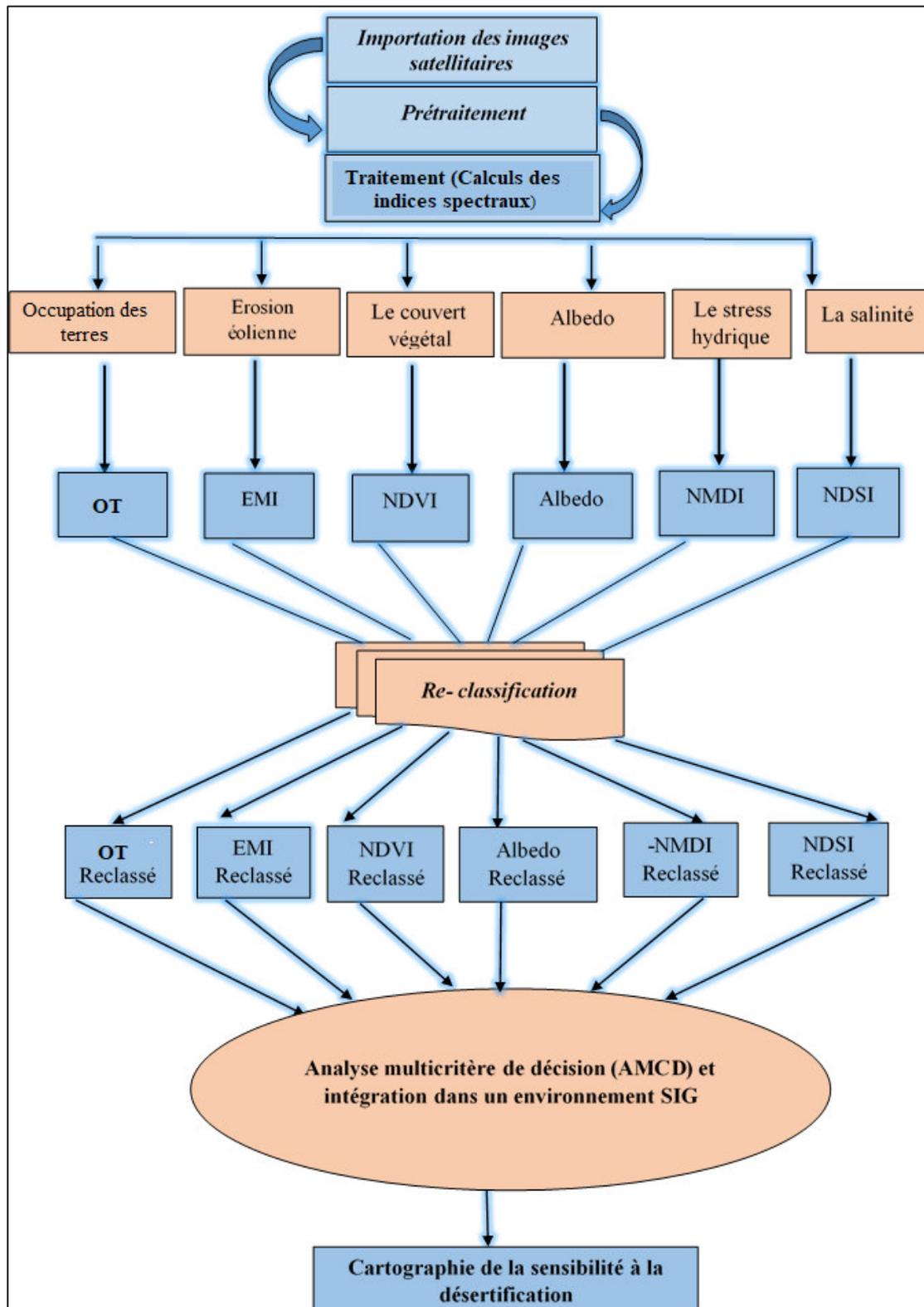


Figure IV.1 : Organigramme méthodologique pour la cartographie de la sensibilité à la désertification.

2. Description du modèle AMCD-SIG

Une analyse multicritère de décision (AMCD) est une analyse décisionnelle qui apporte à la décision plusieurs critères pouvant l'affecter. Ces méthodes ont commencé à émerger au début des années 1970, lorsque des chercheurs des domaines de l'économie et de la prise de décision ont identifié des faiblesses dans la vision néoclassique de la prise de décision et de l'emplacement du site (Carver, 1991).

La raison fondamentale de l'introduction des SIG dans la perspective générale de l'AMCD est d'ajouter des dimensions spatiales au processus de résolution des problèmes (Malczewski, 1999).

Le SIG, en tant que technologie, a évolué à travers trois grands domaines d'application :

- 1) Son utilisation en tant que base de données d'informations pour coordonner et accéder aux données géographiques ;
- 2) Son utilisation en tant qu'outil analytique pour spécifier les relations logiques et mathématiques entre les couches des cartes afin de générer de nouvelles cartes dérivées ;
- 3) Son utilisation en tant que système d'aide à la décision pour décider de la manière dont il faut agir sur les analyses produites (Eastman *et al.*, 1995).

L'AMCD basé sur SIG est peut-être considéré comme un processus combinant des données géographiques (données spatiales) et des jugements de valeur afin d'obtenir des informations pour la prise de décision (Malczewski, 2006), et il peut renforcer les capacités limitées du SIG en matière de stockage et d'analyse de données selon les préférences du décideur (Malczewski et Rinner, 2015).

L'utilisation de l'analyse multicritères de décision en sciences de l'information géographique est largement appliquée et utilisée depuis 1986. Carver (1991) est l'un des chercheurs les plus cités et le premier à appliquer les méthodes AMCD_ SIG (Malczewski 2006).

2.1 Le Processus Analytique de Hiérarchie

Le Processus Analytique de Hiérarchie (AHP), introduit par Thomas Saaty (1980), est un outil efficace pour prendre en charge une prise de décision complexe. Il peut aider le décideur à établir des priorités et à prendre la meilleure décision en réduisant les décisions complexes à une série de comparaisons par paires. En outre, l'AHP incorpore une technique utile pour vérifier la cohérence des évaluations du décideur, réduisant ainsi les biais dans le processus de prise de décision.

L'avantage de l'AHP par rapport aux autres méthodes d'aide à la décision multicritères réside dans le fait qu'il prend en compte les connaissances intuitives du décideur dans la décision analytique (Saaty, 2000).

2.1.1 Comment fonctionne l'AHP ?

L'ensemble de ce processus comprend cinq étapes fondamentales, présentées ci-dessous (Estoque et Murayama, 2014) :

2.1.1.1 Étape 1 : Modélisation du problème

Cette étape a été considérée comme l'aspect le plus important de l'AHP (Zahedi, 1986), elle consiste à énoncer le problème, à en élargir les objectifs en prenant en compte tous les acteurs, les objectifs et les résultats correspondants, ainsi que l'identification d'éléments de décision tels que les alternatives et les critères ou règles de décision. Les éléments de décision doivent être mis en place dans une hiérarchie d'éléments de décision interdépendants constituant l'objectif, les critères, les sous-critères et les alternatives (Vaidya et Kumar, 2006).

2.1.1.2 Etape 2 : Détermination des priorités parmi les éléments de décision de la hiérarchie

Cette étape implique la participation d'experts à la détermination de l'importance relative d'un critère ou d'une alternative par rapport à un autre par le biais d'une méthode de comparaison par paires présentée dans une matrice (Tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Échelle numérique de SAATY (1977) comparaison par paire des critères.

Degrés d'importance	Expression d'un critère par rapport à un autre
1	Importance égale des deux critères
3	Un critère est un peu plus important que l'autre
5	Un critère est plus important que l'autre
7	Un critère est beaucoup plus important que l'autre
9	Un critère est absolument plus important que l'autre
1/3	Un critère est un peu moins important que l'autre
1/5	Un critère est moins important que l'autre
1/7	Un critère est beaucoup moins important que l'autre
1/9	Un critère est absolument moins important que l'autre

2.1.1.3 Étape 3 : Calcul des poids relatifs globaux des éléments de décision

Dans cette étape en calculant les valeurs normalisées pour chaque critère et chaque alternative, et en déterminant les vecteurs propres principaux ou vecteurs de priorité normalisés (poids relatifs). Lors du calcul des valeurs normalisées pour chaque critère et alternative dans leurs matrices respectives, la valeur de chaque cellule est divisée par son total de colonnes. Ce processus génère un total de colonnes de 1 pour chaque critère et chaque alternative. Les poids relatifs sont ensuite calculés en faisant la moyenne des lignes de chaque matrice.

Les valeurs obtenues donnent les poids relatifs des critères par rapport à l'objectif et les poids relatifs des alternatives par rapport aux critères. Les poids relatifs globaux des alternatives sont déterminés en calculant la combinaison linéaire du produit entre le poids relatif de chaque critère et le poids relatif de la variante pour ce critère (Saaty, 1980 ; Zahedi, 1986 ; Forman et Gass, 2001).

2.1.1.4 Étapes 4 et 5 : Vérification de la cohérence des jugements et tirage des conclusions en fonction des résultats

Ces étapes sont nécessaires pour déterminer la cohérence de l'évaluation en calculant le ratio de cohérence (RC) avant qu'une décision ne soit prise. Si le problème à l'examen visait à sélectionner la meilleure alternative, les RC de toutes les matrices (c'est-à-dire les critères et les alternatives) sont calculés avant de calculer les poids relatifs globaux des alternatives. Le RC d'une matrice particulière est déterminé en utilisant les équations (1) et (2).

Saaty (1980) suggère que si le rapport dépasse 0,1, l'ensemble des jugements peut être trop incohérent pour être fiable. Ainsi, un RC inférieur à 0,1 ou 10% est acceptable.

Lorsque l'évaluation est incohérente, la procédure est répétée jusqu'à ce que le RC se situe dans la plage souhaitée. Les décideurs parviennent ensuite à une conclusion basée sur les résultats.

$$RC = IC / IA \quad (1)$$

$$IC = \lambda_{\max} - n / n - 1 \quad (2)$$

Où RC est le rapport de cohérence, IC est l'indice de cohérence, IA est l'indice de consistance aléatoire, λ_{\max} est la valeur propre principale ou la somme des produits entre chaque élément de la pondération relative et le total de leur colonne correspondante dans une matrice particulière, et n est le nombre d'éléments (c.-à-d. le nombre de critères ou d'alternatives). Le IA développé par Saaty (1980) est présenté dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Les valeurs de l'indice de cohérence aléatoire (IA) (Saaty 1980).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

3. Données utilisées

Au fil des années, de nombreux indices spectraux ont été introduits par la communauté scientifique pour résoudre des problèmes environnementaux complexes. Seules quelques études ont été rapportées sur l'utilisation des indices spectraux dans l'évaluation de la désertification dans la steppe algérienne (Benhanifia *et al.*, 2004 ; Benslimane *et al.*, 2008 ; Benguerai, 2011).

Pour notre étude, nous avons choisi les indices les plus connus représentatifs du phénomène de la dégradation des terres et de la désertification des données satellitaires gratuites issus du Programme Landsat USGS / NASA (Landsat 8 OLI, Landsat 5 TM).

3.1 Choix des images satellitaires

Deux images satellitaires TM de Landsat 5 pour les années (1995, 2005), et une image OLI Landsat 8 pour l'année (2016) couvrant l'ensemble de la zone d'étude ont été sélectionnées comme source d'information de base.

3.2 Prétraitement des images satellitaires

Tout d'abord, nous avons géo-référencé les trois images dans ENVI 5.3, en utilisant le système WGS 84 avec la projection UTM Nord, fuseau 31. Ensuite, nous les avons calibrées et corrigées pour éliminer les influences atmosphériques. Extraction de la zone d'étude des trois images satellitaires a été réalisée en prenant des limites géographiques géo-référencées de sud du Hodna (Cf. chapitre III).

3.3 Description des indices spectraux utilisés

Différents indices spectraux ont été vérifiés dans la région de sud du Hodna et ils ont été utilisés pour cette étude « NDVI, NDSI, NMDI, Albédo et EMI ».

Les équations de ces indices sont reportées dans le tableau IV.3 et détaillées dans les paragraphes suivants :

3.3.1 L'Albedo terrestre

L'Albedo terrestre est un indicateur important du bilan énergétique et de l'évolution des conditions micro-météorologiques telles que la température, l'aridité et l'humidité des terres affectées par la désertification (Jackson *et al.*, 1975 ; Li *et al.*, 2000). Certaines études ont montré que l'augmentation de l'albedo de la surface du sol implique une dégradation de la qualité de celui-ci (Riobinove *et al.*, 1981).

Dans cette étude, nous avons utilisé l'Albedo à large bande, déterminé par la combinaison d'un Albedo à bande étroite, pour évaluer les conditions micro_météorologiques à la surface du sol. L'albedo à bande étroite pour chaque bande (à l'exception de la bande six pour Landsat TM / ETM +) des images Landsat a été déterminé à l'aide de la méthode de soustraction d'objet sombre (Chavez, 1988, 1996). L'albedo à large bande a ensuite été calculé en fonction de sa relation avec chaque bande étroite (Musick, 1986 ; Liang, 2001 ; Smith, 2010).

3.3.2 Indice de salinité par différence normalisée (NDSI)

La cartographie précise de la salinité du sol au moyen de techniques de la télédétection est un domaine de recherche actif au cours des dernières décennies, en particulier pour les terres agricoles (Abuelgasim et Ammad, 2019). L'indice de salinité NDSI est dérivé de l'image satellitaire en utilisant la bande Rouge et Proche Infra-Rouge. En général, les valeurs de NDSI varient de -1 à +1, ou les valeurs négatives coïncident avec les zones non salées, par contre, les valeurs positives représentent les zones salées (Khan *et al.*, 2005).

3.3.3 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

C'est l'un des indices les plus couramment utilisés pour l'extraction de la couverture végétale. Le NDVI est basé sur la réflectance rouge et PIR du sol (Rousel, 1974). Il est calculé en prenant le rapport des bandes rouge et PIR à partir des données de télédétection. Les valeurs de NDVI varient entre -1 (masse d'eau et neige) et +1 (couverture totale de la végétation). Le NDVI a été utilisé dans plusieurs études comme indicateur du suivi de la désertification dans les zones arides (Gillespie *et al.*, 2019).

3.3.4 Indice de sécheresse multi-bande normalisée (NMDI)

Indice de sécheresse multi-bande normalisé (NMDI), est proposé pour surveiller l'humidité du sol et de la végétation. Cet indice est proposé en utilisant trois longueurs d'onde, une dans le proche infrarouge centré approximativement à 860 nm et deux dans le SWIR centré respectivement à 1640 nm et 2130 nm. Pour un sol nu, des valeurs plus élevées du NMDI indiquent une sécheresse du sol de plus en plus grave. En revanche, pour les zones à forte

végétation, des valeurs de NMDI plus basses indiquent une sécheresse plus faible de la végétation (wang et Qu, 2007).

3.3.5 Indice de cartographie éolien (EMI)

EMI est un indice qui utilise les bandes spectrales rouge et proche infrarouge pour générer une méthode simple et pratique d'analyse et de cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion éolienne. Les bandes spectrales proche infrarouge (PIR) et rouge (R) combinées au rapport rouge / proche infrarouge (R / PIR) ont été utilisées, respectivement, en tant que composants RVB pour la création d'un composite couleur (PIR - R - R / PIR). Cet indice a été appliqué pour l'analyse afin d'évaluer l'érosion éolienne et la détection de dépôts éolienne (Khiry, 2007).

3.3.6 L'occupation des terres

La carte d'occupation des terres a été créée en format raster dans Envi 5.3, puis elle est classée en quatre classes : agriculture, parcours, parcours dégradés et dunes de sable, puis exportée dans un environnement SIG. Les quatre classes d'occupation des terres ont été reclassées en fonction de leur sensibilité à la désertification.

Tableau IV.3 Indices dérivés des images satellitaires utilisés pour le modèle.

Numéro	Indice	Equation	Source
1	Albédo	$((0.356*B1) + (0.130*B2) + (0.373*B3) + (0.085*B4) + (0.072*B5) - 0.018) / 1.016$	Smith (2010)
2	NDSI	$R_{PIR} / (R + PIR)$	Khan <i>et al.</i> (2005)
3	NDVI	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	Rousse <i>et al.</i> (1974)
4	NMDI	$\frac{R_{0.86\mu m} - (R_{1.64\mu m} - R_{2.13\mu m})}{R_{0.86\mu m} + (R_{1.64\mu m} - R_{2.13\mu m})}$	Wang and Qu (2007)
5	EMI	$(R - NIR - R/NIR)$	Khiry (2007).

4. Reclassification des indices

La rupture naturelle de Jenks est une méthode de regroupement de données conçue pour déterminer le meilleur arrangement de valeurs dans différentes classes (Becerril-Piña *et al.*, 2016). La méthode cherche à réduire la variance au sein des classes et à maximiser la variance entre les classes, elle a identifié les points limites entre les catégories à l'aide de l'algorithme d'optimisation de Jenks ; cet algorithme regroupe les données en fonction des ruptures inhérentes à celles-ci, ce qui signifie que cette classification ne nécessite pas de données d'apprentissage en entrée, il suffit d'identifier le nombre de classes. Les points où la différence est maximisée sont identifiés et utilisés comme seuils pour chaque catégorie naturelle (Jenks, 1963).

Des classements de 1 à 5 ont été adoptés où les taux 1, 2, 3, 4 et 5 représentent des potentiels de sensibilité à la désertification ; très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible, respectivement selon l'ordre d'influence de la classe. Les classes des couches thématiques pour tous les indices et leurs taux correspondants sont donnés à l'annexe 6.

5. Evaluation de la désertification

Dans cette étape, tous les indices sont combinés et la carte de désertification est obtenue à l'aide de l'équation (1) de Wang (2004).

$$CED = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (1) \quad \text{où:}$$

CED = Carte d'évaluation de la désertification,

W_i = Poids de chaque couche d'informations,

X_i = Carte de chaque couche d'informations.

6. Détermination de niveau de la désertification

Selon les conclusions de la recherche de Ma *et al.* (2011), les valeurs de la désertification peuvent être divisées en cinq niveaux différents ; une désertification très élevée, élevée, moyenne, faible, et une désertification très faible.

7. Détection de changement

Dans ce travail, l'évaluation des changements s'applique à la paire d'images de la désertification « 1995 et 2016 » en utilisant la technique de tableau croisé (Yuan *et al.*, 2005).

8. Validation du résultat de la cartographie de la désertification avec le terrain

Après l'extraction des degrés de la sensibilité à la désertification, une évaluation de la précision a été réalisée à l'aide d'une matrice de confusion (Ait Lamqadem, 2018).

La précision est définie comme le degré auquel la carte construite est en accord avec la vérité de terrain. La précision globale est simplement la proportion de la zone correctement cartographiée. Elle fournit à l'utilisateur de la carte la probabilité qu'un emplacement sélectionné de manière aléatoire sur la carte soit correctement classé. La précision de l'utilisateur est la proportion de la zone cartographiée en tant que catégorie particulière qui est en réalité cette catégorie «sur le terrain», dans laquelle la classification de référence est la meilleure évaluation de l'état du sol. La précision du producteur est la proportion de la zone correspondante à une catégorie particulière sur terrain qui est également cartographié à cette catégorie.

9. Résultats et discussion

9.1 Cartographie des indices

Tous les indices utilisés sont calculés à partir des équations (Tableau IV.3) dans l'ENVI 5.3, puis exporté vers ArcGis 10.3 pour la mise en page. Les figures IV (2-7) représentent les cartes des indices utilisés.

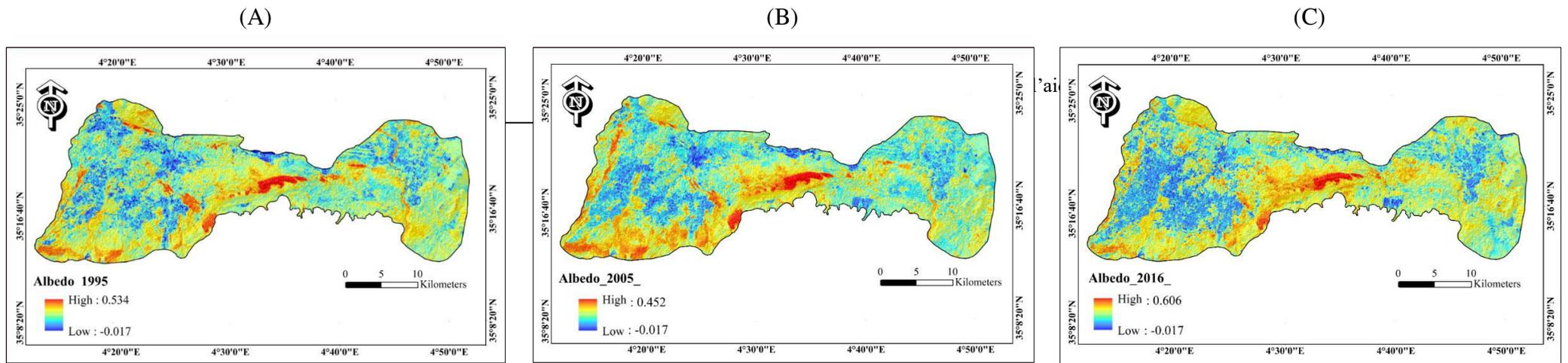


Figure IV.2 : Cartes d'Albedo (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

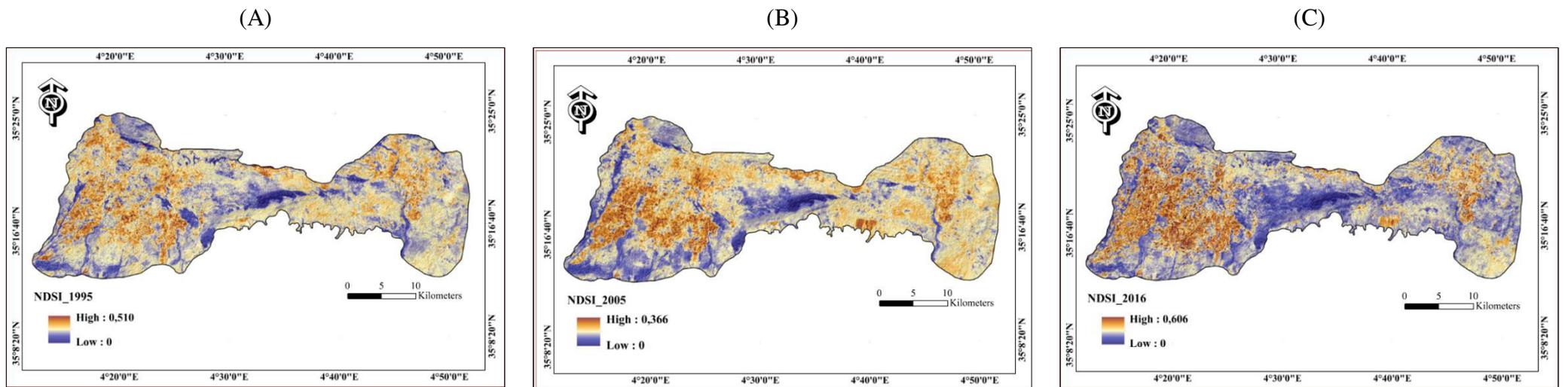


Figure IV.3 : Cartes de l'NDSI (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

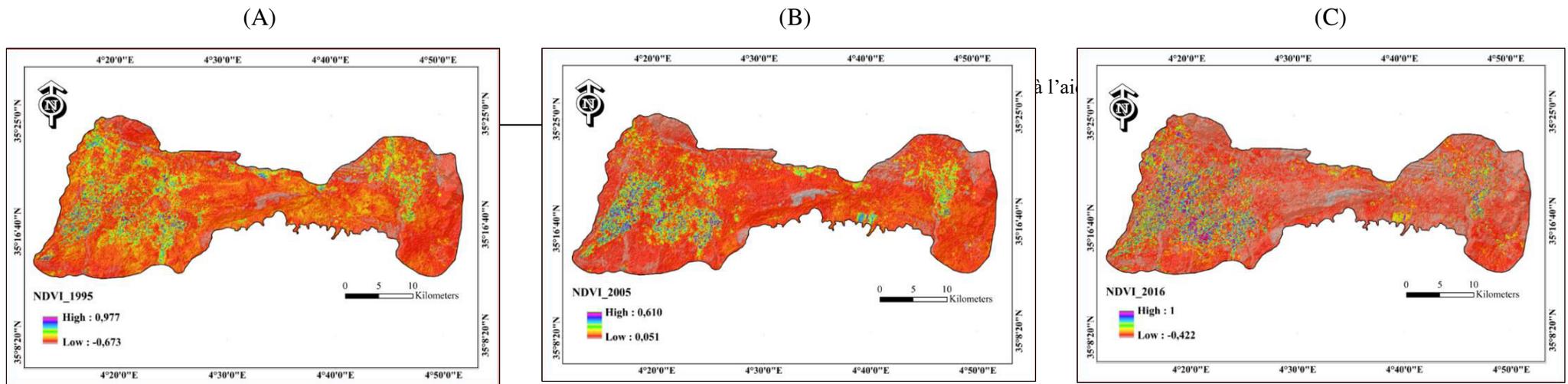


Figure IV.4 : Cartes de l'NDVI (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

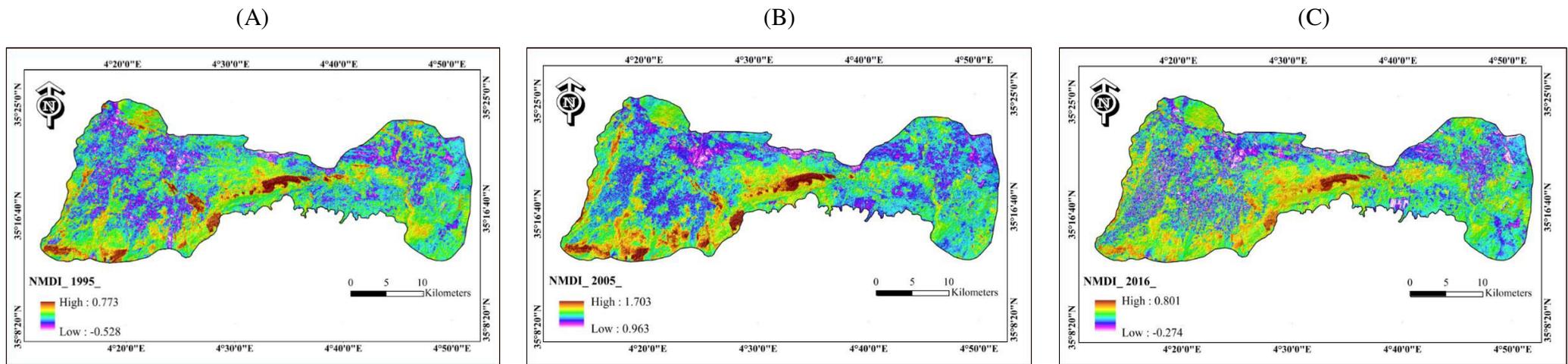


Figure IV.5 : Cartes de l'NMDI (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

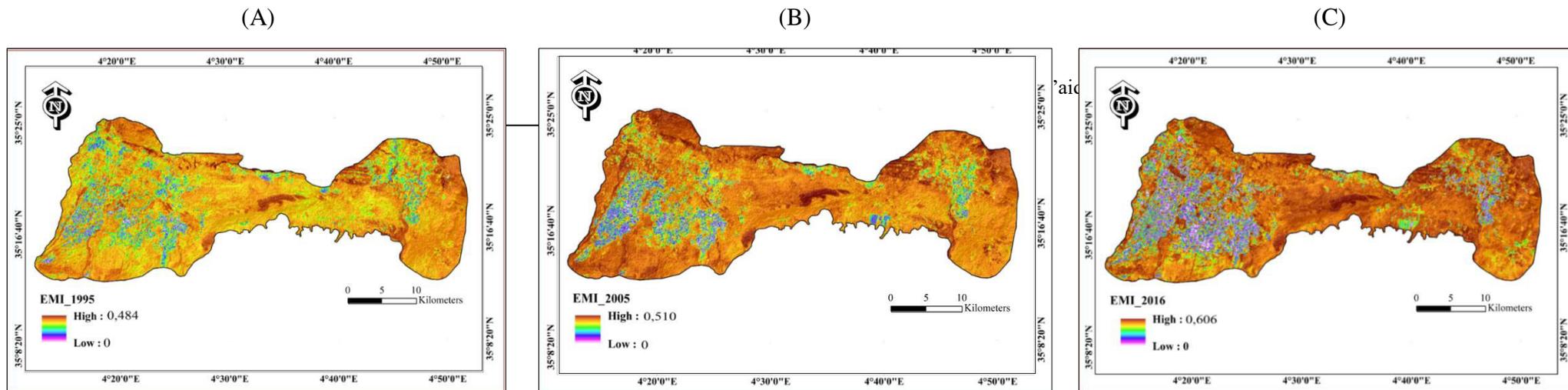


Figure IV.6 : Cartes de l'EMI (A: 1995, B: 2005, C : 2016).

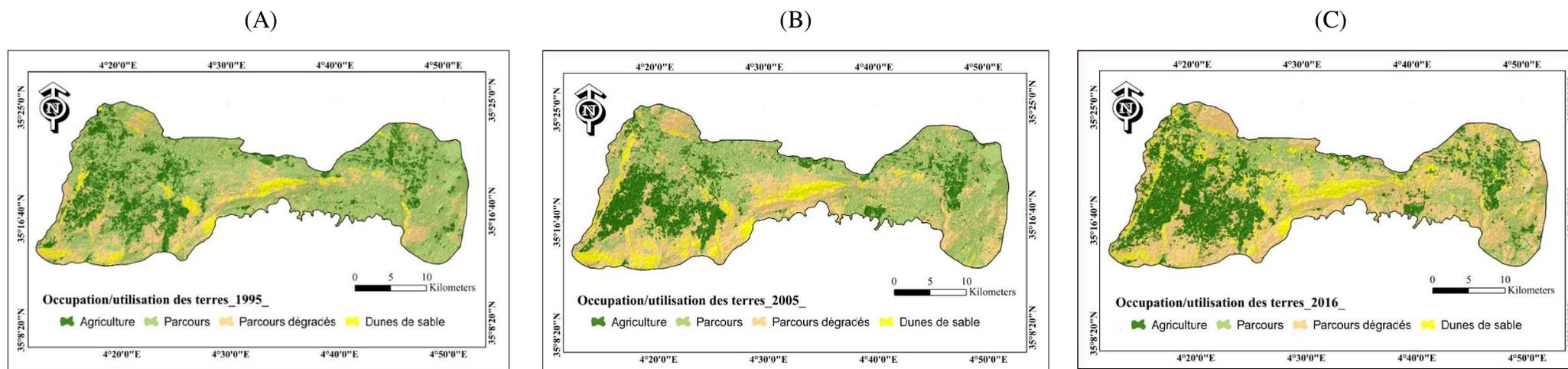


Figure IV.7 : Cartes d'occupation des terres (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

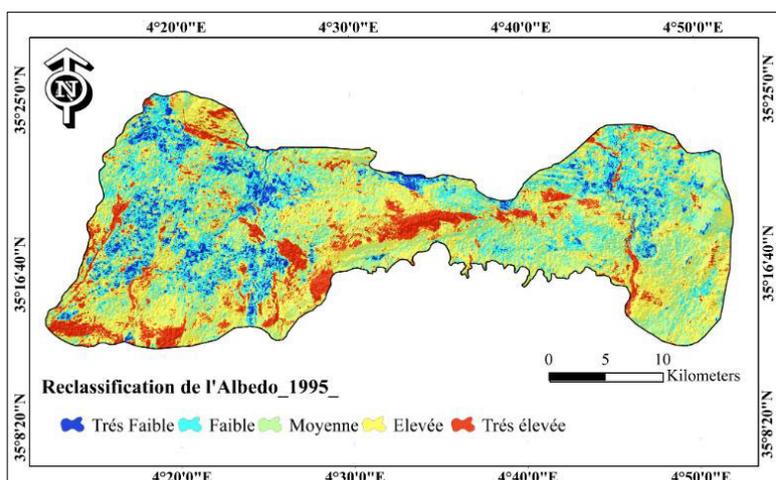
9.2 Reclassification des indices selon la sensibilité à la désertification

9.2.1 L'Albédo terrestre

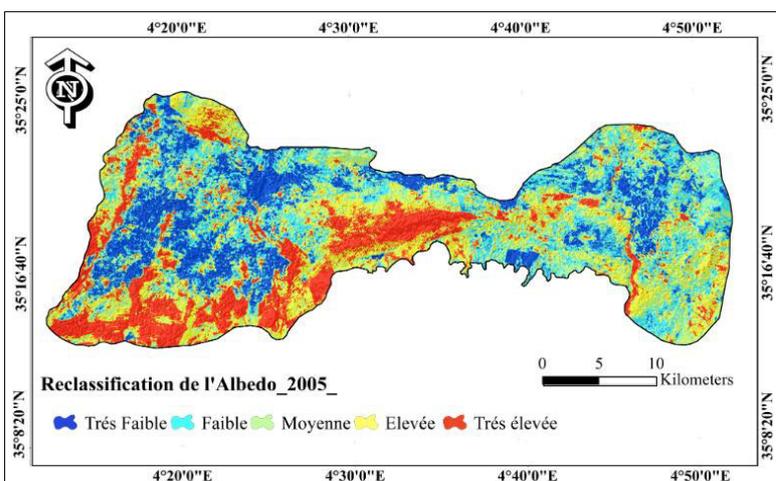
Selon Jackson *et al.* (1975), la désertification est due à une augmentation de l'albédo de surface provoquée par l'utilisation de la végétation par le surpâturage. Selon le même auteur, les sols d'albédo élevés sont dénudés.

Dans notre zone, les valeurs élevées de l'Albédo (0,3 et 0,6) sont généralement des zones désertiques et sont ainsi classées comme zone de sensibilité élevée à la désertification. Par contre, les sols d'Albédo basses sont des zones à végétation relativement dense et sont classées comme zone de sensibilité faible à la désertification (Figure IV.8).

(A)



(B)



(C)

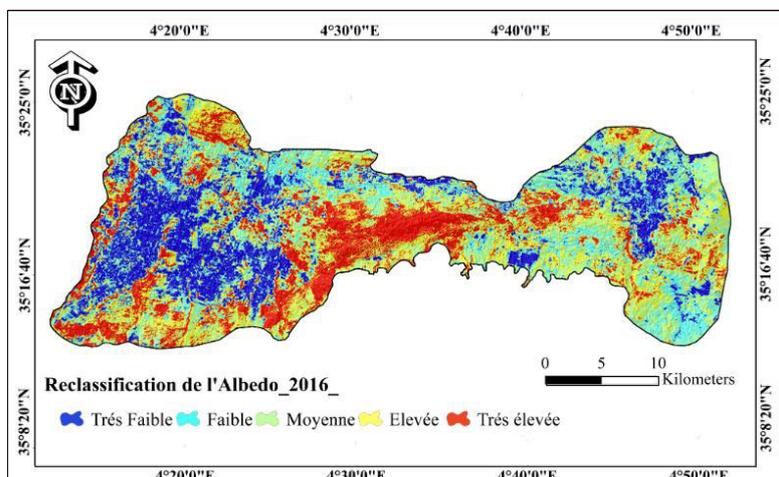
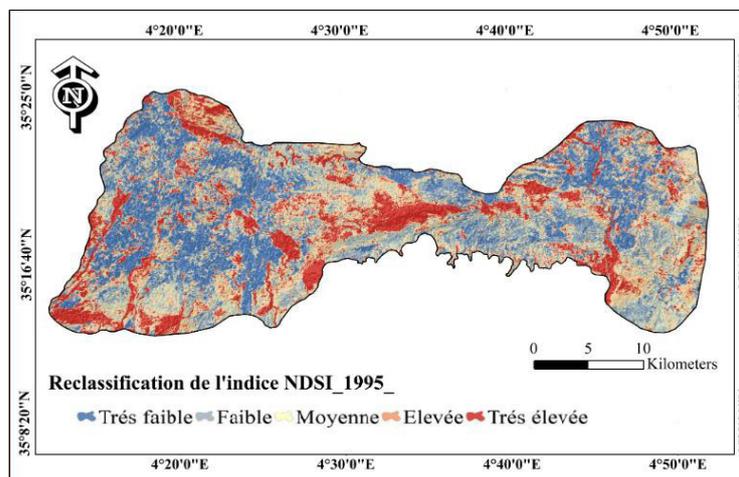


Figure IV.8 : Carte de l'indice d'Albedo reclassé en cinq classes (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

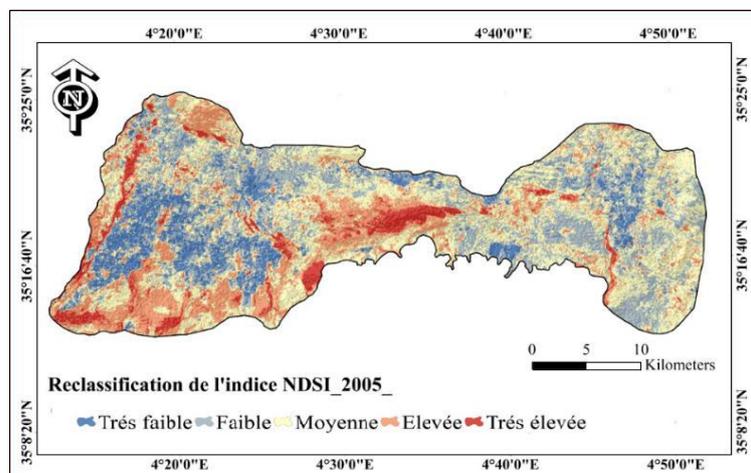
9.2.2 NDSI

En général, la zone d'étude est caractérisée par des taux faibles de salinité. Les taux élevés de salinité dans la zone d'étude concernent les terres agricoles. Cependant, les valeurs faibles caractérisent les zones relativement couvertes par les parcours (Figure IV.9).

(A)



(B)



(C)

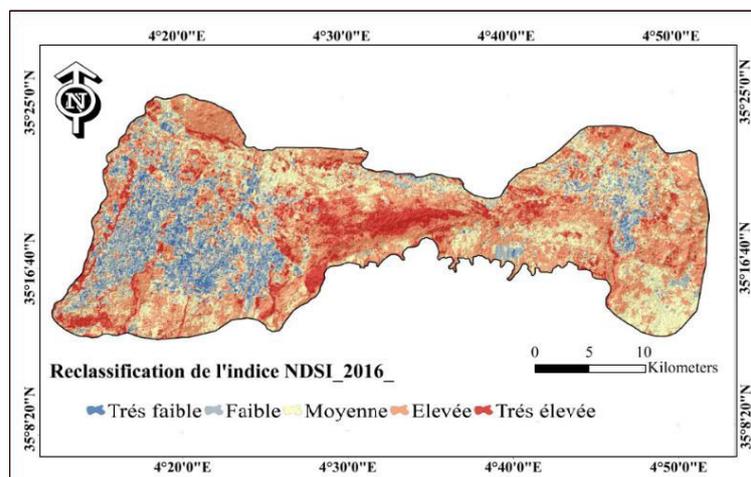
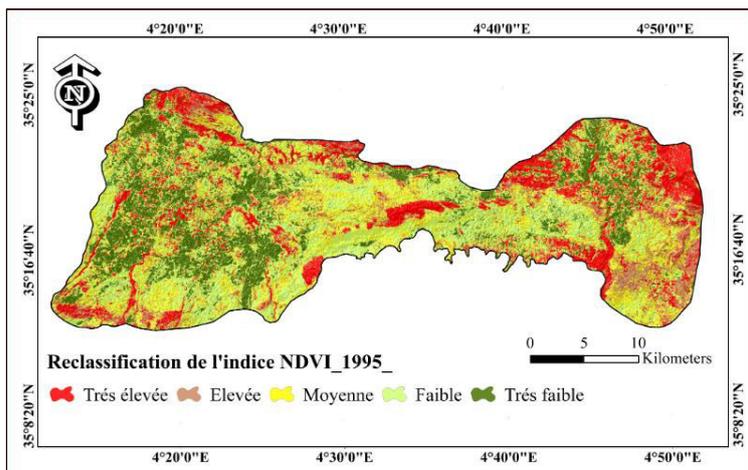


Figure IV.9 : Carte de l'indice NDSI reclassé en cinq classes (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

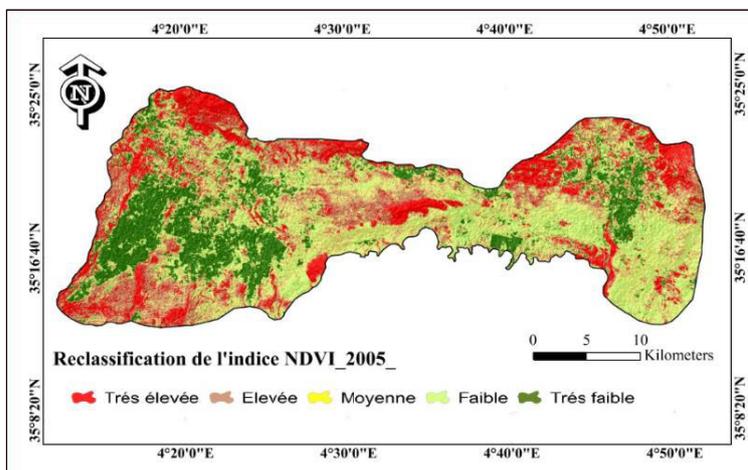
9.2.3 NDVI

La couverture végétale peut modifier de manière significative la valeur de sensibilité à la désertification. Sur l'ensemble des images des trois années, on observe de fortes valeurs de NDVI (de 0,33 à 1) pour les sols à recouvrement végétal élevé « zones agricoles sur des terrains irrigués » (Voir Annexe 6). Les sols recouverts d'une végétation dense sont relativement protégés de l'ensablement et la désertification. Les valeurs de NDVI faibles sont classées comme zone de sensibilité élevée puisqu'elles sont dénudées et présentent un comportement désertique, elle se trouve généralement entre (-0,6 - 0,1) (Figure IV.10).

(A)



(B)



(C)

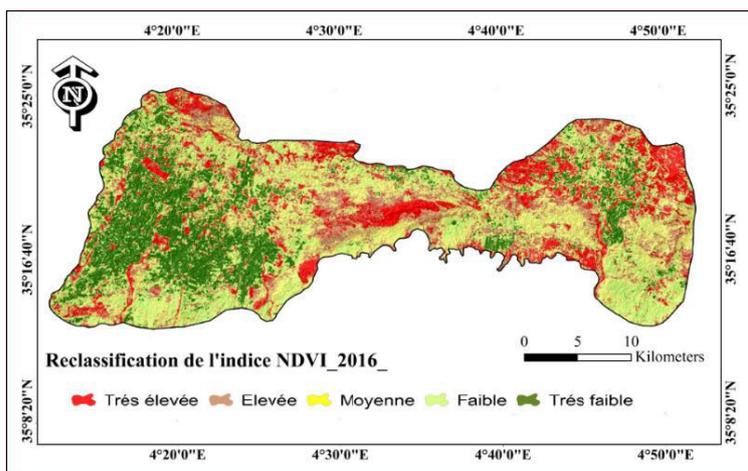


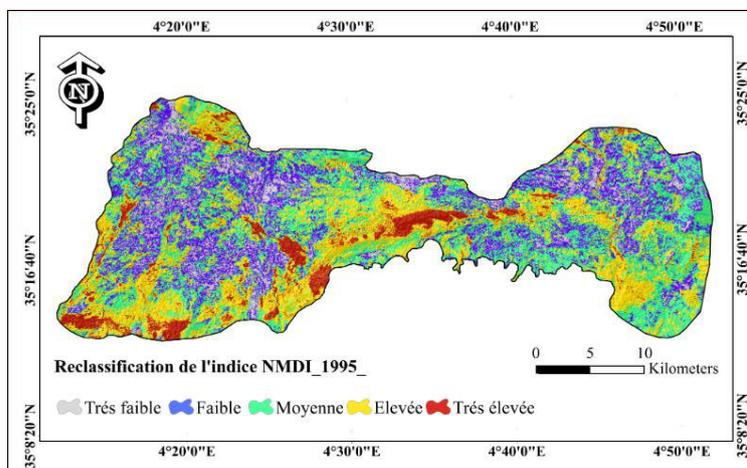
Figure IV.10 : Carte de l'indice NDVI reclassé en cinq classes (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

9.2.4 NDMI

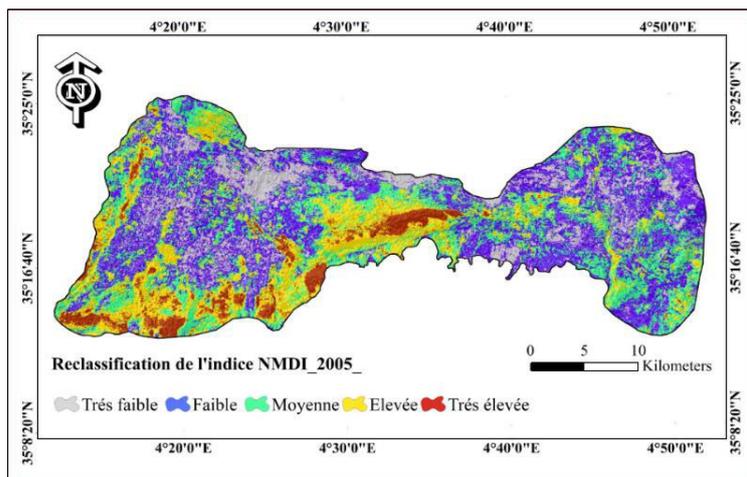
Les valeurs les plus élevées de l'NDMI indiquent une sécheresse du sol de plus en plus importante. L'NDMI qui se situe entre les valeurs de (0,4 et 0, 8) indique un stress hydrique sévère qui s'exerce sur le sol. Plus le NMDI est élevé plus la sécheresse de la végétation et du sol augmente et la terre devienne donc plus sensible à la désertification.

Le rang faible et très faible caractérisent les valeurs qui tendent vers le 0 et qui correspondent aux régions à végétation humide peu sensible à la désertification (Figure IV.11).

(A)



(B)



(C)

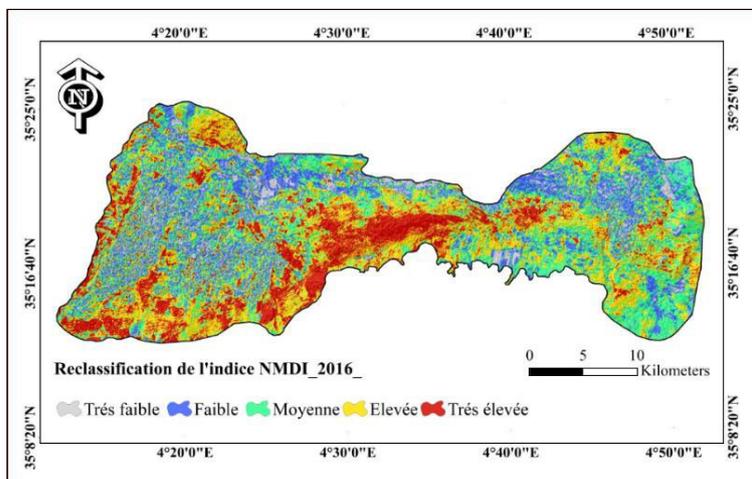


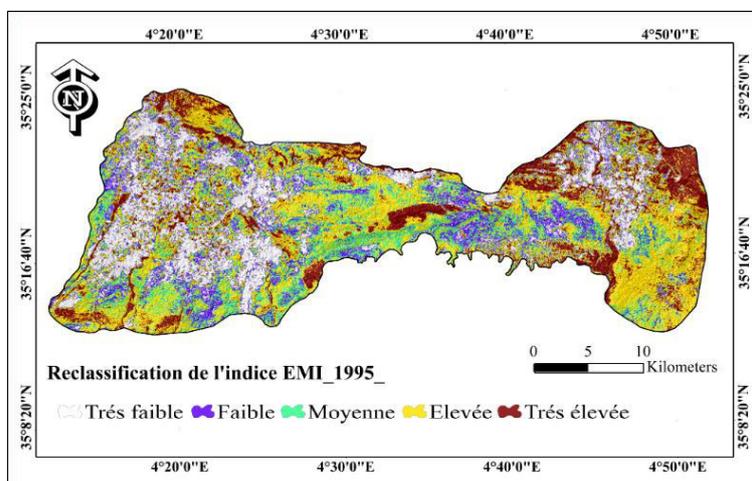
Figure IV.11 : Carte de l'indice NMDI reclassé en cinq classes (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

9.2.5 EMI

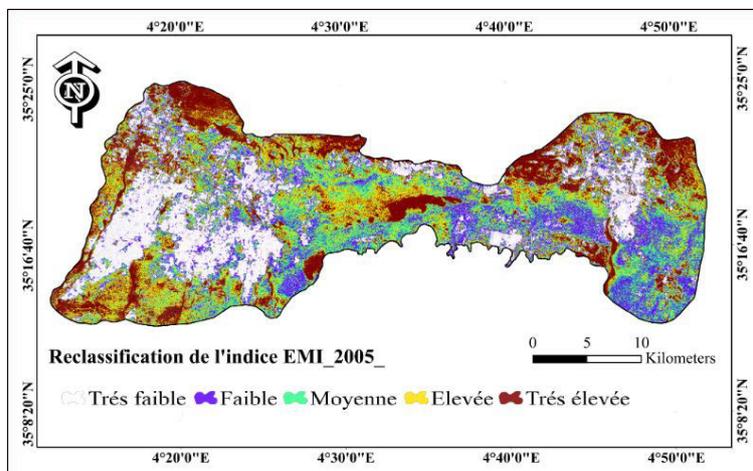
Pour les zones de sensibilité moyenne, les valeurs de l'indice sont réparties entre 0,2 et 0,3 correspondantes au rang de sensibilité moyenne ou les zones sont dénudées à comportement désertique.

Les faibles valeurs d'EMI (0 et 0,2) sont classées dans le rang de sensibilité très faible, et elles indiquent une densité de végétation relativement importante. Les zones sableuses sont classées dans le rang de sensibilité très élevée, l'indice est classé entre (0,3-0,6) (Figure IV.12).

(A)



(B)



(C)

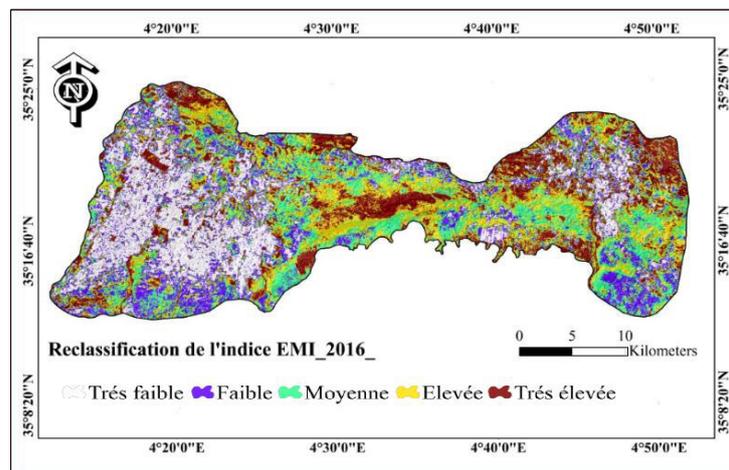


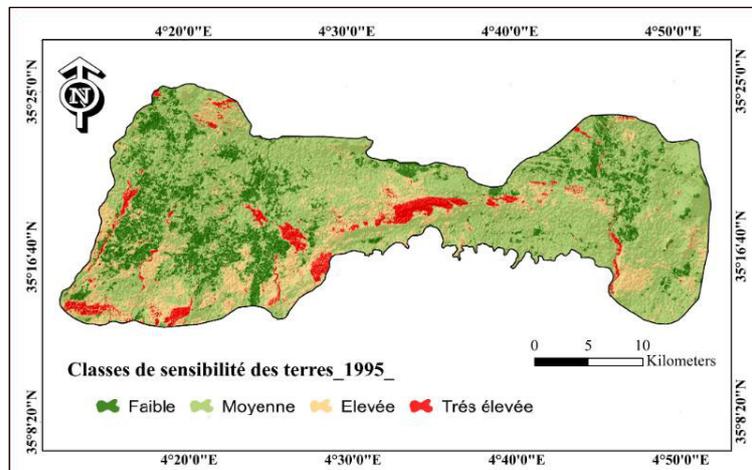
Figure IV.12 : Carte de l'indice EMI reclassé en cinq classes (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

9.2.6 Occupation des terres

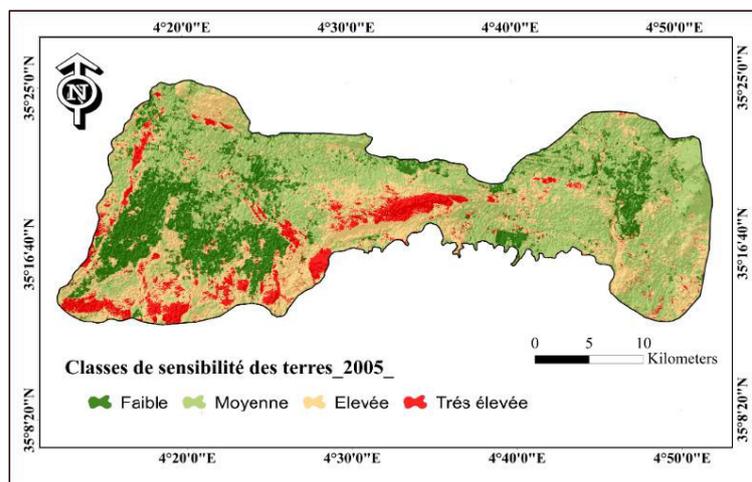
La carte d'occupation des terres a été classée en quatre grandes catégories qui sont : l'agriculture, les terres de parcours, les parcours dégradés et les dunes de sable. Les sables dunaires ont continué d'augmenter dans l'espace et le temps et constituent un excellent indicateur de la désertification, et ils sont assignés au niveau du rang de sensibilité plus élevée à la désertification. La priorité en matière de désertification des sols a été donnée puis aux parcours dégradés, parcours, et enfin aux zones agricoles.

Les parcours dégradés ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif et de la pression anthropique ce qui justifie son classement dans le rang élevé (Figure IV.13).

(A)



(B)



(C)

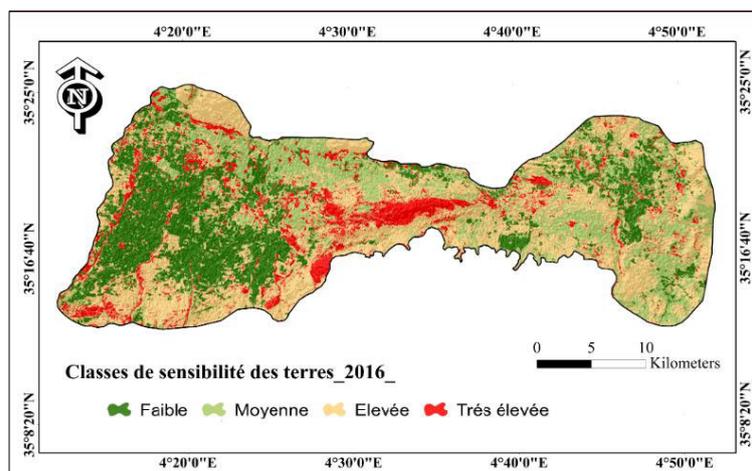


Figure IV.13 : Carte d'occupation des terres reclassée en quatre classes (A :1995, B : 2005, C : 2016).

10. Détermination des priorités parmi les éléments de décision de la hiérarchie

L'étape de la pondération est très délicate et elle exige l'intervention des décideurs ainsi que les spécialistes dans le domaine de l'aménagement du territoire et l'écologie pour l'affectation d'un degré d'importance à chaque comparaison par paires. Pour notre étude, nous avons utilisé les valeurs présentées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Matrice de comparaison par paires de critères.

	NDVI	NDMI	Albedo	NDSI	OT	EMI
NDVI	1	3	3	7	1	1
NDMI	1/3 = 0,33	1	1	5	1/3 = 0,33	1/3 = 0,33
Albedo	1/3 = 0,33	1	1	5	1/3 = 0,33	1/3 = 0,33
NDSI	1/7 = 0,14	1/5 = 0,2	1/5 = 0,2	1	1/7 = 0,14	1/7 = 0,14
OT	1	3	3	7	1	1
EMI	1	3	3	7	1	1

10.1 Calcul des poids relatifs globaux des éléments de décision

La détermination des poids pour les critères consiste à la comparaison par paires selon l'importance relative établie par SAATY, ce qui a abouti à la configuration de la matrice réciproque M de décision.

Cette matrice produit les coefficients de pondération qui sont obtenus à partir des calculs complexes du vecteur propre (Vp) de la matrice de comparaison par paires ; les valeurs de ces vecteurs propres (Vp) sont déterminées en calculant leur moyenne géométrique par ligne pour chaque critère, ainsi le coefficient de pondération pour chaque critère est déduit par standardisation du vecteur propre en divisant chaque vecteur propre par leur somme et à condition que la somme des coefficients de pondération doit être égale à 1.

Le tableau ci-dessous présente les poids utilisés dans l'évaluation multicritère des situations critiques au risque de la désertification.

Tableau IV.5 : Poids des indices utilisés.

INDICE	NDVI	NDMI	Albedo	NDSI	LCI	EMI
POIDS	0,243	0,122	0,122	0,028	0,243	0,243

10.2 Vérification de la cohérence des jugements

Les résultats obtenus par la méthode AHP doivent être vérifiés pour assurer que les jugements de la matrice réciproque de décision sont cohérents, cette vérification est évaluée par l'indice de cohérence **IC**.

Dans le cas de notre étude λ_{\max} est calculé comme suit :

$$\lambda_{\max} = (3,809 * 0,243) + (11,2 * 0,121) + (11,2 * 0,121) + (32 * 0,027) + (3,809 * 0,243) + (3,809 * 0,243) = 6,388$$

$$\mathbf{IC} = (6,388 - 6) / (6 - 1) = 0,0778$$

Après cela, un ratio de cohérence (**RC**) doit être calculé :

$$\mathbf{RC} = \mathbf{IC} / \mathbf{IA} = 0,0778 / 1,24 = 0,062$$

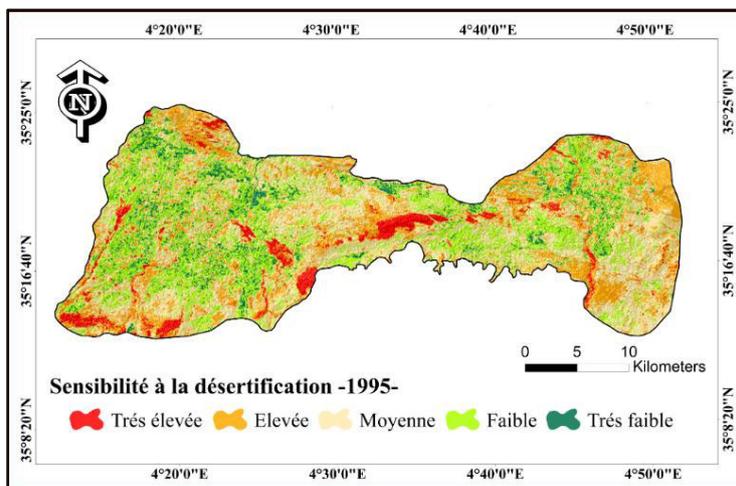
Pour 6 critères nous prenons **AI= 1.12** (Tableau d'indice aléatoire de Saaty).

D'après SAATY, si **RC** est supérieur à 0,1 la matrice de décision devrait être réévaluée, dans notre cas la comparaison par paire effectuée indique un ratio de cohérence égale à 0,062, ce qui confirme que notre jugement est cohérent.

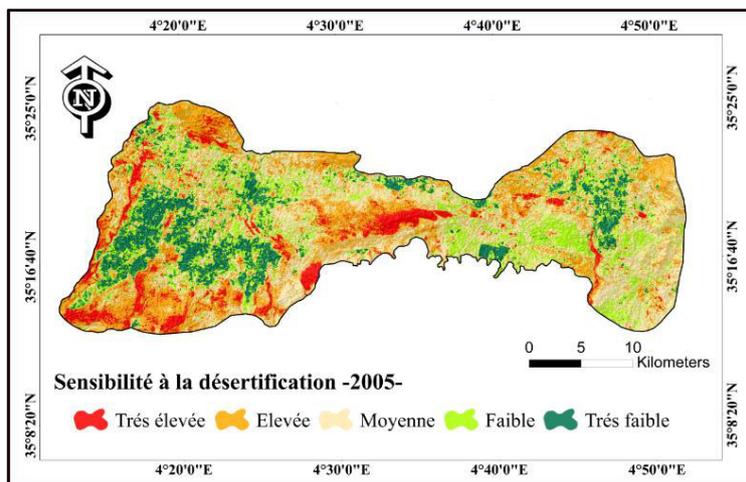
10.3 Evaluation de la sensibilité à la désertification

Cinq classes ont été représentées (très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible). La figure IV.14 montre les cartes de sensibilité à la désertification des trois dates, et le tableau IV. 6 indique la description des différents degrés de sensibilité à la désertification au Sud du Hodna.

A



B



C

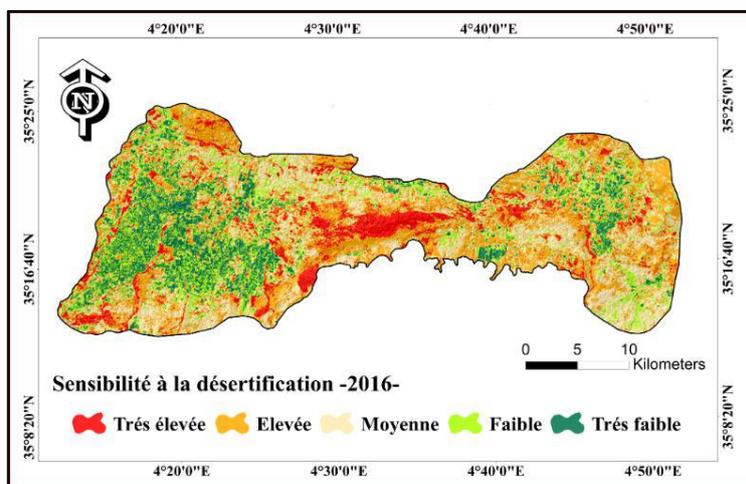
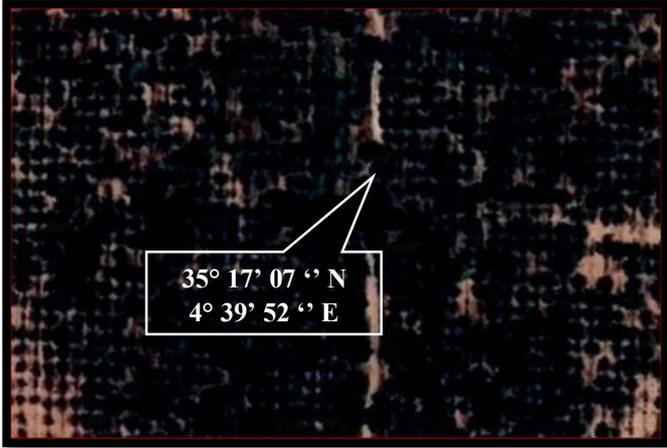
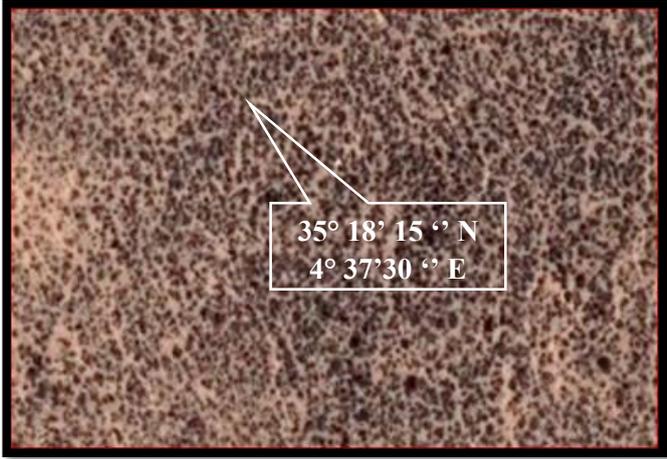
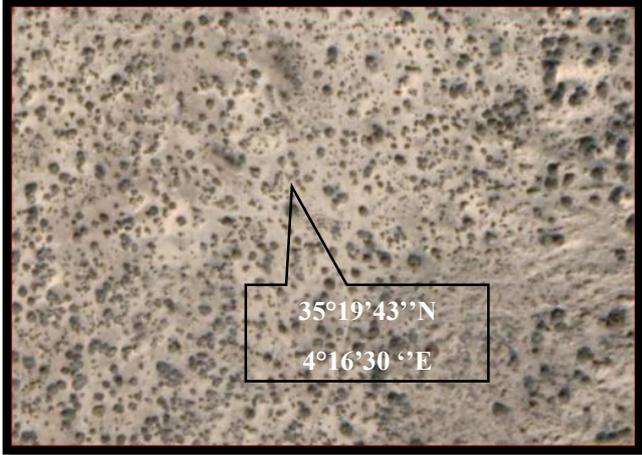
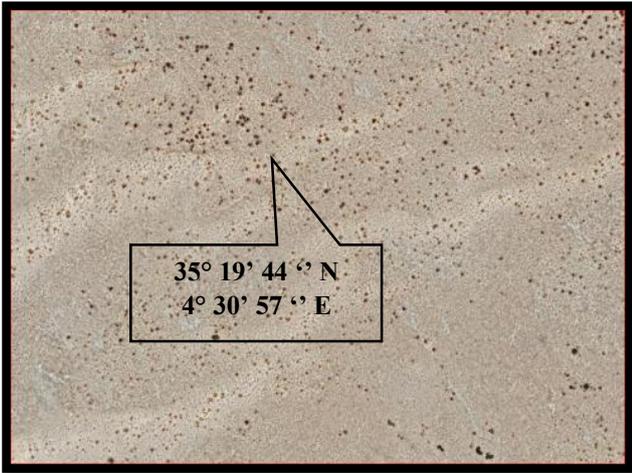
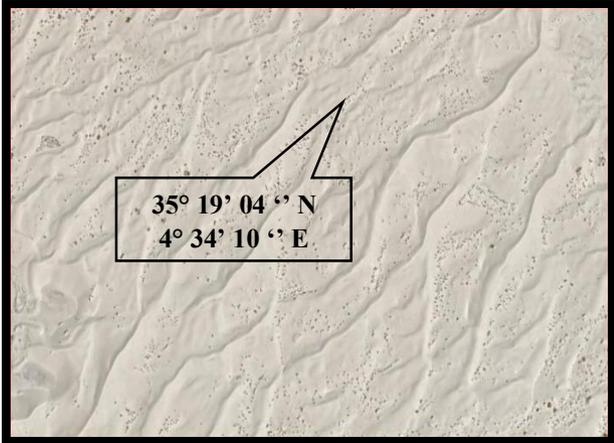


Figure IV.14 : Carte de sensibilité à la désertification (A : 1995, B : 2005, C : 2016).

Tableau IV.6 : Description des différents degrés de sensibilité à la désertification au Sud de Hodna.

Classe	Image	Descriptions
Très faible		<p>Cette classe correspond aux terrains agricoles irrigués par des eaux souterraines, il s'agit de la mise en culture irriguée développée depuis une dizaine d'années au sud de Hodna, située généralement dans les cônes de déjection des petits Oueds qui représente une zone inondable favorable à l'agriculture.</p>
Faible		<p>Ces zones font principalement référence à une densité de végétation modérée.</p> <p>L'agriculture saisonnière est pratiquée avec l'utilisation d'eaux souterraines caractérisées par un taux de sels modérés. Cette catégorie concerne également les nouvelles exploitations.</p>

<p>Moyenne</p>		<p>La désertification modérée est représentée par des zones de parcours moins denses.</p>
<p>Elevée</p>		<p>Cette catégorie se réfère aux zones de parcours dégradés suite au surpâturage et des zones qui délimitent le sable dunaire. La classe de désertification élevée correspond aux terrains presque dénudés.</p>

Très élevée		<p>Les terres désertifiées sont généralement situées au sud du Chott El Hodna.</p> <p>Le degré de désertification extrême dans la zone d'étude est essentiellement de sable dunaire et de véritable dunes vives appelées erg ou zbar.</p> <p>Le sable est accumulé soit en masse uniforme, soit en de petits massifs allongés</p>
-------------	---	---

10.4 Analyse de changement de la désertification

Les statistiques des superficies des classes de sensibilité à la désertification et les changements des classes pour les trois dates (Tableau IV.7, Figure IV.15) montrent que la plus grande partie de la zone d'étude a connu une désertification élevée (243,8 Km²) suivi de la classe de désertification moyenne (226, 95 Km²) en 2016.

La désertification très élevée a augmenté par 22,98 Km² et 16,93 Km² pendant la période de 1995-2005 et 2005-2016 respectivement, et la désertification élevée a augmenté dans la même période par environ 30,29 Km² et 32,06 Km². En revanche, la classe de désertification moyenne a diminué de 28,28 Km² et 37,97 Km², et la classe de faible désertification a diminué de 70 Km² et 10,53 Km² dans la période de 1995- 2005 et la période de 2005-2016 respectivement. La plus forte diminution ayant lieu dans la période de 1995- 2005 pour la classe de faible désertification. La classe de désertification très faible a augmenté dans la période de 1995-2005 et reste presque inchangé dans la période de 2005-2016.

Dans toute la période considérée (de 1995 à 2016), les zones de désertification élevée et très élevée ont considérablement augmenté, et les zones de désertification moyenne et faible ont diminué.

Tableau IV.7 : Résumé de la désertification pour 1995, 2005 et 2016.

	1995		2005		2016		1995-2005		2005-2016	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Très élevée	42,58	5,39	65,56	8,30	82,49	10,44	22,98	2,91	16,93	2,14
Elevée	181,45	22,97	211,74	26,80	243,80	30,86	30,29	3,83	32,06	4,06
Moyenne	293,20	37,12	264,92	33,54	226,95	28,73	28,28	3,58	37,97	4,81
Faible	227,14	28,75	157,14	19,89	146,61	18,56	70,00	8,86	10,53	1,33
Très faible	45,58	5,77	90,60	11,47	90,11	11,41	45,02	5,70	-0,49	-0,06

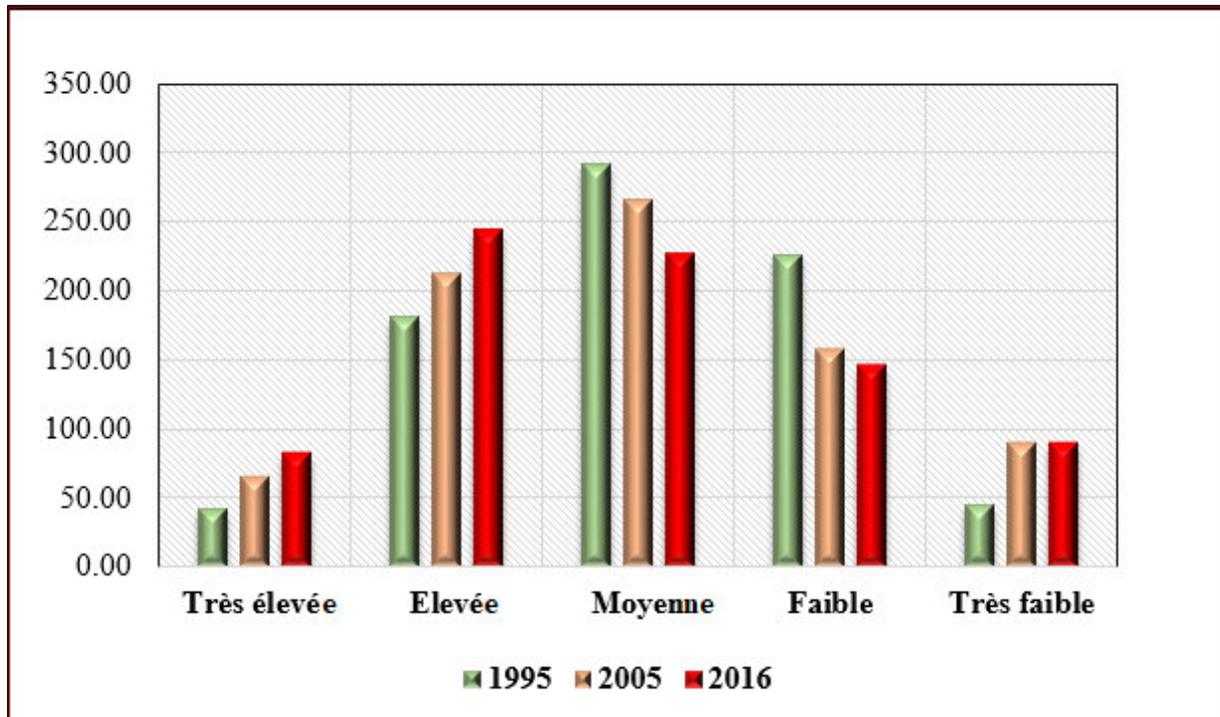


Figure IV.15 : Représentation graphique des classes de sensibilité à la désertification (1995, 2005 et 2016). Les termes «Très faible», «Faible», «Moyenne», «Elevée» et «Très élevée» sont utilisés pour représenter les degrés de sensibilité à la désertification.

D'une manière générale, la steppe algérienne subit des dégradations énormes dans les dernières décennies. L'absence d'une politique de réserves fourragères et la pression humaine de plus en plus forte traduisent un surpâturage sans cesse croissant.

Le suivi diachronique de la désertification au sud du Hodna montre que les zones de sensibilité très élevée à la désertification « champs de dunes et sable accumulé soit en masse uniforme soit en petits massifs allongés » a augmenté pendant la période de 1995 à 2016.

Ce résultat est en accord avec les études diachroniques réalisées par télédétection dans le sud du Hodna, qui ont révélés une extension très nette des surfaces affectées par l'ensablement entre 1972 et 2001 (Abdesselam, 2013), et entre 1995 et 2016 (Sahnouni et Abdesselam, 2018). Cela est en relation avec des périodes de sécheresse parfois prolongées, mais surtout à l'action anthropique qui se manifeste dans cette région par le surpâturage et le défrichement des terres pour l'agriculture (Abdesselam, 2013).

De Bir Heni à Bir khoubana il s'agit d'un terrain recouverts de sables (voie éolien) ou prédominant une végétation clairsemée «*Retama retam, Tmarix gallica, Atriplex halimus* et *limonia strumguyonianum* ».

Dans les zones où la désertification est élevée, la voile éolienne fait 30 m d'épaisseur (Mimoune, 1995), le sable est quartzueux avec des teneurs de 9,4 de gypse et 0,6% de calcaire.

Les enquêtes auprès des habitants de la région et le dépouillement de documentation existante révèlent qu'il s'agissait de la même végétation de stade 2 de dégradation, la végétation a été coupée récemment par l'homme pour mettre en valeur les sols sans faire une étude préalable du milieu (aptitude du sol), ensuite l'homme s'en est rendu compte que le milieu était salé et que ça nécessitait beaucoup d'investissements (drainage surtout). Il à noter que cette action anthropique est dégradante et déséquilibrante de cet écosystème. Le milieu s'est trouvé sans couvert végétal, a donc subi l'accumulation des sables (venant surtout du sud-ouest) ceci est justifié par l'augmentation de classe de désertification élevée.

La classe de sensibilité moyenne correspond aux parcours dégradés, la végétation naturelle clairsemée s'explique aussi par un surpâturage. L'intervention de l'homme a provoqué un bouleversement des conditions écologiques du Hodna. Au sud du chott, le démantèlement de la couverture végétale (défrichement et autres) rompt l'équilibre comme conséquence les phénomènes de steppisation et de désertification.

Le piémont du massif Meharga (Plaine alluviale) était recouvert de plantes naturelles steppiques (essentiellement *Ziziphus lotus*, le jujubier). Cette plaine (autour de 10.000 ha) a été mise en défens (interdiction de laboure et de pâturage).

La classe de sensibilité très faible correspond aux zones de couverture végétale élevée correspondant aux zones agricoles sur des terrains irrigués. Les sols recouverts d'une végétation dense sont protégés de l'ensablement et la désertification. L'agriculture irriguée est entamée avec la révolution agraire par l'irrigation de 300 ha par ruissellement des eaux provenant de la nappe en charge sous-jacente (Sebhi, 1987). A l'état actuel, la superficie irriguée au Sud du Hodna dépasse 20000 ha selon les statistiques des services agricoles (DSA).

10.5 Evaluation des conversions des classes de sensibilité à la désertification

La région de sud du Hodna a connu une désertification importante évaluée dans le temps et dans l'espace selon cinq classes adoptées dans la partie précédente. Il serait maintenant utile d'évaluer plus en détail les résultats de conversion des classes de sensibilité à la désertification selon une matrice de changement entre 1995 et 2016.

Le tableau (IV.8) montre les différentes conversions de chaque classe vers d'autres classes, et la figure IV.16, représente une carte de changement de la désertification.

Tableau IV.8 : Tableau croisé des classes de sensibilité à la désertification (1995-2016) (Superficie en km²).

		Désertification en 2016					
		Très élevée	Elevée	Moyenne	Faible	Très faible	Total
Désertification en 1995	Très élevée	23,47	11,58	4,71	2,06	0,76	42,58
	Elevée	32,30	86,56	40,50	15,39	6,70	181,45
	Moyenne	19,83	101,69	107,61	44,42	19,65	293,20
	Faible	6,29	40,22	65,78	66,62	48,22	227,14
	Très faible	0,60	3,75	8,35	18,11	14,78	45,58
	Total	82,49	243,80	226,95	146,61	90,11	789,96

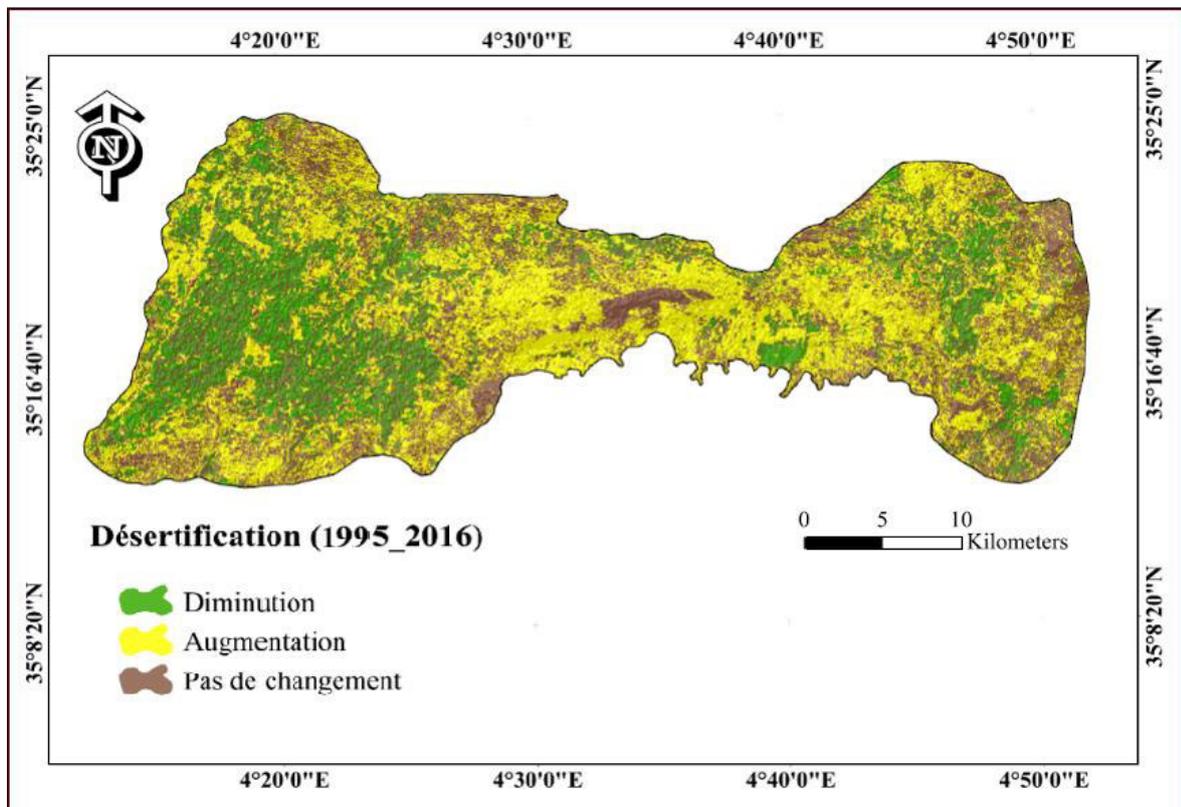


Figure IV.16 : Carte de changement de la désertification entre 1995 et 2016.

Les différentes conversions peuvent être expliquées comme suit :

10.5.1 Conversion de la classe de sensibilité très élevée : 42,58 Km² représentaient la part totale des terres de classe de sensibilité très élevée en 1995, il restait 23,47 km² sans changement en 2016 mais le reste a été distribué sur les autres classes.

10.5.2 Conversion de la classe de sensibilité élevée : 181,45 Km² étaient la superficie de cette classe en 1995, 86,56 km² restaient inchangés en 2016, cependant 40,50 km² ont été convertis en classe de sensibilité moyenne, 32,30 km² en classe de désertification très élevée et de faible surface vers les autres classes.

10.5.3 Conversion de la classe de sensibilité moyenne : 107,61 km² de cette classe reste inchangée en 2016, une surface considérable (101,69 km²) a été convertie en classe de désertification élevée, 44,42 km² en classe de désertification faible et le reste a été distribué sur les autres classes.

10.5.4 Conversion de la classe de désertification faible : 66,62 Km² restait sans changement en 2016, 40,22 Km² a été convertie vers la classe élevée, 65,78 Km² en classe moyenne et 48,22 Km² en classe de désertification très faible.

10.5.5 Conversion de la classe de désertification très faible : Les conversions de cette classe ne sont pas importantes ; il est à noter que la conversion en classe faible est d'environ 18,11 km².

A partir de ces résultats, on peut constater que l'augmentation de la désertification élevée et très élevée et la perte de niveaux de désertification faible et moyenne constituent les conversions les plus importantes dans cette région.

Selon ces conversions, on peut classer la carte de changement de la désertification en trois classes :

a- Augmentation de la désertification : Représenté par des zones converties de la classe moyenne à élevée, de la classe élevée à très élevée, et de faible à élevée. L'érosion éolienne dans ces zones remplace l'érosion hydrique et pose des problèmes graves pour la mise en valeur et même pour les villages localisés dans cette zone ne sont pas épargnés. Elle se traduit dans l'espace par des accumulations dunaires qui ont été remises en mouvement par les hommes, par leurs actions de destruction de la végétation naturelle.

La conversion des zones de désertification faible en moyenne est due principalement au surpâturage des régions qui sont déjà dégradés.

b- Diminution de la désertification : Les résultats indiquent que la diminution de la désertification dans le sud du Hodna provient principalement de la conversion des zones de sensibilité très élevée en zone moyenne, due à la fixation des dunes pour lutter contre l'ensablement spécialement dans la région de Boussaâda. On peut également voir la conversion des zones de désertification élevée en zone moyenne et faible. D'autre part, c'est lié aussi à l'extension de la couverture végétale liée à l'évolution des surfaces irriguées.

Ce dernier point doit être pris avec plus de réserve et d'autres études semblent être indispensables pour vérifier cette situation.

c- Les zones inchangées : Comporte des zones n'ayant subi aucune conversion de classe.

10.6 Validation du résultat de la cartographie de la désertification

Un échantillonnage aléatoire sur le terrain a été effectué en 2016 afin d'évaluer la précision globale de la carte finale de la désertification. En résumé, une dizaine de points au sol ont été collectés sur cinq classes de sensibilité à la désertification (Figure IV.17).

La précision de la carte a été obtenue par une matrice de confusion en utilisant tous les points de vérité terrain (Tableau IV.09).

La précision globale atteinte est de 87%, ce qui indique que l'utilisation des indices spectraux dans l'analyse multicritères pour évaluer la sensibilité à la désertification est une méthode valide et fiable.

Tableau IV.09 : Matrice de confusion et évaluation de la précision de la carte de sensibilité à la désertification pour l'année 2016.

		Vérité au sol (Point GPS)					Total	Précision de l'utilisateur (%)
		Très élevée	Elevée	Moyenne	Faible	Très faible		
Désertification (2016)	Très élevée	55	4	1	0	0	60	91,67
	Elevée	4	46	2	0	0	52	88,46
	Moyenne	0	0	50	5	5	60	83,33
	Faible	0	0	3	42	6	51	82,35
	Très faible	0	0	2	6	49	57	85,96
	Total	59	50	58	53	60	280	
	Précision du producteur (%)	93,22	92,00	86,21	79,25	81,67		

Précision globale	87 %
--------------------------	-------------

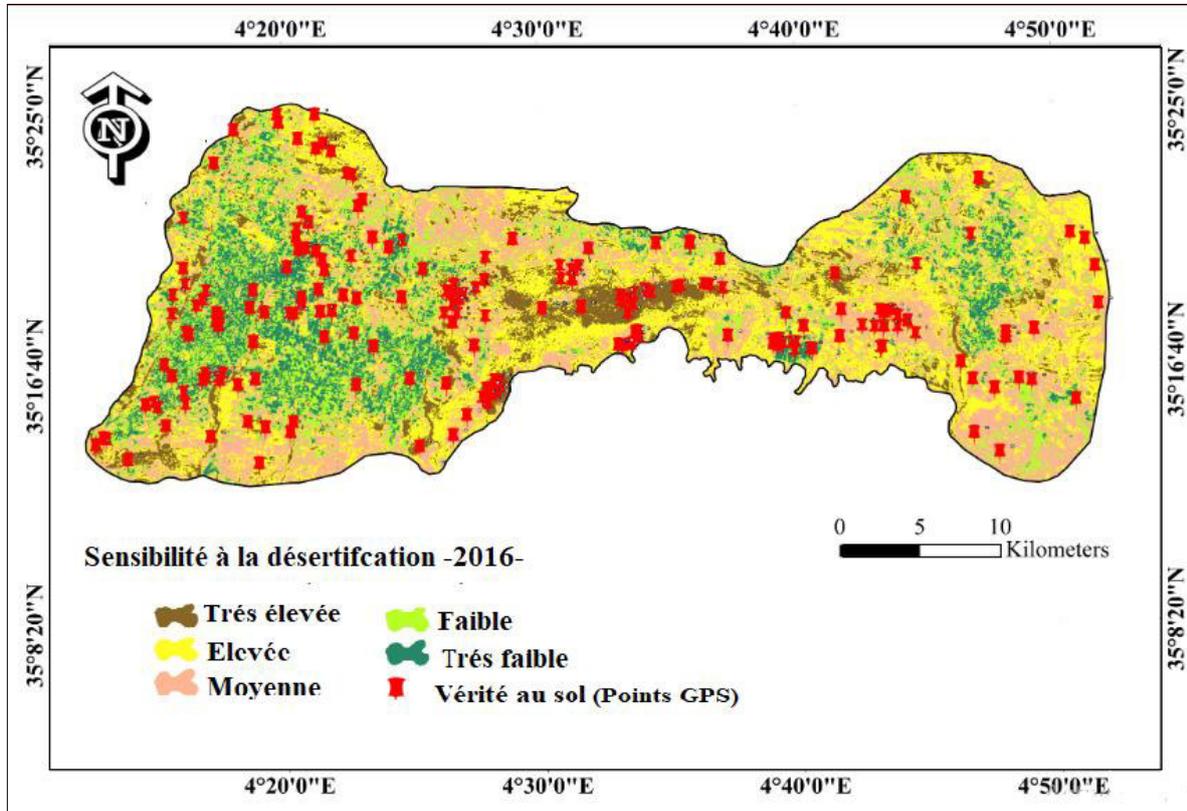


Figure IV.17 : Carte des relevés GPS et échantillonnage pour valider la carte de la désertification, 2016.

Conclusion

Dans ce chapitre, une approche méthodologique cartographique a été adoptée pour la délimitation des zones sensibles à la désertification en utilisant le SIG et les techniques de prise de décision multi-critères dans le sud du Hodna. Les indices spectraux des images satellitaires ont été normalisés en utilisant la technique AHP, et ils ont intégré par la suite dans un environnement SIG (Logiciel ArcGis) afin de générer une carte de sensibilité à la désertification.

Les résultats de ce chapitre permettent de faire ressortir les conclusions suivantes :

La carte de la sensibilité à la désertification montre que la zone d'étude est subdivisée en cinq zones de sensibilité croissante : «très faible », « faible », « moyenne», « élevée» et « très élevée ».

Pendant la période de 1995-2016 en remarque une augmentation de la classe de sensibilité très élevée et la classe de sensibilité élevée, et une diminution de la classe de sensibilité faible et très faible.

L'analyse de la conversion montre que l'augmentation de la classe de sensibilité élevée et très élevée et la perte de niveaux de sensibilité faible et moyenne constituent les conversions les plus importantes dans cette région.

D'un autre côté, il est important de signaler que :

- Les techniques de prise de décision multi-critères et le SIG sont des outils puissants pour évaluer la sensibilité à la désertification ;
- Les indices du modèle peuvent refléter la couverture de la surface terrestre et de la désertification, et ils ont également une signification biophysique certaine ;
- L'utilisation des indices spectraux dans l'analyse multicritères est fondée sur des conditions logiques et un raisonnement dans la région aride, peut également être utile pour les autres régions en Algérie ou dans le monde ;
- Le modèle peut exploiter pleinement les informations de télédétection multidimensionnelles, facilement accessibles, et offre une plus grande précision de surveillance ;

- Plus intéressant, la méthodologie peut facilement identifier quantitativement la désertification des terres et constitue une méthode rapide, peu coûteuse et efficace de surveillance de la désertification, elle convient aussi mieux aux pays en voie de développement et aux pays à faible revenu où les données démographiques, hydrologiques, édaphiques et géologiques adéquates et de bonne qualité manquent souvent pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification.

Enfin, les cartes de sensibilité peuvent être utilisées comme un outil d'aide à la décision pour l'aménagement de cette région et la planification des projets de lutte contre la désertification.

Chapitre V

Facteurs influençant le phénomène de la désertification

Chapitre V

Facteurs influençant le phénomène de la désertification

Introduction

Depuis quelques décennies, le problème de la désertification commence à prendre de l'ampleur au sud du Hodna sous l'effet combiné de facteurs anthropiques et naturels. Dans ces conditions, la compréhension de processus et des causes de la désertification est importante pour mettre en place des mesures de contrôle raisonnables et efficaces permettant de lutter contre ce phénomène.

Dans ce chapitre, il sera question de comparer des données de la dynamique de la sensibilité à la désertification avec une série de données climatiques et anthropiques pour l'identification des facteurs déterminants liés à la désertification et la dégradation de ce milieu.

1. Données utilisées

Notre région d'étude se situe dans le sud du Hodna où se combinent deux paramètres :

- Des parcours steppiques attirant un important effectif d'ovins.
- Des conditions climatiques déterminantes une forte aridité.

Pour mener notre travail, une sélection des données climatiques et anthropiques a été choisie afin d'examiner de près les facteurs les plus importants ayant contribué à la dégradation des parcours.

Les données ayant été retenues pour cette étude sont :

1.1 Les données climatiques

Elles ont été fournies par la station météorologique de Boussaâda pour la période d'étude (1995-2016). Il s'agit de la température, précipitation et la vitesse du vent.

1.2 Les données socioéconomiques

Les données utilisées comprennent les statistiques en relation avec la population et le surpâturage. Ces données ont été fournies par les services agricoles pour la période (1995-2016), au niveau des communes de la zone d'étude (Khoubana, Boussaâda, Maarif, M'Cif et El Houamed).

2. Analyse des facteurs influençant le phénomène de la désertification

2.1 Facteurs climatiques

Le développement de la désertification est en grande partie contrôlé par le changement climatique (Wang *et al.*, 2004). Dans les régions arides et semi-arides, la température, les précipitations et le vent sont des facteurs climatiques importants de la dégradation des terres et de la désertification.

Les données climatiques collectées pour la période (1995-2016) ont été reportées sur la figure V. 1.

Les précipitations moyennes annuelles montrent une grande fluctuation interannuelle avec une valeur maximale de 316,2 mm en 2003 et une valeur minimale de 78 mm en 2002.

Les fluctuations annuelles de la température ont été également détectées au cours de toute la période. La température annuelle moyenne a atteint la valeur maximale de 22, 25 °C en 2016, alors que la température annuelle moyenne la plus basse est de 18,09 °C en 1996.

En ce qui concerne la vitesse du vent, les jours de vent les plus importants ont été enregistrés dans les années 1996, 1999, 2000 et 2007.

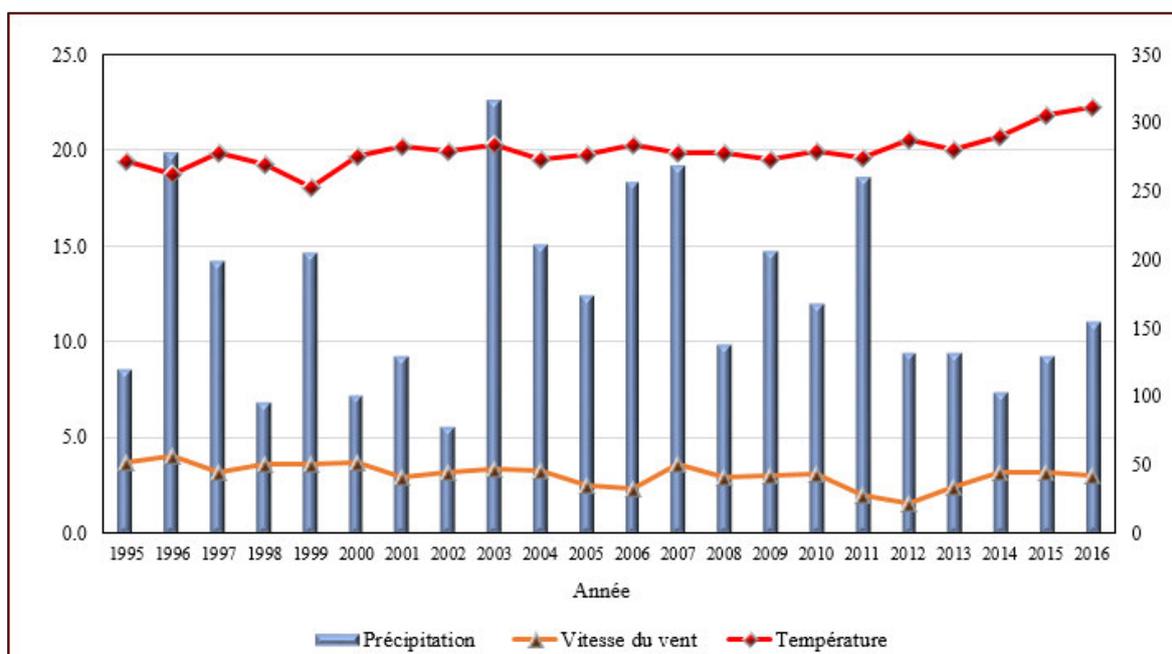


Figure V.1 : Diagramme climatique de la région d'étude (1995-2016).

En guise de conclusion, on peut dire que le climat du sud du Hodna est caractérisé par des conditions climatiques sévères qui marquent une forte aridité. Ces conditions climatiques (aridité et période de sécheresse assez longue) ont toujours joué un rôle important dans l'évolution de ce milieu.

2.2 Facteurs anthropiques

2.2.1 Augmentation de la population

Les parcours steppiques du Hodna constituent un écosystème fragile où évoluent des populations pastorales. Ces dernières subsistent par l'exploitation des ressources naturelles de ces parcours, ce qui constitue la principale cause de la désertification dans le sud du Hodna.

L'estimation de la population de la wilaya de M'sila nous a permis de calculer la densité de population pour les cinq communes couvrant notre zone d'étude.

2.2.1.1 La densité de population

La densité de la population a été quantifiée en intégrant le nombre de population autour de la zone pour chaque année dans l'équation suivante :

La densité de population = Nombre de pop/surface du sol.

La figure V.2 montre que la densité de population au sud du Hodna a augmenté au cours de toute la période étudiée ; elle est passée de 360,42 habitants/km² en 1995 à 780,83 habitants/km² en 2016.

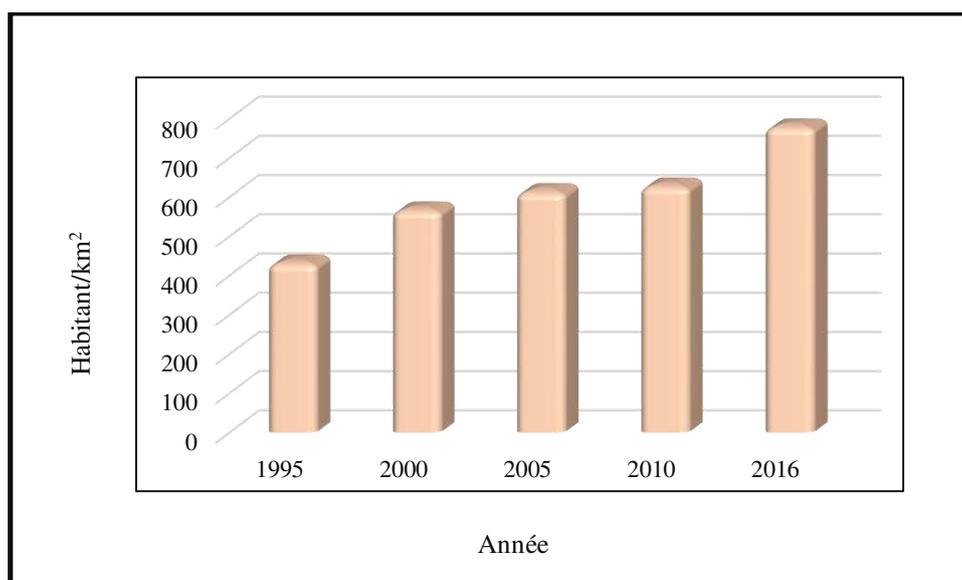


Figure V.2 : La densité de population au sud du Hodna (1995-2016).

2.2.2 Le surpâturage

L'augmentation du cheptel est une autre cause de la désertification des terres induite par le surpâturage dans la steppe d'une manière générale par le prélèvement d'une quantité de végétal supérieur à la production des parcours. D'autre part, l'exploitation permanente des parcours par une charge animale supérieure au potentiel de la production des parcours a pour effet de réduire leur capacité de régénération naturelle.

Il est généralement admis que traditionnellement l'activité dominante dans la steppe était le nomadisme. Ce mode de vie est basé sur la transhumance vers le Nord et vers le Sud. Cette transhumance (Achaba-Azzaba) était dictée par un besoin en fourrage dans des zones favorables (parcours présahariens en hiver, zones céréalières en été), réglemantée par des ententes tacites entre tribus. Les revenus étaient tirés essentiellement de l'élevage (Nedjimi et Homida, 2006). Le système nomadisme été remplacé par un système agropastoral (élevage pastoral et céréaliculture fourragère) avec transhumance occasionnelle vers le Tell ou vers le Sahara, pratiqué par des familles de cultivateurs éleveurs sédentaires, vivant ordinairement dans des habitations fixes situées dans la steppe, et vivant peu sous la tente à l'occasion de quelques déplacements (Bencherif, 2011). La figure V.3 montre les mouvements des agropasteurs dans les systèmes d'élevage agropastoraux.

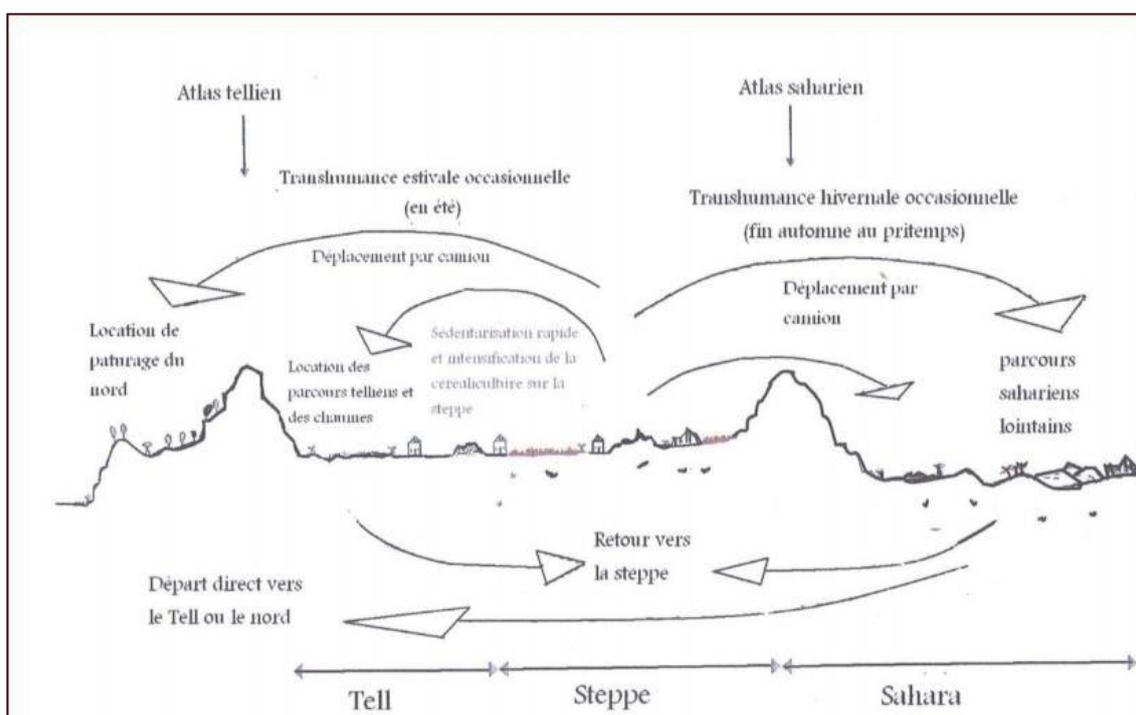


Figure V.3 : Mouvement des agropasteurs dans les systèmes d'élevage agropastoraux actuels.

2.2.2.1 Le nomadisme dans le sud du Hodna

Pendant la période post-coloniale, les tribus nomades du Hodna ont su jouer des complémentarités qu'offrent les pâturages entre leur région et les hautes plaines réalisant un heureux équilibre entre les activités humaines et le milieu tout en évitant toute dégradation de ce dernier (Sebhi, 1987). La solidarité tribale s'exprimait par la jouissance en commun des pâturages devenus un véritable droit d'usage collectif. La cohésion de la tribu était, à cet égard, la condition inévitable pour maintenir des équilibres délicats atteints par les formes traditionnelles de la vie pastorale. Par la suite, et avec la venue des colons, ce mode de vie commence à changer notamment avec la promulgation de la loi de Senatus Consult. Après l'indépendance, les différentes politiques agricoles adoptées ont favorisé l'extension de l'agriculture ce qui a influencé considérablement la dégradation des parcours, et l'exploitation de la surface restante par une charge animale importante au potentiel de la production de ces parcours (Sebhi, 1987 ; Abdesselam, 2013).

2.2.2.2 Intensité de pâturage

L'intensité de pâturage a été estimée en tenant compte du nombre d'animaux par unité de surface pendant la période de pâturage.

Selon Heitschmidt et Stuth (1991), l'intensité de pâturage est calculée selon l'équation suivante : *Nombre d'animaux de pâturage/surface pâturée*

Cette équation a été évaluée et utilisée avec succès pour estimer le taux de chargement comme référence pour évaluer la durabilité du pâturage (Kairis *et al.*, 2015).

L'application de cette équation nous a permis d'obtenir les résultats portés sur la figure V.4.

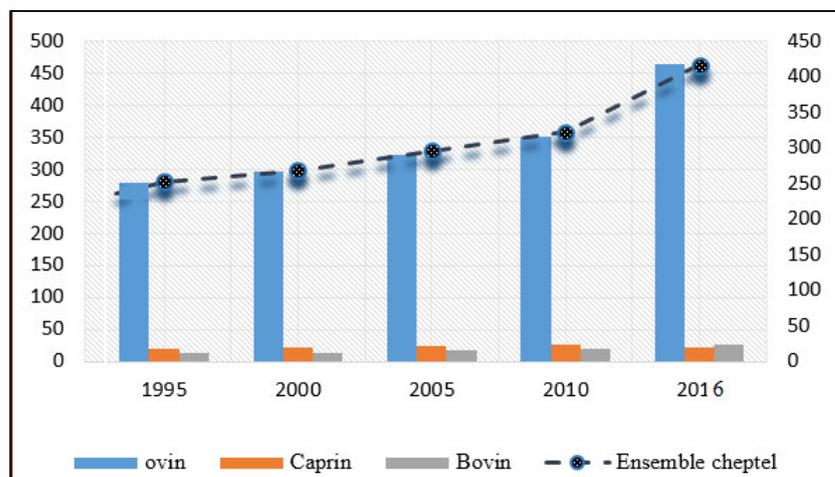


Figure V.4 : Intensité de pâturage au sud du Hodna.

L'intensité totale de pâturage augmente de manière significative entre 1995 à 2016 (Figure V.4), passant de 250,82 en 1995 à 289,96 en 2005, pour atteindre 417 en 2016 ; il est presque deux fois plus élevé qu'en 1995.

En revanche, le nombre d'ovins à augmenter de manière importante sur l'ensemble de la période d'étude.

2.2.3 Les politiques agricoles

L'agriculture dans la steppe est ancienne, cependant, sa croissance a pris essentiellement une forme extensive avec une progression accélérée de la demande induite par une forte augmentation de la population.

L'extension et la diversification des cultures (cultures maraîchères et arboriculture) ont bouleversé le paysage. Les nouvelles superficies cultivées sont souvent soustraites au pastoralisme, ce qui accroît la charge en cheptel sur les pâturages, et sont livrées à une pratique agricole non-durable. Au début des années quatre-vingt, et avec l'application de la loi portant accession à la propriété foncière agricole par la mise en valeur des terres, beaucoup de terres ont été attribuées là où les potentialités en eaux souterraines existent. La mise en œuvre par les pouvoirs publics d'un Plan national de Développement agricole (PNDA) a été lancé en 1998 et dont le principale objectif est d'essayer de résoudre les problèmes liés au manque d'investissements privés dans l'agriculture. Les actions menées concernent la mobilisation des ressources en eau et les équipements nécessaires, les plantations arboricoles, la plasticulture, les pépinières, les chambres froides et autres.

Les précipitations étant faibles et irrégulières, le recours à l'irrigation est nécessaire pour les produits maraîchers et l'arboriculture. Les pasteurs utilisent les eaux souterraines pour l'irrigation des cultures et deviennent des agropasteurs. Inexpérimenté, il apprend sur le tas et souvent, il loue ses terres destinées aux cultures à des agriculteurs venus du nord. Ces cultivateurs utilisent les surfaces de terres louées pour des cultures maraîchères irriguées grâce aux creusements de puits qu'ils réalisent. L'exploitation est de type minier, il s'agit de produire sans autre souci que la maximisation du profit. Quand l'eau se fait rare et quand les rendements diminuent, compromettant la rentabilité de l'exploitation, le locataire quitte la parcelle de terre utilisée et se met à la recherche d'un nouvel espace à louer devenant ainsi un agriculteur itinérant et destructeur (Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage, 2008).

➤ **Extension des surfaces agricoles dans le sud du Hodna**

Les surfaces agricoles de sud du Hodna ont connu une extension aux dépens des parcours (Cf. chapitre IV). D'autre part, l'utilisation des potentialités en eau souterraine a permis le développement des superficies irriguées (Figure V.6).

La figure V.5 montre que la superficie totale des terres cultivées a augmenté régulièrement, passant de 133,07 km² en 1995 à 199,8 km² en 2016.

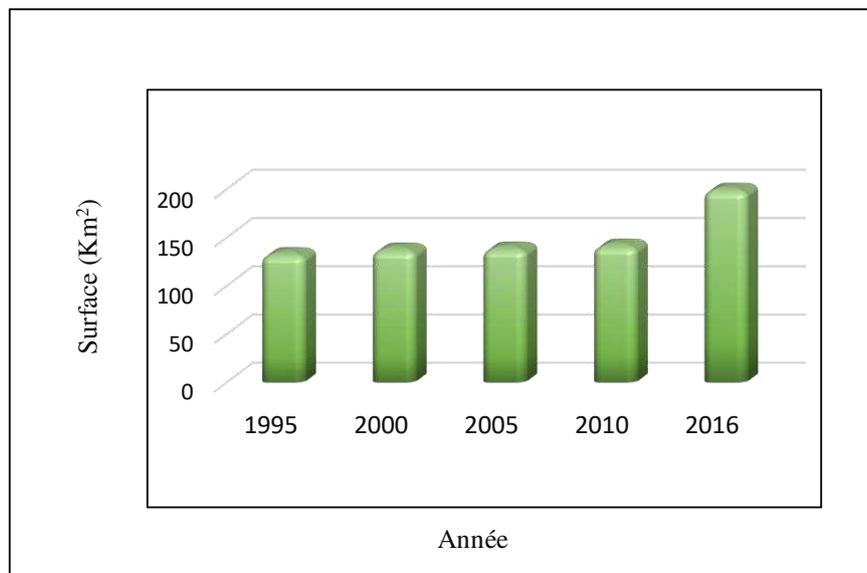


Figure V.5 : Evolution de la surface agricole dans le sud de Hodna (1995-2016).



-Bassin d'accumulation des eaux pompées d'un forage bénéficié dans le cadre du PNDA-



-Verger-



-Céréales-



-Culture en plein champ et arboriculture-



-Labours-



-Maraîchage-

Figure V.6 : Planche photographique représentant les pratiques agricoles au sud du Hodna (Source : Abdesselam, 2013).

3. Analyse des données

Les facteurs contrôlant le processus de la désertification des terres et sa dynamique ont été analysés en utilisant deux groupes de données : les données climatiques et les données des activités humaines. Pour cela, une analyse de régression a été appliquée pour analyser les tendances à long terme de ces facteurs.

Les résultats de l'analyse sont illustrés généralement par une équation de régression. Sur le plan graphique, l'équation de régression est représentée par une droite, qu'on appelle précisément la droite de régression et qui fournit une "image visuelle" schématisée de la relation entre les deux types de données.

4. Résultats et discussion

4.1 Influence des facteurs anthropiques sur la désertification

4.1.1 Cas des surfaces agricoles

La superficie des terres agricoles dans la région d'étude a marqué une extension considérable malgré que la corrélation est non significative ($p > 0,05$). Cette état de fait est du vraisemblablement au nombre réduit d'échantillon ($n=5$) (Figure V.7. A).

4.1.2 Cas de population

Comme c'est le cas des régions steppiques, la densité de population dans la région de l'étude indique une nette croissance dans le temps. L'équation de régression donne : $y = 14,853x - 29\,174$ $r^2=0,94$ avec $n=4$, la corrélation est hautement significative ($p < 0,01$) (Figure V.7. B).

4.1.3 Cas de pâturage

L'effectif total du cheptel a enregistré depuis 1995 à la fin de la période étudiée une nette tendance à la hausse. L'équation de régression donne : $y = 8,5966x - 16\,896$ $r^2=0.89$ avec $n=5$, la corrélation est significative ($p < 0,05$) (Figure V.7. C).

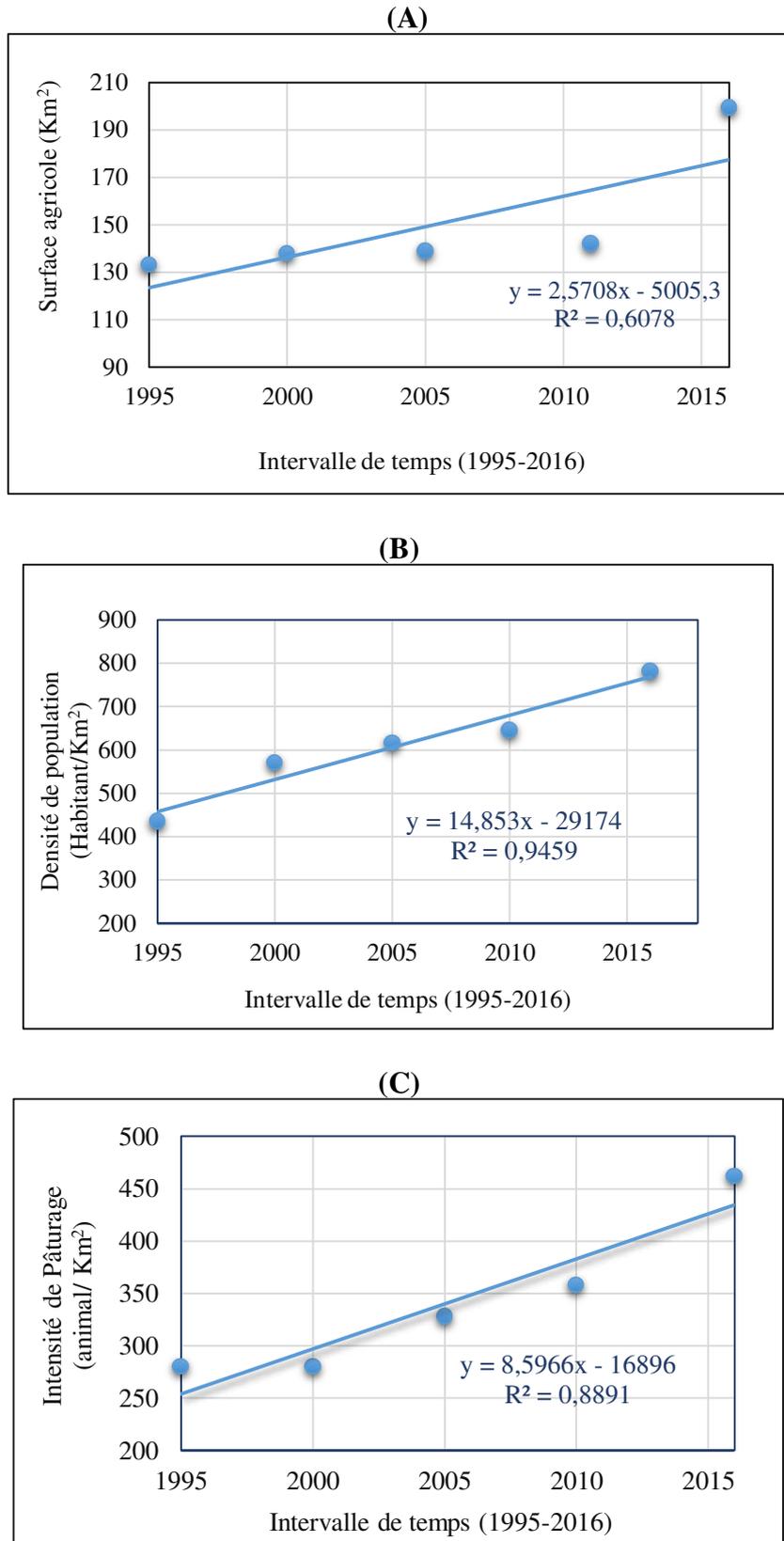


Figure V.7 : Régression linéaire des facteurs anthropiques (1995-2016), (A) Terres agricoles ; (B) Densité de population ; (C) Intensité de pâturage.

Les facteurs anthropiques (densité de population, intensité de cheptel et l'extension des surfaces agricoles) ont été analysés dans toute la période (1995-2016) et présentés simultanément avec les superficies désertifiées dans la figure V.8. L'examen de cette figure indique une évolution dans le même sens du processus de désertification avec les facteurs anthropiques cités durant toute la période d'étude.

Les résultats de cette étude montrent que le sud du Hodna présente une évolution des surfaces désertifiées au fil du temps résultant d'une dégradation de la végétation steppique qui s'amenuise et nourrisse de moins en moins un effectif croissant d'animaux devenus pléthoriques de 1995 à 2016. De même, l'activité agricole progresse dans l'espace et dans le temps dans cette région du fait de la croissance démographique qui induit une forte demande de produits agricoles. Ces résultats concordent avec les travaux de plusieurs chercheurs qui avancent l'hypothèse que l'activité anthropique est un facteur contraignant à l'installation de la désertification dans l'écosystème steppique (Hadeid, 2008 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008).

Selon Benguerai (2011), la dégradation des parcours de la steppe en général est la résultante de la surexploitation des ressources essentiellement à travers le surpâturage, mais aussi par le défrichement de milliers d'hectares en faveur des cultures céréalières.

Maestre (2004) montre que l'activité humaine est le plus souvent peut expliquer la disparition du couvert végétal et son remplacement par des terrains nus, du fait notamment du surpâturage et du défrichement des terres pour l'agriculture.

Nedjimi et Guit (2012) rapportent que l'accroissement des effectifs du cheptel, la pratique des labours mécanisés inadaptés dans les milieux steppiques, la désorganisation de la transhumance et la surexploitation des ressources pastorales ont conduit au déséquilibre alarmant de cet écosystème, qui se traduit sur le plan écologique par une dégradation visible des pâturages et l'extension des paysages désertiques.

Selon Khaldi (2014), l'agriculture dans la steppe est fort ancienne, sa croissance a pris essentiellement une forme extensive avec une progression accélérée de la demande induite par une forte augmentation de la population (multipliée par quatre entre 1962 et 2010), les précipitations étant faibles et irrégulières, le recours à l'irrigation est nécessaire pour les produits maraîchers et l'arboriculture.

Nedjraoui (1996) indique dans une étude qu'en 1968 la charge potentielle des terrains de parcours steppique dans la zone était de 1,9 ha/équivalent ovin alors que la charge réelle

n'était que de 0.78 ha/eq.ovin, d'où une surexploitation de la ressource végétale jusqu'à sa disparition. En 2004, Nedjraoui souligne que la charge pastorale potentielle serait d'environ 8 ha/eq.ovin, donc presque 10 fois supérieure à la charge réelle des parcours, ce qui donne lieu à un surpâturage intense qui se manifeste par le maintien trop prolongé du troupeau sur les aires pâturées, prélevant une quantité de végétation largement supérieure à la production annuelle.

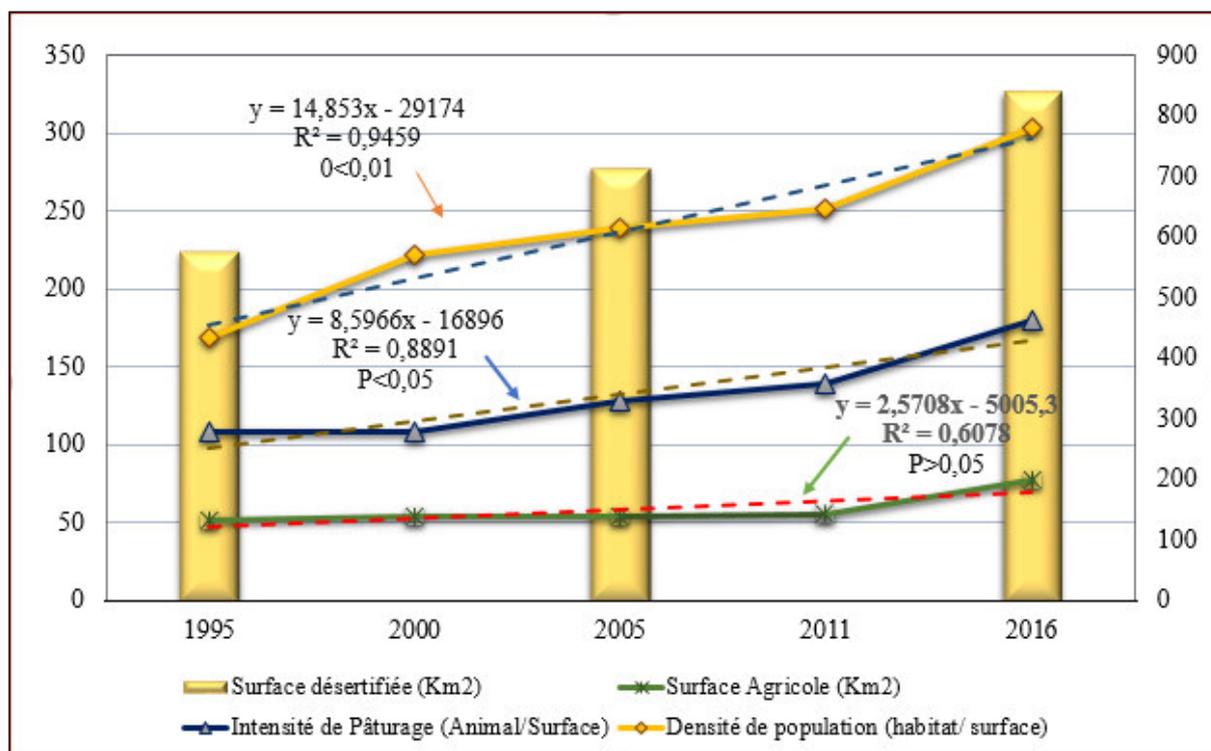


Figure V.8 : Evolution de la désertification et des facteurs anthropiques (1995-2016).

4.2 Influence des facteurs climatiques sur la désertification

4.2.1 Cas de température

L'équation de régression donne : $y = 0,0967x - 173,94$ $R^2 = 0,4985$, la corrélation est hautement significative ($p < 0,01$) (Figure. V.9. A).

4.2.2 Cas de précipitation

L'équation de régression donne : $y = -0,993x + 2166,1$ $R^2 = 0,0091$, la corrélation est non significative ($p > 0,05$) (Figure. V.9. B).

4.2.3 Cas de vitesse du vent

L'équation de régression donne : $y = -0,0547x + 112,71$ $R^2 = 0,3443$, la corrélation est hautement significative ($p < 0,01$). Cependant, si on examine de

près la courbe de tendance, on remarque qu'elle s'infléchit à la baisse de 1995 à 2005 puis se redresse de 2005 à 2016 (Figure. V.9. C).

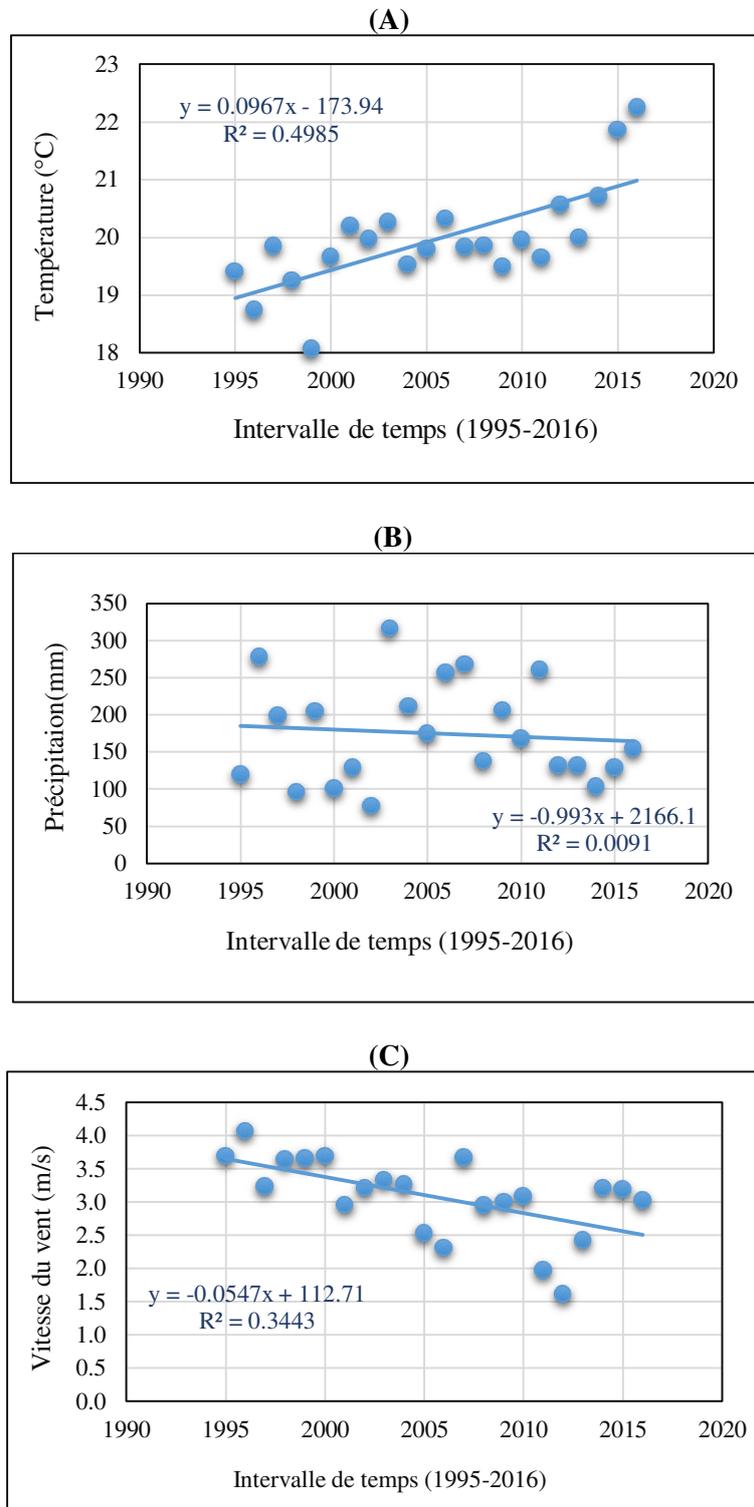


Figure V.9 : Régression linéaire des facteurs climatiques (1995-2016), (A) Température ; (B). Précipitation ; (C) Vitesse du vent.

La figure V.10 indique une relation entre la condition climatique de milieu et l'évolution de la désertification. En effet, les précipitations sont de faible importance et marquent des périodes de sécheresse liées à la forte variabilité interannuelle enregistrée ; elles sont donc peu efficaces pour la croissance de la végétation. L'augmentation de la température et la faiblesse des précipitations dans le sud du Hodna entraînent une faible production de matière organique et une oxydation rapide. Une faible teneur en matière organique entraîne une faible agrégation et une faible stabilité des agrégats, ce qui entraîne un potentiel élevé d'érosion éolienne et hydrique.

Les résultats de cette étude sont en accord avec les études menées dans la steppe.

Selon Nedjraoui et Bedrani (2008), les écosystèmes steppiques sont marqués par une grande variabilité interannuelle des précipitations. Les dernières décennies ont connu une diminution notable de la pluviosité annuelle, avec parfois plusieurs années consécutives de sécheresse persistante.

Hirche *et al.* (2007) montrent que cet écosystème se caractérise par une aridité croissante, cette tendance est plus prononcée pour les steppes occidentales que les steppes orientales. L'action de l'érosion éolienne accentue le processus de désertification. Elle varie en fonction de l'importance du couvert végétal.

Nedjraoui et Bedrani (2008) et Fodil (2018) indiquent que les perturbations climatiques sont ainsi une cause importante de la fragilité de ces milieux déjà très sensibles et provoquent des crises écologiques se répercutant sur l'ensemble de l'écosystème.

En effet, le sud du Hodna est une région venteuse marquée par des températures élevées et des irrégularités interannuelles très importantes des précipitations ayant comme conséquences des périodes de sécheresse très marquées. Ces conditions climatiques sévères de la région, marquée par une forte aridité, ont toujours joué un rôle important dans l'évolution de la désertification dans le sud du Hodna.

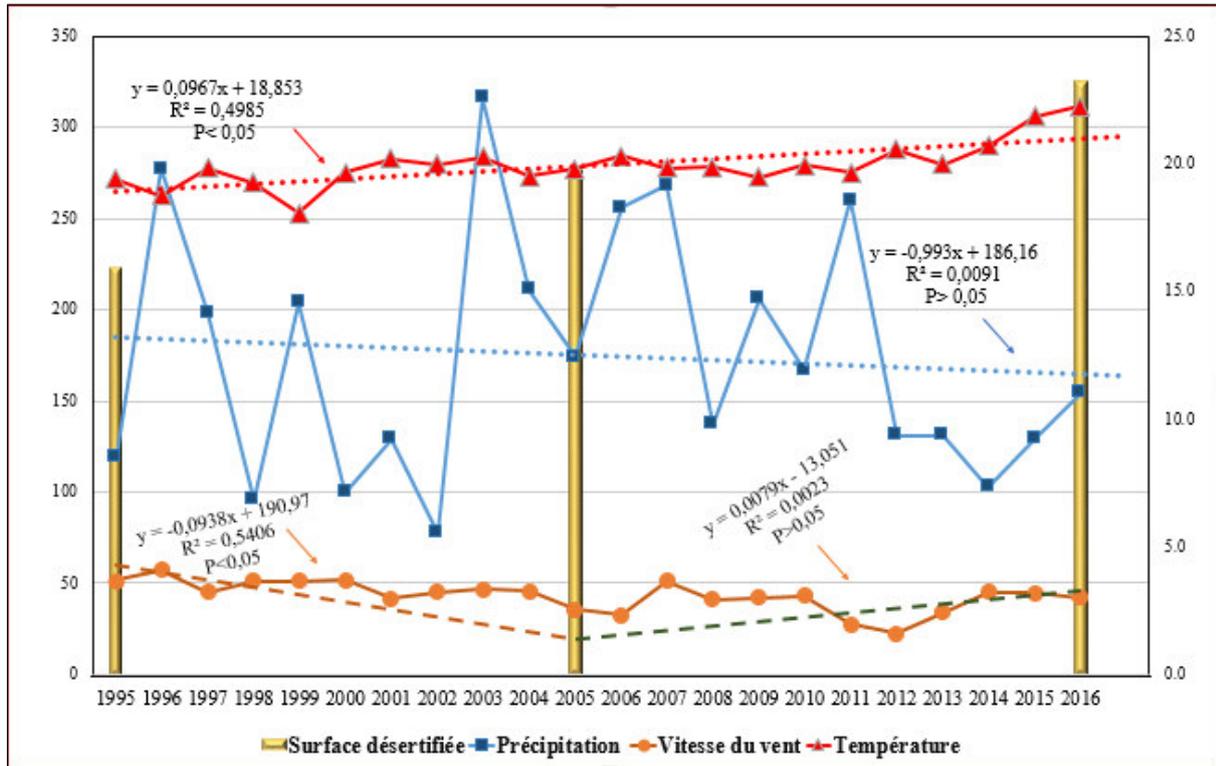


Figure V.10 Evolution de la désertification et de facteurs climatiques (1995-2016).

En résumé, nous pouvons dire que les principales causes de la dégradation du milieu au sud du Hodna sont liées essentiellement à l'action anthropique, due elle-même aux transformations du mode de vie des populations, qu'à la péjoration des conditions climatiques peu favorable.

A la lumière de ce qui a été dit, nous pouvons résumer dans un organigramme (Figure V.11) les différents facteurs influençant le processus de désertification au sud du Hodna.

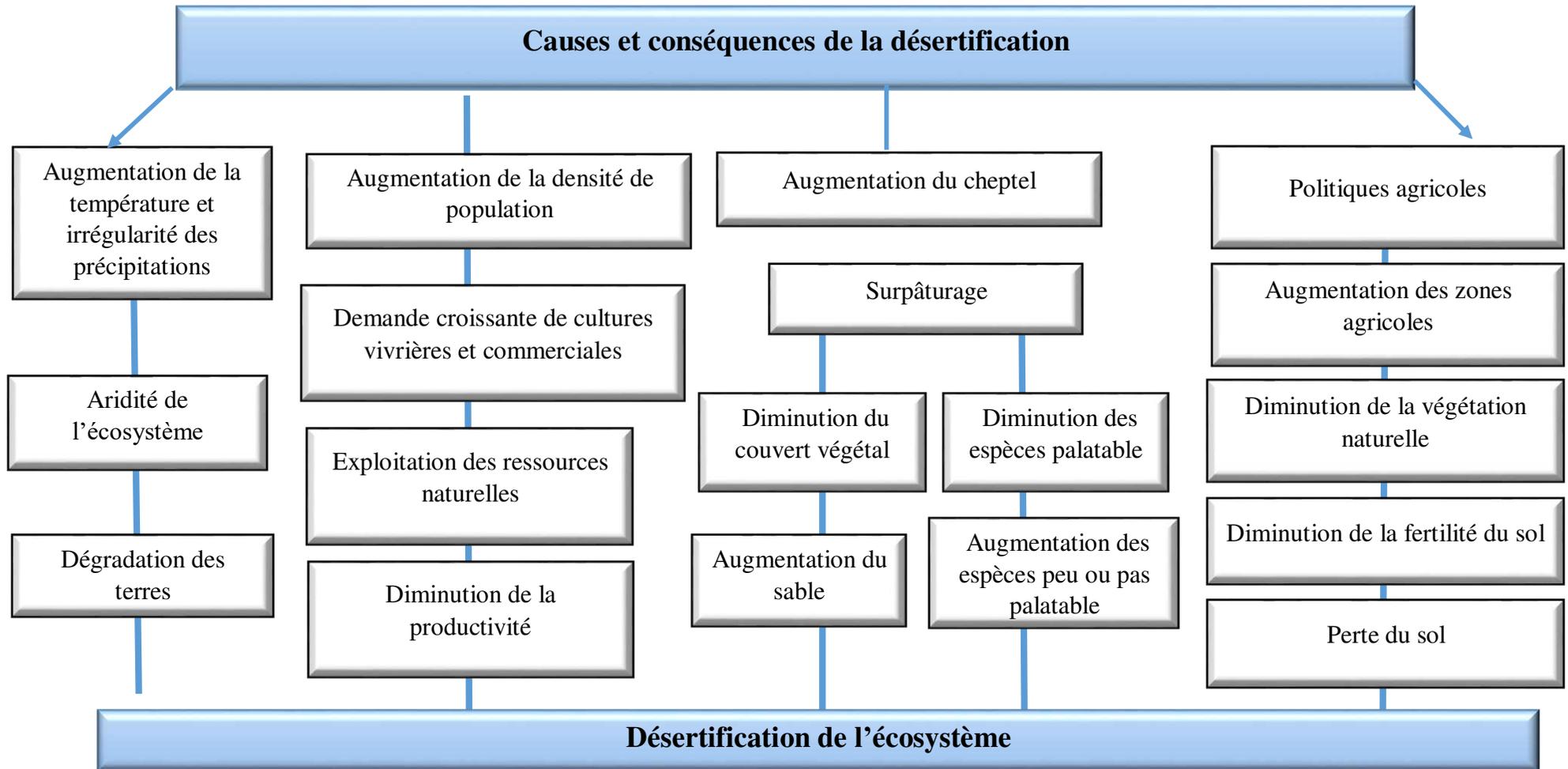


Figure V.11 : Causes et conséquences de la désertification dans le sud du Hodna

Conclusion

La combinaison des facteurs anthropiques et naturels d'une part et les superficies désertifiées d'autre part a permis de faire les constatations suivantes :

- L'augmentation de la population, de l'effectif ovin et l'extension de la superficie cultivée dans la zone d'étude sont les principaux indicateurs anthropiques influençant le phénomène de la désertification.
- La principale cause de la désertification dans le sud du Hodna est identifiée comme une activité économique humaine irrationnelle et intensifiée avec une population en augmentation rapide.
- Les politiques encourageant l'agriculture dans des terres de parcours qui ne peuvent pas supporter des systèmes culturaux viables contribuent à la désertification.
- La faiblesse des précipitations et les températures élevées ainsi que les vents violents déterminent une forte aridité qui a un rôle dans l'évolution de la désertification.
- Il est clair que dans ce milieu, la recrudescence de la désertification est beaucoup plus liée à la croissance de la pression humaine qu'à la détérioration des conditions climatiques peu favorables.



Conclusion générale

Conclusion générale

Face aux défis environnementaux imposés par les sécheresses récurrentes et la pression anthropique, il est important de surveiller les ressources naturelles disponibles en vue de leur gestion rationnelle et durable.

Dans ce contexte, cette étude a adopté une méthodologie intégrative de données de télédétection et de système d'information géographique pour expliquer les changements de l'occupation des terres et de la désertification dans le sud du Hodna en l'Algérie.

A travers les résultats obtenus, un certain nombre de conclusions peuvent être dégagés.

En premier lieu, l'étude de caractéristiques climatiques de sud du Hodna indique des conditions climatiques difficiles qui sont contraignantes pour le développement de la végétation steppique.

Dans un deuxième temps, l'étude spatio-temporelle de changement d'occupation/utilisation des terres révèle :

- Un déclin continu des terres de parcours entre 1995 et 2016, en raison de l'extension de la superficie agricole et du surpâturage continu qui a conduit à la conversion d'une partie importante de ses terres en parcours dégradés.
- Les zones agricoles ont continué d'augmenter en raison des politiques agricoles adoptées.
- Le phénomène de l'ensablement a augmenté ces dernières années avec un changement profond de l'écosystème steppique.

En second lieu, les résultats de l'analyse de l'intensité de changement montrent que le changement d'occupation/utilisation des terres sur l'intervalle 2011-2016 a été le changement le plus rapide, mais les variations n'étaient pas immobiles sur les autres niveaux d'analyse de l'intervalle. Au niveau des catégories, les terres agricoles, les dunes de sable et les parcours dégradés sont des zones de gain actif tandis que les zones de parcours sont des zones de perte active. Au niveau de transition, les terres agricoles s'étaient développées aux dépens du parcours depuis 1995.

En ce qui concerne l'étude de trajectoire de changement d'occupation/utilisation des terres, il ressort clairement que les principales contributions au changement net étaient la conversion des parcours en parcours dégradés et de terre agricole durant la période étudiée ;

la conversion de cette classe était P ---> PD par environ 204,06 Km² et de P ---> A par environ 94,62 Km².

A travers cette étude et d'une manière générale, le constat de la dégradation des terres a été vérifié dans le sud du Hodna ; les causes de cette dégradation sont en relation directe avec l'anthropisation de ce milieu (extension de l'agriculture et le surpâturage) qui amplifient les facteurs naturels ou climatiques (sécheresse, aridité).

Dans un autre chapitre, une nouvelle approche d'évaluation de la sensibilité à la désertification basée sur l'utilisation des indices spectraux et de l'analyse multicritère de décision intégrée au système d'information géographique nous a permis de classer le sud du Hodna en terme de sensibilité à la désertification en cinq classes « très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée ». Dans un autre volet, l'analyse de changement de la sensibilité à la désertification durant la période de 1995 à 2016 a été abordée en utilisant la technique de tableau croisé, ce qui permet de faire ressortir les conclusions suivantes :

- Augmentation de la classe de sensibilité très élevée ;
- Augmentation de la classe de sensibilité élevée ;
- Diminution de la classe de sensibilité faible.

Dans une autre partie, nous avons tenté d'identifier les facteurs déterminants liés à la désertification et la dégradation des parcours steppiques au Sud du Hodna en utilisant les résultats de la sensibilité à la désertification constatés. Il ressort que :

- La principale cause de la désertification dans le sud du Hodna est identifiée comme une activité économique humaine irrationnelle et intensifiée avec une population en augmentation rapide.
- Les changements interannuels de précipitations, la température et la vitesse du vent sont pris en compte comme facteurs climatiques déterminants de l'évolution de la désertification.
- L'évolution de la désertification dans le Sud du Hodna est beaucoup plus liée à l'accroissement de l'intensité de cheptel et la densité de population qu'à la péjoration des conditions climatiques peu favorables.

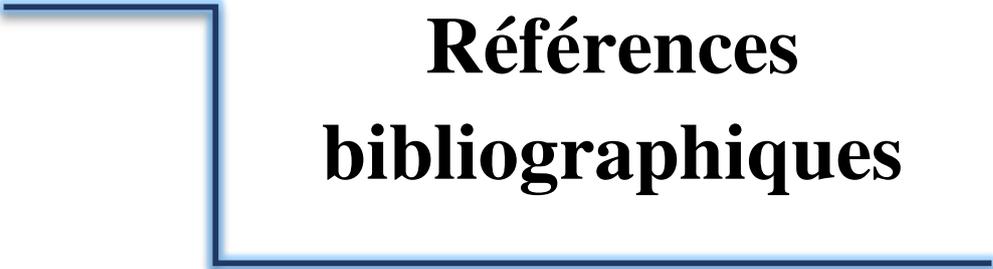
En définitive, l'approche utilisée nous a permis d'identifier quantitativement la désertification des terres ; elle constitue une méthode rapide, peu coûteuse et efficace de surveillance de la désertification, et elle peut être reproduite dans d'autres zones présentant des conditions similaires.

Les cartes de changement d'occupation/utilisation des terres et les cartes de sensibilité à la désertification peuvent être utilisées comme un outil d'aide à la décision pour l'aménagement de cette région et la planification des projets de lutte contre la désertification.

Il est très important d'agir le plus tôt possible pour réhabiliter, conserver et préserver les écosystèmes dans la région de sud du Hodna, spécialement la région classée comme sensible et très sensible à la désertification.

En définitive, ce travail consacré à l'étude du phénomène de la désertification au sud du Hodna avait permis d'aborder les éléments déterminants qui caractérisent la désertification en utilisant plusieurs techniques géospatiales et de répondre aux objectifs fixés au départ dans la problématique. Il n'en reste pas moins que d'autres études qui aborderont d'autres aspects non traités dans ce travail comme l'utilisation des images à haute résolution, l'utilisation d'autres indices de suivi de la désertification, l'application d'autres modèles « IMPDA, Classification et analyse de régression avec des arbres de décision, l'indice de la désertification (ID), classification de réseau neuronal et les techniques orientées objet » permettent de contribuer à une meilleure gestion de ce milieu dans le cadre d'un développement durable.

Enfin, les études de lutte contre la désertification exigent un travail pluridisciplinaire avec l'implication des collectivités locales et la collaboration des organismes en relation avec le monde rural et où le facteur social doit être pris en compte.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- Abdesselam, S. (2013).** Impact de la mise en culture en irrigue sur les sols et les eaux dans un bassin endoréique en zone aride : Cas du sud du Hodna (Algérie). Thèse de Doctorat en science, Université Hadj Lakhdar, Batna, 202 p.
- Abuelgasim, A., and Ammad, R. (2019).** Mapping soil salinity in arid and semi-arid regions using landsat 8 OLI satellite data. *Remote Sensing Applications : Society and Environment*, Vol. 13 : 415-425.
- Aidoud, A. (1989).** Contribution à l'étude des écosystèmes paturés des haute plaines Algéro-oranaises. Fonctionnement, évaluation, et évolution des ressources végétales. Thèse doctorat, USTHB, Alger, 240 p.
- Aidoud, A., et Touffet, J. (1996).** La régression de l'alfa (*Stipa tenacissima*), graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 7, N° 3 : 187-93.
- Ait Lamqadem, A., Pradhan, B., Saber, H., and Rahimi, H. (2018).** Desertification sensitivity analysis using MEDALUS model and GIS : a case study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco. *Sensors*, Vol. 18, N° 7 : 2230.
- Aldwaik, S.Z., and Pontius Jr, R.G. (2013).** Map errors that could account for deviations from a uniform intensity of land change. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 27, N° 9 : 1717-1739.
- Aldwaik, S.Z., and Pontius, Jr.R.G. (2012).** Intensity Analysis to Unify Measurements of Size and Stationarity of Land Changes by Interval, Category, and Transition. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 106, N°1 : 103-114.
- Alphan, H., Doygan, H., and Unlukapman, Y.I. (2009).** Post-classification comparison of land cover using multitemporal Landsat and ASTER imagery : the case of Kahramanmaraş, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 151, N° (1-4) : 327–336.
- Amaouche, D. (2010).** Les potentialités agropastorales de la steppe algérienne : requêtes cartographiques, analyse et interprétation de l'information géographique : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural – Haut-Commissariat au Développement de la Steppe et BNEDER, 33 p.

- ANAT (Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire). (2004).** Carte bioclimatique de l'Algérie.
- Aubreville, A. (1949).** Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.
- Bagnouls, F., et Gaussen, H. (1953, May).** Les climats biologiques et leur classification. In *Annales de Géographie*, Vol. 66, N° 355 : 193-220.
- Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C.A., and González-Sosa, E. (2016).** Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal*, Vol. 22, N° 6 : 1323–1340.
- Bedrani S. (1997).** Les effets du commerce mondial sur la désertification dans les pays du Maghreb, In *L'Annuaire de l'Afrique du Nord*, (CNRS, Aix en Provence).
- Bedrani, S. (1998).** Désertification et emploi en Algérie. In *les Cahiers du CREAD*, N° 4.
- Bedrani, S. (1999).** Situation de l'agriculture, de l'alimentation et de l'économie algérienne, *CIHEAM, Paris*.
- Bedrani, S. (2001).** Les contraintes au développement des zones steppiques et la mise en valeur par les concessions. Ministère de l'agriculture, Alger : 3-16.
- Bedrani, S. (2006).** In *AGRI.MED.CIHEAM*, Rapport annuel : 291-315.
- Bedrani, S., et Bensouiah, R. (2000).** Les causes de la dégradation des parcours steppiques : Résultats d'une enquête. *Annales de l'Institut national agronomique El Harrach*, Vol. 21, N° (1-2) : 14-32.
- Belhadj-Aissa, M., Belhadj-Aissa, A., et Smara, Y. (2006).** Application du SIG et de la Télédétection dans la gestion des feux de forêts en Algérie. *Bulletin des sciences géographiques*, 17 : 54-65.
- Bencherif, S. (2011).** L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne. Evolution et possibilités de développement. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, France, 295 p + Annexes.
- Benguerai, A. (2011).** Evolution du phénomène de désertification dans le sud oranais (Algérie). Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 152 p.

- Benhanifia, K., Haddouche, D., Smahi, Z., Bensaid, A., and Hamimed, A. (2004, February).** Characterization of the deforestation effect in a semi-arid region by the use of satellite images. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology. International Society for Optics and Photonics*, Vol. 5232 : 324-332.
- Benmessaoud, H. (2009).** Etude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse de Doctorat en science, Université El hadj Lakhdar, Batna, 227 p + annexes.
- Bensaïd, A. (2006).** SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naàma (Algérie). Thèse de Doctorat en géographie, Université d'Oran Es-Sénia, Algérie, 325 p.
- Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., et Mederbal, K. (2008).** Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *La revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 8, N°3.
- Bentz, B., et Jouve, P. (2002).** Définitions et caractéristiques générales de la désertification. Dans *Lutte contre la désertification dans les projets de développement*, P. Jouve, C. Corbier-Barthaux et A. Cornet. Eds. (Paris : AFD) : 13-21.
- Bimonte, S. (2007).** Intégration de l'information géographique dans les entrepôts de données et analyse en ligne : de la modélisation à la visualisation. Thèse de doctorat en informatique, Ecole doctorale Informatique et Information pour la Société, Lyon, 219 p.
- Bonn, F., et Rochon, G. (1992).** Précis de télédétection : Principes et méthodes (1 ed, Vol. 1). Sillery, QC : Presses de l'Université du Québec.
- Bouacha, M. (2018).** Application des SIG et de la télédétection à l'étude de la dynamique de végétation des parcours steppiques algériens : Cas de la région de TIARET (Algérie). Thèse de Doctorat 3ème cycle en science, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 125 p.
- Bouahmed, A., et Abdesselam, S. (2010).** Contribution à la création d'une banque de données sur les sols du Hodna a l'aide d'un SIG. Séminaire International sur "La préservation et la Mise en Valeur de l'Ecosystème Steppique". Université Mohamed Boudiaf de M'sila du 14 au 16 mars.

- Bouchetata, T.B., et Bouchetata, A.A. (2005).** Dégradation des écosystèmes steppiques et stratégie de développement durable. Mise au point méthodologique appliquée à la Wilaya de Nâama (Algérie). Développement durable et territoires. Varia : 1-17.
- Boughani, A. (1995).** Contribution à l'étude de la flore et des formations végétales au Sud des monts du Zab (Ouled Djellal, wilaya de Biskra). Thèse magister, USTHB, Alger, 226 p.
- Boukhobza, M. (1982).** L'agro-pastoralisme traditionnel en Algérie : de l'ordre tribal au désordre colonial. Ed. OPU, Alger, 458 p.
- Boultif, M. (2018).** SIG et Modélisation pour la Cartographie des Zones Vulnérables à la Sécheresse et à La Désertification dans un Ecosystème Méditerranéen Semi-Aride : Application dans la Zone d'El Hodna. Thèse De Doctorat 3ème cycle en science, Université Mustapha Benboulaïd, Batna 2, 189 p + Annexes.
- Bouzekri, A. (2015).** Evaluation multicritère des situations Critiques au risque de la désertification Dans les Aurès (Algérie). Thèse de doctorat 3ème cycle En Aménagement du territoire et gestion des risques majeurs, Université El hadj Lakhdar, Batna, 204 p + Annexes.
- C.R.B.T. (1978).** Rapport phytoécologique et pastoral sur les hautes plaines steppiques de la wilaya de Saida, CRBT, Alger, 256 p. + annexe + cartes.
- Caloz, R., Collet, C. (2011).** Analyse spatiale de l'information géographique, Science & ingénierie de l'environnement, Lausanne. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, La suisse, 383p. URL : <http://journals.openedition.org/tem/1952>.
- Campbell, J.B. (2007).** Introduction to Remote Sensing. (4th Ed). The Guilford Press, New-York, 625 p.
- Carver, S.J. (1991).** Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 5, N° 3 : 321-339.
- Chavez, Jr.P.S. (1988).** An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, N° 3 : 459-479.
- Chavez, Jr.P.S. (1996).** Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, N° 9 : 1025–1035.
- Cohen, W., and Goward, S. (2004).** Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, Vol. 54, N° 6 : 535–545.
- Congalton, G.R. (1991).** A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 37, N° 1 : 35-46.

- Coppin, Pol., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., and Lambin, E. (2004).** Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring : A Review. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, N° 9 : 1565–1596.
- Dajoz, R. (1973).** Ecologia Geral : Vozes Edit. Univ. São Paulo, USP, 474 p.
- De Blomac, F., Gal, R., Hubert, M., Richard, D., et Tournet, C. (1994).** ARC / INFO, concepts et application en géomatique. Paris : HERMES.
- Dekkiche, B. (1974).** Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélations géochimiques des eaux de la nappe. Thèse de doctorat, Université de Gand, Belgique, 211 p.
- DGF [Direction Générale des Forêts, Algérie]. (2002).** Rapport National sur la mise en œuvre de la convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Alger : DGF, Organe national de coordination sur la lutte contre la désertification, 37 p.
- DGF [Direction Générale des Forêts, Algérie]. (2004).** Rapport National de l'Algérie sur la mise en œuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification. Alger : DGF, Organe national de coordination sur la lutte contre la désertification, 35 p.
- Djebaili, S. (1978).** Recherche phytosociologique et écologique sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien. Thèse de doctorat en science, Université. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, 299 p + annexes.
- Djebaili, S. (1984).** Steppe algérienne : Phytosociologie et écologie. Ed. OPU, Alger, 177 p.
- Djellouli, Y. (1981).** Etude climatique et bioclimatique des Hauts plateaux du sud oranais. (Wilaya de Saïda). Comportement des espèces vis-à-vis des éléments du climat. Thèse Doct. 3ème cycle, Université Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 272 p + Annexes.
- Djellouli, Y. (1990).** Flores et climats en Algérie septentrionale : Déterminismes Climatiques de la répartition des plantes. Thèse de Doctorat en sciences, USTHB, Algérie, 210 p.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P.A.K., and Toledano, J. (1995).** Raster procedures for Multi-criteria/Multi-objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, N°5 : 539–547.
- EEM (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire). (2005).** Écosystèmes et bien-être humain : Synthèse sur la désertification (Washington D.C : Island Press).

- El Zerey, W., Bachir Bouiadjra, S., Benslimane, M., and Mederbal, K. (2009).** L'écosystème steppique face à la désertification : cas de la région d'El Bayadh, Algérie. *[Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 9, N°2 : 1-12.
- Esri. (2014).** "Dictionary." Definitions for GIS terms related to operations such as analysis, GIS modeling and web-based GIS, cartography, and Esri software.
- Estoque, R. C., and Murayama, Y. (2014).** Social–ecological status index : A preliminary study of its structural composition and application. *Ecological Indicators*, Vol. 43 :183-194.
- FAO (1968).** Études géophysiques dans le bassin du Chott El Hodna, Tech. Report, FAO.
- FAO (1975).** Sandy Soils. Report of the FAO/UNDP Seminar on Reclamation and Management of Sandy Soils in the Near East and North Africa. FAO Soils Bulletin 25, first printing, FAO, Rome.
- Fernandez-Falcon, Eduardo A., et al. (1993).** A Review of Digital Geographic Information Standards for the State/Local User. *URISA Journal*, Vol. 5, N° 2 : 21-27.
- Floret, C., Le Floch, E., et Pontanier, R. (1992).** Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne. In : *L'aridité une contrainte au développement*, Le Floch et al., Eds ORSTOM, Paris : 449-466.
- Fodil, S. (2018).** Dynamique de la désertification dans deux communes steppiques algériennes (El-Gueddid et Zaafrane-Wilaya de Djelfa) et réponses des acteurs : évolution des systèmes agropastoraux et effets des aménagements publics contre la désertification, 152 p.
- Forman, E.H., and Gass, S.I. (2001).** The analytic hierarchy process—An exposition. *Operations Research*, Vol. 49, N°4 : 469-486.
- Gillespie, T.W., Madson, A., Cusack, C.F., and Xue, Y. (2019).** Changes in NDVI and human population in protected areas on the Tibetan Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 51, N° 1 : 428-439.
- Girard, M.C., et Girard, C.M. (1999).** Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p.
- Gounot, M. (1969).** Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Masson et Cie, Paris, 64 p.
- Grine, R. (2009).** Les perspectives hydrogéologiques de la cuvette Hodnéenne. Mémoire de Magister, USTHB, Algérie, 140 p.

- Guettouche, M.S. (2003).** Du terrain à l'analyse numérique essai d'une typologie systématique de l'espace géographique Hodnéen (Algérie nord orientale). Thèse de Doctorat d'Etat en Géomorphologie, FSTGAT, USTHB, Algérie, 230 p.
- Gugan, D.J., and Dowman, I.J. (1988).** Topographic Mapping from SPOT Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, N°10 : 1409-1414.
- Guiraud, R. (1969).** Les traits principaux de l'hydrogéologie du bassin du Chott El Hodna Algérie du nord : Publications du Service Géologique de l'Algérie, Alger - Ministère de l'Industrie et de l'Énergie, Direction des Mines et de la Géologie, Service Géologique, Extrait du Bulletin N°39.
- Guiraud, R. (1990).** Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse de Doctorat en science, Université de Nice, France, 259 p.
- Haddouche, I. (2009).** La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride en Algérie : cas de la région de Naâma. Thèse de Doctorat, Université Tlemcen, Algérie, 211 p + Annexes.
- Hadeid, M. (2008).** Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes. *[Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 8, N°1.
- Halitim, A. (1988).** Sols des régions arides d'Algérie. Ed. OPU, Alger, 384 p.
- Heitschmidt R.K., and Stuth, J.W. (1991).** Grazing Management: an ecological perspective, Timber Press, Portland, USA : 65-83.
- Hinton, J.C. (1996).** GIS and remote sensing integration for environmental application. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 10, N° 7 : 877-890.
- Hirche, A., Boughani, A., et Salamani, M. (2007).** Évolution de la pluviosité dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse*, Vol. 18, N°4 : 314-320.
- Hirche, A., Salamani, M., Abdellaoui, A., Benhouhou, S. and Valderrama, J. (2011).** Landscape changes of desertification in arid areas : the case of south-west Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 179, N° (1-4) : 403-420.

- Huang, C., Goward, S.N., Masek, J.G., Thomas, N., Zhu, Z., and Vogelmann, J.E. (2010).** An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, N°1 :183-198.
- Huang, J., Pontius, Jr, R.G., Li, Q., and Zhang, Y. (2012).** Use of Intensity Analysis to Link Patterns with Processes of Land Change from 1986 to 2007 in a Coastal Watershed of Southeast China. *Applied Geography*, Vol. 34 : 371-384.
- Ikhlef, N. (2012).** Evaluation d'un projet de lutte contre la désertification : cas de la localité d'Oued El Hallouf, commune de Maamora, wilaya de Saida, Algérie. Mémoire de Master of Science, CIHEAM-IAMM, 125 p.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., and Otterman, J. (1975).** Surface albedo and desertification. *Science*, Vol. 189, N° 4207 : 1012–1015.
- Jenks, G.F. (1963).** Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 53, N°(1) : 15–26.
- Kacimi, B. (1996).** La problématique du développement des zones steppiques (Approche et perspectives). Doc, HCDS, Ministère de l'agriculture, 27 p.
- Kadi Hanifi, H. (1998).** L'alfa en Algérie. Thèse Doctorat Science, USTHB, Alger, 270 p.
- Kairis, O., Karavitis, C., Salvati, L., Kounalaki, A., and Kosmas, K. (2015).** Exploring the impact of overgrazing on soil erosion and land degradation in a dry Mediterranean Agro-Forest Landscape (Crete, Greece). *Arid Land Research and Management*, Vol. 25, N°3 : 360–374.
- Katyal, J.C., and Vlek, P.L.G. (2000).** Desertification : Concept, causes and amelioration, ZEF, Discussion Papers on Development Policy, 33 p.
- Khalidi, A. (2014).** La gestion non-durable de la steppe algérienne. *[Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement*.
- Khaldoun, A. (2000).** Evolution technologique et pastoralisme dans la steppe algérienne : le cas du camion Gak en Hautes-Plaines occidentales. In : *Bourbouze A., Qarro M. (eds.). Rupture : nouveaux enjeux, nouvelles fonctions, nouvelle image de l'élevage sur parcours*. Montpellier : CIHEAM, 246 p. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens, N : 39).

- Khan, M.N., Rastoskuev, V.V., Sato, Y., and Shiozawa, S. (2005).** Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, Vol. 77, N° (1-3) : 96-109.
- Khiry, M.A. (2007).** Spectral mixture analysis for monitoring and mapping desertification processes in semi-arid areas in North Kordofan State, Sudan. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 144 p + Appendices.
- Kishk, M.A. (1986).** Land degradation in the Nile valley. *Ambio*, Vol. 15, N°4 : 226-230.
- Kluser, S. (2000).** Elaboration d'une carte de couverture du sol par interprétation semi-automatisée de l'espace colorimétrique d'ortho-photos). Application au bassin versant du Nant d'Avril (France, Suisse). Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement, Université de lausanne, 69 p.
- Konecny, G. (2002).** Geoinformation. Remote Sensing, Photogrametry and Geographic Information Systems, Taylor and Francis Ed. cRc Press, London. 264 p.
- Labani, A., and Benabdeli, K. (2006).** Fluctuations climatiques et dynamique de l'occupation de l'espace dans la commune d'Ain El Hadjar (Saïda, Algérie). *Science et changements planétaires /Revue Sécheresse*, Vol. 17, N°3 : 391-398.
- Lavauden, L. (1927).** Les forêts du Sahara. *Revue des Eaux et Forêts*, N° (6- 7) : 329-341.
- Le Houérou, H. N., Claudin, J., Haywood, M., and Donadieu, P. (1975).** Etude phytocéologique du Hodna (Algérie). 154 p., 14 Figure., 22 Table., 1 Carte., coul. 1/200000 (3 feuilles). *AGS : DP/Alg/66/509, FAO, Rome.*
- Le Houérou, H.N. (1968).** La désertification du Sahara septentrional et des steppes limitrophes (Libye, Tunisie, Algérie). *Annales algériennes de géographies* (Algérie), N°6 Juil/Sept, 1968. 10 p.
- Le Houerou, H.N. (1985).** La régénération des steppes algériennes. Rapport de mission de consultation et d'évaluation, Alger, Ministère de l'agriculture.
- Le Houerou, H.N. (1993).** Changements climatiques et désertisation. *Revue Sécheresse*, Vol. 4, N° 2 : 95-111.
- Le Houerou, H.N. (1995).** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du nord de l'Afrique, Options Méditerranéennes, série B, études et recherches, N° 10, Montpellier,

- Centre International des Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM), 396 p.
- Lea, C., and Curtis, A.C. (2010).** Thematic accuracy assessment procedures : National Park Service Vegetation Inventory, version 2.0. *Natural Resource Report NPS/2010/NRR—2010/204*, National Park Service, Fort Collins, Colorado, USA.
- Li, S.G., Harazono, Y., Oikawa, T., Zhao, H.L., He, Z.H., and Chang, X.L. (2000).** Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 102, N° (2-3) : 125–137.
- Liang, S.L. (2001).** Narrowband to broadband conversions of land surface albedo : algorithms. *Remote sensing of environment*, Vol. 76, N°2 : 213–238.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., and Chipman J.W. (2004).** Remote Sensing and Image Interpretation. 7th. Ed. John Wiley and Sons, New York, 736 p.
- Liu, H., and Zhou, Q. (2004).** Accuracy analysis of remote sensing change detection by rule-based rationality evaluation with post-classification comparison. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, N° 5 : 1037– 1050.
- Loireau, M., Sghaier, M., Fetoui, M., Ba, M., Abdelrazik, M., d’Herbès, J.M., Desconnets, J.C., Leibovici, D., Debard, S., et Delaître, É. (2007).** Système d’information sur l’Environnement à l’échelle locale (SIEL) pour évaluer le risque de désertification : situations comparées circum sahariennes (réseau ROSELT) », Science et changements planétaires Sécheresse : Surveillance environnementale à long terme dans les zones arides et semi-arides, Numéro Spécial, Vol. 18, N°4 : 328-335.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E. (2004) :** Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, N°12 : 2365–2401.
- Ma, Z., Xie, Y., Jiao, J., li, L., and Wang, X. (2011).** The Construction and Application of an Albedo-NDVI Based Desertification Monitoring Model. *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 10 : 2029–2035.
- MADR. (2007).** Le plan national de développement agricole et rural et la lutte contre la désertification. Comm. Atelier International du Parlement Panafricain sur la Lutte Contre la Désertification, Alger du 02 au 04 Avril 2007.

- MADR. (2014).** Statistique agricole, superficies et productions. Ministère de l'agriculture et du développement rural Série B.
- Maestre, F.T. (2004).** On the importance of patch attributes, environmental factors and past human impacts as determinants of perennial plant species richness and diversity in Mediterranean semi-arid steppes. *Diversity and Distributions*, Vol. 10, N°1 : 21-29.
- Malczewski, J. (1999).** GIS and Multi-Criteria Decision Analysis. John Willey and Sons, New York, 392 p.
- Malczewski, J. (2006).** GIS-based multicriteria decision analysis : A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, N° 7 :703-726.
- Malczewski, J., and Rinner, C. (2015).** Multicriteria decision analysis in geographic information science. *Springer*, New York, USA, 331 P.
- Mallinis, G., Koutsias, N., and Arianoutsou, M. (2014).** Monitoring Land Use/Land Cover Transformations from 1945 to 2007 in Two Peri-Urban Mountainous Areas of Athens Metropolitan Area, Greece. *Science of the Total Environment*, Vol. 15, N° 490 : 262-278.
- MARA. (1974).** La steppe Algérienne. Statistique agricole, Ministère de l'Agriculture et de la Révolution Agraire, N°14 : 383 p.
- Mas, J.F. (1999).** Monitoring land-cover changes : a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, N° 1 : 139-152.
- Mertens, B., and Lambin, E.F. (2000).** Land-cover-change trajectories in southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 90, N°3 : 467–494.
- Middleton, N.J and Thomas, D.S.G. (1992).** World Atlas of Desertification. *Land degradation and developement*, Vol. 3, N°4 : 249-249.
- Mimoune, S. (1995).** Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (Sud du Chott El Hodna). Thèse Doctorat, Université Aix-Marseille I, France, 209 p.
- Mitchel, A. (2005).** The ESRI Guide to GIS Analysis : Volume 2 : *Spatial Measurements and Statistics*. ESRI Press, Californie, 252 p.
- Mouhous, A. (2005).** Les causes de la dégradation des parcours steppiques. Mémoire de Magister, INA El-Harrach, 126 p.

- Musick, H.B. (1986).** Temporal change of Landsat MSS albedo estimates in arid rangeland. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 20, N° 2 : 107–120.
- Nahal, I. (2004).** La désertification dans le monde : Causes-Processus-Conséquences-Lutte. Editions L'Harmattan : 33-83.
- Navulur, K. (2006).** Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm. CRC Press, *Taylor and Frances Group*, Boca Raton.
- Nedjimi, B., et Homida, M. (2006).** Problématique des zones steppiques algériennes et perspectives d'avenir. *Revue du Chercheur*, Vol. 4, N°4 : 13-19.
- Nedjimi, B., et Guit, B. (2012).** Les steppes algériennes : Causes de déséquilibre. *Algerian Journal of Arid Environment*, Vol. 2, N° 2 : 50-61.
- Nedjimi, B., Sebti, M., et Naoui, T. (2008).** Le problème du foncier agricole en Algérie, Alger. *Revue Droit et Science Humaine*, Vol.1 : 1-11.
- Nedjraoui, D. (1981).** Teneurs en éléments biogènes et valeurs énergétiques dans trois principaux faciès de végétation dans les Hautes Plaines steppique de la wilaya de Saida. Thèse de Doctorat 3ème cycle, USTHB, Algérie, 156 p.
- Nedjraoui, D. (1996).** The impact of grazing on needle grass steppes. In *The optimal exploitation of marginal Mediterranean areas by extensive ruminant production systems. Proceedings of an international symposium organized by HSAP and EAAP and sponsored by EU (DGVI), FAO and CIHEAM.* Hellenic Society of Animal Production : 329-333.
- Nedjraoui, D. (2003).** Les mécanismes de suivi de la désertification en Algérie proposition d'un dispositif national de surveillance écologique à long terme. Doc, OSS, 37 p.
- Nedjraoui, D. (2004).** Évaluation des ressources pastorales des régions steppiques algérienne et définition des indicateurs de dégradation. *Cahiers Options Méditerranéennes*, N° 62 : 239-243.
- Nedjraoui, D. (2002).** Les ressources pastorales en Algérie. Document FAO, [en ligne] www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/Algeria/Algerie.htm.
- Nedjraoui, D., et Bedrani, S. (2008).** La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *La revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 8, N° 1 : 1-15.

- Oussedik, A., Iftène, T., et Zegrar, A. (2003).** Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification. *Sécheresse*, Vol. 14, N°2 : 121-127.
- Pan, J., and Li, T. (2013).** Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. *Natural hazards*, Vol. 68, N° 2 : 915-927.
- Petit, C., Scudder, T., and Lambin, E. (2001).** Quantifying processes of land-cover change by remote sensing : Resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, N°17 : 3435–3456.
- PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). (2007).** Convention on Biological Diversity : Dry and Sub-humid Lands Biodiversity.
- Polidori, L. (2002).** Introduction à la télédétection spatiale. Cours de télédétection : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes. Laboratoire Régional de Télédétection (Cayenne, Guyane Française), 60 p.
- Pontius, R., Gao, Y., Giner, N., Kohyama, T., Osaki, M., and Hirose, K. (2013).** Design and Interpretation of Intensity Analysis Illustrated by Land Change in Central Kalimantan, Indonesia. *Land journal*, Vol. 2, N°3 : 351-369.
- Pouchin, T. (2001).** Élaboration d'un observatoire paysager, Application à l'estuaire de Seine. Thèse de doctorat Géographie & Aménagement, Université du Havre, UMR « IDEES » 6063 du CNRS, France, 316 p.
- Pouget, M. (1980).** Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Thèse de Doctorat en science, Paris, Travaux et documents ORSTOM, 116, 555 p.
- Regagba, Z. (2012).** Dynamique des populations végétales halophytes dans la région sud-est de Tlemcen. Aspects phytoécologiques et cartographiques. Thèse de doctorat en écologie végétale, Université de Tlemcen, 170 p + Annexes.
- Riobinove, C.J., Chavez, Jr.P.S., Gehring, D., and Holmgren, R. (1981).** Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, Vol.11 : 133–156.
- Rousel, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W. (1973, December).** Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite—1 Symposium*, NASA SP-351 : 309-317.

- Roy, P.S., and Tomar, S. (2001).** Landscape cover dynamics pattern in Meghalaya. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, N°18 : 3813–3825.
- Saaty, T. (1980).** The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, *Resource Allocation*. McGraw Hill International, New York, 287 p.
- Saaty, T.L. (1977).** A scaling method for priorities in hierarchichal structure. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, N°3 : 234–281.
- Saaty, T.L. (2000).** Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. RWS Publications, Pittsburgh.
- Sabins, F. (1996).** Principles and Interpretation of Remote Sensing, New York.
- Safriel, U., Adeel, Z., Niemeijer, D., Puigdefabregas, J., White, R., Lal, R., Winslow, M., Ziedler, J., Prince, S., Archer, E., King, C., Shapiro, B., Wessels, K., Nielsen, T., Portnov, B., Reshef, I., Thonell, J., Lachman, E., and McNab, D. (2005).** Dry land systems. In : *Millennium Ecosystem Assessment : Ecosystems and HumanWell-being : Current State and Trends : Findings of the Condition and Trends Working Group*, Hassan, R. M., Scholes, R. and Ash, N., eds., Island Press : Washington, DC, Chapitre 22 : 623–662.
- Sahnouni, R., et Abdesselam, S. (2018).** Change of land Use/Cover in Algeria's Steppe Ecosystem : A case Study of Southern Hodna. *The Arab World Geographer*, Vol. 21, N°4 : 348-360.
- Salamani, M., Kadi, H., Hirche, A., et Nedjraoui, D. (2013).** Évaluation de la sensibilité à la désertification en Algérie. *Revue d'écologie*, Vol. 68, N° 1 : 71-84.
- Sebhi, S. (1987).** Mutation du monde rural Algérien. Le Hodna. (Algérie). Ed. OPU, Alger, 252 p.
- Senoussi, A., Chehma, A., et Bensemaoune, Y. (2011).** La steppe algérienne à l'aube du IIIème millénaire : quel devenir ?. *Annales des sciences et Technologie*, Vol. 3, N°2 : 129-138.
- Senoussi, A., Hadbaoui, I., et Huguenin, J. (2014).** L'espace pastoral dans la région de M'sila, Algérie : état et perspectives de réhabilitation. *Livestock Research for Rural Development*, Vol. 26, N° 11 : 1-11.

- Seto, K.C., and Fragkias, M. (2005).** Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecology*, Vol. 20, N°7 : 871-888.
- Sinave, E. (2010).** Les défis de la mise en œuvre de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke, Canada, 81 p.
- Singh, A. (1989).** Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, N°6 : 989-1003.
- Slimani, H., Aidoud, A., and Rozé, F. (2010).** 30 Years of protection and monitoring of a steppic rangeland under going desertification. *Journal of Arid Environments*, Vol. 74, N° 6 : 685–691.
- Slimani, H., and Aidoud, A. (2004).** Desertification in the Maghreb : a case study of an Algerian high-plain steppe. In *Environmental Challenges in the Mediterranean 2000–2050*. Springer, Dordrecht : 93-108.
- Smith, R.B. (2010).** The heat budget of the earth's surface deduced from space. *Yale University Center for Earth Observation : New Haven, CT, USA*. Available online : http://yceo.yale.edu/sites/default/files/files/Surface_Heat_Budget_From_Space.pdf. (accessed on 20 April 2018).
- Stewart. P. (1968).** Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse*, Vol. 59, N° (1- 4) : 23-36.
- Thomas, M. (1997).** Remote sensing. *Mapping Awareness*, Vol. 11, N°1 : 32-33.
- Tricart, J. (1954).** Influence des sols salés sur la déflation éolienne en basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, Vol. 5 : 124-132.
- UNCCD. (1994).** Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique (texte final de la convention), United Nations Convention to Combat Desertification, Paris, France, 17 June 1994, 65 p.
- Vaidya, O., and Kumar, S. (2006).** Analytic hierarchy process : An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, N°1 : 1-29.

- Vermote, E.F., and Kotchenova, S. (2008).** Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. *Journal of Geophysical Research*, Vol.113, N° 23 : 1-12.
- Wang, L., and Qu, J.J. (2007).** NMDI : A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, N° 20 : 545-552.
- Wang, T., Wu, W., and Zhao, H. (2004).** Analyses on driving factors to sandy desertification process in Horqin region, China. *Journal of Desert Research*, Vol. 24, N° 5 : 519-528.
- Wang, T., Wu, W., Xue, X., Han, Z., Zhang, W., and Sun, Q. (2004).** Spatial-temporal changes of Sandy desertified land during last 5 decades in Northern China. *Acta Geographica Sinica*, Vol. 59, N°2 : 203-212.
- Weng, Q. (2010).** Remote sensing and GIS integration : theories, methods, and applications. McGraw-Hill, New York ,416 p.
- Wilkinson, G.G. (1996).** A review of current issues in the integration of GIs and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information System*, Vol. 10, N°1 : 87-101.
- Woodcock, C.E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., and Nemani, R. (2008).** Free access to Landsat imagery. *Science*, Vol. 320, N° 5879 : 1011.
- Yuan, F., Sawaya, K.E., Loeffelholz, B.C., and Bauer, M.E. (2005).** Land cover classification and change analysis of the twin cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 98, N° (2-3) : 317-328.
- Zahedi, F. (1986).** The analytic hierarchy process : A survey of the method and its applications. *Interfaces*, Vol. 16, N° 4 : 96–108.
- Zhou, P., Huang, J., Pontius, Jr.R.G., and Hong, H. (2014).** Land Classification and Change Intensity Analysis in a Coastal Watershed of Southeast China. *Sensors*, Vol. 14, N° 7 : 11640-11658.
- Zhou, W., Troy, A., and Grove, M. (2008).** Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore metropolitan area using multitemporal high resolution remote sensing data. *Sensors*, Vol. 8, N° 3 : 1613-1636.

Liste des tableaux par chapitre

Chapitre I

Tableau I.1 :	Exemples de définitions de la désertification	06
Tableau I.2 :	Les principaux programmes de lutte contre la désertification.....	15

Chapitre II

Tableau II.1 :	Caractéristiques géographiques de la station météorologique de Boussaâda.....	41
Tableau II.2 :	Données Climatiques de la station météorologique de Boussaâda.....	41

Chapitre III

Tableau III.1 :	Caractéristiques des capteurs Landsat TM, ETM+ et OLI.....	53
Tableau III.2 :	Changement d'occupation//utilisation des terres entre 1995 et 2016...	72
Tableau III.3 :	Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres entre 1995 et 2016	73
Tableau III.4 :	Trajectoire de changement des classes d'occupation des terres (1995-2016).....	84
Tableau III.5 :	Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (1995-2000).....	85
Tableau III.6 :	Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2000-2005).....	85
Tableau III.7 :	Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2005-2011).....	86
Tableau III.8 :	Tableau croisé des classes d'occupation/utilisation des terres (2011-2016).....	86

Chapitre IV

Tableau IV.1 :	Échelle numérique de SAATY (1977) « Comparaison par paire des critères ».....	93
Tableau IV.2 :	Les valeurs de l'indice de cohérence aléatoire.....	95
Tableau IV.3 :	Indices dérivés des images satellitaires utilisés pour le modèle.....	97
Tableau IV.4 :	Matrice de comparaison par paires des critères.....	111
Tableau IV.5 :	Poids des indices utilisés.....	111
Tableau IV.6 :	Description des différents degrés de sensibilité à la désertification au Sud de Hodna	114
Tableau IV.7 :	Résumé de la désertification pour 1995, 2005 et 2016.....	117
Tableau IV.8 :	Tableau croisé des classes de sensibilité à la désertification (1995-2016).....	119
Tableau IV.9 :	Matrice de confusion et évaluation de la précision de la carte de sensibilité à la désertification pour l'année 2016.....	122

Liste des figures par chapitre

Chapitre I

Figure I.1 :	Localisation des zones sèches au niveau mondial et leurs Catégories.....	08
Figure I.2 :	Limites de la steppe algérienne	10
Figure I.3 :	Évolution de la population steppique par rapport à la population totale.....	11
Figure I.4 :	Évolution des moyennes des précipitations annuelles en fonction de la référence année humide (Communes El-Gueddid et Zaafrane-Wilaya de Djelfa).....	12
Figure I.5 :	Structure d'un SIG.....	20
Figure I.6 :	Le cycle de vie de l'information géographique dans un SIG.....	21
Figure I.7 :	Couches d'informations spatialisées au sein d'un SIG.....	22
Figure I.8 :	La réflexion et l'émission du rayonnement.....	24
Figure I.9 :	Représentation schématique d'une onde électromagnétique.....	26
Figure I.10 :	Les principales divisions du spectre électromagnétique.....	27
Figure I.11 :	Signature spectrale de l'eau, de la végétation et du sol.....	28

Chapitre II

Figure II.1 :	Localisation du bassin du Hodna.....	32
Figure II.2 :	Localisation de la zone d'étude	34
Figure II.3 :	Coupe géologique schématique à travers le Hodna.....	35
Figure II.4 :	Principaux systèmes morphologiques du Hodna.....	37
Figure II.5 :	Carte phyto-écologique du Hodna.....	38
Figure II.6 :	Carte pédologique du Hodna.....	39
Figure II.7 :	Les zones climatiques du Hodna.....	40
Figure II.8 :	Précipitation moyenne mensuelle de la période allant de 1995 à 2016.....	42
Figure II.9 :	Précipitation moyenne annuelle de la période allant de 1995 à 2016.....	43

Figure II.10 :	Température moyenne mensuelle de la période allant de 1995 à 2016.....	43
Figure II.11 :	Température moyenne annuelle de la période allant de 1995 à 2016.....	44
Figure II.12 :	Vitesse moyenne du vent en m/s de la période allant de 1995 à 2016.....	45
Figure II.13 :	Diagramme Ombrothermique de la période allant de 1995 à 2016..	46
Figure II.14 :	Positionnement de la station de Boussaâda dans le climagramme d'Emberger durant la période (1995-2016).....	48

Chapitre III

Figure III.1 :	Organigramme synthétique de l'approche méthodologique.....	51
Figure III.2 :	Photos de la zone d'étude : A) Agriculture ; B) Terres de parcours ; C) Parcours dégradés ; et D) Dunes de sable.....	55
Figure III.3 :	Fenêtre du module correction atmosphérique (Cas de l'image Landsat LC81950352016085LGN00).....	57
Figure III.4 :	Résultats des corrections sur l'image Landsat OLI 8 (25/03/2016)...	58
Figure III.5 :	Carte d'occupation/utilisation des terres (1995).....	66
Figure III.6 :	Représentation graphique des données d'occupation/utilisation des terres (1995).....	66
Figure III.7 :	Carte d'occupation/utilisation des terres (2000)	67
Figure III.8 :	Représentation graphique des données d'occupation/utilisation des terres (2000).....	67
Figure III.9 :	Carte d'occupation/utilisation des terres (2005)	68
Figure III.10 :	Représentation graphique des données d'occupation/utilisation des terres (2005).....	68
Figure III.11 :	Carte d'occupation/utilisation des terres (2011)	69
Figure III.12 :	Représentation graphique des données d'occupation/utilisation des terres (2011).....	69
Figure III.13 :	Carte d'occupation/utilisation des terres (2016)	70
Figure III.14 :	Représentation graphique des données d'occupation/utilisation des terres (2016).....	70
Figure III.15 :	Evolution des superficies des classes d'occupation/utilisation des	

	terres entre 1995 et 2016.....	72
Figure III.16 :	Cartes de perte et de gains des classes d'occupation/utilisation des terres entre 1995 et 2016 (A : Dunes de sable, B : Parcours, C : Parcours dégradés, D : Agriculture)	74
Figure III.17 :	Analyse de l'intensité de changement d'occupation des terres pour les quatre intervalles de temps (1995-2000, 2000-2005, 2005-2011 et 2011-2016).....	75
Figure III.18 :	Analyse de l'intensité de changement par catégorie d'occupation des terres (Gain et perte).....	78
Figure III.19 :	Analyse de l'intensité de transition par catégorie d'occupation des terres.....	82
Figure III.20 :	Trajectoires de changement d'occupation/utilisation des terres.....	83

Chapitre IV

Figure IV.1 :	Organigramme méthodologique pour la cartographie de la sensibilité à la désertification.....	91
Figure IV.2 :	Carte d'Albedo (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	100
Figure V.3 :	Carte de l'NDSI (A: 1995, B: 2005, C : 2016)	100
Figure IV.4 :	Carte de l'NDVI (A: 1995, B: 2005, C : 2016)	101
Figure IV.5 :	Carte de l' NDMI (A: 1995, B: 2005, C : 2016)	101
Figure IV.6 :	Carte de l' EMI (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	102
Figure IV.7 :	Carte d'occupation des terres (A: 1995, B: 2005, C : 2016)	102
Figure IV.8 :	Carte d'Albedo reclassé (A: 1995, B: 2005, C :2016).....	104
Figure IV.9 :	Carte de l' NDSI reclassé (A: 1995, B: 2005, C : 2016)	105
Figure IV.10 :	Carte de l'NDVI reclassé (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	106
Figure IV.11 :	Carte de l'NDMI reclassé (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	108
Figure IV.12 :	Carte de l'EMI reclassé (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	109
Figure IV.13 :	Carte d'occupation des terres reclassée (A: 1995, B: 2005, C : 2016).....	110

Figure IV.14 : Cartes de sensibilité à la désertification (A : 1995, B : 2005, C : 2016).....	113
Figure IV.15 : Représentation graphique des classes de sensibilité à la désertification (1995, 2005 et 2016).	117
Figure IV.16 : Carte de changement de la désertification entre 1995 et 2016.....	120
Figure IV.17 : Carte des relevés GPS et échantillonnage pour valider la carte de la désertification (2016).....	123

Chapitre V

Figure V.1 : Diagramme climatique de la région d'étude (1995 à 2016).....	127
Figure V.2 : Densité de la population au sud du Hodna (1995 à 2016)	128
Figure V.3 : Mouvement des agropasteurs dans les systèmes d'élevage agropastoraux actuels	129
Figure V.4 : Evolution de l'intensité de pâturage dans le sud du Hodna (1995-2016).....	130
Figure V.5 : Evolution de la surface agricole dans le sud de Hodna (1995-2016)..	132
Figure V.6 : Planche photographique représentant les pratiques agricoles au sud du Hodna.....	133
Figure V.7 : Régression linéaire des facteurs anthropiques (A : Terres agricoles , B : Densité de population, C : Intensité de pâturage)	135
Figure V.8 : Evolution de la désertification et des facteurs anthropiques.....	137
Figure V.9 : Régression linéaire des facteurs climatiques (A : Température, B : Précipitation , C : Vitesse du vent).....	138
Figure V.10 : Evolution de la désertification et des facteurs climatiques	140
Figure V.11 : Causes et conséquences de la désertification dans le sud du Hodna...	141



Les annexes

Les annexes

Annexe 1. Matrice de confusion après une classification supervisée (1995).

Confusion Matrix: [Classification 1995] (2012x757x1)					
Overall Accuracy = (3191/3268) 97.6438%					
Kappa Coefficient = 0.9685					
Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	DEGRADED MTR	AGR MTR	SAND MTR	RANGELAND MTR	
Unclassified	0	0	0	0	0
DEGRADED CLS	682	0	0	2	684
AGR CLS [Red]	0	787	2	42	831
SAND CLS [Cya	2	0	852	0	854
RANGELAND CLS	20	3	6	870	899
Total	704	790	860	914	3268
Class	Ground Truth (Percent)				Total
	DEGRADED MTR	AGR MTR	SAND MTR	RANGELAND MTR	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEGRADED CLS	96.88	0.00	0.00	0.22	20.93
AGR CLS [Red]	0.00	99.62	0.23	4.60	25.43
SAND CLS [Cya	0.28	0.00	99.07	0.00	26.13
RANGELAND CLS	2.84	0.38	0.70	95.19	27.51
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Class	Commission	Omission	Commission	Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)	
DEGRADED CLS	0.29	3.13	2/684	22/704	
AGR CLS [Red]	5.29	0.38	44/831	3/790	
SAND CLS [Cya	0.23	0.93	2/854	8/860	
RANGELAND CLS	3.23	4.81	29/899	44/914	
Class	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)	
DEGRADED CLS	96.88	99.71	682/704	682/684	
AGR CLS [Red]	99.62	94.71	787/790	787/831	
SAND CLS [Cya	99.07	99.77	852/860	852/854	
RANGELAND CLS	95.19	96.77	870/914	870/899	

Annexe 2. Matrice de confusion après une classification supervisée (2000).

Confusion Matrix: [Classification 2000] (2012x757x1)					
Overall Accuracy = (3854/4025) 95.7516%					
Kappa Coefficient = 0.9432					
Ground Truth (Pixels)					
Class	Agriculture M	Parcours M	Sable dunaire	Parcours dégr	Total
Unclassified	0	0	0	0	0
Agriculture C	1146	29	0	0	1175
Parcours C [B	1	912	0	70	983
Sable dunaire	0	0	884	28	912
Parcours dégr	0	16	27	912	955
Total	1147	957	911	1010	4025
Ground Truth (Percent)					
Class	Agriculture M	Parcours M	Sable dunaire	Parcours dégr	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agriculture C	99.91	3.03	0.00	0.00	29.19
Parcours C [B	0.09	95.30	0.00	6.93	24.42
Sable dunaire	0.00	0.00	97.04	2.77	22.66
Parcours dégr	0.00	1.67	2.96	90.30	23.73
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Commission and Omission (Pixels)					
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)	
Agriculture C	2.47	0.09	29/1175	1/1147	
Parcours C [B	7.22	4.70	71/983	45/957	
Sable dunaire	3.07	2.96	28/912	27/911	
Parcours dégr	4.50	9.70	43/955	98/1010	
Production and User Accuracy (Pixels)					
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)	
Agriculture C	99.91	97.53	1146/1147	1146/1175	
Parcours C [B	95.30	92.78	912/957	912/983	
Sable dunaire	97.04	96.93	884/911	884/912	
Parcours dégr	90.30	95.50	912/1010	912/955	

Annexe 3. Matrice de confusion après une classification supervisée (2005).

Confusion Matrix: [Classification 2005] (2012x757x1)						
Overall Accuracy = (3382/3731) 90.6459%						
Kappa Coefficient = 0.8747						
Ground Truth (Pixels)						
Class	Agiculture	M	Parcours M	Sable dunaire	Parcours dégr	Total
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Agiculture C	944	2	0	0	0	946
Parcours C [B	0	1038	0	4	0	1042
Sable dunaire	0	0	904	331	0	1235
Parcours dégr	0	7	5	496	0	508
Total	944	1047	909	831	0	3731
Ground Truth (Percent)						
Class	Agiculture	M	Parcours M	Sable dunaire	Parcours dégr	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agiculture C	100.00	0.19	0.00	0.00	0.00	25.36
Parcours C [B	0.00	99.14	0.00	0.48	0.00	27.93
Sable dunaire	0.00	0.00	99.45	39.83	0.00	33.10
Parcours dégr	0.00	0.67	0.55	59.69	0.00	13.62
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Commission and Omission (Percent and Pixels)						
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)		
Agiculture C	0.21	0.00	2/946	0/944		
Parcours C [B	0.38	0.86	4/1042	9/1047		
Sable dunaire	26.80	0.55	331/1235	5/909		
Parcours dégr	2.36	40.31	12/508	335/831		
Production and User Accuracy (Percent and Pixels)						
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)		
Agiculture C	100.00	99.79	944/944	944/946		
Parcours C [B	99.14	99.62	1038/1047	1038/1042		
Sable dunaire	99.45	73.20	904/909	904/1235		
Parcours dégr	59.69	97.64	496/831	496/508		

Annexe 4. Matrice de confusion après une classification supervisée (2011).

Confusion Matrix: [Classification 2011] (2012x757x1)						
Overall Accuracy = (3767/4101) 91.8556%						
Kappa Coefficient = 0.8901						
Ground Truth (Pixels)						
Class	Agriculture	Sable dunaire	Parcours dégr	Parcours M	Total	
Unclassified	0	0	0	0	0	
Agriculture C	920	0	0	3	923	
Sable dunaire	0	800	14	0	814	
Parcours dégr	0	67	785	234	1086	
Parcours C [M	2	0	14	1262	1278	
Total	922	867	813	1499	4101	
Ground Truth (Percent)						
Class	Agriculture	Sable dunaire	Parcours dégr	Parcours M	Total	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Agriculture C	99.78	0.00	0.00	0.20	22.51	
Sable dunaire	0.00	92.27	1.72	0.00	19.85	
Parcours dégr	0.00	7.73	96.56	15.61	26.48	
Parcours C [M	0.22	0.00	1.72	84.19	31.16	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Commission and Omission (Pixels)						
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)		
Agriculture C	0.33	0.22	3/923	2/922		
Sable dunaire	1.72	7.73	14/814	67/867		
Parcours dégr	27.72	3.44	301/1086	28/813		
Parcours C [M	1.25	15.81	16/1278	237/1499		
Production and User Accuracy (Pixels)						
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)		
Agriculture C	99.78	99.67	920/922	920/923		
Sable dunaire	92.27	98.28	800/867	800/814		
Parcours dégr	96.56	72.28	785/813	785/1086		
Parcours C [M	84.19	98.75	1262/1499	1262/1278		

Annexe 5. Matrice de confusion après une classification supervisée (2016).

Confusion Matrix: [Classification 2016] (2012x757x1)								
Overall Accuracy = (3085/3090) 99.8382%								
Kappa Coefficient = 0.9978								
	Ground Truth (Pixels)							
Class	SAND	MTRRANGELAND	MTR	DEGRADED	MTR	AGR	MTR	Total
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0
SAND CLS [Blu	775	0	0	2	0	0	0	777
RANGELAND CLS	0	751	3	0	0	0	0	754
DEGRADED CLS	0	0	668	0	0	0	0	668
AGR CLS [Gree	0	0	0	0	891	0	0	891
Total	775	751	673	673	891	891	0	3090
	Ground Truth (Percent)							
Class	SAND	MTRRANGELAND	MTR	DEGRADED	MTR	AGR	MTR	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SAND CLS [Blu	100.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	25.15
RANGELAND CLS	0.00	100.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	24.40
DEGRADED CLS	0.00	0.00	99.26	0.00	0.00	0.00	0.00	21.62
AGR CLS [Gree	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	28.83
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Commission		Omission					
Class	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)				
SAND CLS [Blu	0.26	0.00	2/777	0/775				
RANGELAND CLS	0.40	0.00	3/754	0/751				
DEGRADED CLS	0.00	0.74	0/668	5/673				
AGR CLS [Gree	0.00	0.00	0/891	0/891				
	Prod. Acc.		User Acc.					
Class	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)				
SAND CLS [Blu	100.00	99.74	775/775	775/777				
RANGELAND CLS	100.00	99.60	751/751	751/754				
DEGRADED CLS	99.26	100.00	668/673	668/668				
AGR CLS [Gree	100.00	100.00	891/891	891/891				

Annexe 6. Couche thématique et poids de leurs classes correspondantes.

	Indice	Poids	Date	Classe	Rang	Sensibilité à la désertification
1	Albedo	0,122	1995	0,3550 - 0,5349	1	Très élevée
				0,3095 - 0,3550	2	Elevée
				0,2705 - 0,3095	3	Moyenne
				0,2228 - 0,2705	4	Faible
				-0,0177 - 0,2228	5	Très faible
			2005	0,3475 - 0,4527	1	Très élevée
				0,3125 - 0,3475	2	Elevée
				0,2830 - 0,3125	3	Moyenne
				0,2497 - 0,2830	4	Faible
				-0,0177 - 0,2497	5	Très faible
			2016	0,3643 - 0,6067	1	Très élevée
				0,3153 - 0,3643	2	Elevée
				0,2663 - 0,3153	3	Moyenne
				0,2124 - 0,2663	4	Faible
				-0,0177 - 0,2124	5	Très faible
2	NDSI	0,028	1995	0 - 0,0680	1	Très élevée
				0,0680 - 0,1661	2	Elevée
				0,1661 - 0,2122	3	Moyenne
				0,2122 - 0,2582	4	Faible
				0,2582 - 0,5105	5	Très faible
			2005	0 - 0,1767	1	Très élevée
				0,1767 - 0,2112	2	Elevée
				0,2112 - 0,2385	3	Moyenne

				0,2385 - 0,2716	4	Faible
				0,2716 - 0,3665	5	Très faible
			2016	0 - 0,0499	1	Très élevée
				0,0499 - 0,1380	2	Elevée
				0,1380 - 0,1999	3	Moyenne
				0,1999 - 0,2522	4	Faible
				0,2522 - 0,6068	5	Très faible
3	NDVI	0,243	1995	-0,6730- -0,3817	1	Très élevée
				-0,3817 - -0,0515	2	Elevée
				-0,0515 - 0,1814	3	Moyenne
				0,1814 - 0,3303	4	Faible
				0,3303 - 0,9776	5	Très faible
			2005	0,0510 - 0,1211	1	Très élevée
				0,1211 - 0,1672	2	Elevée
				0,1672 - 0,2440	3	Moyenne
				0,2440 - 0,3449	4	Faible
				0,3449 - 0,6103	5	Très faible
			2016	-0,4227- 0,1742	1	Très élevée
				0,1742 - 0,3025	2	Elevée
				0,3025 - 0,4978	3	Moyenne
				0,4978 - 0,7377	4	Faible
				0,7377 - 1	5	Très faible
			1995	0,4777 - 0,7739	1	Très élevée
				0,3756 - 0,4777	2	Elevée
				0,2990 - 0,3756	3	Moyenne

4	NDMI	0,122		0,2173 - 0,2990	4	Faible
				-0,5281- 0,2173	5	Très faible
			2005	1,4569- 1,7037	1	Très élevée
				1,3610 - 1,4569	2	Elevée
				1,2913 - 1,3610	3	Moyenne
				1,2245 - 1,2913	4	Faible
				0,9632 - 1,2245	5	Très faible
				2016	0,4427 - 0,8014	1
			0,3625 - 0,4427		2	Elevée
			0,2823 - 0,3625		3	Moyenne
0,1852 - 0,2823	4	Faible				
0,2748 - 0,1852	5	Très faible				
5	EMI	0,243	1995	0.375-0.484	1	Très élevée
				0.312-0.375	2	Elevée
				0.243-0.312	3	Moyenne
				0.101-0.243	4	Faible
				0- 0.101	5	Très faible
			2005	0.358-0.510	1	Très élevée
				0.307-0.358	2	Elevée
				0.127-0.307	3	Moyenne
				0.249-0.127	4	Faible
				0-0.249	5	Très faible
			2016	0.373-0.684	1	Très élevée
				0.296-0.373	2	Elevée
				0.200-0.296	3	Moyenne

				0.072-0.200	4	Faible
				0- 0.072	5	Très faible
6	O/U des terres	0,243	1995	Sable dunaire	1	Très élevée
				Parcours dégradés	2	Elevée
				Parcours	3	Moyenne
				Agriculture	4	Très faible
			2005	Sable dunaire	1	Très élevée
				Parcours dégradés	2	Elevée
				Parcours	3	Moyenne
				Agriculture	4	Très faible
			2016	Sable dunaire	1	Très élevée
				Parcours dégradés	2	Elevée
				Parcours	3	Moyenne
				Agriculture	4	Très faible

RESUME

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semi-arides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin. Dans la présente contribution, nous avons étudié le phénomène de la désertification au sud du Hodna en utilisant des techniques Géospatiales. Le cadre évolutif de la zone d'étude se caractérise par des précipitations très irrégulières dans le temps et dans l'espace, des températures assez élevées et des vents violents et desséchants ; tous ces facteurs déterminent une forte aridité. Par ailleurs, la région est caractérisée par une forte pression anthropique. Plusieurs approches utilisant les SIG et la télédétection ont été adoptées pour l'étude du changement d'occupation/utilisation des terres, l'évaluation de la sensibilité à la désertification et l'analyse des facteurs climatiques et anthropiques de la désertification dans cette région.

Les résultats obtenus montrent des changements spatio-temporels relatifs à la désertification de 1995 à 2016 ayant comme conséquence la dégradation de parcours dans la zone du Hodna. L'application de la méthodologie quantitative de l'analyse de l'intensité de changement sur des différents niveaux d'intervalle de temps montre que l'intervalle 2011-2016 était une période de changement rapide, mais les changements n'étaient pas immobiles sur les autres intervalles de temps. Au niveau des catégories, les terres agricoles, les dunes de sable et les parcours dégradés sont des zones de gain actif, tandis que les zones de parcours sont des zones de perte active. Au niveau de transition, les terres agricoles s'étaient développées aux dépens du parcours depuis 1995. D'autre part, la sensibilité à la désertification a été évaluée de 1995 à 2016 en utilisant des indices spectraux et l'analyse multicritère de décision dans un système d'information géographique, ce qui a permis de classer le sud du Hodna en terme de sensibilité à la désertification à cinq classes « très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée ». L'analyse de changement de la sensibilité à la désertification montre une augmentation de zone de sensibilité très élevée de 42,58 Km² à 82,49 Km², tandis que les zones de faible sensibilité à la désertification ont été diminuées de 227,14 Km² à 146,61 Km² durant la même période.

Enfin, des données de la dynamique de la sensibilité à la désertification ont été comparées avec une série de données climatiques et anthropiques pour l'identification des facteurs déterminants liés à la désertification et la dégradation de ce milieu. Il a été constaté que l'évolution de la désertification dans cette région est beaucoup plus liée à l'activité anthropique qu'à la péjoration des conditions climatiques peu favorable.

Mots clés : Désertification, Changement d'occupation/utilisation des terres, SIG et Télédétection, Sud du Hodna.

ABSTRACT

Desertification in Algeria, mainly concerns the steppes of the arid and semi-arid regions that have always been the privileged areas of extensive sheep farming. In this paper, we have studied the phenomenon of desertification in southern Hodna using Geospatial techniques. Southern Hodna is characterized by very irregular rainfall in time and space, high temperatures, and severe winds ; all these factors determine high aridity. In addition, the region is characterized by strong anthropogenic pressure. Several approaches using GIS and remote sensing have been used to address land use/cover change, desertification sensitivity assessment and the study of climatic and anthropogenic factors of desertification in this region.

The results show that the spatial-temporal changes related to desertification from 1995 to 2016 resulting in the degradation of rangelands in the Hodna area. Applying the quantitative methodology of the intensity of change analysis over different time interval levels shows that the 2011-2016 interval was a period of rapid change, but the changes were not stationary over the other time interval. At the category level, agriculture, sand dunes, and degraded rangeland are active gain areas while rangelands are areas of active loss. At the transitional level, agricultural land had developed at the expense of rangelands since 1995. On the other hand, the sensitivity to desertification was evaluated from 1995 to 2016 using spectral indices and multi-criteria decision analysis integrated in a geographic information system, which made it possible to classify southern Hodna in term of sensitivity to five classes "very low, low, medium, high and very high." The sensitivity change analysis shows an increase of area with very sensitive from 42,58 km² to 82,49 Km², while areas of the low sensitivity of desertification have been reduced from 227,14 Km² to 146,61 Km² during the same period.

Finally, data of desertification dynamic were compared with a series of climatic and anthropogenic data to identify the determining factors linked to desertification and the degradation of this environment. It has been found that the upsurge of desertification in this region is much more related to anthropogenic activities than to the deterioration of unfavorable climatic conditions.

Key words : Desertification, Land use/land cover, GIS and Remote sensing, Southern Hodna.

ملخص

يتعلق التصحر في الجزائر أساساً بالسهول القاحلة وشبه القاحلة التي كانت دائماً المنطقة المميزة لتربية الأغنام على نطاق واسع.

في هذه الدراسة، تطرقنا لظاهرة التصحر في جنوب الحضنة باستخدام التقنيات الجيو-فضائية. تتميز منطقة الدراسة بهطول الأمطار الغير المنتظم جداً في الزمان والمكان، ودرجات الحرارة المرتفعة إلى حد ما، بجانب ذلك الرياح الشديدة والجافة؛ كل هذه العوامل تحدد الجفاف العالي للمنطقة. بالإضافة إلى ذلك، تتميز المنطقة بالضغط البشري القوي.

تم استخدام نظام المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لمعالجة تغير غطاء الأراضي / استخدام الأراضي من حيث التصحر، تقييم حساسية التصحر ودراسة العوامل المناخية والبشرية المسببة لهذا التصحر في هذه المنطقة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تطور التغيرات المكانية والزمانية المتعلقة بالتصحر من عام 1995 إلى عام 2016، مما أدى إلى تدهور المراعي في منطقة الحضنة. يُظهر تطبيق المنهجية الكمية لتحليل شدة التغير على مستويات الفترات الزمنية المختلفة أن الفترة 2011-2016 كانت فترة تغير سريع، لكن التغيرات لم تكن ثابتة خلال الفترات الأخرى. على مستوى الفئة، تعتبر الأراضي الزراعية، الكثبان الرملية والمراعي المندهورة مناطق كسب نشطة بينما المراعي مناطق ضياع نشطة. على المستوى الانتقالي، تطورت الأراضي الزراعية على حساب المراعي منذ عام 1995.

من ناحية أخرى، تم تقييم الحساسية للتصحر في الفترة من 1995 إلى 2016 باستخدام المؤشرات الطيفية وتحليل القرار المتعدد المعايير في نظام المعلومات الجغرافية، مما جعل من الممكن تصنيف جنوب الحضنة من حيث الحساسية لخمس فئات "منخفضة للغاية، منخفضة، متوسطة، عالية وعالية جداً". تحليل تغير الحساسية يظهر زيادة كبيرة في المنطقة ذات حساسية عالية من 42.58 إلى 82.49 كيلومتر مربع، في حين أن المناطق ذات حساسية منخفضة للتصحر انخفضت من 227.14 إلى 146.61 كيلومتر مربع.

وأخيراً، تمت مقارنة البيانات الخاصة بدinamيات حساسية التصحر بسلسلة من البيانات المناخية والبشرية لتحديد العوامل المحددة المرتبطة بالتصحر وتدهور هذه البيئة. ووجد أن العامل البشري هو العامل الأكثر أهمية والعوامل المناخية ليست سوى عوامل مواتية.

الكلمات المفتاحية: التصحر، تغير غطاء الأراضي/استخدام الأراضي، نظام المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، جنوب الحضنة.