

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mustapha Benboulaïd, Batna 2

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et d'Environnement



Thèse

Présentée par

Meriem BOULTIF

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle

Spécialité : Ecosystèmes Méditerranéens et Géomantique Appliquée

Thème :

**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**

Devant le jury

<i>Président</i>	<i>Mr Abdelkrim SI BACHIR</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université Batna 2</i>
<i>Directeur de thèse</i>	<i>Mr Hassen BENMESSAOUD</i>	<i>Professeur</i>	<i>Université Batna 1</i>
<i>Examineur</i>	<i>Mr Nabil BERTELLA</i>	<i>M.C. A</i>	<i>Université Batna 2</i>
<i>Examineur</i>	<i>Mr Toufik MOSTPHAOU</i>	<i>M.R</i>	<i>C.R.S.T.R.A Biskra</i>

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans les encouragements d'innombrables amis enseignants et professeurs, Il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenue durant ces longues années. J'espère qu'ils trouveront dans cette thèse la justification de leurs efforts.

Je tiens d'abord à remercier Pr. Hassen BENMESSAOUD, d'avoir accepté de m'encadrer et de m'avoir mis sur la voie de recherche.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail sous la présidence Pr. SI BACHIR Abdelkrim Pr. A l'université de Batna 2, Dr. BERTELLA Nabil Maître de conférences à l'université de Batna 2, et Dr MOSTPHAOUI Toufik Maître de recherche au niveau du centre des recherches scientifiques et techniques sur les régions aride (CRSTRA) de la Wilaya de Biskra.

Mes sincères remerciements vont aux services de la conservation des forêts de la wilaya de M'sila notamment Mr REBIAI et Mr BELKHIRI pour leur accueil et pour les données et les informations qu'ils ont pu me fournir et pour faciliter mon travail, également un grand merci aux techniciens et aux cadres de la circonscription des forêts de la wilaya de M'sila pour leurs générosité, aide et orientation sur terrain, et surtout pour les informations qu'ils m'ont données et les échanges fructueux à propos des différentes caractéristiques écologiques, anthropiques et historiques de la région d'étude.

Un merci particulier au Pr. José Luís ZEZERE, Professeur et vice-président de l'institut de géographie et de gestion spatiale à l'université de Lisbonne, Portugal, pour ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse et pour me permettre d'approfondir mon travail en me faisant profiter de ses grandes connaissances dans le domaine de cartographie des risques naturels. Dr Jorge ROCHA et Dr Sandra DE OLIVEIRA chercheurs au niveau de l'institut de géographie et de gestion spatiale et membres du groupe de recherche Riskam à l'université de Lisbonne pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, pour leurs conseils, leur générosité, suggestions et critiques qui m'ont énormément aidé à finaliser ce travail.

Mes respects et mes vifs remerciements vont également aux enseignants et aux enseignantes et le cadre administratif du département d'écologie et d'environnement que beaucoup d'entre eux me traitaient comme collègue plus qu'une doctorante.

Mes pensées vont également à mes très chers collègues au niveau de la faculté des sciences de la nature et de la vie je cite particulièrement Kenza GARAH et Amina BARBACHE, Souad RAHMANI et Sara BENFARHI pour leurs gentillesse, humour, encouragement et aide précieux et avec qui j'ai passé d'agréables moments durant ces dernières années.

Mes sincères gratitudes vont à tous ceux qui m'ont soutenu durant les moments difficiles, c'est à eux que je dédie ce travail :

Mes chers parents, qui m'ont donné un amour illimité, qui m'ont toujours encouragé et supporté jusqu'au bout, tous les mots du monde ne pourront servir pour les remercier de leur soutien moral et matériel.... Je leur dois tout.

Mes chères sœurs Zina et Romaiissa, mon frère Khalil pour leur amour et leur sympathie, et surtout ma petite sœur Roaya qui égaye ma vie.

Aux amies qui ont sillonné mon chemin Ferial et Chafia.

A Ilyes, aucun mot ne saurait t'exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'encouragement, le soutien, l'aide, la tendresse et la gentillesse dont tu m'as toujours entouré.

Liste des abréviations

- AHP : Analyse Hiérarchique des Processus.
- AMC : Analyse Multi. Critère.
- ANAT : Agence Nationale d'Aménagement du Territoire.
- ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.
- BNEDER : Bureau national d'étude et de développement urbain.
- BTP : Bâtiments et travaux publics
- CNTS : Centre National des Techniques Spatiales.
- CSFD : Comité Scientifique Français de Désertification.
- DMCSEE : Drought mitigation center of south and eastern Europe
- DPAT: Direction de la planification et de l'aménagement
- DSA : Direction des Services Agricoles.
- EPAE : Etablissement Public Algérienne des Eaux
- ETM : Enhanced Thematic Mapper.
- EM : Ecart à la moyenne.
- FAO: Food and Agriculture Organization.
- GPS : Global Positioning System.
- GRVI : Green ration vegetation index
- HCDS : Haut-Commissariat du Développement de la Steppe
- ICCD : International convention to combat desertification
- IDI : Indice de désertification intégré
- IDL : Interactive Data Language
- IDP : indice de déficit pluviométrique
- IDW : Inverse distance weighting
- IR : Indice de Rougeur.
- IS : Indice de salinité
- IV : Indice de vulnérabilité
- LiDar : Light detection and ranging.
- MADR : Ministère de l'agriculture et du développement rural.
- MNT : Model Numérique de Terrain.
- MSI: Moisture Stress Index.
- MSN : modèle de sécheresse nationale
- NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.
- NMDI : Normalized multiband drought index
- OLI: Opérationnel Land Imager.
- OMM : Organisation mondial de météorologie
- ONM : Office National de Météorologie.
- OSS : Observation du Sahel et du Sahara.
- PAN : Plan d'Action Nationale.
- PNDA : Plan National de Développement Agricole
- PNLCD : plan national de lutte contre la Désertification
- PNUE : Programme des Nations unies pour l'Environnement

- RGPH : Recensement général de population et d'habitats
- ROSELT : Réseau d'Observation pour la Surveillance Écologique à Long Terme.
- RN : Rapport à la normale
- SASS : Système Aquifère du Sahara Septentrional
- SAVI: Soil Adjusted vegetation index.
- SAU : Surface Agricole Utile.
- SIG : Système d'Information Géographique.
- ST : Surface temperature
- SPI : Standardized precipitation index (indice standardisé de précipitation)
- TM : Thematic Mapper.
- UICN : Union internationale pour la conservation de la nature.
- USLE : Universal soil loss equation
- UTM : Universal transverse mercator
- UNCCD : United Nations Convention to Combat Desertification
- USD : United States dollar
- WGS : World Geodetic System
-

Liste des figures

FIGURE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	6
FIGURE 2 : CARTE DES PAYSAGES DE LA ZONE D'ETUDE (SEBHI,1987)	8
FIGURE 3 : CARTE D'ALTITUDE DE LA ZONE D'ETUDE (EXTRAITE DU MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN MNT)	11
FIGURE 4 : CARTE DES PENTES DE LA ZONE D'ETUDE (EXTRAITE DU MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN MNT).....	13
FIGURE 5 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (EXTRAITE DE LA CARTE DE AMROUN, 2008)	17
FIGURE 6 : COUPE GEOLOGIQUE DE L'AVANT PAYS DE LA CHAINE ALPINE EN ALGERIE, AU NIVEAU DU HODNA ORIENTAL (GUIRAUD, 1971).....	18
FIGURE 7 : COUPE SCHEMATIQUE DE LA REGION DU HODNA (F.A.O 1968	18
FIGURE 8 : CARTE PEDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (SOURCE : F.A.O, 1975).....	21
FIGURE 9 : CANAL DE TRANSPORT D'EAU D'IRRIGATION DU BARRAGE AUX TERRES AGRICOLE DURANT LES ANNEES 1960 (SOURCE DSA).....	23
FIGURE 10 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE (EXTRAITE DU MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN MNT)	25
FIGURE 11 : CARTE PHYTO-ECOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	29
FIGURE 12 : OISEAUX AQUATIQUE DU CHOTT EL HODNA	31
FIGURE 13 : OCCUPATIONS DE POPULATION DE LA ZONE D'ETUDE (SOURCE : CONSERVATION DES FORETS DE LA WILAYA DE M'SILA : MONOGRAPHIE DES COMMUNE 2014/2015).....	32
FIGURE 14 : REPARTITION DE LA POPULATION DU HODNA, ENTRE 1987 ET 2015.....	33
FIGURE 15 : TAUX D'ACCROISSEMENT DE POPULATION PAR COMMUNE	34
FIGURE 16 : ÉVOLUTION DU RESEAU ROUTIER DE LA WILAYA DE M'SILA EN KM 1975-2000 (BNEDER,2010)	35
FIGURE 17 : CARTE DU RESEAU ROUTIER DE LA ZONE D'ETUDE.....	36
FIGURE 18 : CARTE DE ZONES CLIMATIQUES (SEBHI, 1987)	39
FIGURE 19 . FLUCTUATIONS DES TAUX DE PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA STATION DE M'SILA (1988 – 2016)	41
FIGURE 20. FLUCTUATIONS DES TAUX DE PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA STATION D'EL K'SOB (1988 -2016).	41
FIGURE 21 : DISTRIBUTION SPATIALE DES PRECIPITATIONS DE LA ZONE D'ETUDE	42
FIGURE 22 : HISTOGRAMME DU REGIME SAISONNIER DES STATIONS DE LA REGION D'ETUDE	43
FIGURE 23 : LES COURBES DES TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES MENSUELLES ET ANNUELLES (°C) DE LA REGION DE M'SILA.	44
FIGURE 24 : LES COURBES DES TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES MENSUELLES ET ANNUELLES (°C) DE LA REGION DE EL K'SOB.	45
FIGURE 25 FLUCTUATIONS DES TEMPERATURES DANS LA STATION DE M'SILA (1988 - 2016)	46
FIGURE 26 FLUCTUATIONS DES TEMPERATURES MOYENNES DANS LA STATION D'EL K'SOB.....	46
FIGURE 27 : DISTRIBUTION SPATIALE DES TEMPERATURES MOYENNES	47
FIGURE 28 : HISTOGRAMME DES MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DE LA VITESSE DU VENT EN (M/S) DE LA REGION DE M'SILA (1988-2016).....	48
FIGURE 29 : CARTE DES VALEURS D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (EN MM).	52
FIGURE 30 : HISTOGRAMME DE L'HUMIDITE RELATIVE EN (%) DE LA REGION DE M'SILA (1988-2016).....	53
FIGURE 31 : DIAGRAMME OMBRO-THERMIQUE DE LA STATION DE M'SILA (1988-2016).	54

FIGURE 32 : DIAGRAMME OMBRO-THERMIQUE DE LA STATION D'EL K'SOB (1988-2016).....	55
FIGURE 33 : DIAGRAMME PLUVIOTHERMIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	57
FIGURE 34 : DIAGRAMME PLUVIOTHERMIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	58
FIGURE 35 : ABAQUE DE L'INDICE D'ARIDITE DE DEMARTON.....	59
FIGURE 36 : CARTE DE L'INDICE DE DEFICIT HYDRIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	60
FIGURE 37 : CARTE DE L'INDICE SPI DE LA ZONE D'ETUDE DE L'ANNEE 2016.....	62
FIGURE 38 : CARTE DE L'INDICE RAPPORT A LA NORMAL.....	64
FIGURE 39 : CARTE DES ECARTS A LA MOYENNE.	66
FIGURE 40: LA CARTE MONDIALE DE CLASSIFICATION DE KÖPPEN- KREIGER, CARTE MISE A JOUR, (KOTTEK ., ET AL, 2006).....	70
FIGURE 41: ZONES CARACTERISEES PAR LEUR VALEUR DE L'INDICE D'ARIDITE DE MARTONNE, CALCULE POUR LA PERIODE 1951-2000	72
FIGURE 42: SUCCESSION ET INCIDENCES DES TYPES DE SECHERESSE	82
FIGURE 43: EFFET DE LA SECHERESSE SUR LES SYSTEMES PASTORAUX (INTENSITE ET FREQUENCE) (ALARD ET BALENT, 2007)	85
FIGURE 44 : DIAGRAMME METHODOLOGIQUE DU SUIVI DU CHANGEMENTS SPATIOTEMPOREL DE L'OCCUPATION DU SOL.....	110
FIGURE 45 : CARTES D'OCCUPATION DU SOL EN 1987- 2003- 2016.....	111
FIGURE 46 : DIFFERENCES DES SURFACES D'OCCUPATIONS DE SOL ENTRE 1987 – 2003 EN HECTARE	114
FIGURE 47 : DIFFERENCE ENTRE LES SURFACES D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2003-2016 EN HECTARE.	115
FIGURE 48 : DIFFERENCE ENTRE LES SURFACES D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 2016-1987 EN HECTARE.	115
FIGURE 49 : CARTE DES UNITES DE CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 1987 ET 2016	116
FIGURE 50 : CARTE DE L'INDICE NDVI DES ANNEES 1987, 2003, 2016.....	122
FIGURE 51 : LA SUPERFICIE DES CLASSES DE L'NDVI PAR HECTARE POUR LES ANNEES 1987, 2003,2016.	124
FIGURE 52 : CARTE DE L'INDICE DE ROUGEUR (IR) (1987, 2003, 2016).....	125
FIGURE 53 : LA SUPERFICIE DES CLASSES DE L'INDICE DE ROUGEUR PAR HECTARE POUR LES ANNEES 1987, 2003,2016	126
FIGURE 54 : CARTE D'INDICE DE SALINITE (2016, 2003, 1987).....	127
FIGURE 55 : LA SUPERFICIE DES CLASSES DE L'INDICE DE SALINITE PAR HECTARE POUR LES ANNEES 1987, 2003,2016	128
FIGURE 56 : APPARITION DES CROUTES DE SEL DUR LA SURFACE DE LA TERRE	129
FIGURE 57 : CARTES DE L'INDICE AJUSTE DE SOL ET DE VEGETATION.....	130
FIGURE 58: LA SUPERFICIE DES CLASSES DE L'INDICE SAVI PAR HECTARE POUR LES ANNEES 1987, 2003,2016.	131
FIGURE 59 : CARTE DE LA TEMPERATURE DE LA SURFACE DU SOL ESTIMEE DANS L'ANNEE 1987, 2003,2016.	134
FIGURE 60 : LA SUPERFICIE DES CLASSES DE LA TEMPERATURE DE LA SURFACE DU SOL PAR HECTARE POUR LES ANNEES 1987, 2003,2016	136
FIGURE 61 : DIAGRAMME DE LA DEMARCHE D'ETUDE	141
FIGURE 62 : CARTE DES SOUS-CRITERES	144
FIGURE 63. OUTIL DE SOMME PONDEREE SUR LE LOGICIEL ARCGIS.....	147
FIGURE 64 : CARTES DE SENSIBILITE CLIMATIQUE-EDAPHIQUE- SOCIOECONOMIQUE ZONES D'ETUDE	149

FIGURE 65 : CARTE DE VULNERABILITE A LA SECHERESSE	151
FIGURE 66 ORGANIGRAMME POUR LE CALCUL DE L'INDICE DE DESERTIFICATION INTEGRE IDI	153
FIGURE 67 : CARTOGRAPHIE DES FACTEURS ENTRES DANS LE CALCUL DE L'EQUATION DE PERTE DE SOL USLE. 155	
FIGURE 68 : MODELE CONCEPTUEL POUR LE CALCUL DE L'ERODABILITE (CISSOKO, 2011)	157
FIGURE 69 : MODELE CONCEPTUEL POUR LE CALCUL DE L'HUMIDITE DU SOL (CISSOKO, 2011).	157
FIGURE 70 : CARTOGRAPHIE DES ENTRES DU MODELE DE VULNERABILITE A L'EROSION EOLIENNE (IV)	158
FIGURE 71 : CRITERES ENTRANTS DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA DESERTIFICATION.	159
FIGURE 72 : CARTE DE VULNERABILITE A LA DESERTIFICATION	163
FIGURE 73 : L'ACTION ANTHROPIQUE DANS LA REGION DE MAADHID (CLICHE PERSONNEL)	166
FIGURE 74 : LE SITE ARCHEOLOGIQUE D'EL KALAA DES HAMMADIDES AU SEIN DE DJEBEL MAADHID (CLICHE PERSONNEL).....	167
FIGURE 75 : OUTARDE HOUBARA D'AFRIQUE (CHLAMYDOTIS UNDULATA), UN OISEAU MENACE DE DISPARITION DE LA REGION	168
FIGURE 76 : AVIFAUNE AQUATIQUE DU CHOTT	168
FIGURE 77 : PLAN DE REBOISEMENT DANS DJEBEL MAADHID.	170
FIGURE 78 : FIXATION DES DUNES DANS LA REGION DE M'CIF (CONSERVATION DES FORETS DE LA WILAYA DE M'SILA).....	171
FIGURE 79 : CREATION DE TRANSITION D'ESTIMATION MARKOV	176
FIGURE 80 : ENTRE DU MODELE MARKOV	176
FIGURE 81 : SCENATIO PROJETE A 2025 SELON LE MODELE DE MARKOV	177

-

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : DISPONIBILITE DU KILOMETRAGE DE ROUTE PAR 1000 VEHICULES	35
TABLEAU 2 : LES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES EN (MM) DE LA ZONE D'ETUDE POUR LA PERIODE (1988–2016)	40
TABLEAU 3 : LE REGIME SAISONNIER DES TROIS STATIONS.	43
TABLEAU 4 : MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DES TEMPERATURES DE LA STATION DE M'SILA. 1988-2016	44
TABLEAU 5 : MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DES TEMPERATURES DE LA STATION DE BOUSSAADA. 1988-2016.....	45
TABLEAU 6 : MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DE LA VITESSE DU VENT EN M/S 1988-2016.	48
TABLEAU 7 : VALEURS CALCULEES DE L'EVAPOTRANSPIRATION SELON LA METHODE DE THORNTWAITE	50
TABLEAU 8 : TABLEAU DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE MOYENNE SELON LA FORMULE DE TURC	51
TABLEAU 9 : MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DE L'HUMIDITE EN (%).1988-2016.....	53
TABLEAU 10 : L'ENSOLEILLEMENT A LA STATION DE M'SILA (1990-2015).	53
TABLEAU 11 : VALEURS DU QUOTIENT PLUVIOMETRIQUE DE M'SILA	56
TABLEAU 12 : INDICE D'ARIDITE DE LA ZONE D'ETUDE.....	59
TABLEAU 13 : CLASSIFICATION DES PERIODES DE PRECIPITATION SELON LES VALEURS DE SPI (MCKEE ET.,AL, 1993)	61
TABLEAU 14 : TYPES DE CLIMAT SELON LA CLASSIFICATION DE KÖPPEN- KREIGER	71
TABLEAU 15 : LES ZONES CLIMATIQUES SELON LA CLASSIFICATION DE L'UNESCO (1979) ET L'UNEP (1992)...	72
TABLEAU 16: REPARTITION DES ZONES ARIDES DU NORD DE L'AFRIQUE (EN MILLIONS D'HECTARES)(AIDOU ET.,AL, 2006).....	77
TABLEAU 17: MATRICE DE COMPARAISON ET CALCUL DES VECTEURS PROPRES.....	102
TABLEAU 18 : EXEMPLE D'UNE MATRICE DE COMPARAISON POUR 5 CRITERES	102
TABLEAU 19 : CARACTERISTIQUES DES IMAGES UTILISEES	106
TABLEAU 20 : DYNAMIQUE DES UNITES D'OCCUPATION DU SOL EN CHIFFRES ENTRE 1987 – 2003 ET 2016.....	111
TABLEAU 21 : MATRICE DE TRANSITION D'OCCUPATION DE SOL ENTRE 1987 ET 2016 (SUPERFICIE EN HA).....	119
TABLEAU 22 : PARAMETRES UTILISES DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA SECHERESSE SELON LE MODELE PROPOSE PAR L'OSS (2009)	140
TABLEAU 23 : LES PARAMETRES UTILISE POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA SECHERESSE SELON LE MODELE DE DMCEE.	140
TABLEAU 24 : SCORES ATTRIBUES AUX SOUS CRITERES ENTRE DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA SECHERESSE	142
TABLEAU 25 : LES POIDS ATTRIBUES AUX CRITERES SELON L'ECHELLE DE SAATY	145
TABLEAU 26 : COEFFICIENTS DES POIDS FINAUX	145
TABLEAU 27. TABLEAU D'INDICE ALEATOIRE DE SAATY	146
TABLEAU 28 : LA CLASSIFICATION DES SITUATIONS DE VULNERABILITE A LA SECHERESSE	149

TABLEAU 29 : SCORES ATTRIBUES AUX SOUS CRITERES ENTRE DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA DESERTIFICATION	160
TABLEAU 30 : POIDS ATTRIBUE SELON L'ECHELLE DE SAATY	161
TABLEAU 31 : POIDS DE CHAQUE CRITERE	161

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : L a region d'el hodna face a la secheresse et la desertification

INTRODUCTION	5
1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE	6
1.1. LA REGION DES MONTS D'EL HODNA.....	8
1.2. LA PLAINE AGRICOLE D'EL HODNA	9
1.3. LA REGION DU CHOTT	9
1.4. LA REGION DE R'MEL.....	9
1.5. DJEBEL MEHARGA.....	10
2. LES ALTITUDES.....	10
3. LES PENTES.....	11
4. CADRE GEOLOGIQUE.....	13
4.1. PRIMAIRE.....	14
4.2. SECONDAIRE	14
4.2.1. <i>Jurassique</i>	14
4.2.2. <i>Crétacé</i>	14
4.3. TERTIAIRE.....	15
4.3.1. <i>Paléogènes</i>	15
4.3.2. <i>Le Néogène</i>	15
4.3.3. <i>Le Pliocène</i>	16
4.4. LE QUATERNAIRE.....	16
5. CADRE EDAPHIQUE	19
6. CADRE HYDROLOGIQUE	21
6.1. BARRAGE DE OUED K'SOB	22
6.2. LES OUEDS.....	23
6.3. LES NAPPES	25
7. COUVERT VEGETAL	26
7.1. ESSENCES FORESTIERES	26
7.2. VEGETATION DU CHOTT EL HODNA	27
7.3. ACTIVITE AGRICOLE	28
8. LA FAUNE.....	29
9. ACTIVITE ANTHROPIQUE	31
10. ACTIVITES ECONOMIQUES ET INDUSTRIALISATION.....	34

11. RESEAU ROUTIER.....	35
CONCLUSION.....	37
INTRODUCTION.....	38
1. ZONES CLIMATIQUES.....	38
2 LES PRECIPITATIONS.....	40
2.1. DISTRIBUTION SPATIOTEMPORELLE.....	40
2.2. LE REGIME SAISONNIER.....	42
3. LES TEMPERATURES.....	43
4. LES VENTS.....	47
5. EVAPOTRANSPIRATION.....	48
6. HUMIDITE RELATIVE.....	52
7. L'ENSOLEILLEMENT.....	53
8. SYNTHESE CLIMATIQUE.....	54
8.1. INDICES ET DIAGRAMMES OMBRO-THERMIQUES.....	54
8.2. QUOTIENT PLUVIOTHERMIQUE D'EMBERGER.....	55
8.3. INDICE D'ARIDITE DE DEMARTONE.....	58
8.4. INDICE DE DEFICIT HYDRIQUE.....	59
8.5. INDICE STANDARDISE DE PRECIPITATION.....	61
8.6. RAPPORT A LA NORMAL.....	63
8.7. ECART A LA MOYENNE.....	64
CONCLUSION.....	67
INTRODUCTION.....	68
1. LES ECOSYSTEMES ARIDES ET SEMI-ARIDES.....	69
1.1. DEFINITION.....	69
1.2. CLASSIFICATION ET ETENDU GEOGRAPHIQUE.....	69
1.3. CARACTERISTIQUES DES ZONES ARIDES.....	73
1.3.1. <i>Caractéristiques climatiques.....</i>	73
1.3.2. <i>Les sols.....</i>	74
1.3.3. <i>La végétation.....</i>	75
1.4. LES ZONES ARIDES DU NORD D'AFRIQUE.....	76
1.5. LES STEPPES ARIDES ET SEMI ARIDES EN ALGERIE.....	77
2. LA SECHERESSE.....	78
2.1. DEFINITION.....	78
2.2. TYPES ET DYNAMIQUE DE LA SECHERESSE.....	79
2.2.1. <i>La sécheresse météorologique.....</i>	79
2.2.2. <i>La sécheresse hydrologique.....</i>	80

2.2.3. <i>La sécheresse agricole</i>	80
2.2.4. <i>Les sécheresses socio-économiques</i>	81
2.3. IMPACT DE LA SECHERESSE	82
2.3.1. <i>Impact de la sécheresse sur le sol</i>	83
2.3.3. <i>Impact sur les ressources en eau</i>	83
2.3.4. <i>Impact sur le couvert végétal et le rendement agricole</i>	84
2.4. LA SECHERESSE EN ALGERIE	85
2.5. POLITIQUE DE GESTION ET DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE	86
3. LA DESERTIFICATION	88
3.1. DEFINITION	88
3.2. LES INDICATEURS DE LA DESERTIFICATION.....	89
3.3. LES CAUSES DE LA DESERTIFICATION	90
3.3.1. <i>Causes à origine humaine</i>	91
3.3.2. <i>Causes à origine climatiques</i>	91
3.4. LA DESERTIFICATION EN ALGERIE	92
3. 5. POLITIQUE DE GESTION ET DE LUTTE CONTRE DESERTIFICATION	93
4. APPORT DE LA MODELISATION ET DE LA GEOMATIQUE DANS L'ETUDE DE LA SECHERESSE ET LA DESERTIFICATION	94
4.1. LA GEOMATIQUE.....	94
4.1.1. <i>Introduction et concept</i>	94
4.1.2. <i>Application de la géomatique dans le suivi et la modélisation de la sécheresse et de la désertification</i>	95
4.1.3. LA MODELISATION ET LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE EN ECOLOGIE	97
4.1.4. <i>Application du système d'information géographique le suivi et la modélisation de la sécheresse et de la désertification</i>	97
4.1.3. <i>Analyse multicritère : Analytical Hierarchy Process (AHP)</i>	100
CONCLUSION	104
INTRODUCTION	105
1. CHOIX ET PRETRAITEMENT DES DONNEES	105
1.1. DONNEE UTILISEE	105
1.2. PRETRAITEMENT ET CALIBRATION DES IMAGES.....	106
1.2.1. <i>Correction Radiométrique</i>	107
1.2.2. <i>Correction Atmosphérique FLAASH</i>	107
2. SUIVI DU CHANGEMENT SPATIOTEMPOREL DE L'OCCUPATION DU SOL	108
2.1. EXPLOITATION DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES ET THEMATIQUE.....	108
2.2. MISSIONS DE PROSPECTION ET D'OBSERVATION SUR TERRAIN.....	108

2.3. CLASSIFICATION SUPERVISEE	109
2.4. VALIDATION DES RESULTATS ET MATRICE DE CONFUSION	109
2.5. RESULTATS	110
2.5.1. <i>Etat d'occupation du sol en 1987</i>	112
2.5.2. <i>Etat de l'occupation du sol en 2003</i>	112
2.5.3. <i>Etat de l'occupation du sol en 2016</i>	113
2.6. DISCUSSION.....	113
3. ANALYSE DU CHANGEMENT DES UNITES D'OCCUPATION DU SOL ENTRE 1987 ET 2016	115
3.1. LES UNITES SANS CHANGEMENTS.....	117
3.2. LES AFFLEUREMENTS ROCHEUX.....	117
3.3. LES AGGLOMERATIONS	117
3.4. LES TERRES AGRICOLES	117
3.5. LES STEPPES A ALFA	117
3.6. LE BARRAGE D'OUED EL KSOB.....	118
3.7. CHOTT EL HODNA	118
3.8. LES HALOPHYTES.....	118
3.9. LES FORETS ET LES MAQUIS	118
3.10. LES PARCOURS STEPPIQUES	118
3.11. LES DUNES DE SABLES.....	119
3.12. LE SOL NU	119
CONCLUSION.....	120
INTRODUCTION	121
1. INDICE NORMALISE ET DIFFERENCIE DE VEGETATION (NDVI).....	121
2. INDICE DE ROUGEUR.....	124
3. INDICE DE SALINITE.....	126
4. INDICE AJUSTE DE SOL ET DE VEGETATION.....	129
5. ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE.....	131
CONCLUSION.....	136
INTRODUCTION	137
1. NOTION DE VULNERABILITE	138
2. DONNEES UTILISEES	138
3. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA SECHERESSE	139
3.1. DEMARCHE D'ETUDE.....	139
3.2. CHOIX ET HIERARCHISATION DES CRITERES.....	140

3.3. ANALYSE MULTICRITERE POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA SECHERESSE	145
3.4. RESULTATS ET DISCUSSION	147
3.4.1. Critères de décision	147
3.4.2. Carte de vulnérabilité	149
4. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A LA DESERTIFICATION	152
4.1. DEMARCHE D'ETUDE	152
4.1.1. Cartographie d'érosion hydrique	153
4.1.2. Cartographie d'érosion éolienne	155
4.1.3. Salinité	158
4.1.4. Occupation du sol	159
4.1.5. Densité des cheptels	159
4.2. INTEGRATION DE L'ANALYSE MULTICRITERE DANS LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE	160
4.3. CARTE DE VULNERABILITE A LA DESERTIFICATION	162
CONCLUSION	164
INTRODUCTION	165
1. GESTION ET AMENAGEMENT	165
1.1. MILIEU FORESTIER	165
1.2. LES TERRES AGRICOLES	167
1.3. LE CHOTT	167
1.4. PRESERVATION DES RESSOURCES EN EAUX	168
1.5. LE REBOISEMENT	169
1.6. LUTTE CONTRE L'EROSION HYDRIQUE	170
1.7. LIMITER L'EROSION EOLIENNE	170
1.8. FIXATION DES DUNES	170
1.9. REHABILITATION DU SOL	172
1.10. REHABILITATION PASTORALE	172
2. LES PERSPECTIVES D'AVENIR DANS LA ZONE D'ETUDE	173
2.1. SIMULATION FUTURE DE L'ETAT DU MILIEU	175
3. PERSPECTIVES D'ETUDE	177
CONCLUSION	178
CONCLUSION GENERALE	180
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	200
RESUME	

Introduction générale

L'Algérie fait partie d'une région bioclimatique où la majorité du territoire est occupée par des zones arides et où combinaison des conditions climatiques et édaphiques fait de ces zones des milieux fragiles (Bensaid, 2006), ce vaste territoire est composé essentiellement par des parcours, dont les ressources pastorales constituent la principale source de revenu et qui jouent aussi un rôle fondamental dans le système de production essentiellement extensif (Nadjraoui, 2011).

Au cœur des régions arides Algérienne, le Hodna constitue une entité naturelle bien individualisée : une cuvette de 8500 km², où plus de 80% de la superficie est consacrée à l'élevage, y compris les jachères et les chaumes des céréales (Belloum et Dekhil, 1993).

La région d'El Hodna fait parties des steppes arides du centre de l'Algérie, isolée de la mer méditerranéenne par 150 km de chaînes de montagnes, et entourée par les monts du Hodna au Nord, le massif des Aurès à l'Est, les monts du Zab au Sud-Est, ceux des Ouled Nail au Sud-Ouest ; et passe graduellement à l'Ouest aux hauts plateaux algérois (Abdesselam, 2013), cette région est caractérisée par des conditions défavorisées et une évolution désastreuse des rapports entre l'homme et son environnement sous le double effet de l'expansion des structures socio-économiques et la démographie marquée par un fort accroissement de la population (Sebhi, 1987), la combinaison de la pression anthropique, la surexploitation des ressources naturelles et les conditions climatiques défavorisées mettent cette région face à des fléaux naturels destructifs ; l'érosion hydrique et éolienne, les incendies, l'ensablement, et surtout la sécheresse et la désertification.

Parmi tous les risques naturels, la sécheresse est la plus complexe et la moins comprise, affectant un grand nombre de personnes et entraînant des impacts économiques, sociaux et environnementaux significatifs (Wilhite, 2005), la sécheresse aggrave la pression sur les ressources naturelles et compromet la sécurité alimentaire, les impacts de la sécheresse sont non structurels et sont repartis sur des zones plus large, que les impacts issus d'autres catastrophes naturelles et plus désastreuses même dans les pays très développés. Du fait il est important de suivre la durée, la fréquence et l'extension spatiale de la sécheresse, en utilisant des indices pertinents pour fournir aux planificateurs les informations utiles nécessaires pour se préparer à une intervention en cas de catastrophe (OMM, 2016).

Du même côté, La désertification représente à la fois un problème d'environnement et un problème de développement, selon l'article 1 de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULD, Paris 1994), celle-ci désigne « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ». Ce phénomène affecte l'environnement local et le mode de vie des populations, mais ses effets ont du fait de nombreuses interactions des retentissements plus globaux au niveau de la biodiversité, des changements climatiques et des ressources en eau (Benmessaoud, 2009).

Selon la FAO, l'Algérie est classée parmi les pays les plus pauvres en eau parce que nous n'avons que 11,5 milliards de mètres cubes d'eau renouvelables par an. Ce qui nous donne 290 ou 292 m³ par personne et par an d'eau renouvelable, alors que la moyenne mondiale est de 6000 m³. Ce qui veut dire que l'Algérien n'a que 3,5% de la moyenne mondiale ».

Selon le ministère de l'agriculture (2011), 32 millions d'hectares en zones steppiques d'Algérie sont affectés ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts soumis aux menaces des effets des changements climatiques, alors que la demande en ressources hydriques est en constante augmentation notamment pour le secteur de l'agriculture qui absorbe plus de 87 % du potentiel disponible (Khaldi, 2015).

La situation environnementale de la région steppique a fait l'objet de plusieurs études (Mimoun, 1995, Bedrani et Bensouiah, 2000 ; Mouhous, 2005; Bensaid et *al.*,2007 ; Benslimane et *al.*, 2008 ; Hadeid, 2008, Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Redjam et Tachrifet, 2008 ; Daoudi et *al.*, 2010 ; Bouchetata, 2011 ; Abdesselam, 2013 ;Hadbaoui, 2013 ; Bensaci et *al.*,2014,), ces auteurs ont présenté des études qui portent sur l'augmentation de la population, ainsi que l'évolution du tissu urbain, le surpâturage, la dégradation des sols, l'appauvrissement en eau et la dégradation du milieu.

Les méthodes inadaptées dans l'exploitation des terres agricoles, la salinisation des terres et des eaux, l'appauvrissement en matière organiques et en minéraux de sol, l'augmentation de la pression anthropique et du surpâturage soumettent les écosystèmes naturels à une dégradation intense et un causent leur déséquilibre, avec l'appui des conditions météorologique ces régions deviennent de plus en plus fragiles et vulnérables.

L'objectif principal de ce travail, est de cartographier les zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification dans la région d'El Hodna, en adoptant une méthodologie basée sur l'utilisation des outils de Géomatique en l'occurrence la télédétection et les systèmes d'information géographiques et l'intégration des méthodes mathématiques qui permettent une meilleure évaluation logique et prise de décision en ce qui concerne la pondération des critères lors de l'élaboration des cartes de synthèse et de la modélisation.

La méthodologie globale repose sur le calcul d'une série d'indices météorologiques et satellitaires afin de caractériser le climat de la région et les paramètres généraux du milieu, et suivre les différentes mutations des caractéristiques de végétation, sol et climat, et le changement spatiotemporel de l'occupation du sol, puis utiliser les résultats de ces analyses en appliquant deux modèles régionaux afin de cartographier les zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification, en intégrant l'analyse multicritère afin de pouvoir pondérer les critères entrés dans cette modélisation selon l'ordre de leurs importances et leurs rôles dans la vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification dans la région.

Cette thèse comporte Sept chapitres qui traitent respectivement :

Chapitre I : La région d'El Hodna face à la sécheresse et à la désertification ; Concerne la localisation, les différentes caractéristiques du biotope.

Chapitre II : Caractéristiques climatiques et aridification de la région ; Ce chapitre est consacré à l'exploitation des données météorologiques et le calcul des paramètres et des indices climatiques illustrant la nature du climat dans la région.

Chapitre III : Cadre théorique de l'étude ; qui présente une synthèse bibliographique sur les concepts clés de cette étude.

Chapitre IV : Etude spatiotemporelle des changements globaux dans la région d'étude ; présente une analyse spatiotemporelle de l'évolution de la zone d'étude à travers une étude du changement d'occupation de sol.

Chapitre V : Approche indicielle pour le suivi de l'évolution et la dégradation de la zone d'étude ; A travers une série d'indices et satellitaires.

Chapitre VI : Cartographie et modélisation de la vulnérabilité de la zone d'étude à la sécheresse et à la désertification ; Concerne une présentation d'une démarche d'étude pour la conception des cartes de vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification

Chapitre VII : Proposition d'un plan d'aménagement, des scénarios et des perspectives ; Ce chapitre donne une vue sur les scénarios à venir, une visualisation sur les tendances futures et des plans d'aménagement adéquats.

Nous terminons ce manuscrit avec une conclusion générale qui récapitule les axes généraux de cette étude et les résultats principaux.

Chapitre I



La région d'El
Hodna face à la
sécheresse et la
désertification

Introduction

Les Arabes ont nommé El Hodna la vaste plaine qui s'étend des chaînes montagneuses de l'Atlas Tellien jusqu'à l'Atlas Saharien passant par la dépression saline du Chott El Hodna, ce bassin situé entre les montagnes de Belezma et de Guetienne en Est jusqu'aux montagnes d'Ounougha en Ouest à travers la montagne de Maadhid et de Boutaleb. Et vers le Sud jusqu'aux montagnes de Ouled Naïl et de Boussaâda (Birem, 2006), cette plaine a donc l'air entourée par une ceinture de montagnes sous forme d'un arc d'où vient le nom El Hodna qui signifie en Arabe « Couvée ». Cette vaste zone est relativement pauvre en sol, en ressources végétales et en eau de surface, la conséquence d'une forte sécheresse, une désertification et une industrialisation galopante qui rendent le domaine de l'eau de plus en plus vital et les ressources en eaux souterraines de plus en plus salinisées et vulnérables à la pollution (Amroun, 2008).

Géographiquement, la région d'étude est située au Sud-Est de l'Algérie entre 35°18' et 35°32' Nord et 4°15' et 5°06', à 250 Km au sud- Est d'Alger, s'étend sur 202896.36 ha.

Le choix de cette zone pour notre étude et pour la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification a été fait suite à une série de critères :

- La zone d'étude se caractérise par une diversité naturelle paysagère : montagnes, steppes, terres agricoles, Chott, et dunes de sables ainsi que d'un couvert végétal varié.
- La situation géographique qui fait de cette région une zone de transition entre l'étage bioclimatique aride du désert et le subhumide de l'Atlas Tellien.
- La croissance de la pression anthropique suite à l'augmentation de la densité populaire dans la région d'El Hodna.
- La diminution des taux annuels de précipitation et l'augmentation des températures enregistré par les observations météorologiques.
- Le problème de l'invasion de sable dans le sud de la région d'étude.
- Le grand potentiel agro-pastoral de la région.
- La variété climatique de la région d'étude.

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques du milieu naturel et les particularités paysagères et climatiques qui particularisent la région d'étude.

1. Localisation géographique

La zone choisie pour cette étude se situe au cœur de la région d'El Hodna, elle s'étend de Djebel Maadhid jusqu'à Djebel Meharga et inclue la dépression saline dite Chott El Hodna, Elle s'attache administrativement à la wilaya de M'sila issue du découpage administratif de 1984 (Figure 1), constituée de six communes : M'sila (Chef-lieu de la wilaya), Maadhid, Metarfa, Ouled madhi, Souamaa, M'cif, Limité géographiquement par :

- La wilaya de Bordj Bou Aariridj au Nord.
- La Wilaya de Batna au Sud-Est
- Les communes de : Khoubana et Houamed au Sud- Ouest.
- Les communes d'Ouled Mansour et Chellal à l'Ouest
- Les communes d'Ouled Derradj et Ouled Addi goubala à l'Est

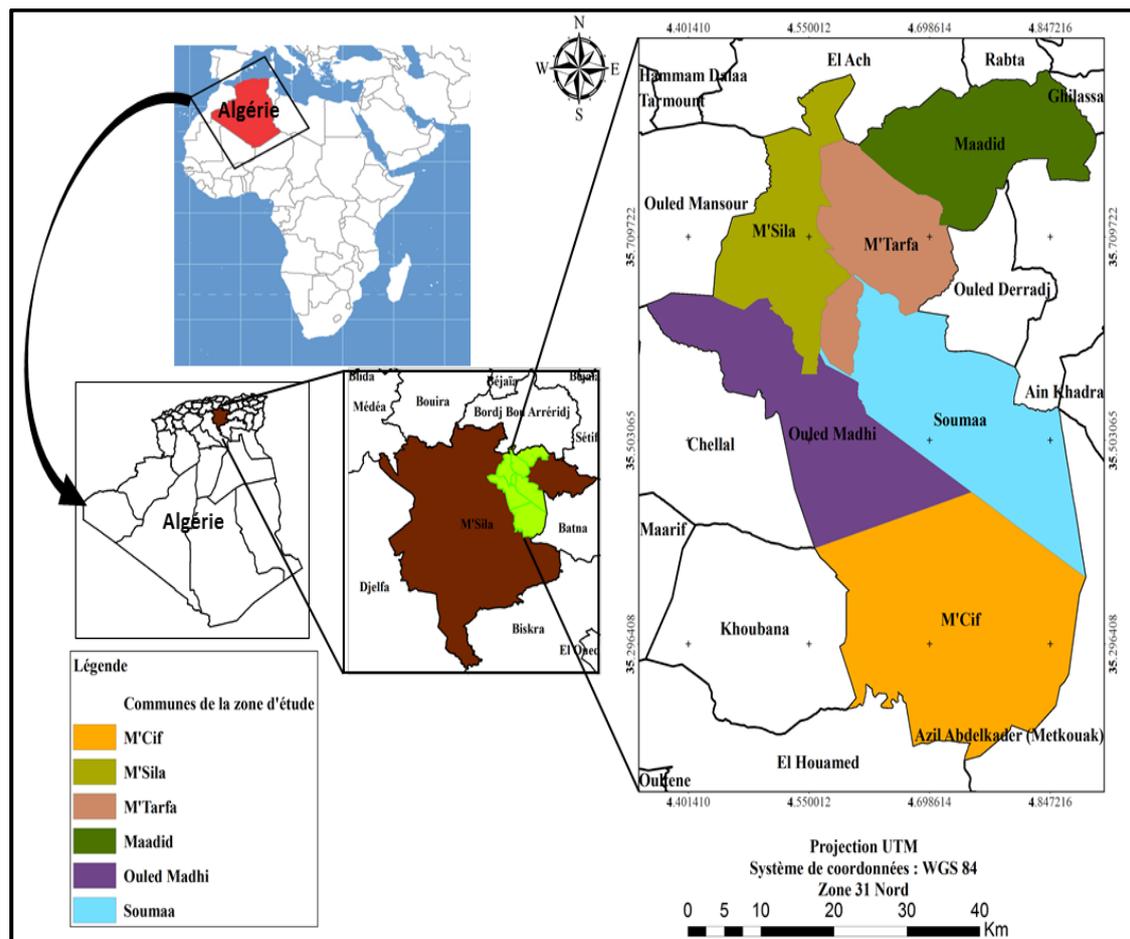


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

Cette région présente une zone de transition allant du paysage désertique du Sud et le paysage montagneux des monts d'El Hodna au Nord.

En effet, la présence du Chott Hodna au sud et l'existence de l'ouverture vers le Sahara à travers l'Atlas saharien (couloir de Boussaâda-Biskra) laisse pénétrer le climat saharien jusqu'au piémont sud du massif du Hodna. Cette situation permet aussi le développement d'un milieu fortement contrasté entre la façade nord de cette chaîne (tendance humide) et sa façade sud (tendance semi-aride à aride), cette région se particularise donc par sa localisation à la limite d'un grand nombre de milieux écologiques : entre le domaine subhumide, semi-aride, aride et sub-saharien.

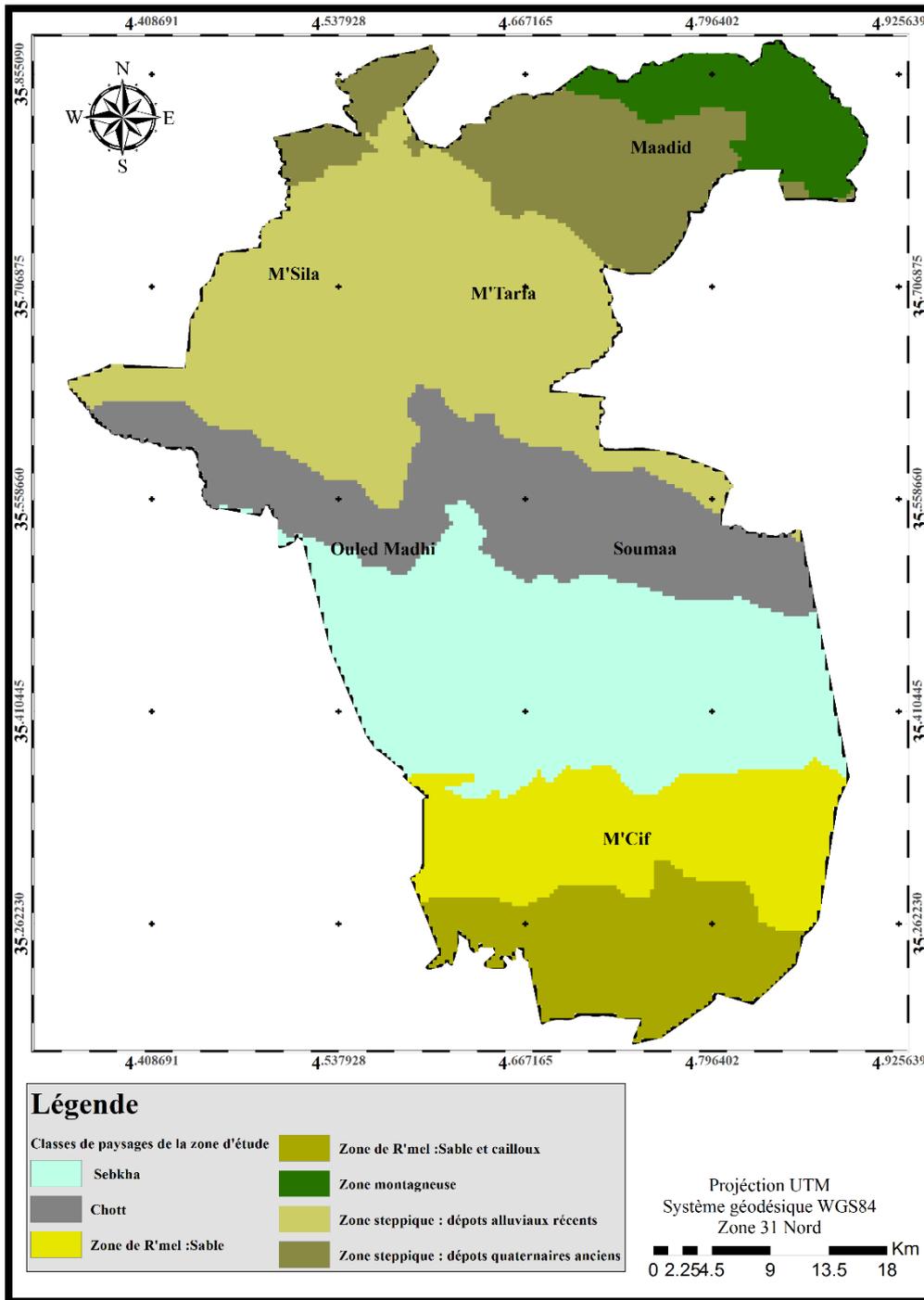


Figure 2 : Carte des paysages de la zone d'étude (Sebhi, 1987)

Les différents types des paysages distingués dans la zone d'El Hodna sont :

1.1. La région des monts d'El Hodna

La topographie du massif Hodnéen se voit comme une seule entité et un seul massif montagneux au Nord Djebel Maadhidd d'une altitude de 1863 m qui forme une véritable

barrière que seul l'oued K'sob arrive à franchir. Le faciès écologique, fortement anthropisé (activité agro-sylvo-pastorale), regroupe un ensemble d'écosystème forestier dégradé, matorral, relique de forêt, steppe à alfa, steppe à armoise etc...

1.2. La plaine agricole d'El Hodna

La zone de plaine proprement dite est définie assez exactement par la courbe de niveau 500 m et couvre les deux tiers du Hodna. Elle s'étale jusqu'aux abords de la sabkha qui occupe le centre du bassin. Elle est le lieu privilégié de la culture où les Hodnéens ont depuis des siècles utilisé les épandages des crues sur les glacis limoneux.

1.3. La région du Chott

Doté d'un relief plat et d'un microrelief ondulé, le chott qui est une large dépression dont le fond atteint 391 m sépare la région du Hodna proprement dite de la région saharienne, dépression constituée de deux zones concentriques, une zone périphérique ou zone du chott et une zone centrale ou zone de la sebkhah (Ledghem Chekouche, 2001) :

- Les bordures du Chott est une zone de dépression, bordé au sud et à l'ouest par des dunes sableuses et passe graduellement au chott ; au nord-ouest et au nord, ainsi qu'à l'est, les bordures de chott sont formées par des dépôts argileux récents, a un relief plat et microrelief ondulé, suite à la présence de nebkhas et des micro nebkhas de pseudo-sable avec une végétation halophile clairsemée (Kaabache, 1990).

- La sebkhah est une vaste surface d'épandage des eaux de crues, de forme presque elliptique se trouve au centre de la plaine. C'est une étendue argileuse, absolument plane et fortement salée ou toute végétation est absente. Le centre de la cuvette du Hodna est situé à 40 km de la Ville de M'sila, à 20 km au Sud-Ouest de la ville de Boussaâda et à 80 km au Sud-Est de la ville de Biskra (Kaabache, 1990). Le Chott se met en eau uniquement en hiver, sec et sale en été et des croûtes de sel couvrent toute son étendue (Ledghem Chicouche et Zerguine, 2001)

1.4. La région de R'mel

Au sud de la sebkhah, zone considérée saharienne et ne fait pas partie d'El Hodna proprement dit. Constitué de dunes de sable, des collines rocheuses dans la partie septentrionale,

la partie méridionale se forme de larges glacis caillouteux entourée de sables et de collines rocheuses (Amroun, 2008).

1.5. Djebel Meharga

Dans le Sud de la zone d'étude, d'une altitude de 682 m, caractérisé par un couvert végétal très claires et des affleurements rocheux sur le versant Sud, au sein de la cuvette de Oued M'cif est le plus élevé (800 m) et qui ne forment pas un verrou efficace ; et laisse une large ouverture pour les vents secs du Sud (Abdesselam, 2013).

2. Les altitudes

Les monts du Hodna forment une barrière orientée Est Ouest qui réduit les influences maritimes. Par ailleurs, cet écran dont l'altitude varie entre 1400 et 1880 m forment seulement 4% de la zone d'étude, (Dj. Mâadid au Nord de M'sila culmine à 1863 m) accuse un contact net et brutal avec les collines, puis s'allonge une plaine d'Ouest en Est aux pieds de montagnes du versant Nord entre les côtes 700m et 500m. C'est un ensemble de collines découpées et ravinées par les oueds qui descendent des montagnes (les oueds M'sila et Selmane) et par des ruisseaux temporaires qui coulent après les pluies (Amroun, 2006), cette classe forme environ 18% de la zone d'étude.

Au Sud, la courbe de niveau 400m marque grossièrement le passage de la plaine au chott et la zone de R'mel d'où une pente de 0.55% où l'altitude minimale atteint 350m, cette classe d'altitude forme environ 78% de la zone d'étude.

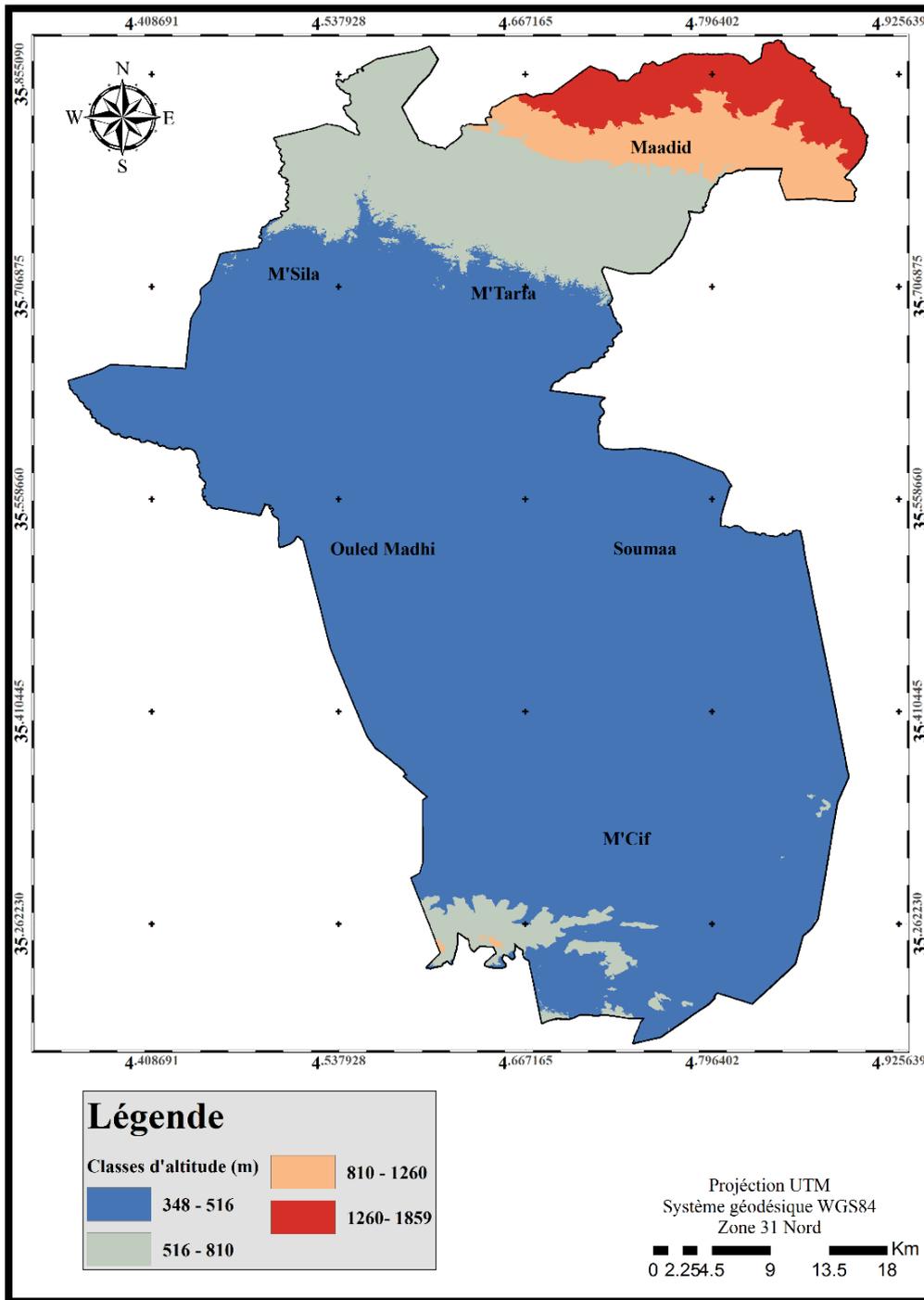


Figure 3 : Carte d'altitude de la zone d'étude (extraite du modèle numérique du terrain MNT)

3. Les pentes

L'observation de la carte des pentes (voir ci-après) montre que les pentes sont généralement inférieures à 6% traduisant en cela un modelé de plaines vallonnées de collines, avec des zones plus accidentées au niveau des monts du Hodna au nord de M'sila. Ces éléments

ont été soulignés par les acteurs régionaux et ont eu une conséquence directe sur la possibilité de mobilisation et de stockage des eaux de surface par la création de retenues, dans les secteurs concernés. (BNEDER, 2008).

Du même, l'observation des expositions présente une répartition des classes de cette dernière ; les expositions Nord forment environ 23% généralement sur la région montagneuse, les expositions Est forment 25% de la zone d'étude, Ainsi l'exposition Sud forme 29%, et l'exposition Ouest forme 23 %.

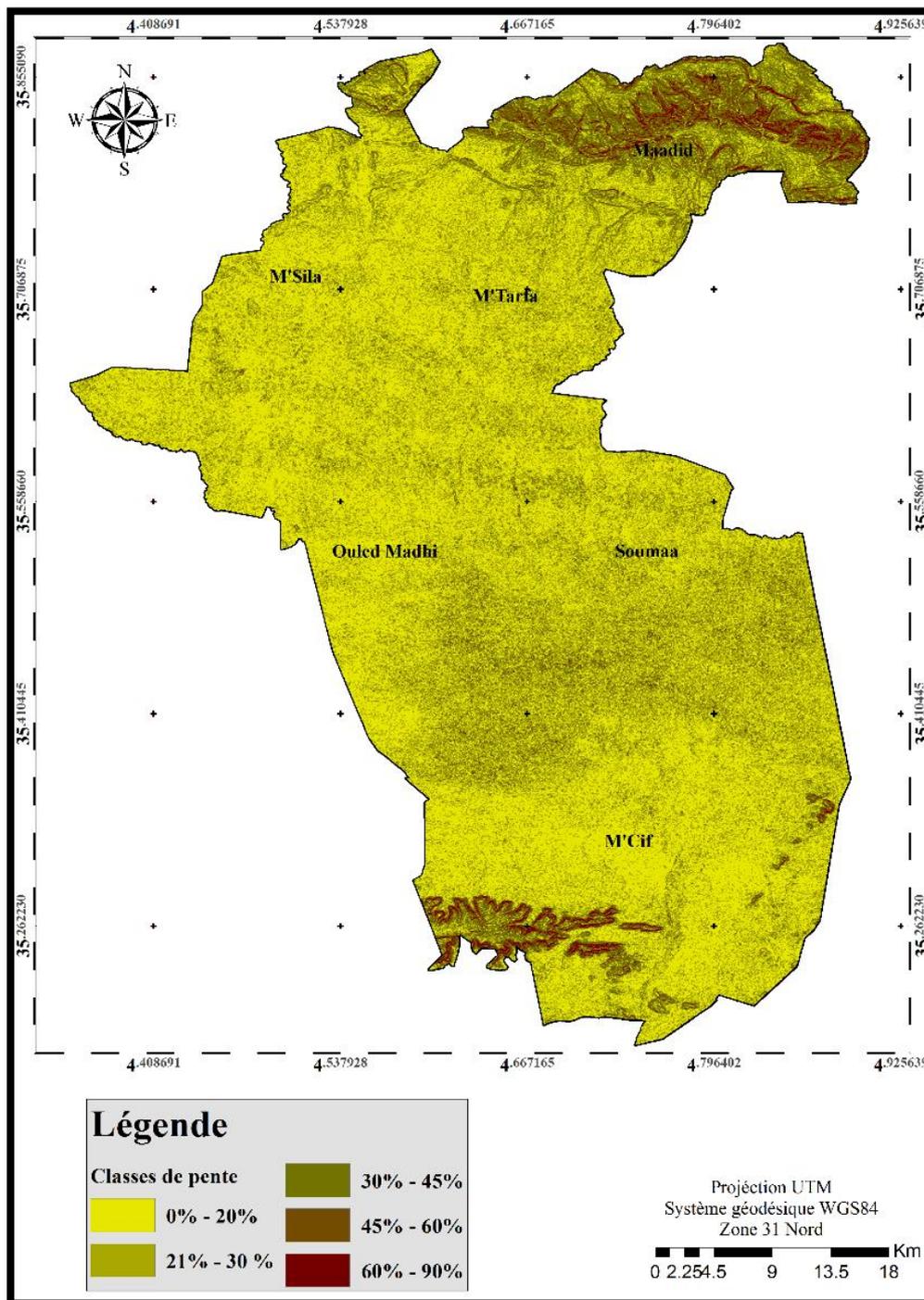


Figure 4 : Carte des pentes de la zone d'étude (extraite du modèle numérique du terrain MNT)

4. Cadre géologique

La géologie du Hodna a été étudiée par de nombreux auteurs (Savornien, 1920 ; Emberger, 1964 ; Keiken et Dame 1962 ; Keiken 1975 ; Guiraud, 1966, 1973, 1990 ; FAO,

1968). Elle est assez complexe en raison de la position de la cuvette au contact des Atlas tellien et saharien. La cuvette du Hodna appartient à la zone pré atlasique (Figure 6 Figure 7).

4.1. Primaire

La région du Hodna est dépourvue de formations géologiques paléozoïques. Toute fois au Nord de celle-ci ont été observés au niveau des formations allochtones qui comportent des coupeaux provenant du socle primaire (roches sédimentaires, éruptives et métamorphiques). (Amroun, 2008).

4.2. Secondaire

4.2.1. Jurassique

Affleure au cœur de l'anticlinal de Djebel Meharga dont l'épaisseur atteint 350 m est représenté de bas en haut par des dolomies massives, des calcaires dolomitiques et une succession de marnes et de marno-calcaires du Toarcien.

4.2.2. Crétacé

Le Crétacé inférieur affleure largement dans la chaîne pré atlasique, qui limite au Nord de la dépression du Hodna. L'Albien du Crétacé inférieur est représenté dans la zone d'étude par un faciès argilo gréseux et dolomitique, il atteint une épaisseur de 370m. Par contre l'Albien terminal ou Vraconien présente selon Amroun (2008) au niveau du Dj Mâadid par la succession suivante des marnes et des marno calcaires avec de minces intercalations de calcaires cristallins à débris lumachelliques, des calcaires sub lithographiques noduleux (15 m environ), et une série marneuse de quelques mètres d'épaisseur ainsi qu'un banc de calcaire glauconieux de la même épaisseur

Le Sénonien – Danien, est présenté au niveau d'Oued Ksob, on note un faciès calcaro marneux surmonté par des marnes lumachelliques, à nombreuses interstratifications de calcaires argileux, Dans le piémont du Djebel Maadhid, Le Danien est représenté par des marnes noires (Abdesslam, 2013)

4.3. Tertiaire

4.3.1. Paléogènes

Les formations paléogènes affleurent en bandes plus ou moins parallèles sur le plan méridional des monts du Hodna. Les couches plongent en général vers la cuvette de M'sila.

L'Eocène-Oligocène affleure largement au Nord de M'sila où il constitue les appuis du barrage du K'sob. Son extension sous la couverture miocène a été reconnue par les prospections pétrolières de la S.N.Repal. Dans la région de M'sila l'Eocène comprend 100 m de marnes, 100 m de calcaires lutétien inférieur, 400 m d'Argiles et marnes à gypse lutétien supérieur, Ces formations disparaissent rapidement vers le sud. (Abdesslam, 1987).

Le Lutétien supérieur allochtone affleure sur les rives de Oued K'sob, formé de marnes argileuses ocre à bancs décimétriques, le Lutétien supérieur autochtone est caractérisé par de gros bancs de gypses à passer de sel gemme et de marnes blanches d'une épaisseur totale de 100 à 200 mètres environ dans la région de M'sila.

L'Oligocène autochtone, est représenté au Sud de Maadhid par une série grés-argileuse et l'Oligocène allochtone comporte à la base des marnes brunes claires, lamelleuses, grasses à rares miches de grès légèrement glauconiaux.

4.3.2. Le Néogène

Le Miocène moyen constitue l'essentiel des piémonts sur le versant méridional des monts du Hodna. Discordant, il débute par quelques mètres de conglomérats surmontant des calcaires à algues (lithothamniées), Huîtres, Pectens et Spatangues, l'épaisseur de la formation du Miocène moyen a été estimée à 1300 mètres tandis que sur la structure anticlinale, elle n'atteint que 800 mètres au maximum (Sebhi, 1987).

Le Miocène supérieur correspond à des formations marno gréseuses épaisses de 400 mètres environ. Des marnes grises verdâtre à brun verdâtre, souvent sableuses ou gypseuses, alternent avec quelques passées de grès friables, cette formation est surmontée par des grès conglomératiques, alors que le Miocène inférieur est discordant sur le Paléogène et le Mésozoïque.

4.3.3. Le Pliocène

Le Pliocène supérieur, au niveau de la plaine de M'sila, est représenté par des niveaux irréguliers de conglomérats alternant avec des grés et des marnes sableuses. Le Miocène affleure largement dans les partis Nord et Est du bassin.

La limite d'extension vers le sud du Miocène marin passe par Baniou, la limite sud du Chott est entre le Djebel Meharga et le fennds (Abdesselam, 2013).

4. 4. Le quaternaire

Le Quaternaire est d'origine continentale, les formations quaternaires sont discordantes sur un substratum Néogène et parfois Paléogène et sont souvent protégées par des croûtes calcaro-gypseuses (Amroun, 2008).

Durant le quaternaire récent se distinguent deux épisodes humides, le Soltanien puis le Rharbien suivis par l'actuelle période de sécheresse. La fin du Soltanien est marquée par l'apparition de vastes lacs, la sebkha du Hodna s'y est implantée et y a quelques milliers d'années seulement à la suite à l'émergence du seuil de M'doukal par des formations lacustres du Soltanien et par des dunes (Ledghem Chicouche, 2001).

Le Quaternaire Ancien ou Moulouyen est discordant sur les conglomérats et les sables du Pliocène supérieur (Abdesselam, 2013), Le Quaternaire moyen est distingué au voisinage immédiat des reliefs, ces glacis sont constitués sur une épaisseur de l'ordre de 15 à 20 mètres, d'une alternance de couches irrégulières de cailloutis, de blocailles mal classées (le volume de certains blocs dépasse 1 m³) et de colluvions plus ou moins rougeâtres) et le Quaternaire récent sur la plaine du Hodna essentiellement constituée d'alluvions récentes provenant des reliefs environnants, celles-ci présentent un maximum d'épaisseur au voisinage du Chott El Hodna.

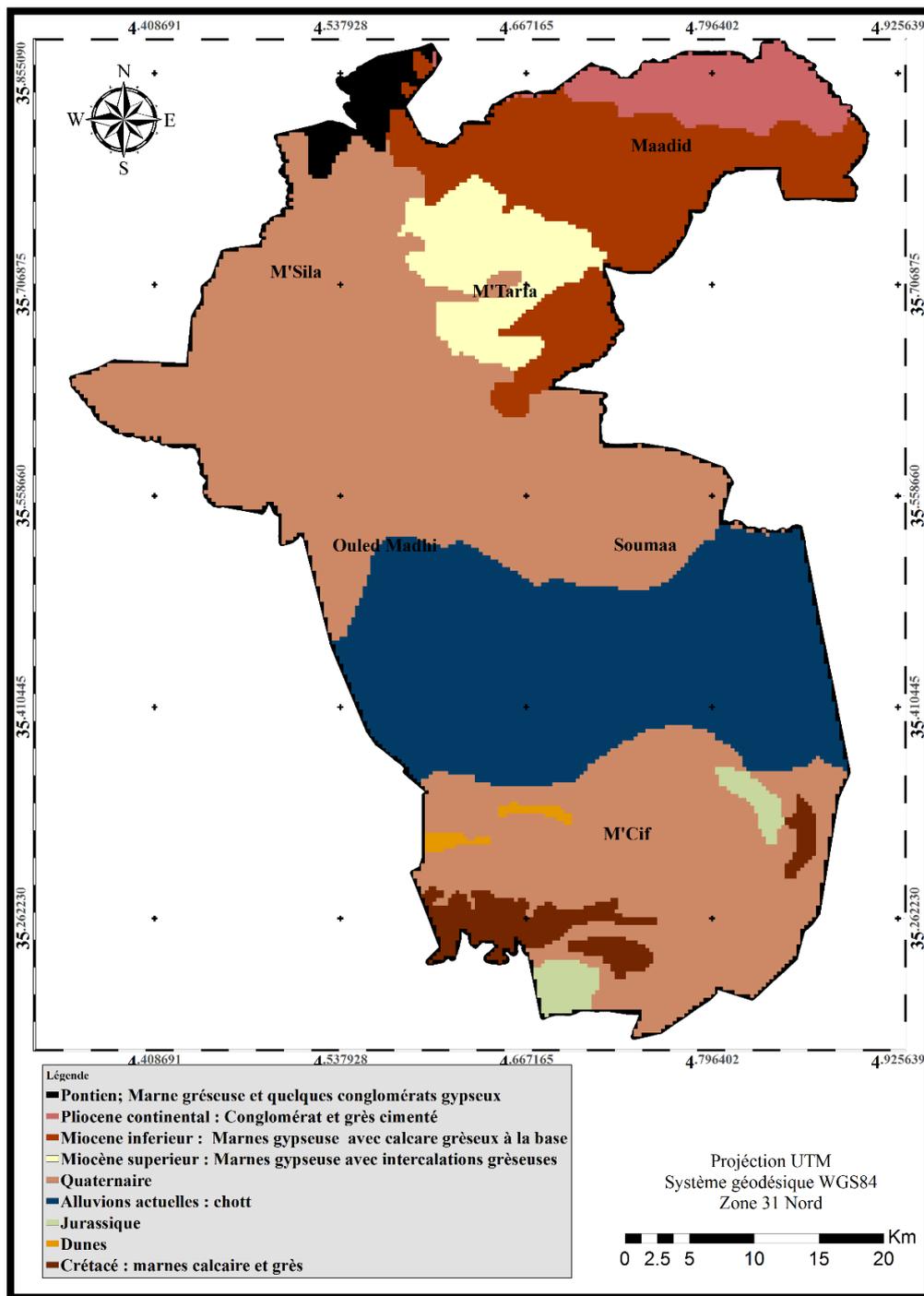


Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude (extraite de la carte de Amroun, 2008)

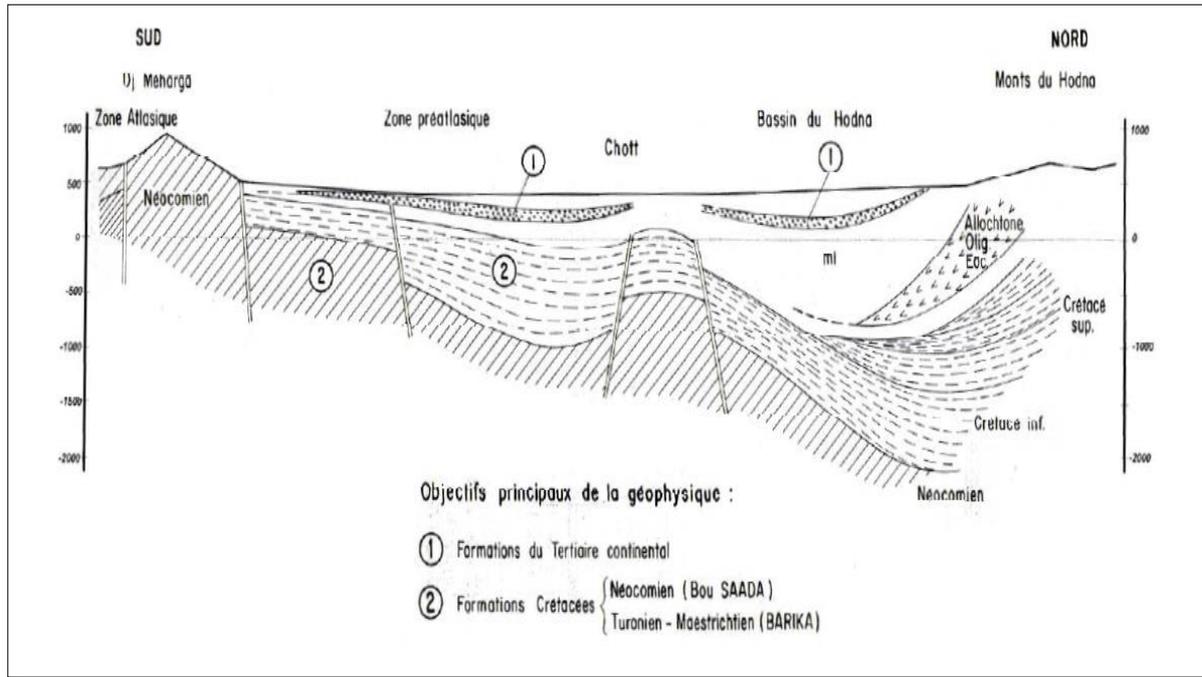


Figure 6 : Coupe géologique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie, au niveau du Hodna oriental (Guiraud, 1971)

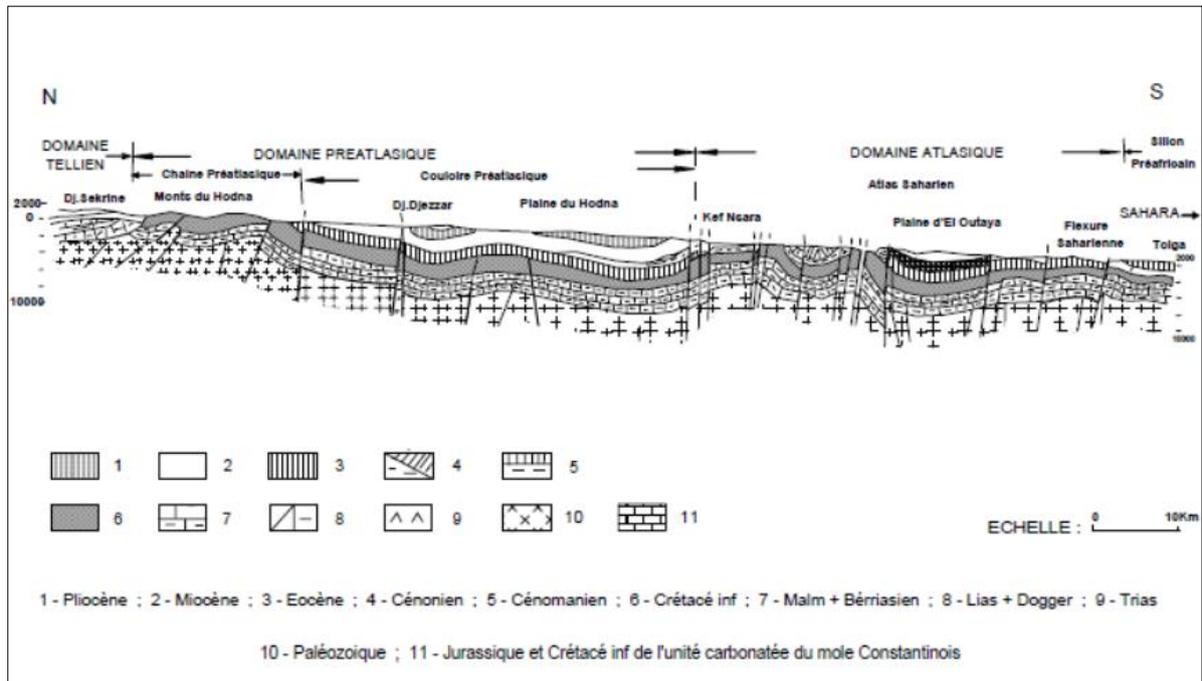


Figure 7 : Coupe schématique de la région du Hodna (F.A.O 1968)

5. Cadre édaphique

Les caractères généraux des sols ont été dégagés des travaux de Boyadgiev (1975), Pouget (1979), Halitim (1985) et Abdesselam (2013). Dans la zone considérée, deux grands ensembles de facteurs édaphiques ont une influence déterminante sur la végétation :

- Les facteurs du bilan hydrique, en particulier la capacité de rétention en eau du sol (liée à la texture, à la teneur en matière organique et au type de substrat) ainsi que la valeur des apports complémentaires (ruissellement, nappe phréatique).
- Les facteurs chimiques, principalement le rôle des horizons d'accumulation des sels.

Les sols, en majorité sableux, présentent des caractères salins, calcaires ou gypseux soumis à l'effet de la nappe phréatique ou à l'érosion éolienne. D'une manière générale, à cause de leur texture et leur faible teneur en matière organique, le niveau de fertilité est faible (faible capacité d'échange cationique et de rétention en eau) ; le recours à la fertilisation et aux amendements organiques est indispensable pour assurer des rendements acceptables (Abdesellam, 2013)

Selon la DSA (2008), Du Nord au Sud, les grandes zones pédologiques se caractérisent par :

- Une zone de montagne xérique avec des reliefs qui dépassent parfois 1 800 m, les sols ici sont des minéraux bruts d'érosion en association avec des sols bruns calcaires. Ils ne sont pas aptes à l'agriculture compte tenu de leur faible profondeur et leur relief et sont destinés beaucoup plus au reboisement. Néanmoins.
- Une zone steppique de dépôts quaternaires anciens et moyens avec des reliefs compris entre 400 et 1 000 m d'altitude avec succession de glacis à composition granulométrique et chimique différentes. Les sols sont de groupe sierozems sur croûte calcaire à encroûtement et à nodules calcaires. On trouve également des sols gypseux, minéraux bruts d'érosion et peu évolués.
- Une zone steppique de dépôts alluviaux récents avec des passages plats et une altitude de 400 à 500 m. les sols sont surtout peu évolués, d'apport alluvial en différents degrés affectés par des sels.
- Une zone sub-désertique sableuse avec des dunes de sable. Elle est située au sud du chott El Hodna avec une altitude de 400 à 600 m, et des microreliefs ondulés dus à la

présence de dunes et de sebkhas. On rencontre deux types de sols : l'un à texture minérale, il est le plus répandu, l'autre à texture moyenne ou variable en profondeur.

- Une zone sub-désertique sablo-caillouteuse qui comprend la partie septentrionale de l'atlas saharien. Les reliefs sont compris entre 600 et 1 000 m, avec de nombreux cônes et glacis d'accumulation à matériaux grossiers. Les sols dominants sont de type minéraux bruts d'érosion sur croûte et encroûtement, ils ne sont pas recommandés pour l'agriculture, mais plutôt pour le pâturage. Il existe aussi des sols peu évolués ou sierozems à nodules calcaires qui peuvent être utilisés pour les cultures en irrigué.

Le chott entourant la sebkha et la sebkha elle-même portent des sols à accumulations gypso-salines de nappe qui deviennent franchement salines dans la sebkha (chlorure de sodium); leur conductivité électrique est très élevée (Boyadgiev, 1975). La répartition des sols est en rapport avec des phénomènes pédologiques majeurs tels que : l'halomorphie, la gypsomorphie, la calcimorphie et la désertification.

Notre zone d'étude est caractérisée généralement par six types de sols selon la carte pédologique de la F.A.O en 1975 :

- Des sols à encroûtement calcaires sur les altitudes du Nord (Mont de Maadhid)
- Les sierozèmes sur piémont du mont de Maadhid et autour de Oued K'sob.
- Sols peu évolués alluviaux sur les glacis et la plaine agricole de M'sila, une partie de ces sols sont des sols à phase saline.
- Sols halomorphes et des sols hydromorphe, dans la partie Ouest du chott.
- Sols halomorphe sur une grande partie de la cuvette du chott
- Sols halomorphes et des sols minéraux bruts éoliens, sur la partie sud du chott
- Sols hydromorphe et des sols minéraux bruts éoliens.
- Sols minéraux bruts éoliens, Lithosols et regosols

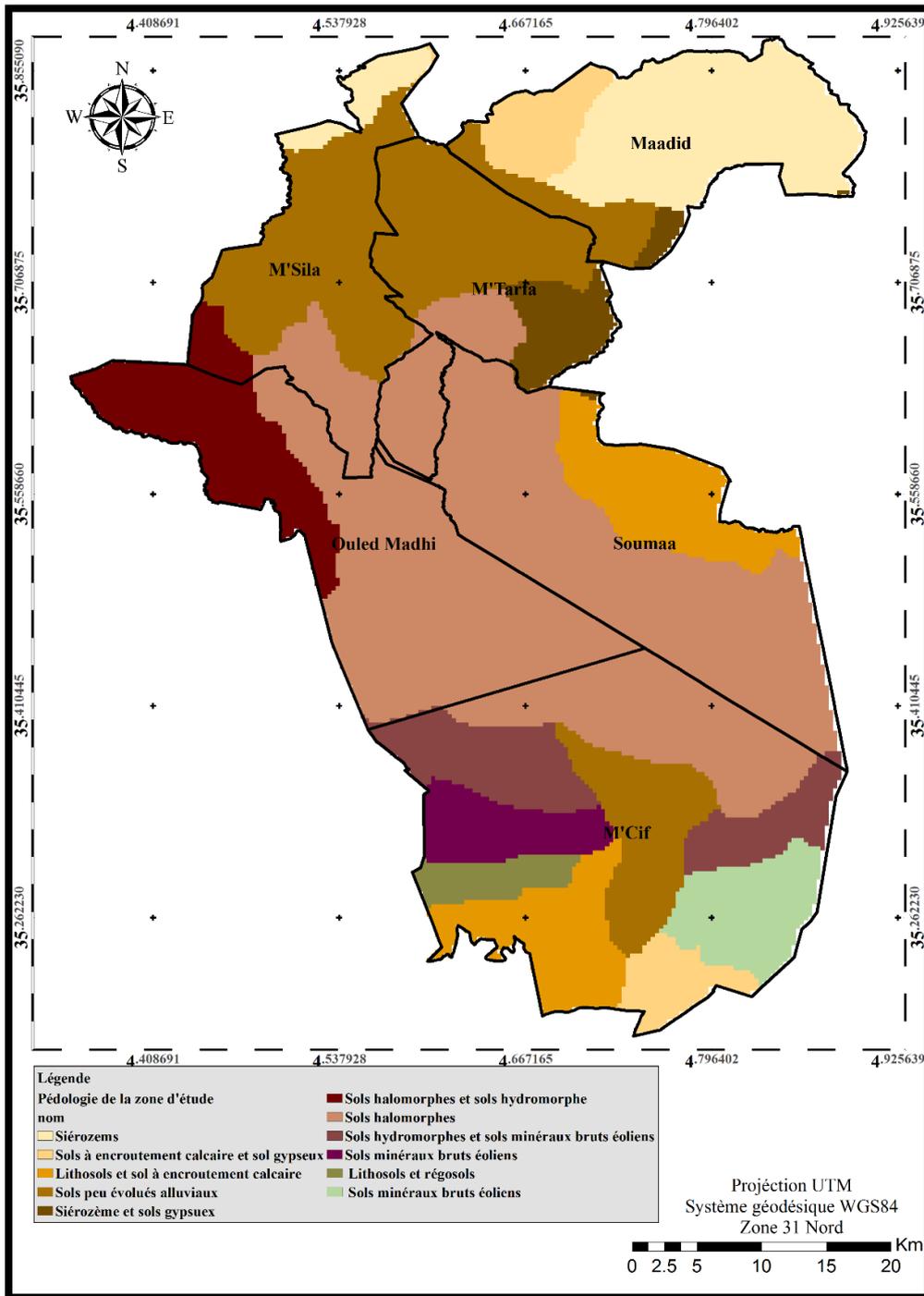


Figure 8 : Carte pédologique de la zone d'étude (Source : F.A.O, 1975).

6. Cadre hydrologique

La wilaya de M'sila est située dans un immense bassin versant qui reçoit le flux pluvial grâce aux différents oueds qui sont alimentés à partir des bassins versants de la wilaya et ceux des wilayas limitrophes particulièrement au Nord (Bouira et Bordj Bou Arreridj). Selon

la D.S.A. (2008), les capacités hydriques sont estimées à 540 millions de m³ dont 320 millions de m³ en eaux superficielles (soit 59,25% de la capacité totale), et 220 millions de m³ en eaux souterraines (soit 40,74%).

Le volume d'eau mobilisé pour l'irrigation est estimé à 151 millions de m³, réparti respectivement entre les eaux superficielles avec 35 millions de m³ et les eaux souterraines avec 116 millions de m³ (Hedbaoui, 2008). Le réseau hydrographique est tout diversifié et dégradé, Il est constitué par plusieurs oueds sans rapport entre eux drainant, chacun une aire plus ou moins étendue dont les plus importants sont ceux issus des massifs montagneux telliens. Le plus important est Oued K'sob : avec une aire de drainage de plus de 2400Km² située dans le domaine tellien (Amroun, 2008).

Le chott d'El Hodna est recouvert d'une nappe d'eau au moment des crues, sa limite septentrionale pendant la période hivernale est inondée entièrement ou partiellement, plus au moins longtemps suivant que l'année est pluvieuse ou sèche. En été, il est sec car le bilan alimentation-évaporation est nettement négatif.

6.1. Barrage de Oued K'sob

Les régimes hydrologiques des systèmes fluviaux du bassin versant D'Oued El K'sob sont caractérisées par une grande variabilité spatiale et temporelle, cet Oued est le chargeur et le pivot de l'activité agricole dans la région (Bahlouli *et al*, 2012).

Ce barrage est construit en 1939 à 15 Km en amont de M'Sila, la capacité maximale du réservoir permet actuellement moins de 25 hm³ du volume d'eau régularisée (surface 230 ha) (Benkadja *et al*, 2012).

Ce barrage irriguait au passé les terres agricoles de la plaine de M'sila à l'aide des canaux de ciment sur des centaines de mètres tout au long de la plaine (Fig 15), ces canaux ne sont pas utilisés aujourd'hui et sont remplacées par des pompes qui tirent de l'eau directement de Oueds K'sob.



Figure 9 : Canal de transport d'eau d'irrigation du barrage aux terres agricole durant les années 1960 (Source DSA)

6.2. Les Oueds

Le réseau hydrographique est constitué de nombreux oueds, dont les plus importants sont :

- Oued Leham, dont le bassin présente 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 Lougmane, dont le régime est permanent ;
- Oued K'sob sur lequel existe l'important barrage, son régime est permanent ; El K'sob avant l'entrée dans le barrage à une abondance annuelle moyenne de 60 millions de m³ soit un débit spécifique de 1,51/s/km² soit un coefficient d'écoulement moyen de 11%. La densité moyenne du réseau hydrographique y est extrêmement forte (5,45 km/km²) (Tatar, 1985).
- Oued Ennfida, son régime est temporaire ;
- Oued Nakrar, dont le régime est temporaire ;
- Oued Barika, sur lequel existe un barrage de dérivation. Cet Oued draine les Monts du Belazma et son régime est permanent ;

- Oued Bitam dont le régime est temporaire.

Par contre dans la zone Sud du Chott El-Hodna. Il n'existe que deux oueds importants :

- Oued Boussaâda et son affluent Maïtar, d'un régime est temporaire ;
- Oued Melah ou Oued M'Cif plus en aval rejoint le chott à l'Ouest de Guelalia, son régime est permanent

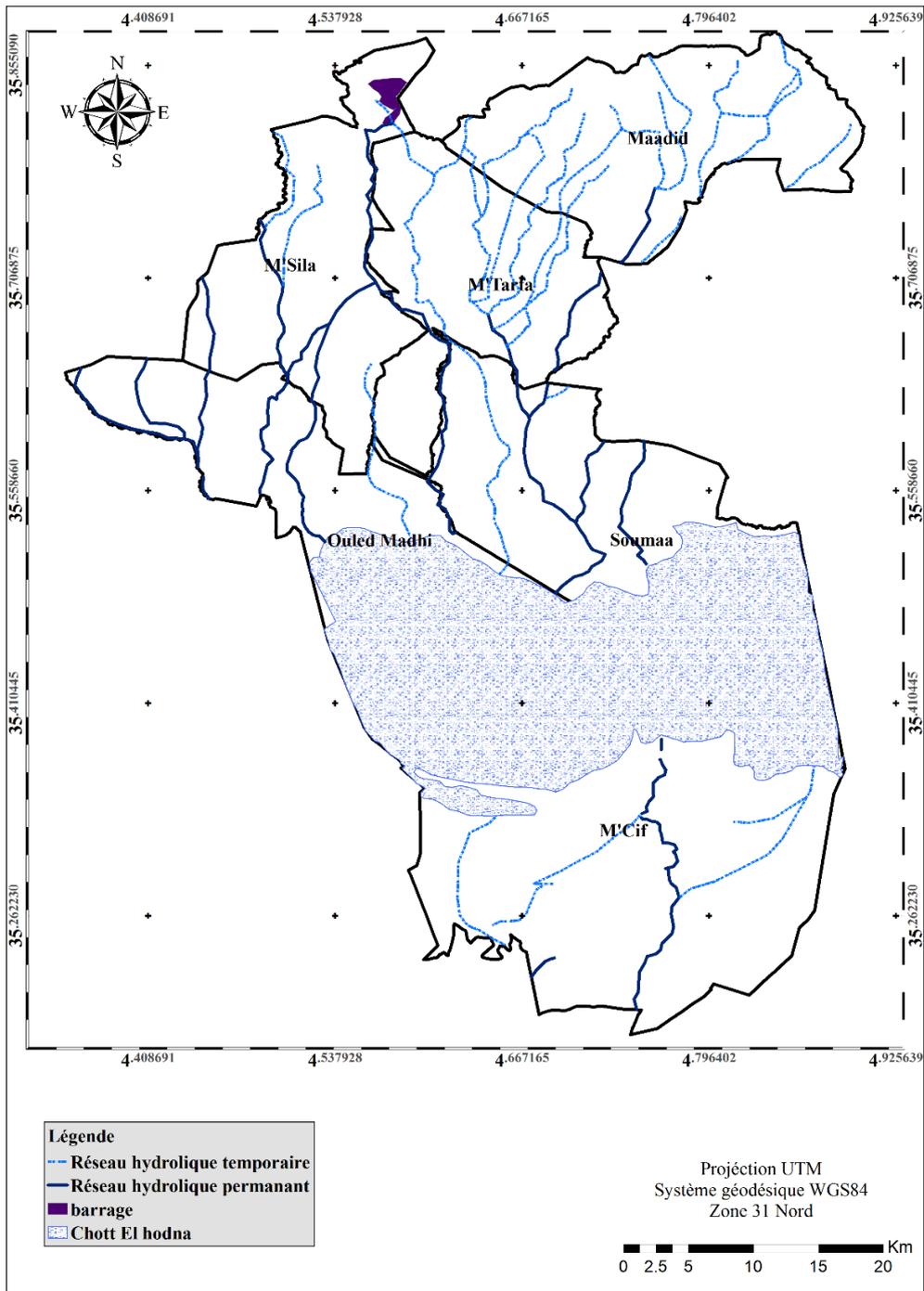


Figure 10 : Réseau hydrographique (extraite du modèle numérique du terrain MNT)

6.3. Les nappes

La wilaya possède des potentialités importantes en eaux souterraines (250,0 hm³), la structure hydrogéologique du Hodna renferme beaucoup de formations aquifères réparties sur plusieurs niveaux depuis le jurassique jusqu'au quaternaire (BNEDER, 2007). Deux types de nappes sont connus à travers le territoire de la wilaya :

- Nappe phréatique : peu exploitée car ces eaux sont très chargées et saumâtres ;
- Nappes profondes : dont les plus importantes, la captive du Hodna (133 millions m³/an) et d'Ain Irrich (8 millions m³/an).

La nappe la plus exploitée à M'Sila, Barika et au sud du chott est celle du Miopliocène, au sein de laquelle les horizons du Pontien occupent une place privilégiée. Cette nappe captive, artésienne autour du chott, généralisée sur à peu près l'ensemble du bassin, et contient une eau relativement d'assez bonne qualité (Abdesselam, 2013).

L'étude piézométrique de la plaine de M'sila montre un écoulement principal des eaux selon des directions Nord-Sud, Est-Ouest et Ouest-Est, ce qui permet de dire que l'alimentation de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire se fait par les flancs Sud des monts du Hodna. Le gradient hydraulique varié entre de 1.5 ‰ et 2.6 ‰ (Amroun 2008).

Les eaux souterraines de la plaine sont largement utilisées dans l'irrigation des cultures ayant de fortes minéralisations, ces eaux peuvent entraîner des risques de salinisation des sols des terres agricoles ; les nappes phréatiques se rapprochant de la surface près de la sebkha, où la minéralisation des eaux augmente et la salinisation de type sulfato-chlorure devient chloruro-sulfatée et chlorurée (Amroun, 2008)

7. Couvert végétal

Le découpage du couvert végétal de la région d'étude, on distingue une zone pastorale qui forme 49% du territoire de la wilaya sur les périphéries du Chott, et la plaine de M'sila, aussi une zone à typologie forestière sur les Monts d'El Hodna, et même une zone pastorale-forestière sur les piémonts des montagnes

7.1. Essences forestières

Du point de vue essences forestières qui constituent la strate arborescente, les formations de Pin d'Alep purs sont quasi dominantes et occupent une superficie de 47 697 Ha soit 89% des superficies forestières cartographiées (forêts et reboisements). On rencontre en mélange le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) avec le chêne vert (*Quercus ilex*) sur 2 216 ha (4%) et au

Genévrier Oxyèdre sur 3 451 ha (6%). On rencontre également sur des superficies très restreintes, d'autres mélanges d'essences forestières telles que l'Eucalyptus et Cyprès, pistachier et le Cyprès sur 113 ha. Les espèces les plus répandues du maquis sont le Genévrier Oxyèdre, le Genévrier de Phénicie, le Chêne vert, le lentisque et l'oléastre (BNEDER, 2007).

- Djebel Maadhid

La superficie boisée est constituée par des maquis clairs de Genévrier de Phénicie. Des maquis arborés en Pin d'Alep (*Pinus Alepensis*), de chêne vert (*Quercus ilex*), oxyèdre (*Juniperus oxycedrus*), les hautes altitudes sont couvertes par des pelouses.

-Djebel Meharga

Au niveau du Djebel Meharga (Sud du chott) et de son piémont (glacis récent), des groupements psammophiles (*Aristida pungens*), des groupements calcicoles (*Artemisia herba alba* et *Stippa tenacissima*), *Juniperus phoenicea* (genévrier) en associations avec d'autres groupements : *Olea europea*, *Peganum harmala*, *Anabasis articulata*, *Thymeria hirsuta*, *Rhus tripartita*, *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* ((Mimoune, 1995).

7.2. Végétation du Chott El Hodna

Au niveau du Chott, on rencontre de parcours steppiques autour du Chott. De l'Alfa qui est dégradée et qui est utilisé comme terres de parcours, et des terres agricoles envahis par des dunes de sable notamment dans la région de M'cif.

Des groupements argilo-halophiles (*Atriplex halimus*). Des groupements hyperhalophiles (*Salicornia arabica*) qui disparaissent dans la Sebkha. En bordure Sud du chott, essentiellement des psammophiles : *Aristida pungens*, *Eremobium oegyptiacum*, *Retama retam* en association avec d'autres groupements : *Limoniastrum guyonianum*, *Atriplex halimus*, *Tamarix gallica* (Abdesselam, 2013).

Il est à noter que, selon Quezel et Santa (1962-1963), la dépression du Chott el Hodna se rapporte à la Sous-région saharo-arabique dont elle représente une enclave au sein de la Sous-région méditerranéenne (Kaabache, 1990)

7.3. Activité agricole

L'activité agricole au niveau de la plaine de M'sila, Souamaa, Ouled madhi occupe une place importante au sein des activités de la population rurale. La principale activité dans la région est la culture des céréales (Orge et blé). Cette plaine est dédiée à l'agriculture intensive dans les terres irriguées, ainsi qu'Agriculture extensive marginale à pluviométrie inférieure à 300 mm/an, avec mobilisation des eaux de crues, on rencontre aussi des parcours steppiques réservés au pâturage. Des groupements steppiques calcicoles à alfa (*Stippa tenacissima*), armoise (*Artemisia herba alba*). Des groupements gypso-calciphiles (*Anabasis oropetiorum* et *Salsola vermiculata*) (Abdesselam, 2013).

Les cultures dans cette plaine sont distinguées par :

- Des cultures de légumes frais de saison, notamment : la carotte, le concombre, l'oignon, le piment et encore d'autres relativement : l'ail, la courgette, le navet, le melon et la pastèque, en particulier sur le périmètre irrigué par le barrage du Ksob ;
- Outre ces cultures maraîchères, elle pratique les fourrages verts, l'arboriculture telle l'abricotier et le grenadier et d'autres fruitiers, qui lui confèrent une des premières places à l'échelle nationale. (BNEDER, 2007).

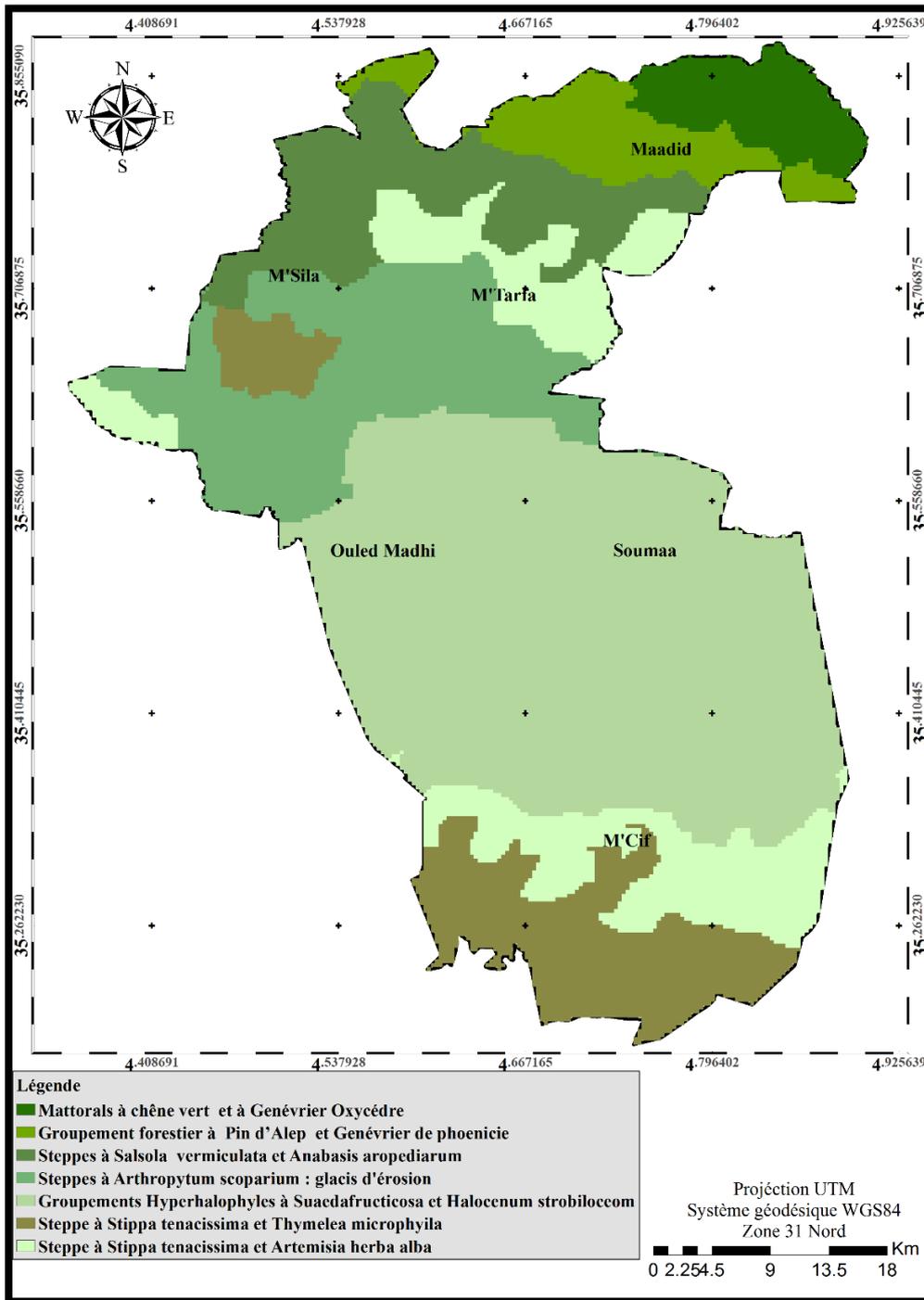


Figure 11 : Carte Phyto-écologique de la zone d'étude
(Source : Claudin et al., 1975)

8. La faune

Le Chott El Hodna est une région limitrophe qui abritent des espèces menacées telles que, la gazelle de Cuvier (*Gazella Cuvieri*) espece endemique a l'Afrique du Nord considérée comme en danger par l'UICN, l'outarde Houbara (*Chlamydotis undulata*) qui a subi une grande

pression de chasse en raison des pratiques liées à la fauconnerie, et l'intensification de l'agriculture. La sarcelle marbrée (*Marmonette angustirostris*), est également un oiseau menacé classé sur la liste rouge de l'UICN (Ledghem Chikouche, 2011).

Le réseau hydrique et les bassins d'accumulation constituent un habitat particulier pour les poissons, les amphibiens, les libellules, et de nombreuses espèces sauvages qui viennent s'y abreuver. La sebkha qui collecte les eaux résiduaires de l'oasis est également un habitat particulier en raison de son caractère temporaire et la salinité de l'eau. Elle attire de nombreux oiseaux en période de migration (BNEDER, 2007).

L'élevage extensif fait appel quasi-exclusivement aux parcours naturels pour satisfaire les besoins nutritifs du troupeau, ce qui suppose des déplacements dont l'amplitude est fonction des moyens dont dispose l'éleveur (à pied ou à l'aide des camions). L'élevage constitue un facteur important pour l'équilibre économique et écologique des systèmes agricoles oasiens. Il permet de valoriser les fourrages et les sous-produits disponibles dans les oasis. La présence d'espèces fourragères, de légumineuses notamment, dans les assolements, et le fumier produit par les animaux, sont nécessaires au maintien de la fertilité des sols et à l'amélioration de leurs caractéristiques physico-chimiques (Hadbaoui, 2013).



Figure 12 : Oiseaux aquatique du Chott El Hodna

9. Activité anthropique

La répartition démographique se fait de deux manières :

- Au Nord : la répartition de la population est dense, où le centre urbain est bien peuplé, par contre la zone rurale est moins peuplée ;
- Au Sud la répartition de la population est moins dense avec des centres urbains éloignés les uns des autres, et une zone rurale moins habitée à cause de la sécheresse et le manque des moyens (Amroun, 2008).

Depuis 1970, les petites villes se sont multipliées dans la région du Hodna. Elles tendent aujourd'hui à jouer un rôle de plus en plus important dans l'économie et les projets de développement. M'sila, promue au rang de chef-lieu de wilaya, comptait en 1966, 19675 habitants avec un taux d'urbanisation de 55,62%.

Ainsi, le long de l'axe routier entre Msila et Barika s'aligne un nombre de petits centres commerciaux formant une série de villes, fonctionnant comme refuge pour les populations rurales particulièrement après 1990 (Redjam et Tachrifet, 2008).

Cette répartition a changé ultérieurement, où on remarque l'augmentation de la population de toutes les communes du Hodna, la figure si-dessous présente la répartition de l'occupation de la population de la zone d'étude :

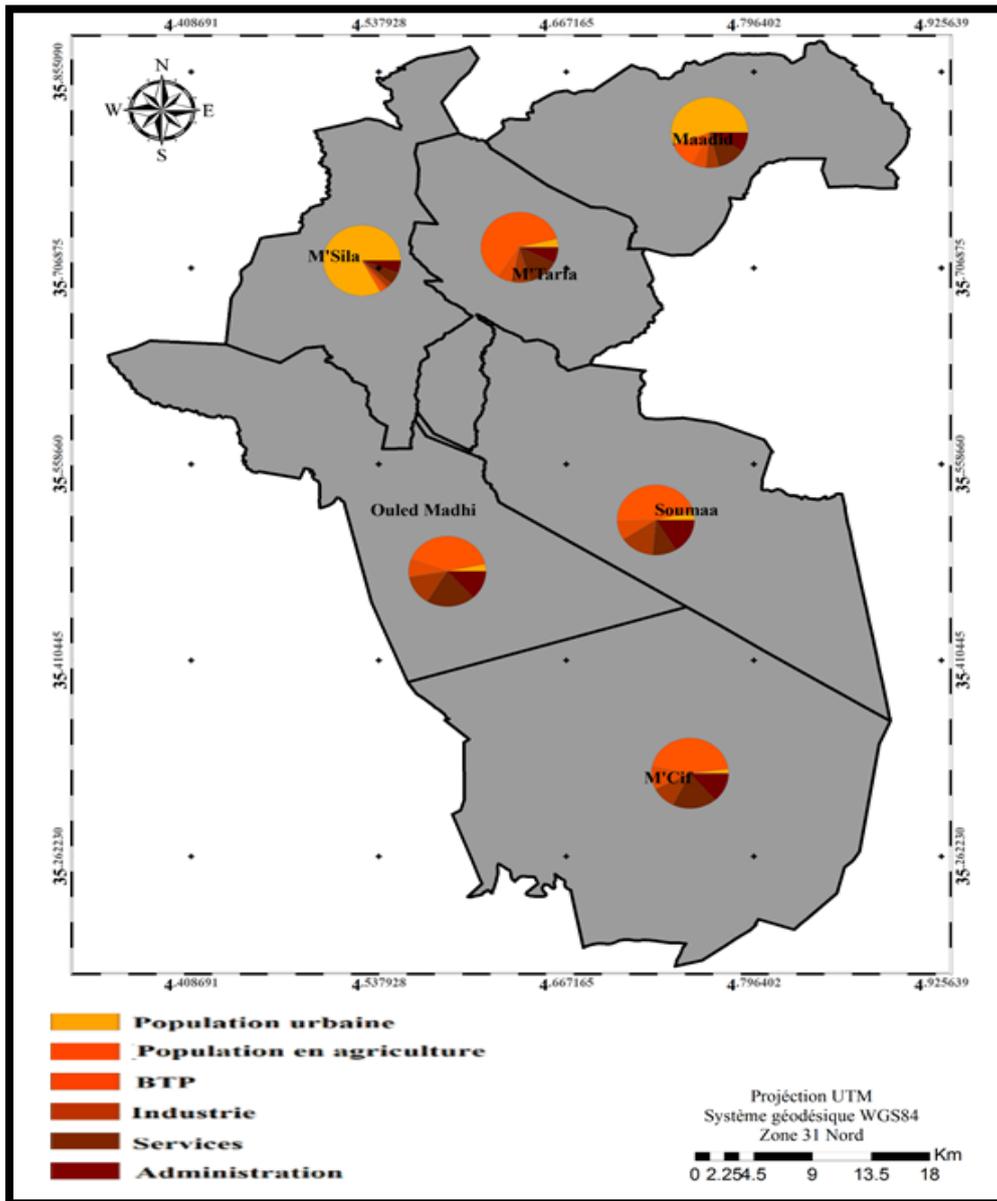


Figure 13 : Occupations de population de la zone d'étude (Source : Conservation des forêts de la wilaya de M'sila : Monographie des commune 2014/2015)

En 2005, plus de 60% de la population vit à peine sur 10% du territoire, c'est-à-dire sur des communes de faible dimension et de densité moyenne ou urbaine, le recensement 2008 confirme la diminution de la population nomade et le phénomène de sédentarisation de cette population dans les agglomérations ou autour des villes afin de bénéficier des services sociaux. Ce mouvement est également en relation avec le changement de mode de vie des éleveurs et des conditions de transhumance (BNEDER,2007).

Selon RGPH (1998), la population de la wilaya de M'sila atteindra 1180308 en 2020 et 193535 ha en 2030.

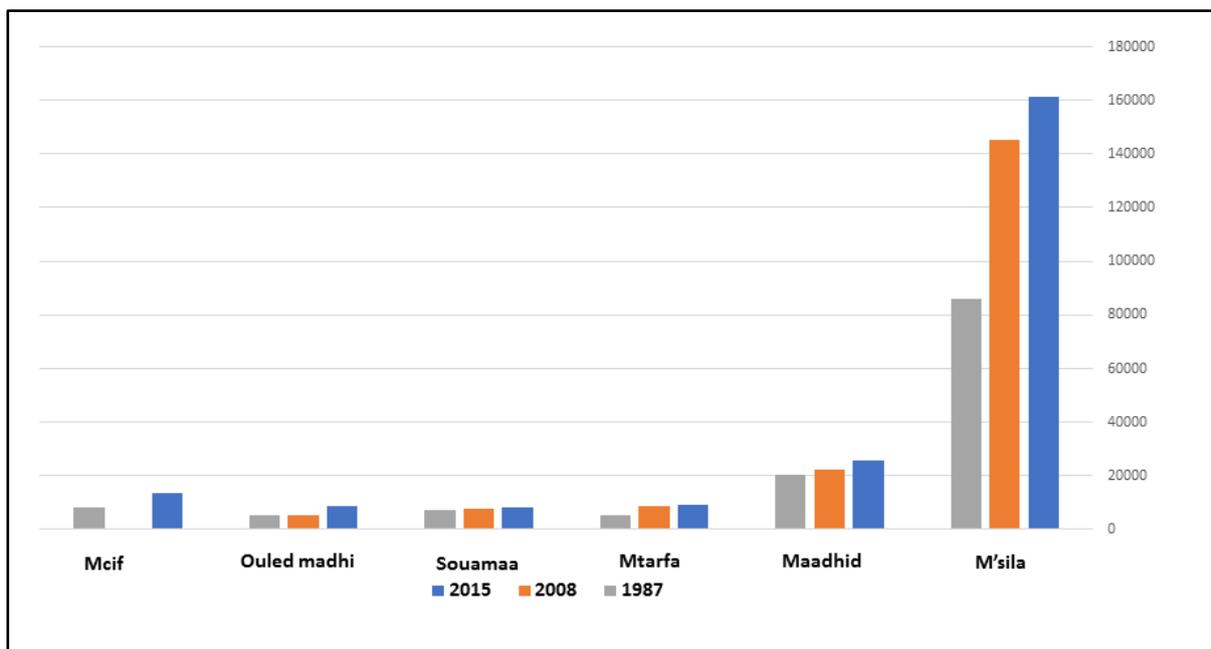


Figure 14 : Répartition de la population du Hodna, entre 1987 et 2015

(Source : Office national des statistique)

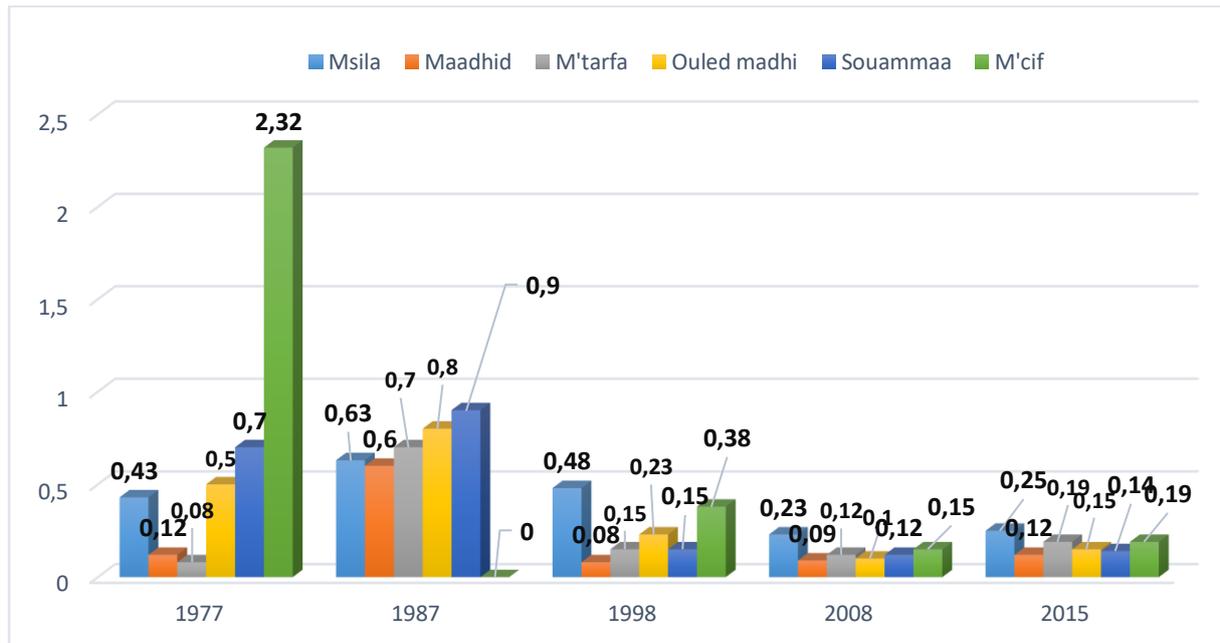


Figure 15 : Taux d'accroissement de population par commune

(Office national des statistiques).

10. Activités économiques et industrialisation

Au Hodna, plusieurs points de vente et de distribution ont été implantés à M'sila et d'autres points aux différents chefs-lieux de daïra selon l'importance de celles-ci (D.P.A.T de M'sila, 2008). Ce développement économique a suscité le déclenchement de puissants mouvements migratoires, dirigés vers les villes du Hodna.

Ainsi plusieurs installations industrielles sont venues s'installer au cours des dernières années notamment autour de la ville de M'sila, on s'aperçoit que le risque est accru par la présence d'unités industrielles à l'intérieur et au voisinage des villes ; la zone industrielle de M'sila (s'étend sur 164 h) est entourée par 50 agglomérations. En effet, ces installations peuvent engendrer des risques supplémentaires aux populations voisines (libération de produits dangereux, incendies, explosions...) ainsi que leurs exigence d'alimentation permanent et en grandes quantités en eau.

La région possède aussi de grandes potentialités aujourd'hui peu exploitées en matière de ressources minérales du fait notamment de la présence de chaînes de montagne (BNEDER,2008). L'exploitation de ces ressources nécessite un réseau de transport ferroviaire et/ou routier, adapté en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire ainsi que de l'énergie et

de l'eau. Les impacts non négligeables de cette activité sur l'environnement (qualité de l'air, poussières, bruit, rejets liquides et solides, transport...) devront dans tous les cas, et plus particulièrement dans le cadre d'un développement des carrières, être pris en compte et minimisés.

11. Réseau routier

Le réseau routier de la région programme des hauts plateaux est marqué par le cadre physique de la région : relief accidenté pour accéder sur les hauts plateaux, des lits d'oueds asséchés qui peuvent prendre des formes torrentielles lors d'épisodes pluvieux, La densité routière de la wilaya est de 50,83 km/1000 km² (BNEDER, 2010).

Tableau 1 : disponibilité du kilométrage de route par 1000 véhicules

Wilaya	KM POUR 1000 VEH			
	RN	CW	CC	GLOBAL
MSILA	15,16	12,75	32,59	60,49

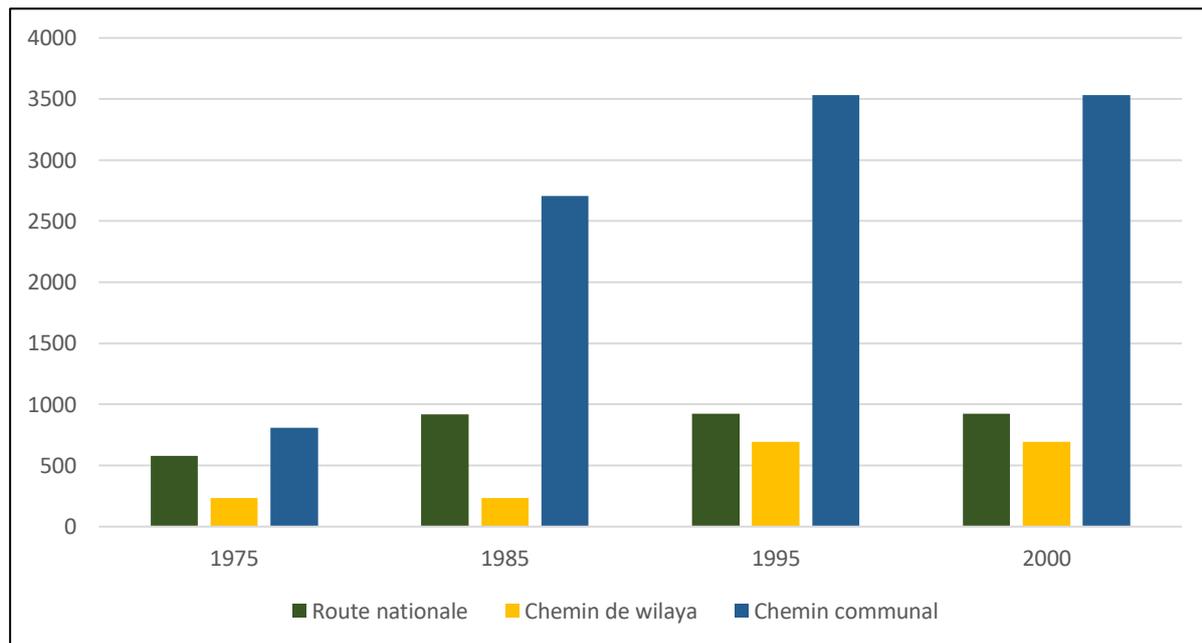


Figure 16 : Évolution du réseau routier de la wilaya de M'sila en km 1975-2000 (BNEDER,2010)

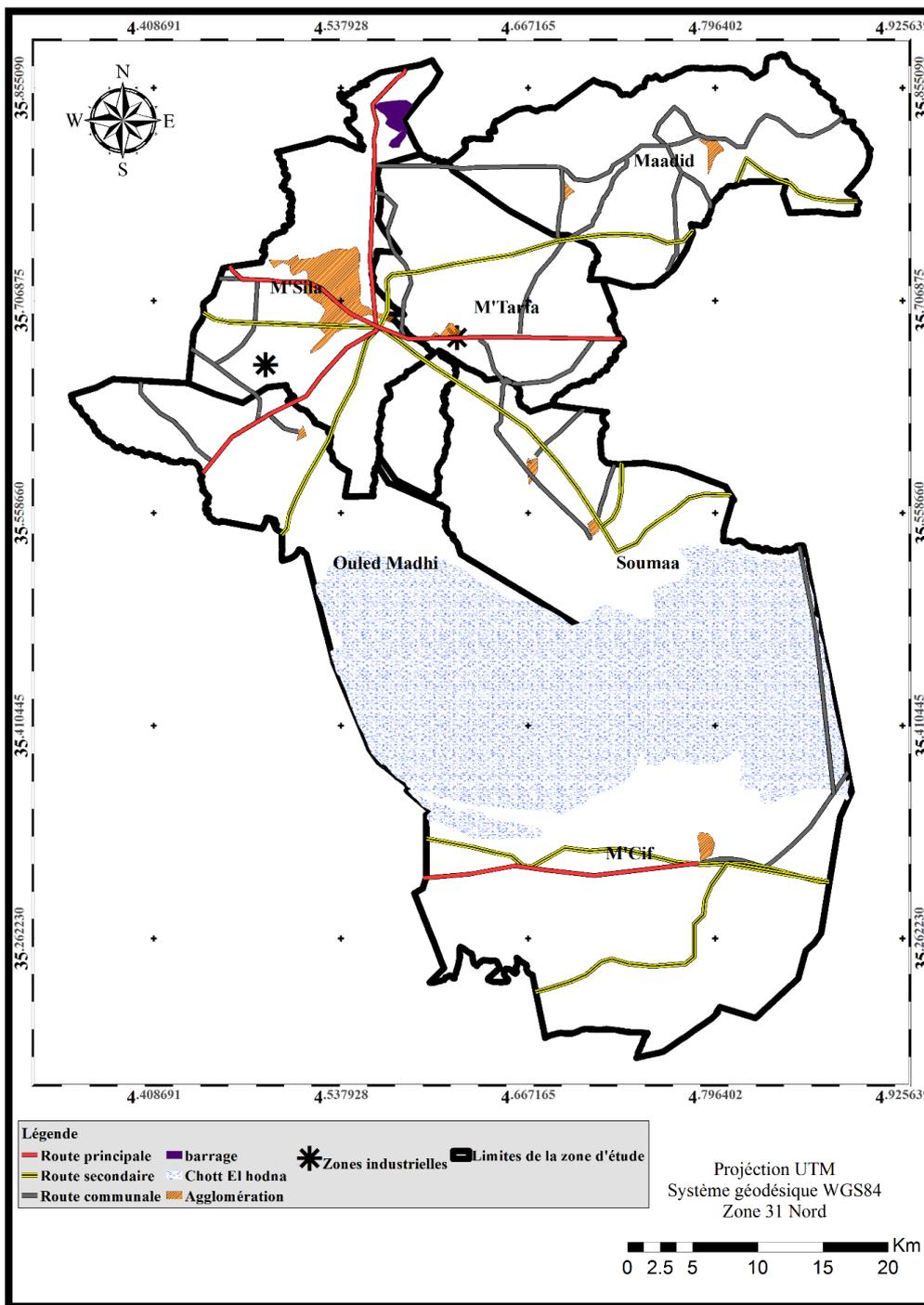


Figure 17 : Carte du réseau routier de la zone d'étude

(Ministère des travaux public : Direction de l'exploitation et de l'entretien des routes, 2014)

Conclusion

Du fait de sa localisation au centre de l'Algérie, en zone de transition, et en raison de sa position en zone de dépression entre l'Atlas tellien et Saharien ; la région d'El Hodna présente une particularité de biotopes et de paysages.

A travers l'étude du milieu physique on peut constater que notre zone d'étude se divise potentiellement en quatre régions :

- Région montagneuse, au nord de la zone d'étude, d'une altitude qui varie entre 1000 et 1800 m, à un couvert végétal assez dense formé essentiellement des maquis de chêne vert et des reboisements de pin d'Alep.
- Région steppique, sur des altitudes qui varient entre 450 et 1000 m, formées essentiellement de parcours et des steppes à Alfa.
- Région de dépression, sur des altitudes qui varient entre 350 et 450 m, couverte par une végétation spontanée et des Halophytes, incluant le Chott d'El Hodna.

Aux cours des dernières années, cette région a connu un développement, et une évolution urbaine très rapides, notamment dans les régions localisées sur les périphéries des grands axes routiers, cette explosion démographique à élever les besoins d'exploitation des différentes ressources naturelles, ce qui a augmenté la pression anthropique dans la région.

Chapitre II

Caractéristiques climatiques

Introduction

Le climat a une influence sur tous les êtres vivants. Il régit le cycle biologique des plantes et des animaux, il influe sur leur croissance et leur vitalité et est un des principaux facteurs qui déterminent leur répartition autour de la planète. Presque toutes les formes de vie sont adaptées pour vivre dans une zone climatique particulière et relativement limitée (Khaldi, 2005)

Le climat des hautes plaines steppiques de l'Algérie est marqué par un conflit entre les influences de la méditerranée, caractérisé par des hivers doux et une longue période estivale chaude, tempérée par des brises de mer et du Sahara, avec un vent chaud et secs (le sirocco) soufflant au Nord du Sahara durant la saison estivale, amène des orages de poussière et de sable vers les régions côtières (Bouzekri, 2015). La région choisie pour cette étude fait partie du bassin versant endoréique Hodnéenne dans une zone de transition entre le climat doux du Nord et désertique du Sud (Amroun, 2008).

Dans ce chapitre on tentera de procéder à des calculs à partir de données météorologiques disponibles, et de suivre et présenter les caractéristiques climatiques de la région.

1. Zones climatiques

La région d'étude fait partie du bassin Hodnéen, celle du bassin versant Oued Ksob-M'sila. La caractéristique essentielle du climat du Hodna est l'extrême variabilité des précipitations dans l'espace et dans le temps. Selon Boyadgiev (1975). Cette zone est exposée à la fois aux perturbations qui affectent le bassin occidental de la Méditerranée et aux influences desséchantes du désert.

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 contre bas (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 (Abdesselam, 2013).

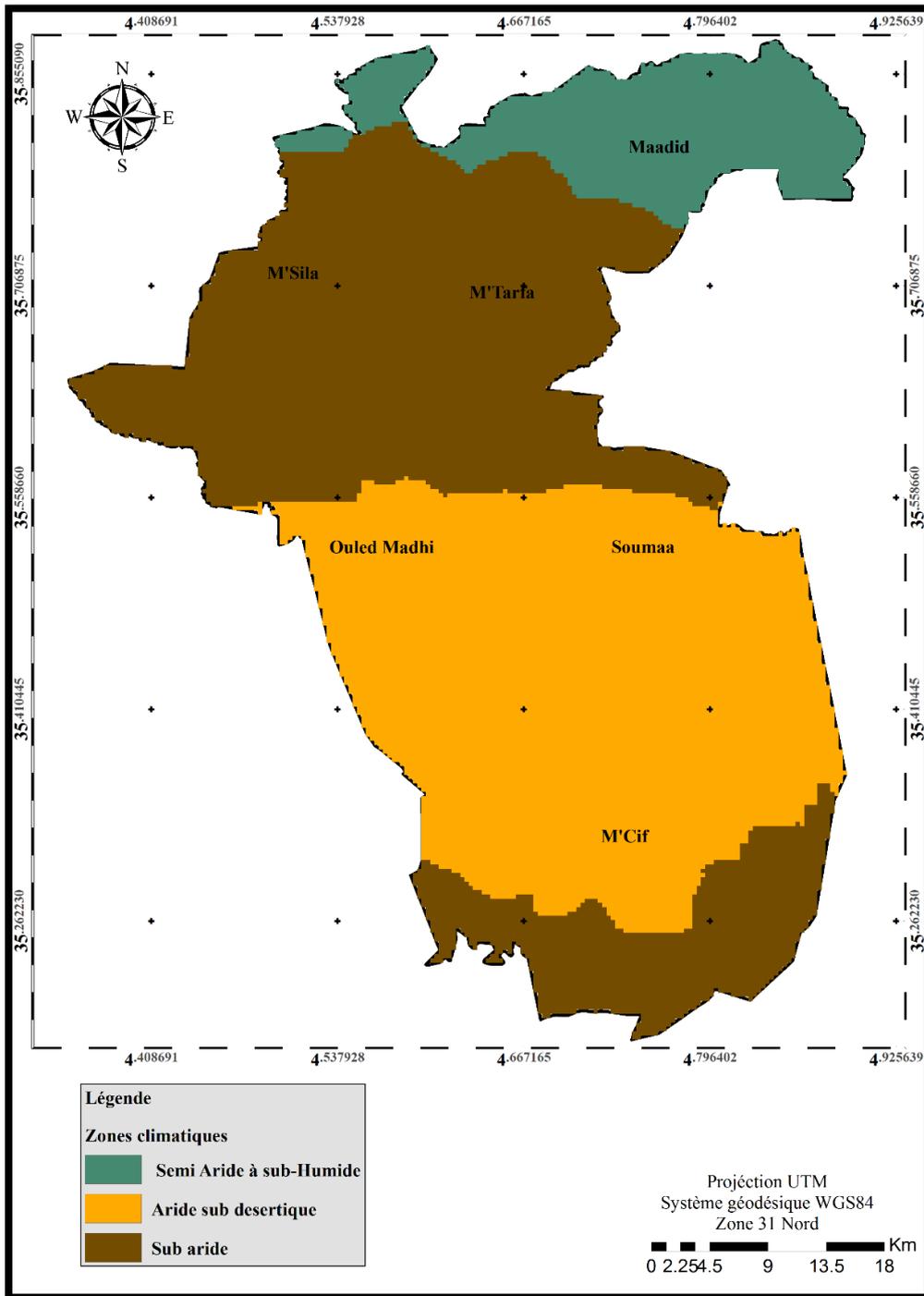


Figure 18 : Carte de zones climatiques (Sebhi, 1987)

Pour bien caractériser le climat de notre zone d'étude, nous avons exploité une série d'observations sur une période de référence de 25 ans de 1988 à 2015, relevée dans la station météorologique de M'Sila ($4^{\circ} 30' E$ et $35^{\circ} 40' N$) sur une altitude de 441 m et celle de El K'sob ($4^{\circ} 33' E$ et $35^{\circ} 42' N$) à 606 m d'altitude.

Afin de pouvoir cartographier les différents indices et paramètres suivants, et de présenter leurs répartitions spatiales nous avons effectué une correction et une extrapolation des données météorologiques de la période d'étude selon des points choisies dans la zone d'étude de différentes latitudes et altitudes et expositions (voir annexes).

2 Les précipitations

2.1. Distribution spatiotemporelle

Les précipitations jouent un rôle important dans l'apparition et la disparition du tapis végétal. La répartition mensuelle et annuelle des pluviométries moyennes sur une période de 28 ans (1988-2016) est enregistrée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) de la zone d'étude pour la période (1988– 2016)

Sources : stations météorologiques / ANRH

	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOT
M'sila	P (mm)	17.41	13.04	15.70	22.18	24.43	9.41	3.79	7.41	24.54	23.86	19.75	19.27	200.79
El K'sob	P (mm)	19,12	14,52	16,96	21,2	21,8	9,45	4,15	8,51	26,9	22,8	18.11	19,20	202.72

À partir de ce tableau nous remarquons que le mois le plus pluvieux est le mois de Septembre 20,86 mm et 20.9mm, et Octobre pour la station de M'sila avec 17.3 mm, alors que le mois le plus sec est le mois d'Aout.

Cette région n'est pas non plus à l'abri du changement climatique qui touche l'ensemble de la planète où la précipitation au cours des dernières années a vu des fluctuations dans la quantité de pluie caractérisée par une pénurie sévère dans quelques années.

Les figures suivantes présentent les fluctuations annuelles des précipitations dans les deux stations, on remarque que durant les années 2002, 2003, et 2004 le taux de précipitation a connu une augmentation considérable au niveau de la zone d'étude, suivie par une diminution à partir de 2005 puis une série de variations entre 250 et 290 mm par an jusqu'à 190 mm et 160 mm entre 2010 et 2016.

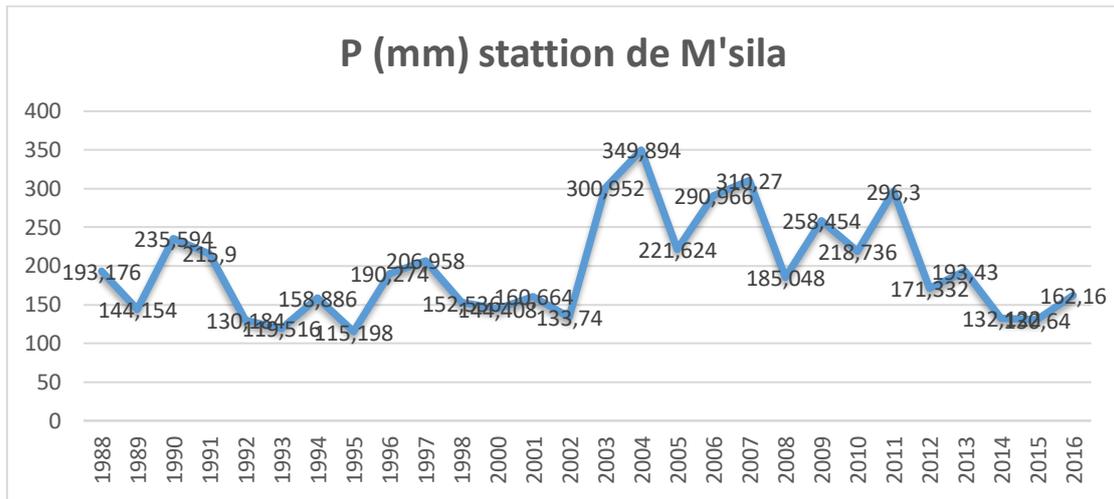


Figure 19. Fluctuations des taux de précipitations annuelles de la station de M'sila (1988 – 2016)

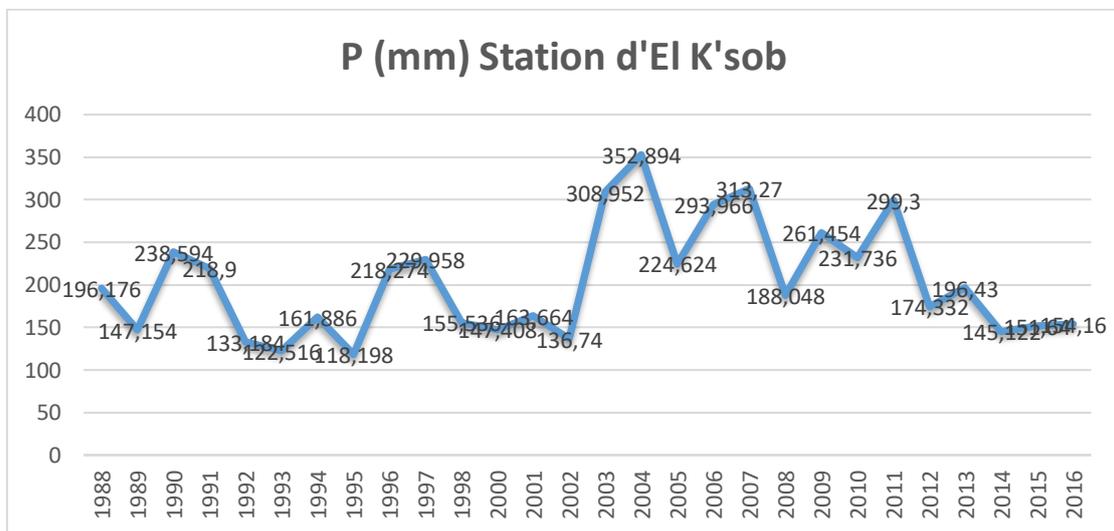


Figure 20. Fluctuations des taux de précipitations annuelles de la station d'El K'sob (1988 -2016).

La distribution des précipitations est inégale sur l'étendue de la région d'étude, le facteur topographique joue un rôle dans le régime de précipitation ; en raison de son altitude, la région montagneuse reçoit une quantité annuel moyenne qui varie entre 243.98 et 268.48 mm, la région steppique ainsi que la plaine agricole de M'sila reçoivent des quantités qui varient entre 222.49 et 243.97 mm par an, tandis que la région du Chott et du sud du chott qui est caractérisée par des quantités de précipitation très diminuées par rapport au reste de la zone d'étude due à son basse altitude, où la moyenne annuelle varie entre 198.24 et 208.6 mm (Figure 21 : Distribution spatiale des précipitations de la zone d'étude).

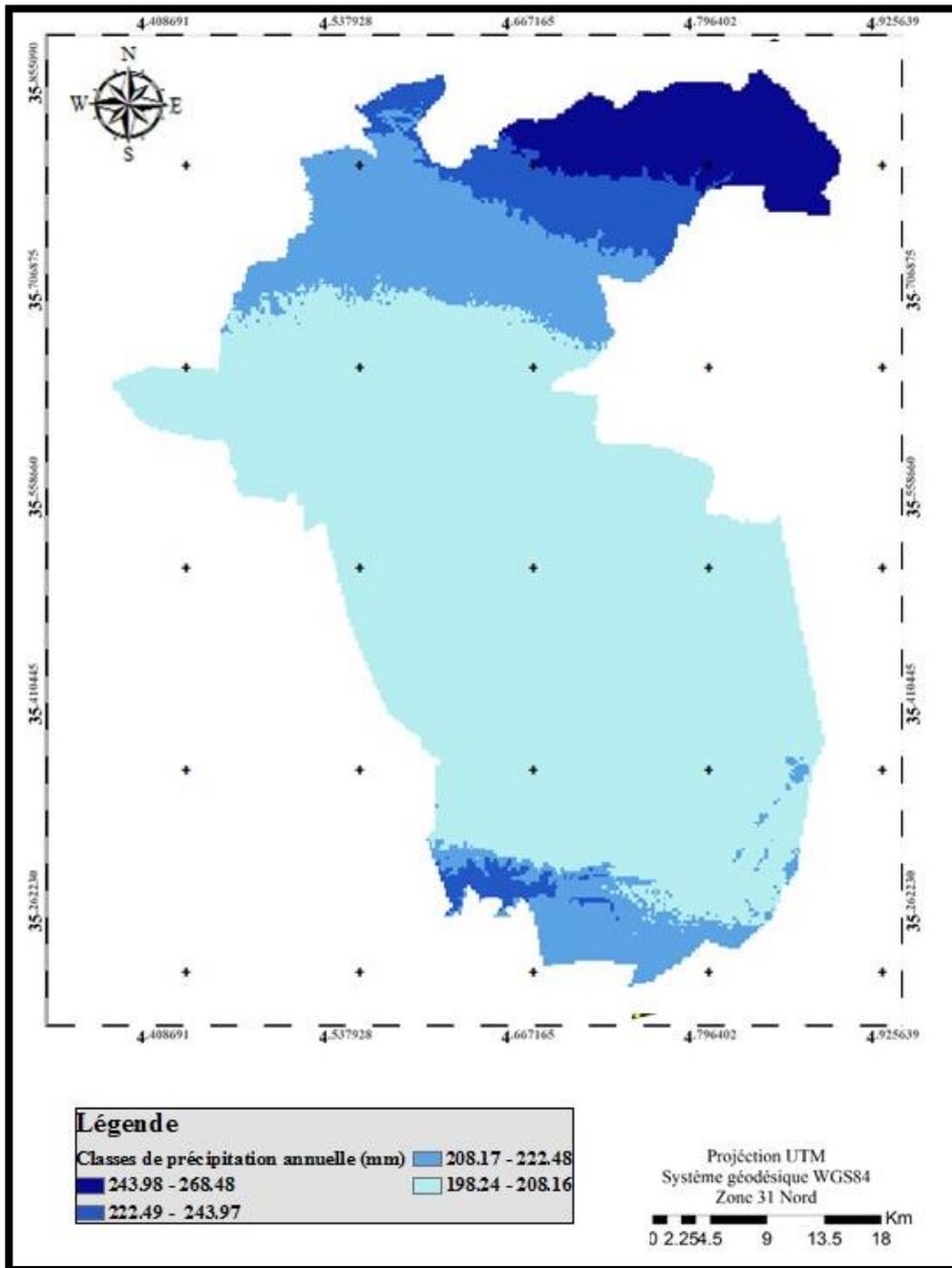


Figure 21 : Distribution spatiale des précipitations de la zone d'étude

2.2. Le régime saisonnier

Le tableau ci-dessous représente le totale des précipitations dans chaque saison à la station météorologique de la région d'étude

Tableau 3 : Le régime saisonnier des trois stations.

Source : Station météorologique de M'Sila, Boussada

	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Boussaâda	47,8	20,52	49,96	19,11
M'sila	40,5	37,26	36,07	14,96

Le tableau ci-dessus permet de caractériser le régime pluviométrique en fonction des saisons. Le régime saisonnier est de type AHPE, ceci signifie que l'automne est la saison la plus arrosée. Sur la station d'El K'sob ; le taux des précipitations durant la saison printanière est légèrement supérieur à celui des autres saisons ce qui fait du régime de cette station du type PAHE

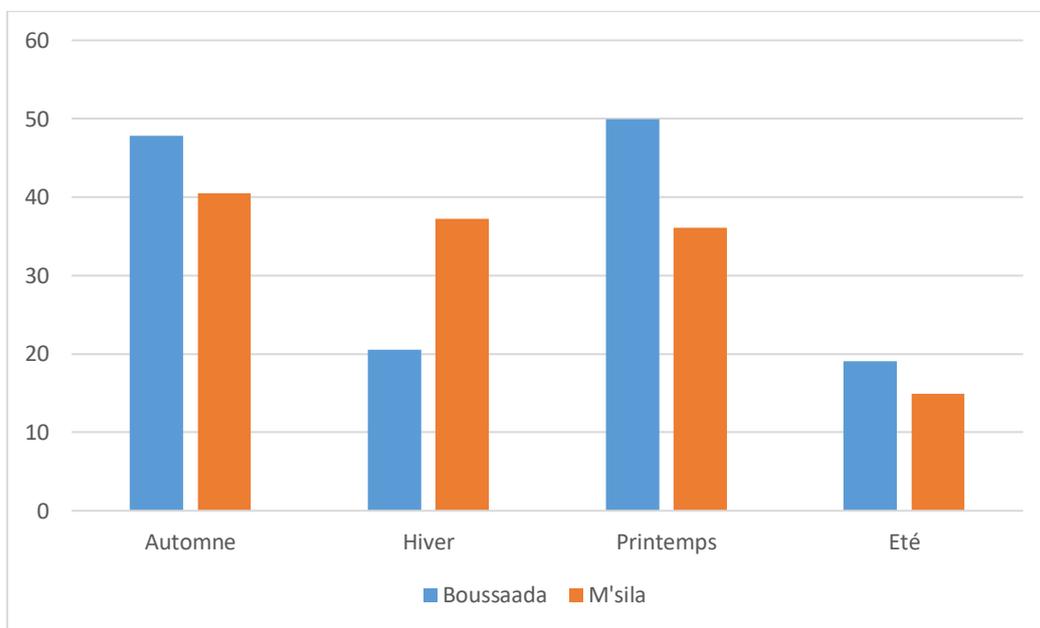


Figure 22 : Histogramme du régime saisonnier des stations de la région d'étude

3. Les Températures

L'étude de l'évolution de la température dans le temps a une grande importance du fait qu'elle constitue le paramètre principal qui conditionne le phénomène d'évaporation, autrement dit, elle a une grande influence sur le bilan hydrique (Amroun ,2008).

La caractéristique de la température en un lieu donné se fait généralement à partir de la connaissance d'au moins cinq variables importantes qui sont les moyennes des minimums et des maximums, la moyenne mensuelle, le minimum absolu et le maximum absolu ainsi que l'amplitude thermique (Djebailli, 1984).

Tableau 4 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station de M'Sila. 1988-2016

Source : Station météorologique de M'Sila

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy/ an
m(°C)	3,37	4,30	7,41	10,55	15,62	20,94	24,26	24,12	19,13	14,56	8,12	4,60	12,95
M(°C)	14,30	16,21	20,36	23,06	28,37	34,65	39,15	38,02	32,49	25,68	19,27	14,15	25,68
Tmoy(°C)	8,83	10,11	13,89	16,92	21,99	27,88	31,71	31,20	25,81	20,25	13,70	9,24	19,29

Le tableau ci-dessus montre qu'au niveau de la station de M'sila le mois de Janvier est le mois le plus froid (3.37C), bien que le mois de Juillet est le mois le plus chaud (39.15°C).

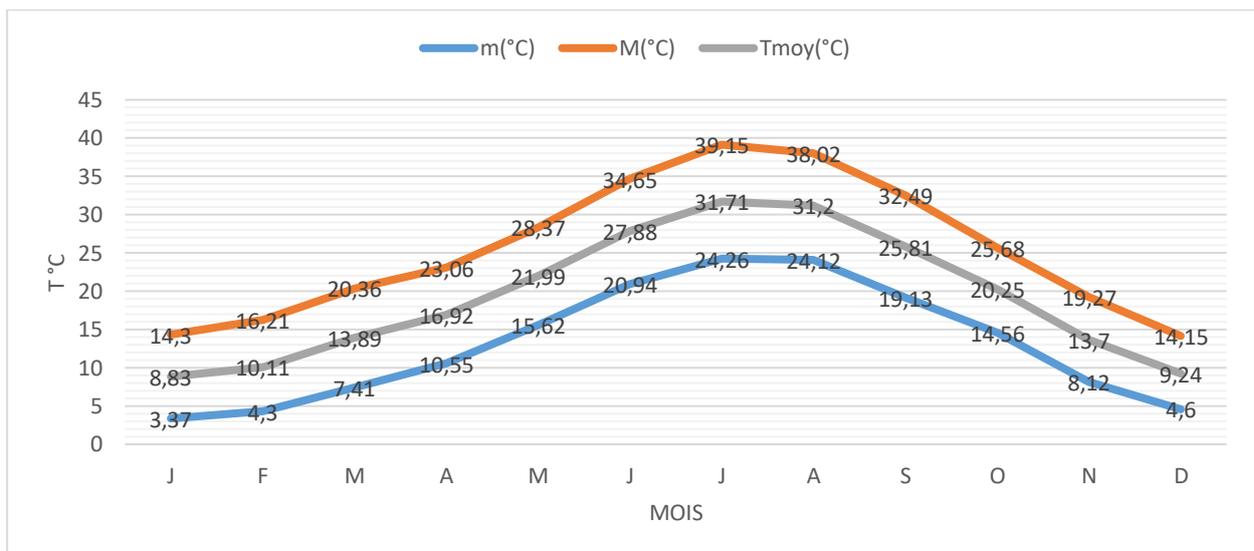


Figure 23 : Les courbes des températures minimales, moyennes et maximales mensuelles et annuelles (°C) de la région de M'Sila.

Le (Tableau 5 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station de Boussaâda. 1988-201) présente les moyennes mensuelles et annuelle de la région de Boussaâda, l'analyse de ces données montre que le maximum des températures dans cette station est atteint également au mois de Juillet, et du même, Janvier est marqué comme le mois le plus froid.

Tableau 5 : Moyennes mensuelles et annuelles des températures de la station de Boussaâda. 1988-2016

Source : Station météorologique de El K'sob

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy/an
m (°C)	4,1753	4,9	8,2	11,45	16,13	21,23	24,78	24,07	20,16	15,31	8,9	5,2	13,01
M (°C)	14,587	17,38	21,15	24,34	29,11	35,50	39,90	39,60	33,11	27,98	19,17	15,33	26,43
T _{moy} (°C)	10,267	12,15	16,20	19,22	25,11	30,74	34,01	33,12	28,05	22,06	15,33	11,19	21,45

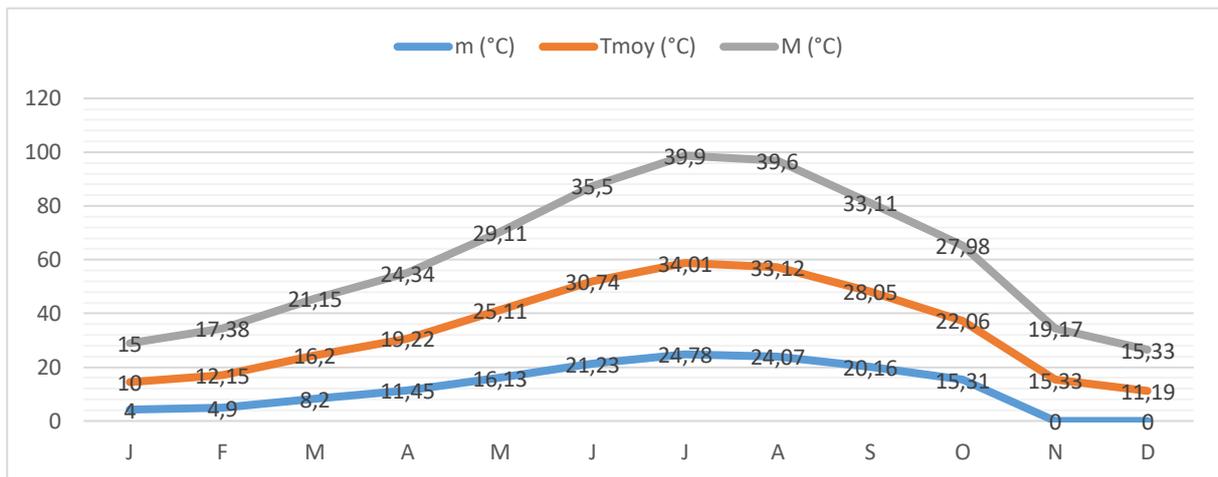


Figure 24 : Les courbes des températures minimales, moyennes et maximales mensuelles et annuelles (°C) de la région de El K'sob.

L'analyse des fluctuations des températures à travers la série (1988 – 2016) montre que la température moyenne de la zone d'étude varie entre 18.50°C et 21.5°C, l'an 1992 a connu la valeur la plus basse, tandis que les années 1990, 1990,2003 ont connu les valeurs les plus élevées, en général, à partir de l'an 2000 la température moyenne de cette zone connaît des valeurs de plus en plus élevées.

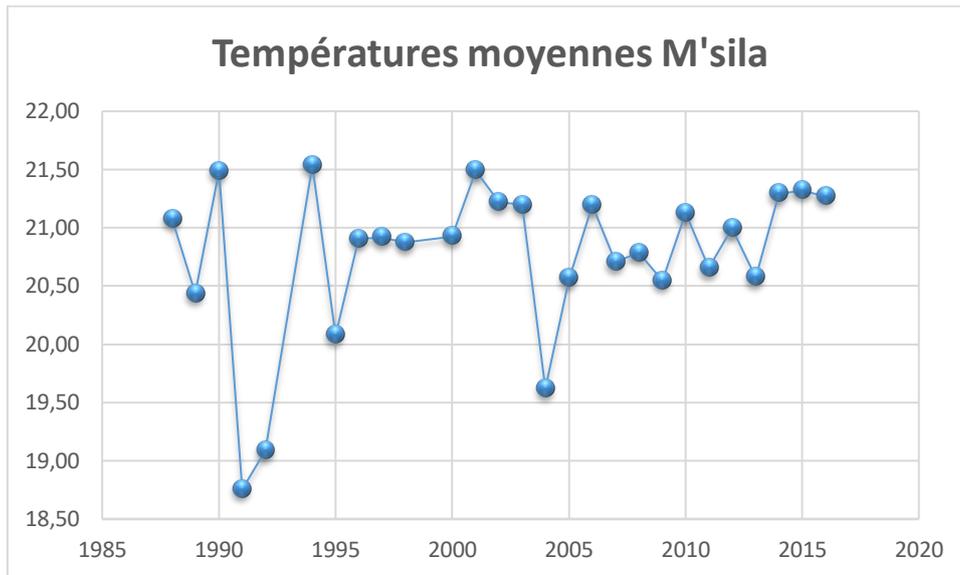


Figure 25 Fluctuations des températures dans la station de M'sila (1988 - 2016)

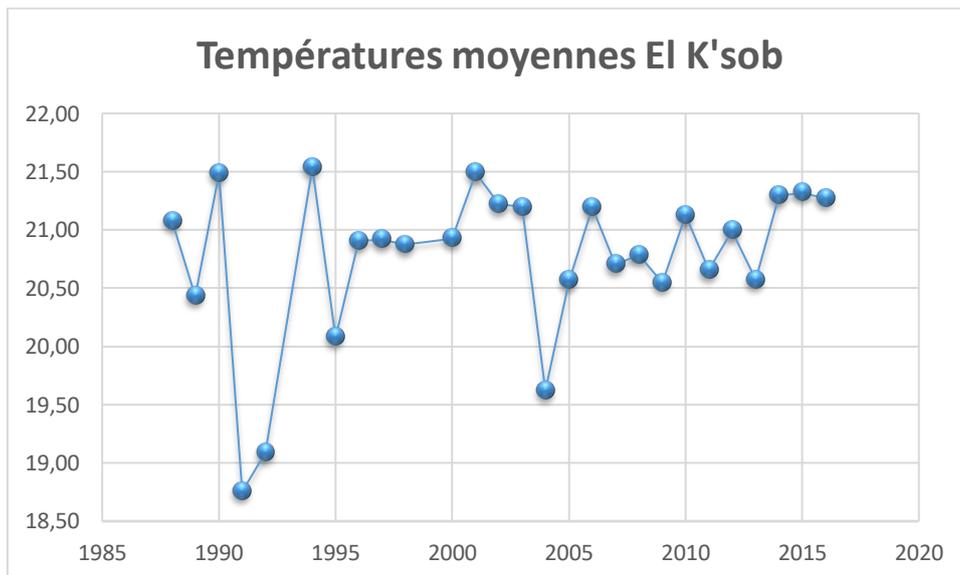


Figure 26 Fluctuations des températures moyennes dans la station d'El K'sob

Les hautes altitudes qui sont caractérisées par des températures assez basse (Mons de Maadhid) qui varient entre 13.2 et 19.81°C, les hautes plaines de la zone d'étude sont caractérisées par des températures moyennes qui varient entre 19.81et 26.6°C, la zone de dépression du chott est caractérisée par des températures moyennes élevées qui varient entre 26.6 et 30° (Figure 27).

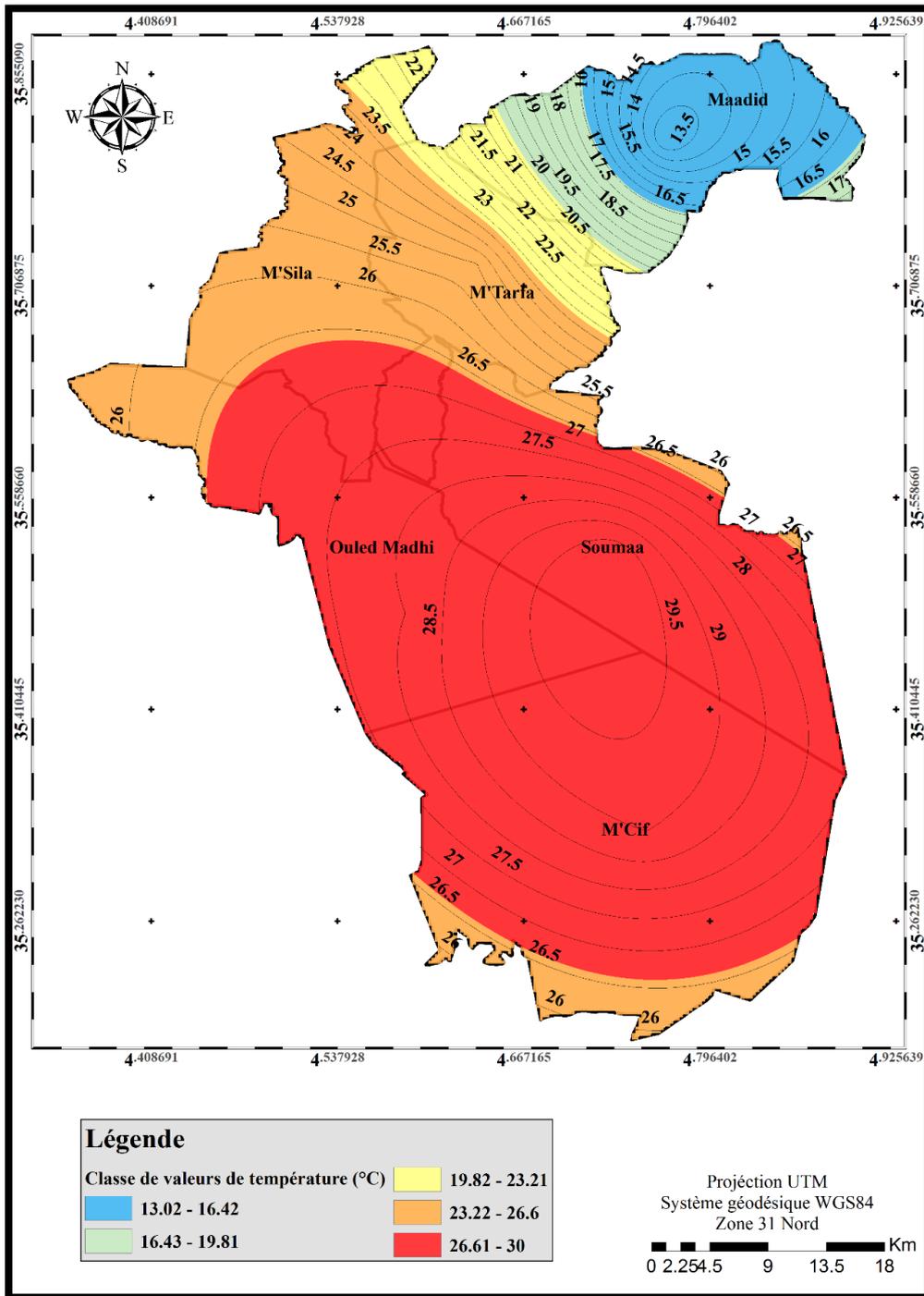


Figure 27 : Distribution spatiale des températures moyennes

4. Les vents

Les vents du Nord sont fréquents pendant l'hiver, les vents du Nord-Est sont bien répartis sur toute l'année et accèdent facilement dans la cuvette d'El Hodna par l'ouverture de la vallée d'oued Barika. Ceux du Sud n'atteignent la région qu'en été, dans la cuvette. Ils

soufflent avec des rafales brûlantes (le Sirocco), pendant une ou deux heures qui font un abaissement de l'humidité relative de l'air ($H < 10\%$).

Tableau 6 : Moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent en m/s 1988-2016.

Source : Station météorologique de M'Sila

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	moy
Vent (m/s)	4,25	4,74	5,16	5,58	4,59	5,03	4,69	4,29	4,14	4,02	4,16	4,07	4,62

Quelles que soient leurs directions, les vents qui soufflent sur M'Sila, ont des vitesses relativement faibles, qui vont de 4,02 m/s en Octobre à 5,58m/s en Avril. En ce qui concerne les vents forts (vitesse $\geq 5,58$ m/s), ils sont assez fréquents (Amroun, 2008).

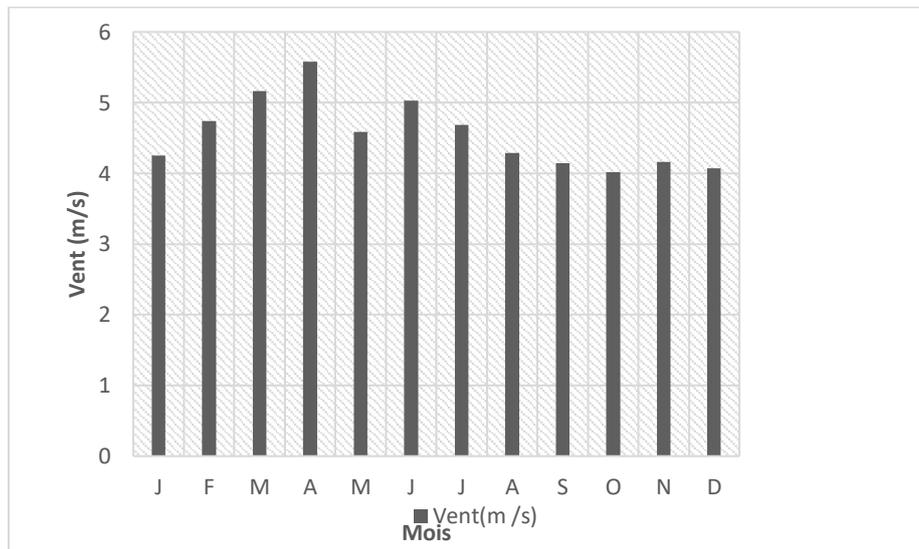


Figure 28 : Histogramme des moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent en (m/s) de la région de M'Sila (1988-2016)

5. Evapotranspiration

La connaissance du bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation, l'évapotranspiration est définie comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère, cette notion englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes, elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique, et

dépend de plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal...etc (Amroun, 2008)

Dans cette étude nous avons opté pour le calcul de l'ETP suivant la méthode de Thornthwaite en se basant sur les données de température :

$$ETP = 16 (10T/I)^a * K$$

Où

ETP : évapotranspiration mensuelle non corrigée (en mm)

T : Température moyenne mensuelle (en °C)

I: Induce thermique annuel, $I = \sum i$

i : indice thermique mensuel, déterminé par l'expression suivante :

$$i = (T/5)^{1/5}$$

a : Coefficient calculé par la formule suivante : $a = 1.6 * (I/100) + 0.5$

K = Coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

La valeur de transpiration doit être corrigée en prenant en considération les heures d'ensoleillement selon la formule :

$$ETP\ corr = ETP\ calculée (N/12) * (d/30)$$

Où N= Nombre des heures d'ensoleillement et d = nombre des jours du mois.

Les résultats des calculs de l'évapotranspiration, où la valeur du coefficient a est égale à 2.34 pour la station de M'sila et 2.15 pour la station d'El K'sob, sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Valeurs calculées de l'évapotranspiration selon la méthode de Thornthwaite

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
T M'sila	10.0	12.2	16.2	19.2	25.1	30.7	34.0	33.1	28.1	15.3	11.2	5.0	240.1
i	2.9	3.8	5.9	7.7	11.5	15.6	18.2	17.5	13.6	5.5	3.4	1.0	106.6
ETP calculée	15.1	23.5	44.7	65.7	119.7	188.5	236.4	222.9	153.5	39.5	19.5	3.2	
Nbr des jours	31.0	28.3	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	
Nbr des heures	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.4	
ETP corr (M'sila)	12.7	19.5	46.2	72.8	148.4	235.7	299.3	263.0	159.9	38.1	16.2	2.6	1322.4
T K'sob	8.8	10.1	13.9	16.9	22.0	27.9	31.7	31.2	25.8	20.3	13.7	9.2	230.8
i	2.4	2.9	4.7	6.3	9.4	13.5	16.4	16.0	12.0	8.3	4.6	2.5	98.5
ETP calculée	12.6	16.9	33.6	51.3	90.3	150.5	198.5	191.8	127.5	75.6	32.6	13.9	
Nbr des jours	31.0	28.3	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	
Nbr des heures	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.4	
ETP corr (K'sob)	10.6	14.1	34.7	56.9	112.0	188.2	251.3	226.3	132.8	72.9	27.1	11.3	1129.9

Pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) on a suivi la méthode de Turc, une relation est applicable à tous les climats, elle est fonction des précipitations et des températures moyennes mensuelles. La formule est la suivante :

$$ETR = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{1/2}$$

Où :

ETR : évapotranspiration réelle en mm

P : Précipitation moyenne annuelle en millimètre

$L = 300 + 25T + 0.05T^3$ c'est le pouvoir évaporant de l'atmosphère.

T : Température Moyenne en °C.

Pour la station de M'sila, le taux des précipitations moyennes annuelles est de 200.79 mm par an, la température moyenne est de 21°C, ce qui donne un pouvoir évaporant de l'atmosphère de 10710.18, et un taux d'évapotranspiration réelle de 222.93 mm.

Pour la station d'El K'sob, le taux des précipitations moyennes annuelles est de 203.09 mm par an, la température moyenne est de 19°C, ce qui donne un pouvoir évaporant de l'atmosphère de 7964.94, et un taux d'évapotranspiration réelle de 214 mm.

On observe que les valeurs de l'évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP) sont légèrement supérieures aux valeurs de précipitations ; l'évapotranspiration réelle est égale à 111 % de la précipitation annuelle au niveau de la station de M'sila et à 105 ,37% à la station d'El K'sob.

Tableau 8 : Tableau de calcul de l'évapotranspiration réelle moyenne selon la formule de TURC

	J	f	M	A	M	J	Ju	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	An
T M'sila	10.00	12.15	16.20	19.22	25.11	30.74	34.00	33.12	28.05	22.06	15.33	11.19	21.00
T K'sob	8.83	10.11	13.89	16.92	21.99	27.88	31.70	31.20	25.81	20.25	13.70	9.24	19.00
P Msila	17.41	13.04	15.70	22.18	24.43	9.41	3.80	7.41	24.54	23.86	19.80	19.27	200.79
P K'sob	19.12	14.52	16.96	21.20	21.80	10.05	4.15	8.15	26.90	22.90	18.11	19.20	203.06
L M'sila	1636. 60	2397. 41	4956. 60	7880. 58	16760. 00	30116. 00	3117. 18	37459. 00	23071. 00	11587. 00	4286. 00	1981. 00	10710. 18
L K'sob	1209. 30	1586. 16	3327. 10	5567. 02	11483. 00	22668. 00	2687. 01	31451. 00	18139. 00	9110.1 0	3214. 00	1320. 00	7964.9 4
ETR M'sila	19.34	14.49	17.44	24.64	27.14	10.46	4.21	8.23	27.27	26.51	21.94	21.41	222.94
ETR K'sob	20.15	15.31	17.88	22.35	22.98	10.59	4.37	8.59	28.36	24.14	19.09	20.24	214.00

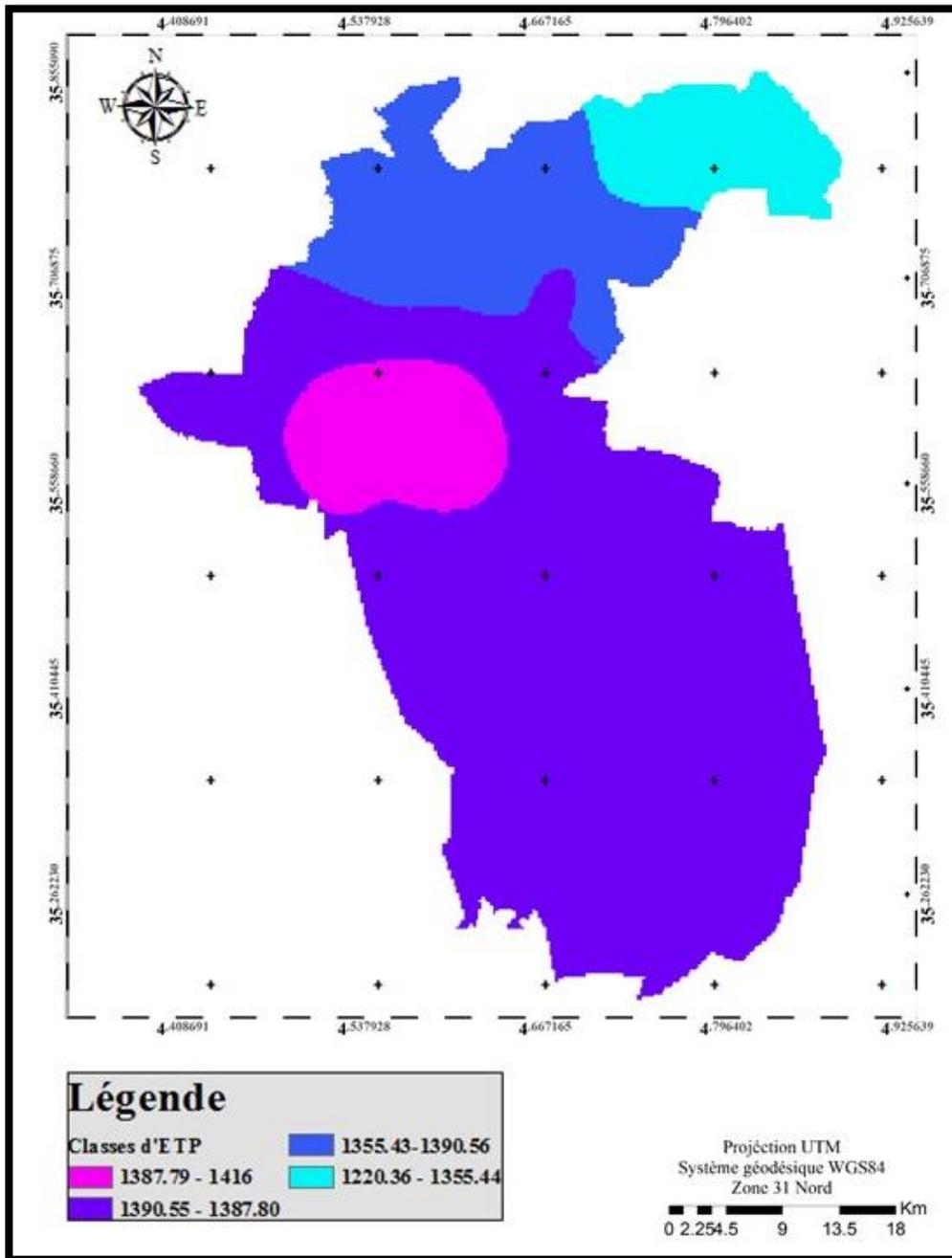


Figure 29 : Carte des valeurs d'évapotranspiration potentielle (en mm).

6. Humidité relative

Le Tableau 9 ci-dessous représente les moyennes mensuelles et annuelles de l'humidité de la station de M'Sila

Tableau 9 : Moyennes mensuelles et annuelles de l'humidité en (%).1988-2016

Source : Station météorologique de M'Sila

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
H (%)	73,63	66,22	59,98	56,47	49,24	41,65	35,62	37,85	52,63	59,93	69,14	74,87	56,44

D'après (Tableau 9) nous constatons que le mois de Décembre présente l'humidité la plus élevée (74,87%), par contre la plus faible moyenne mensuelle est enregistrée pendant le mois de Juillet avec (35,62%).

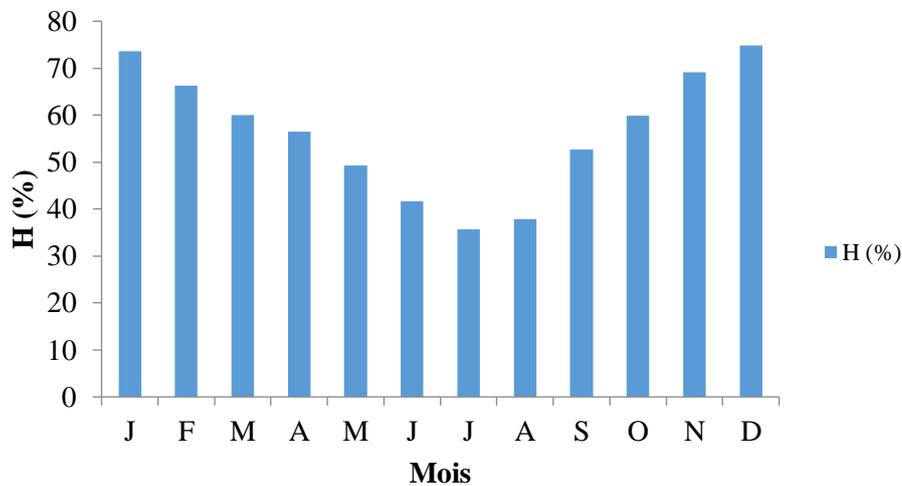


Figure 30 : Histogramme de L'humidité relative en (%) de la région de M'Sila (1988-2016).

7. L'ensoleillement

L'ensoleillement effectif est en moyenne égal à 8 heures/jour, comparé à l'ensoleillement potentiel qui n'est rien d'autre que la durée du jour et qui est en moyenne de 12 heures/jour, sur le plan temporel, l'ensoleillement et l'évapotranspiration évoluent parallèlement, les maximums sont enregistrés en Juillet et les minimums en Décembre.

Tableau 10 : L'ensoleillement à la Station de M'sila (1990-2015).

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
h/mois	188	229	260	317	327	347	317	365	201	251	207	180	265,75

8. Synthèse climatique

Un indice climatique est une combinaison d'au moins deux valeurs numériques sur l'état de l'atmosphère pour caractériser le climat d'un lieu, en vue de la classification à l'échelle planétaire ou pour des applications spécifiques. Les indices synthétiques de classification climatique sont nombreux et divers :

8.1. Indices et diagrammes ombro-thermiques

Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité. Celle-ci est appréciée à travers un indice de sécheresse S (Indice ombro-thermique) calculé en faisant la différence entre les courbes P et T pour le et les mois les plus secs ($P=2T$).

Selon le diagramme ombro-thermique, des stations de M'sila et de El K'sob la période de sécheresse pour la région se prolonge durant toute l'année.

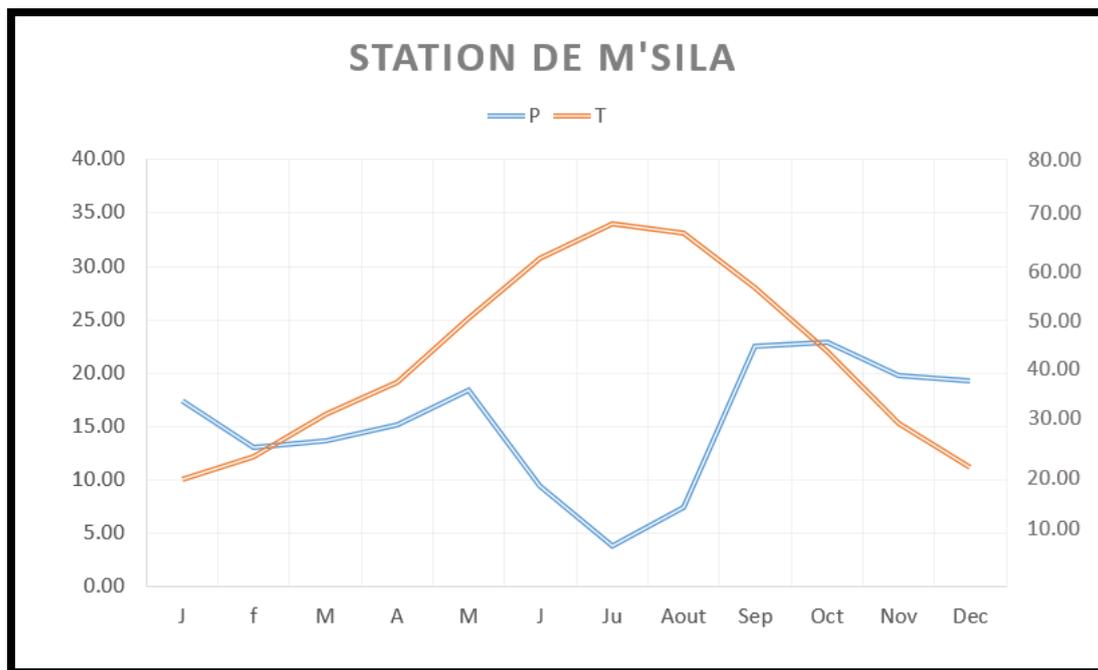


Figure 31 : Diagramme ombro-thermique de la station de M'Sila (1988-2016).

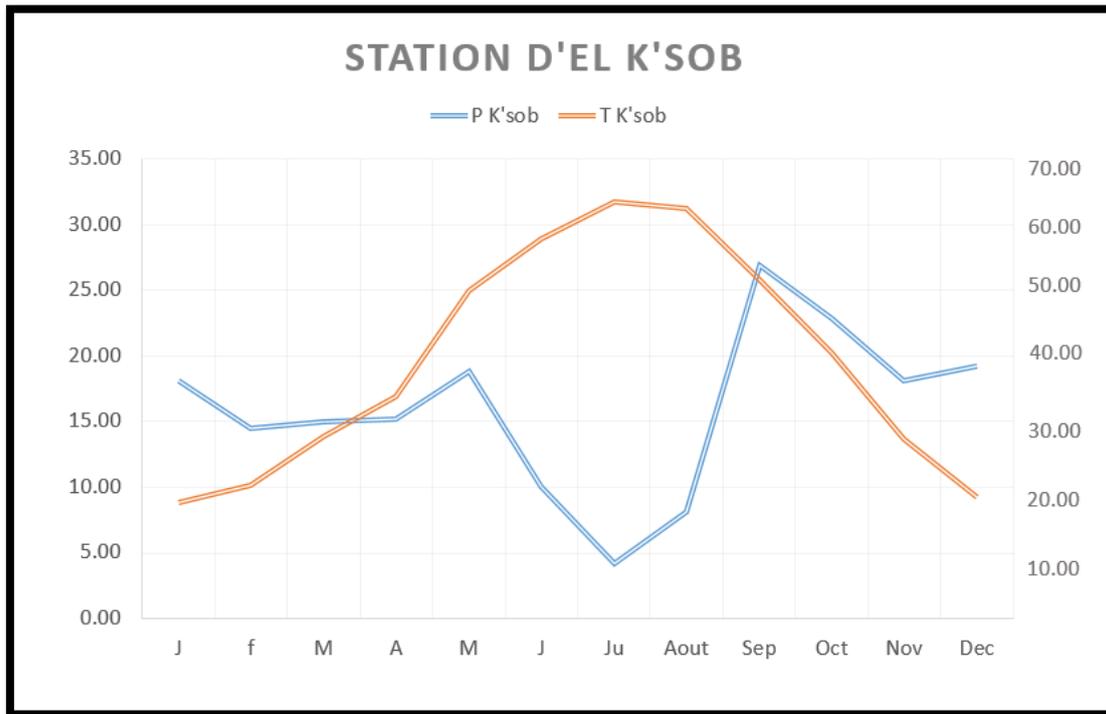


Figure 32 : Diagramme ombro-thermique de la station d'El K'sob (1988-2016).

8.2. Quotient pluviothermique d'EMBERGER

Emberger a défini les étages bioclimatiques en se basant sur deux facteurs ; la détermination des saisons sèches et humide qui est représentée par le quotient pluvio-thermique Q_2 (Ozenda, 1982). La formule est la suivant :

$$Q_2 = \frac{1000P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)}$$

$\frac{M+m}{2}$: Moyenne des températures annuelles.

P : Précipitation annuelle en mm

(M-m) : Amplitude thermique extrême en °K.

M: Moyenne des maxima du mois le plus chaud °K.

m: Moyenne des minima du mois le plus froid en °K.

K : degré kelvin.

La représentation graphique porte m sur l'axe des abscisses et $Q2$ sur celui des ordonnées. Les valeurs du quotient correspondant les étages bioclimatiques et à celle des températures minimales du mois le plus froid, La station de M'Sila positionne dans l'étage bioclimatique Aride à Hiver tempéré avec un quotient pluviométrique 18.96.

Pour la station de Boussaâda, le $Q2$ est égale à 15, 38ce qui fait de cette région une région saharienne d'hivers froid

Tableau 11 : Valeurs du quotient pluviométrique de M'Sila

Station	P(mm)	m (K)	M (K)	Q2	Etage bioclimatique
M'sila	200.79	277.2	312.8	18.96	Aride
K'sob	203.06	276.37	312.35	19.47	Aride

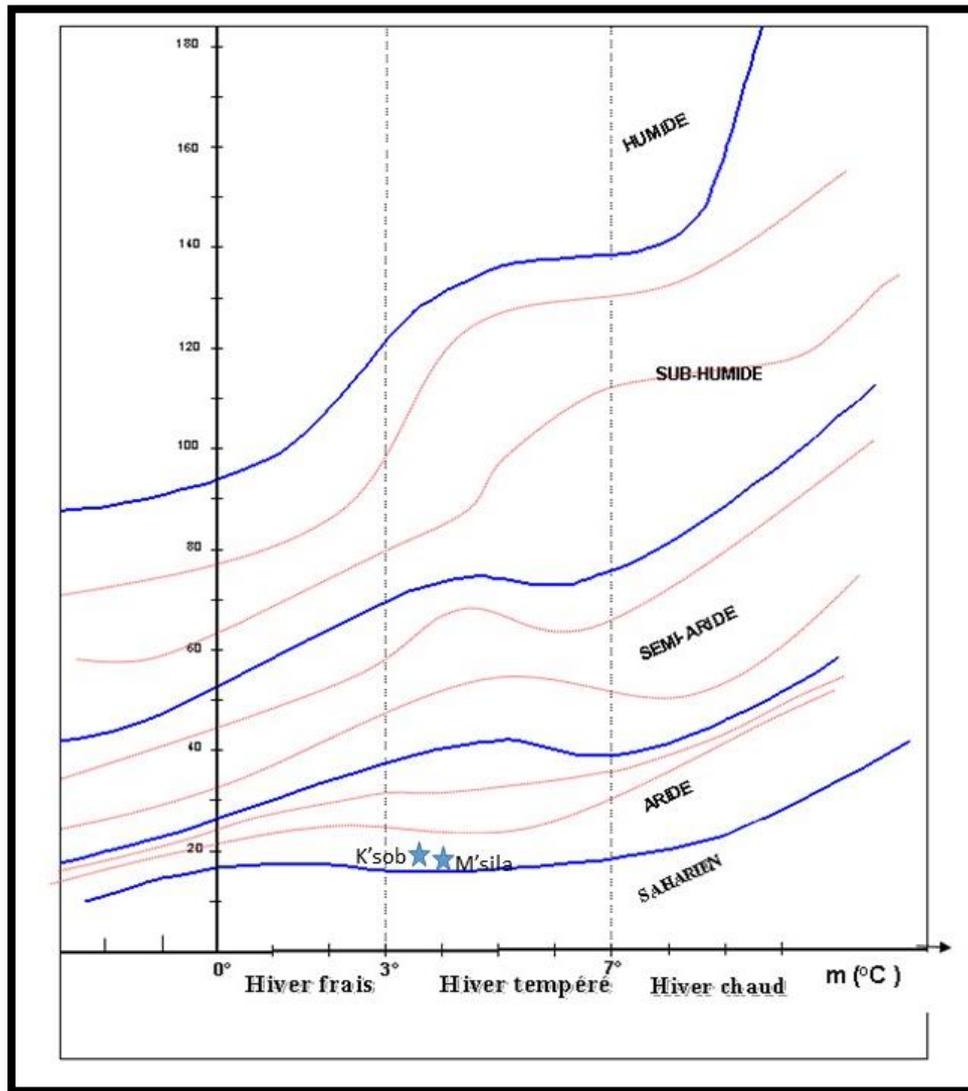


Figure 33 : Diagramme pluviothermique de la zone d'étude

La carte ci-dessous présente la distribution des valeurs de l'indice d'aridité de De Martonne sur la zone d'étude, le climat du Nord de la zone est caractérisé par des valeurs plus élevées avec qui les températures basses le classent comme un climat semi-aride à hiver frais.

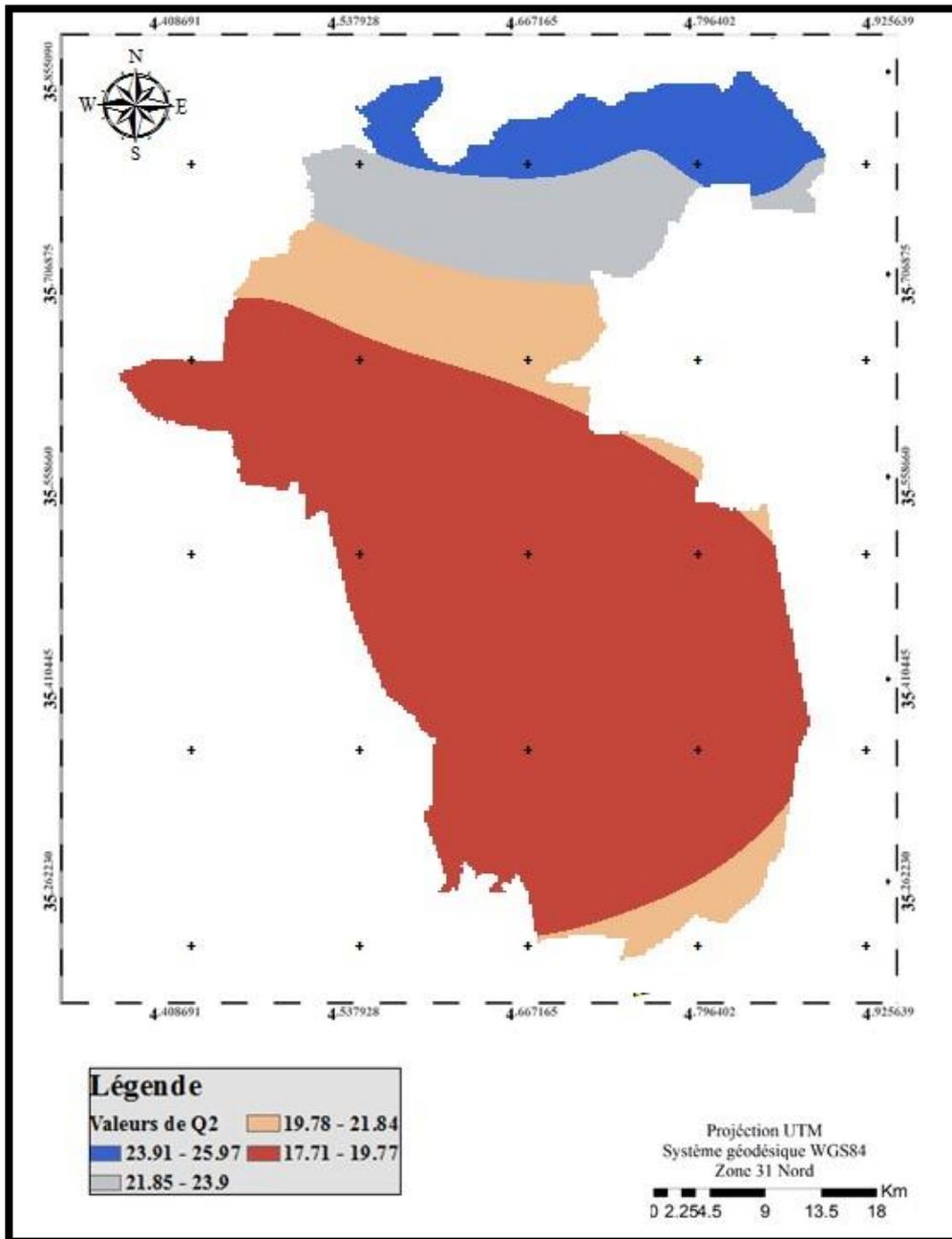


Figure 34 : Diagramme pluviothermique de la zone d'étude

8.3. Indice d'aridité de Demartone

Utilise la température et les précipitation selon la formule suivante :

$$I = P / T + 10$$

Où : **P** : représente les précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Représente les températures moyennes annuelles (°C).

Tableau 12 : Indice d'aridité de la zone d'étude

	P	T	I
Msila	200.79	21.45	19.36
K'sob	203.06	19.29	22.23

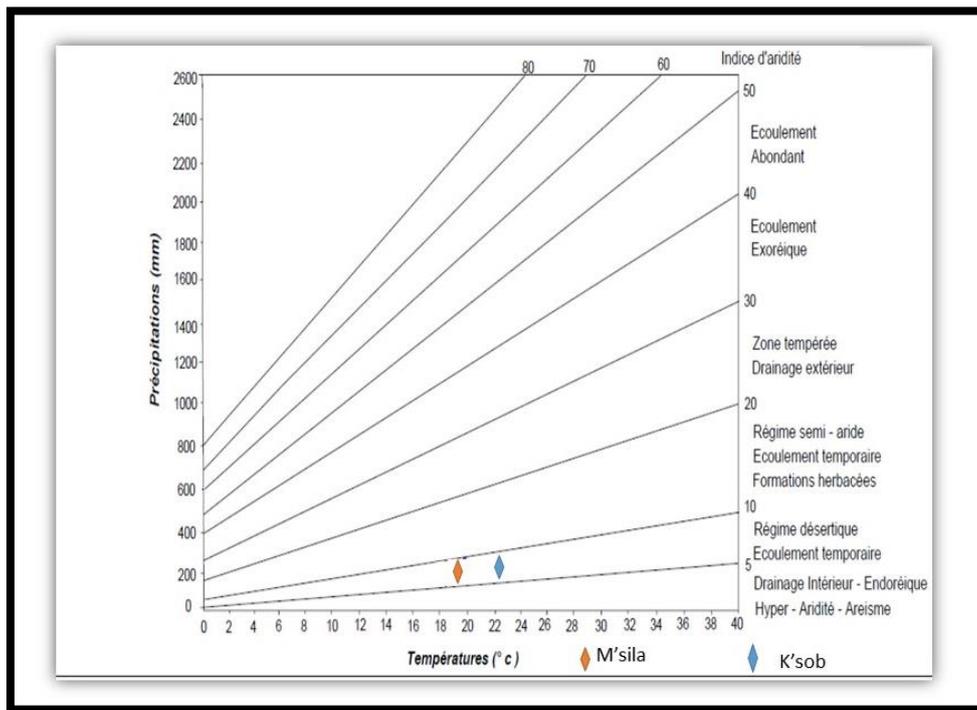


Figure 35 : Abaque de l'indice d'aridité de Demarton

8.4. Indice de déficit hydrique

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$IDP(\%) = (P_i - P_m) / P_m \times 100$$

Où :

IDP : Indice de déficit pluviométrique (en pourcentage).

P_i : précipitation annuelle (en mm).

P_m : précipitation moyenne de la période étudiée (en mm).

Une année est qualifiée d'humide si cet indice est positif de sèche lorsqu'il est négatif. Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des écarts croît, il s'agit d'une tendance humide, la tendance est de type « sèche » dans le cas contraire, cet indice permet donc de visualiser et de déterminer le nombre des années déficitaires et leur succession.

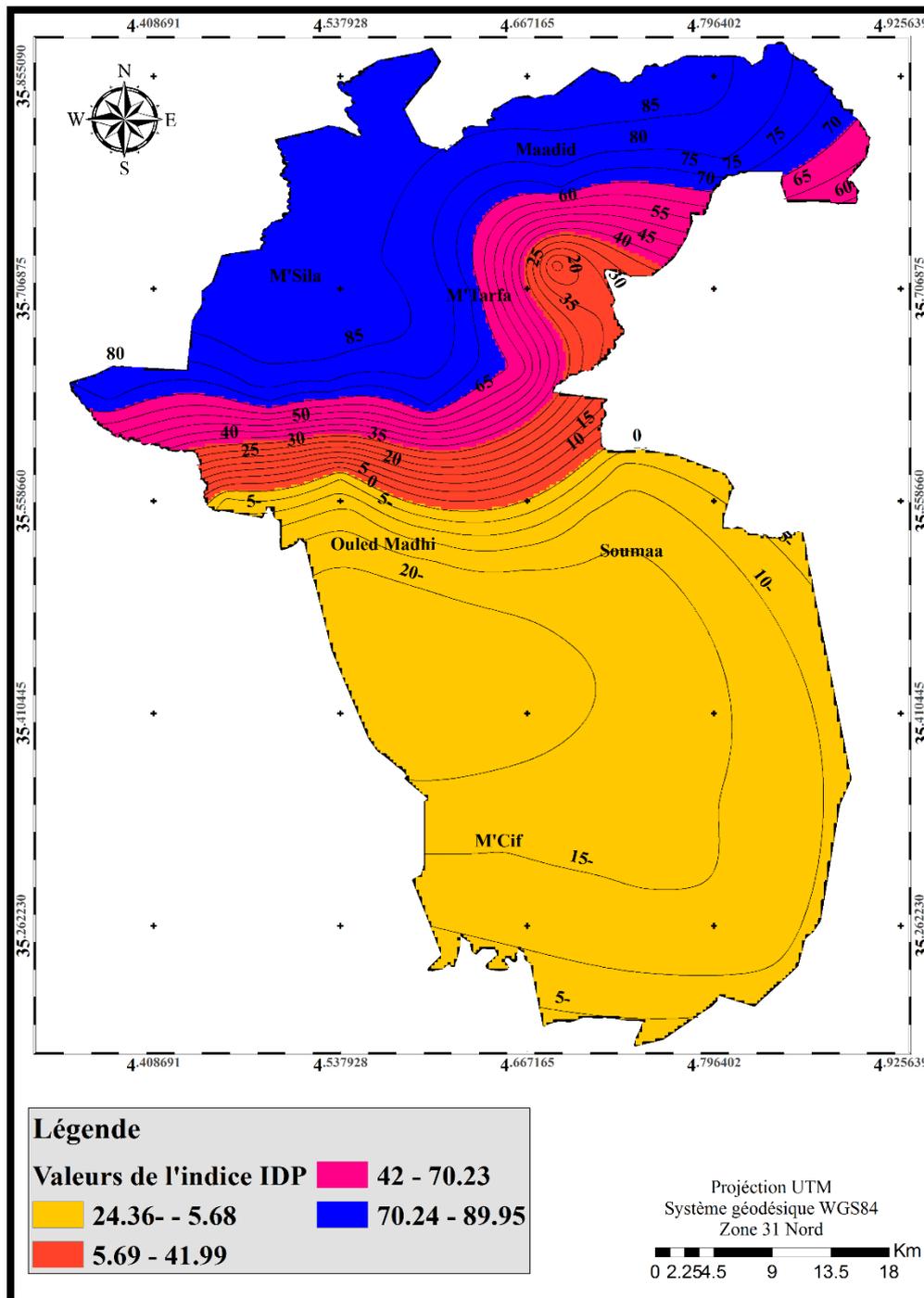


Figure 36 : Carte de l'indice de déficit hydrique de la zone d'étude.

8.5. Indice standardisé de précipitation

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté l'indice de précipitations standardisé (SPI) en 2009 comme instrument mondial pour mesurer les sécheresses météorologiques, aux termes de la « Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse » (Jouilil et., *al*, 2013)

Le SPI compare les précipitations sur une certaine période en principe 1 à 24 mois à la moyenne historique de précipitations observée sur le même site, (Mckee, 1993), il est défini comme suit :

$$SPI = (p_i - p_m) / \sigma$$

Où

P_i est la précipitation annuelle

P_m la moyenne historique de précipitation de la période

σ est l'écart type historique de la période

Le tableau suivant présente les catégories de classification des périodes de précipitation selon les valeurs de l'indice :

Tableau 13 : classification des périodes de précipitation selon les valeurs de SPI (Mckee et.,*al*, 1993)

Valeurs	Catégorie
+ 2.0	Très humide
1.5 à 1.99	Humide
1 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à 0.99	Près du normal
-1 à - 1.49	Modérément sec
-1.5 à -1.99	Sévèrement sec
<-2	Très sec

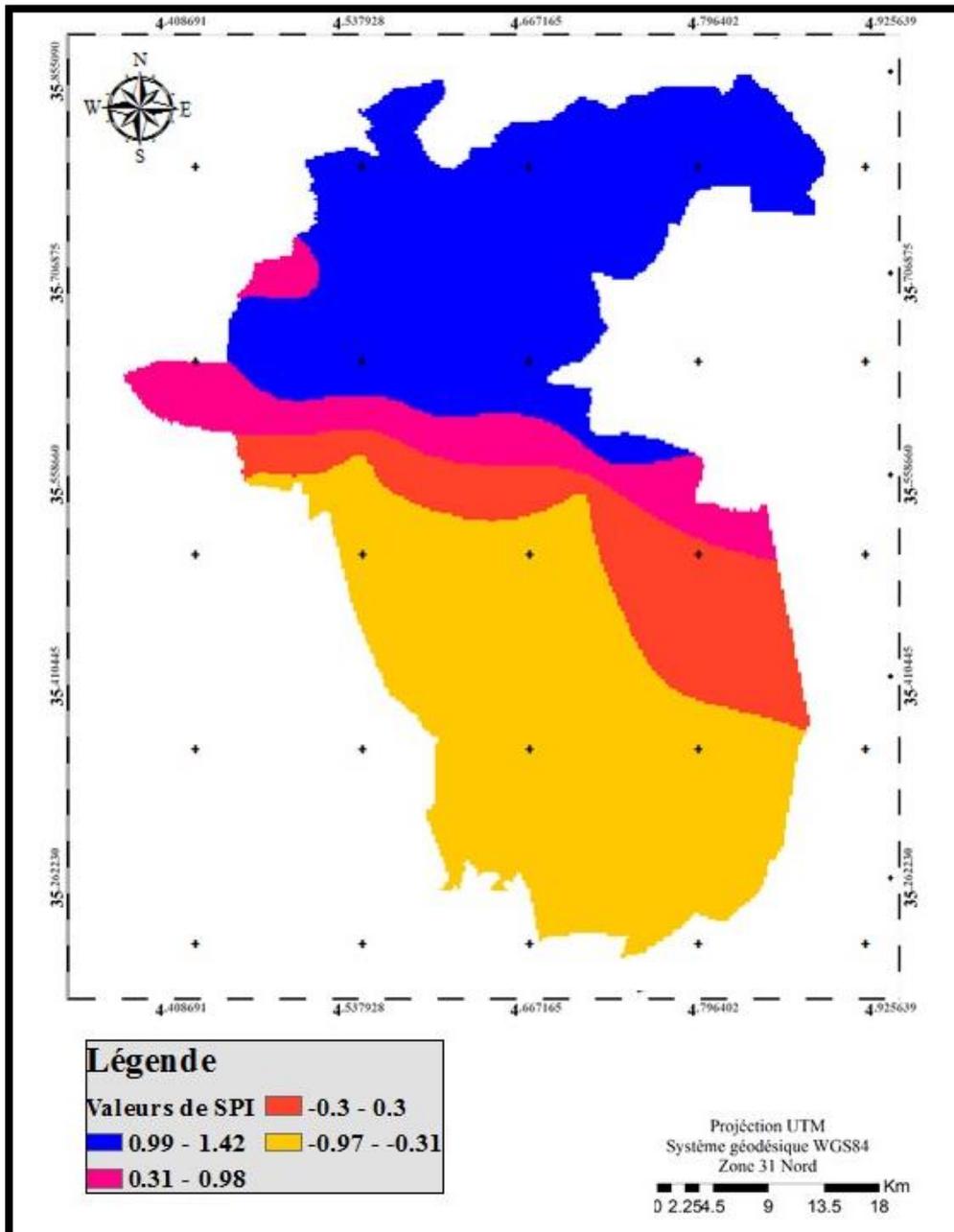


Figure 37 : Carte de l'indice SPI de la zone d'étude de l'année 2016

Les valeurs de l'indice SPI varient entre 0.99 à la limite de la plaine agricole de M'sila et 1.42 sur les hautes altitudes de Maadhid, le climat de ces régions est donc classé près de la normale à modérément humide, au début de la zone de dépression du chott, les valeurs varient entre 0.31 et 0.98 le climat de cette zone est classé également comme près de la normal vers modérément sec.

Les valeurs de SPI commencent à diminuer au niveau des périphéries de Chott El Hodna, vers 0.3 et -0.3 donnant un climat modérément sec, le sud de la zone d'étude est

caractérisé par des valeurs très basses qui peuvent atteindre -0.97 donc un climat sévèrement sec.

Cette grande variance entre le Sud et le Nord de la zone d'étude est dû à l'écart d'altitude qui atteint 1600 à 1800 au Nord, et 400 à 360 au niveau du Chott, cela est traduit par une variabilité de précipitation et de température.

8.6. Rapport à la normal

Cet indice est exprimé mathématiquement en pourcentage comme suit :

$$RN(\%) = (P_i/P_m) \times 100$$

P_i est la précipitation de l'année i et P_m est la précipitation moyenne pour la même période de temps étudiée. Ce rapport permet une estimation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale : Une année est classifiée comme sèche si la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque le RN est inférieur à 100 % (Rognon, 1997).

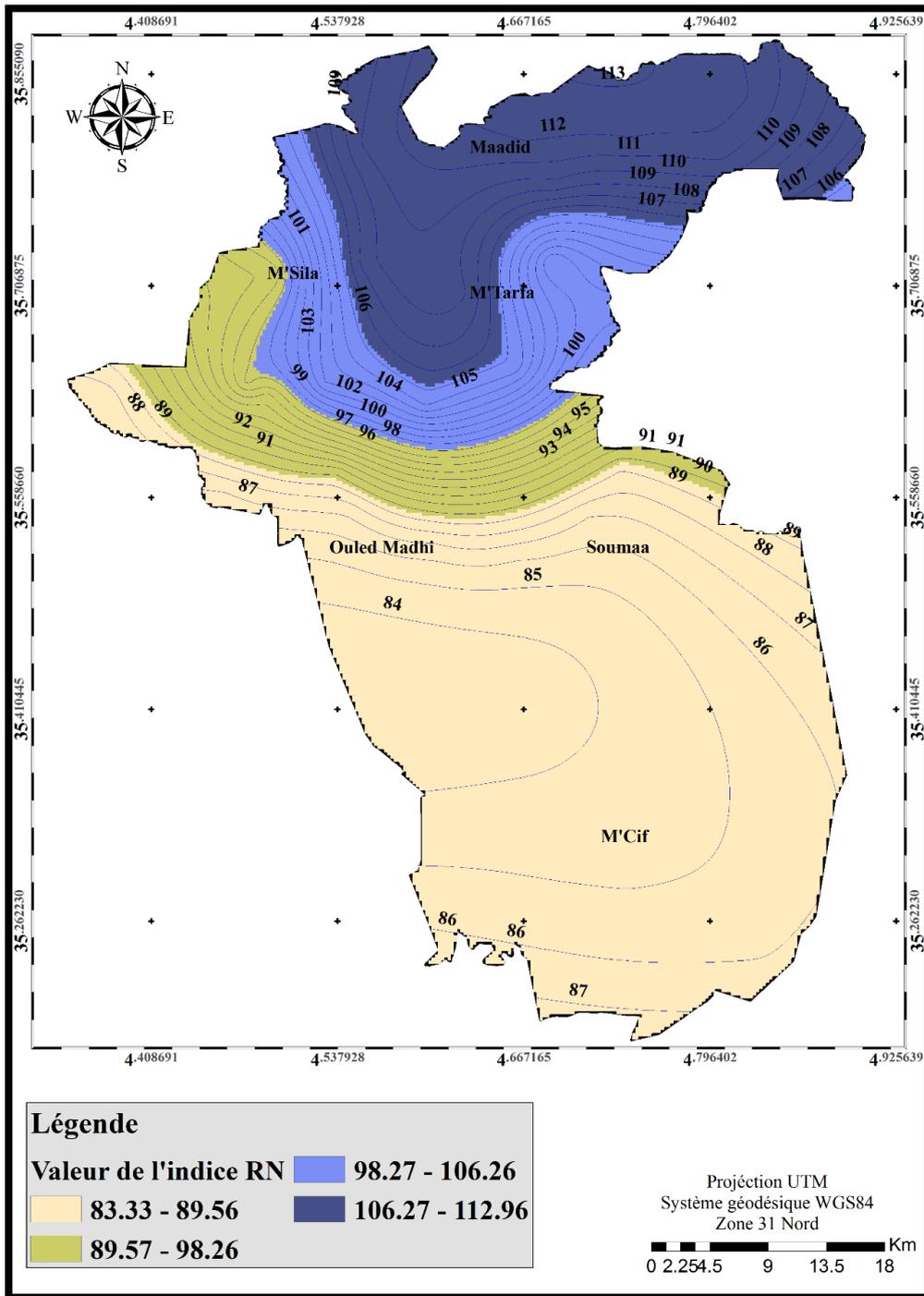


Figure 38 : Carte de l'indice rapport à la normal

8.7. Ecart à la moyenne

C'est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la médiane est le plus utilisé par les agro météorologues. Bien évidemment, quand l'échantillon de données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la médiane est

grande. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (P_i) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (P_m).

$$E_m = P_i - P_m$$

L'écart est positif pour l'année humide, et négative pour les années sèches. On parle d'année déficitaire quand la pluie est inférieure à la moyenne et d'année excédentaire quand la moyenne est dépassée. Cet indice permet de visualiser et de déterminer le nombre d'années déficitaires et leur succession (Jouilil *et al.*, 2013).

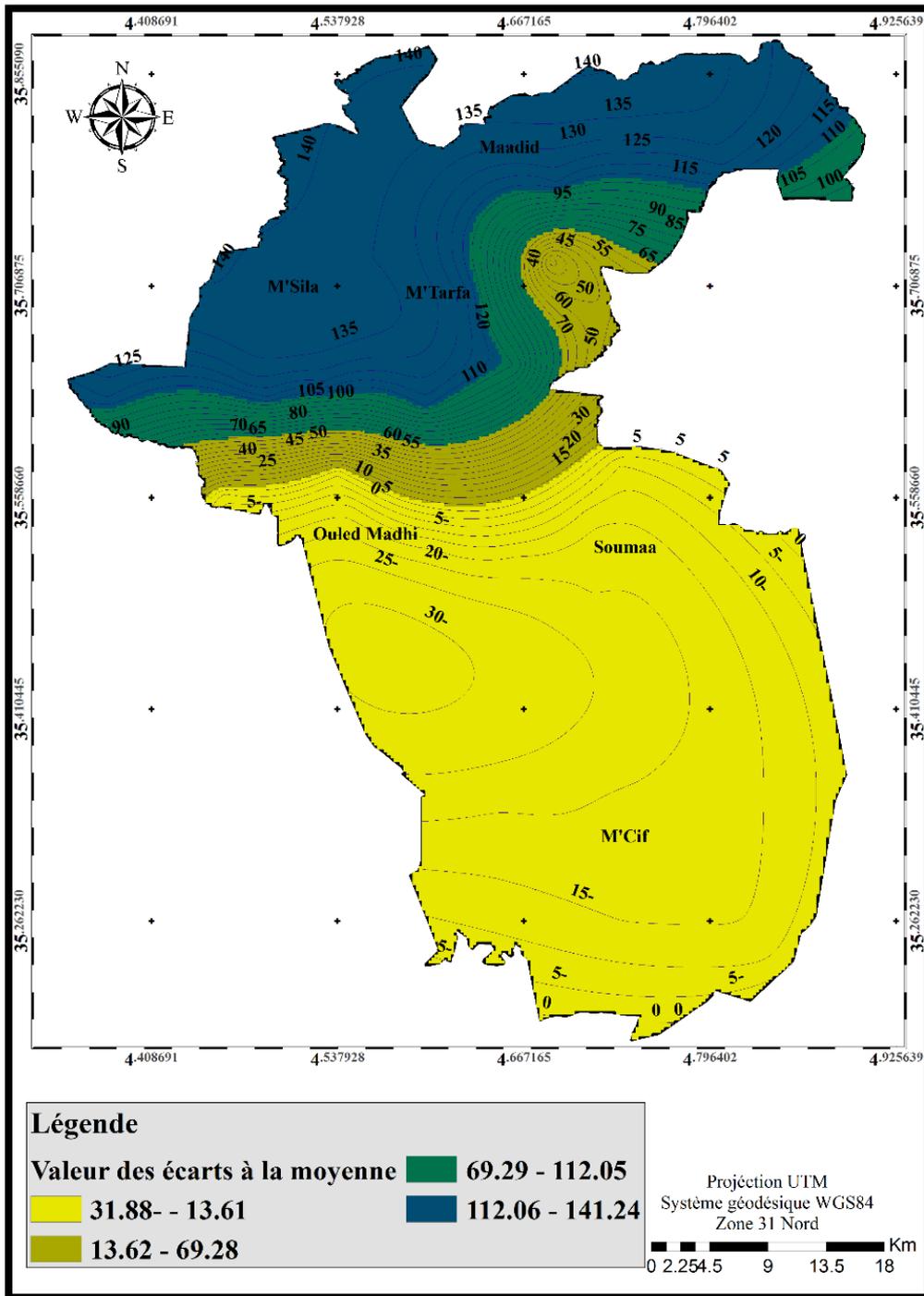


Figure 39 : Carte des écarts à la moyenne.

Conclusion

Du fait de sa localisation au centre de l'Algérie, en zone de transition entre l'étage bioclimatique humide et subhumide du Nord et l'étage hyper aride et désertique du Sud, la région d'El Hodna présente une particularité climatique et bioclimatique.

L'analyse des données climatiques a montré l'irrégularité de la distribution des précipitations et des valeurs de températures entre le Nord et le Sud de la zone d'étude, du fait, les régions montagneuses de la zone d'étude (plus de 1000 m d'altitude) sont caractérisées par un climat plus au moins favorable où les précipitations varient entre 228 et 268 mm, tandis que le Sud de la région est caractérisé par des faibles précipitation (198 à 220 mm), du même les différents indices et paramètres calculés ont montré une large variance entre les caractéristiques climatiques du Nord et celle du Sud de la zone d'étude.

Chapitre III



Cadre
théorique de
l'étude

Introduction

En termes d'environnement, les zones arides et semi arides sont caractérisées par des précipitations faibles, peu fréquentes, irrégulières et imprévisibles, des grandes variations entre les températures du jour et de la nuit, des sols contenant peu de matières organiques et présentant un manque d'eau et une faune et une flore adaptées aux variations climatiques (résistants à la sécheresse, s'accommodent de l'eau salée et capables de supporter un manque d'eau, Les zones sèches accueillent 50% du bétail mondial. En Algérie, et selon une étude du Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (2000), la production totale des zones arides et semi arides, qui était de 1,6 milliard d'unités fourragères en 1978, n'atteint plus aujourd'hui que le tiers, soit environ 530 millions d'unités fourragères. Ces régions ont subi depuis les années soixante-dix une transformation importante ; une régression climatique et une dégradation des paysages de ces zones.

La sécheresse est un phénomène naturel dans lequel la quantité d'eau disponible pour une région est inférieure à celle dans les conditions normales pour une période prolongée (Xu et *al.*, 2014). Du même, La désertification désigne la dégradation persistante des écosystèmes des zones sèches par les variations climatiques et les activités humaines et a un impact négatif sur les moyens d'existence de millions de personnes à travers le monde qui dépendent des bienfaits que les écosystèmes des zones sèches peuvent leur procurer

Récemment ; l'évolution des techniques d'observation et de suivi de la surface de la terre, en l'occurrence les outils de géomatique ont contribué dans la conception des bases des données et dans la cartographie des différents risques majeurs, ainsi dans l'aide à la décision pour l'évaluation, la simulation, la modélisation et la prédiction des différentes catastrophes naturelles.

Ce chapitre représente un recueil bibliographique sur les différentes notions clés de cette étude :

- Les écosystèmes arides et semi-arides
- La sécheresse et la désertification
- L'apport des outils de géomatique dans l'étude de la sécheresse et la désertification

1. Les écosystèmes arides et semi-arides

1.1. Définition

L'aridité et les écosystèmes arides et semi-arides ont fait l'objet d'étude de plusieurs auteurs, parmi les différentes définitions de ces derniers on résume :

Selon Aggoussine (2003), l'aridité ne peut être définie uniquement par de faibles précipitations moyennes annuelles, mais aussi par leur irrégularité dans l'espace et dans le temps et par une forte évapotranspiration ; les jours où il ne tombe que des gouttes ou des précipitations non mesurables (inférieur à 5 mm) peuvent être 3 à 4 fois plus nombreuses que les jours de précipitations mesurables, ces jours sont d'autant plus nombreux que l'aridité est grande.

L'aridité est due à la présence d'un air sec descendant. Aussi la trouve-t-on surtout dans des lieux où les conditions anticycloniques sont persistantes, comme c'est le cas dans les régions situées sous les anticyclones des zones sub-tropicales (FAO, 2006) .

L'aridité n'est pas due uniquement au climat, mais essentiellement à une action humaine (le déboisement, l'incendie, le pâturage intensif, etc.) : la dégradation anthropique du tapis végétal entraîne une augmentation des maximums des températures et celle du sol a pour effet de diminuer les capacités de stockage de l'eau (Madani, 2008).

On distinguera ainsi des zones « hyper-arides », ou désertiques, avec des déserts à hiver froid (essentiellement en Asie) et des déserts sans hiver froid ; des zones arides, des zones semi-arides, ou tropicales de nuance sèche, et des zones sub-humides (Bied-charreton, 2009).

Selon le PNUE quand le rapport entre précipitation et évaporation est inférieur à 0,03 nous sommes dans une région « hyper- aride » ; quand il est compris entre 0,03 et 0,20 il s'agit d'une région « aride » ; entre 0,20 et 0,50 une région « semi- aride » ; entre 0,50 et 0,75 une région « sub- humide sèche ».

1.2. Classification et étendu géographique

L'aridité a été définie par plusieurs indicateurs ; le premier système de classification du climat qui a inclus deux paramètres climatiques importants : température et précipitation est

introduit par Köppen, ce système de classification est basé sur le principe de l'intégration de plusieurs éléments climatique avec le couvert végétal (Sparovek et al., 2007). Cette classification utilise des températures proches de la surface et les précipitations pour présenter le régime climatique et donc la détection des périodes climatiques associés aux composantes climatiques de base (Köppen, 1931). La classification de Köppen est souvent utilisée pour évaluer, les transitions entre les zones climatiques (Diaz et Eischeid, 2007), cette classification définit les zones arides et semi-arides comme deux des zones les plus importantes (Asadi zarch et al., 2015) (Figure 40)

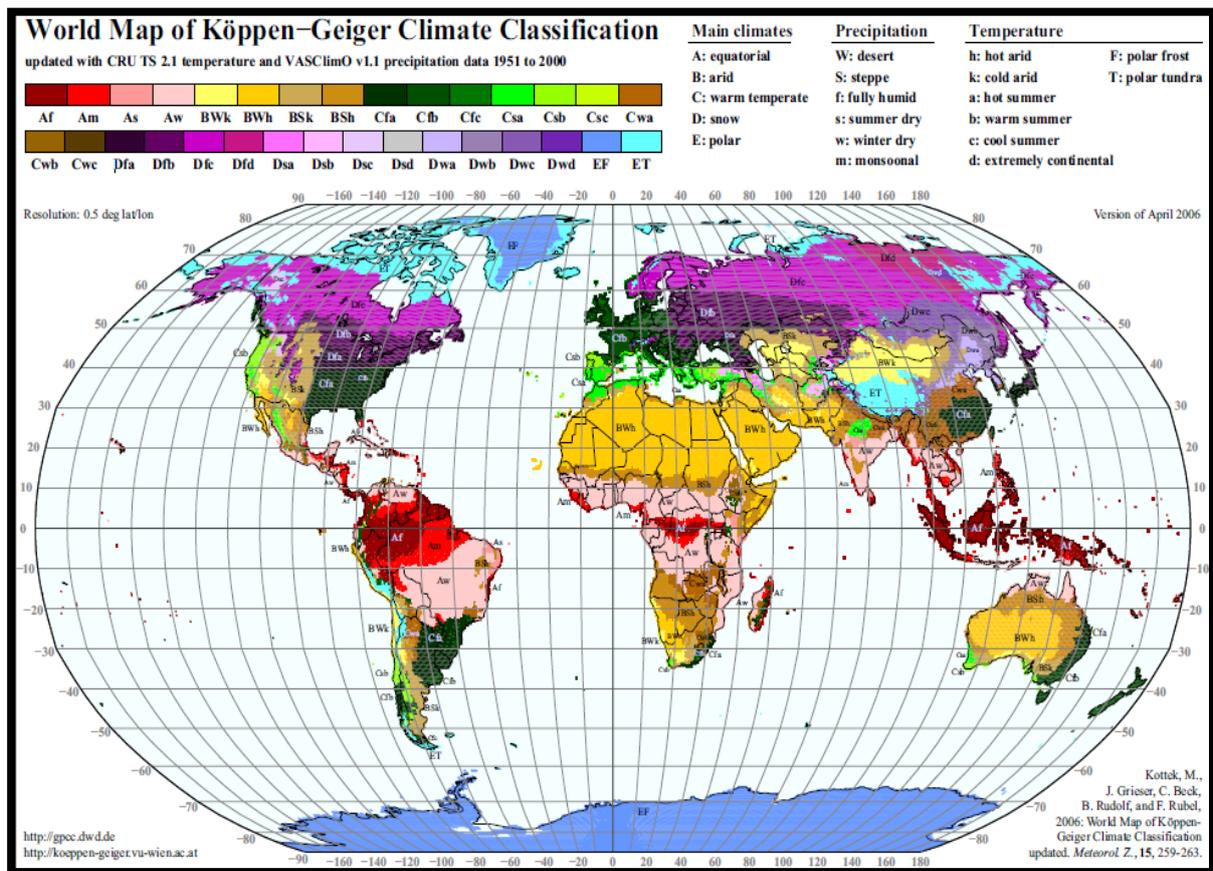


Figure 40: La carte mondiale de classification de Köppen- Kreiger, Carte mise à jour, (Kottek ., et al, 2006).

La première lettre, de A à E, correspond à la caractéristique principale de la catégorie climatique et donc aux grands types de climat selon le tableau ci-dessous :

Tableau 14 : types de climat selon la classification de Köppen- Kreiger

A	Climats tropicaux pluvieux
B	Climat sec
C	Climats humides tempérés
D	Climats boréaux subarctiques
E	Climats neigeux

La deuxième lettre correspond essentiellement au régime pluviométrique, parfois à la température. Cette lettre, tantôt une majuscule, tantôt une minuscule, est l'initiale d'un mot allemand : F : *Frost* (gel), f : *feucht* (humide), m : *Monsoonregen* (pluies de mousson), S : *Steppe*, s : *Sommertrockenzeit* (sécheresses d'été), T : *Tundra*, W : *Wüste* (déserts), w : *Wintertrockenzeit* (sécheresses d'hiver).

La troisième lettre se réfère uniquement à la température moyenne : a, b, c, d, h (*trocken-heiss* : chaud et sec) et k (*trocken-kalt* : froid et sec). Ainsi, par exemple, le climat des steppes péri-sahariennes sera désigné par l'abréviation BSh alors que celui des steppes d'Asie centrale sera désigné par BSk.

La définition d'un climat aride ne peut se suffire de la mesure de l'intensité des précipitations mais doit aussi prendre en compte celle de l'évaporation. Dans l'ensemble, celle-ci est d'autant plus importante que la température est plus élevée au moment où elle se produit. Cette classification cherche à rendre compte de ce fait par le moyen d'une formule définissant une valeur seuil. T_{ann} étant la température annuelle moyenne en °C, cette valeur seuil, ici désignée par P_{th} (en mm de précipitations) est égale à

- $2 \setminus T_{ann}$, si au moins les 2/3 des précipitations ont lieu en hiver,
- $2 \setminus T_{ann} + 28$, si au moins les 2/3 des précipitations ont lieu en été,
- $2 \setminus T_{ann} + 14$, dans les autres cas.

Le climat est alors considéré comme aride si les précipitations annuelles P_{ann} sont inférieures à $10 P_{th}$. Par exemple, si $T_{ann} = 18$ °C et $P_{ann} = 500$ mm avec des pluies d'été, on a $P_{th} = 36 + 28 = 64$, et comme $P_{ann} < 640$, ce climat est considéré comme aride.

Deux subdivisions sont pratiquées dans ce type de climat : si $P_{ann} > 5 P_{th}$, on a un climat de steppe (BS) ; si $P_{ann} < 5 P_{th}$, on a un climat de désert (BW).

Dans les années 1920, La classification d'Emmanuel de Martonne est fondée sur un indice d'aridité qu'il a défini en 1926 :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Où P est le total annuel des précipitations en mm et T la température moyenne annuelle en °C. Élaboré principalement pour qualifier les zones arides, il n'est pas utilisable dans les régions froides : en effet, il n'est pas défini pour les zones à des températures annuelles inférieures ou égale à -10 °C (DeMartonne, 1926).

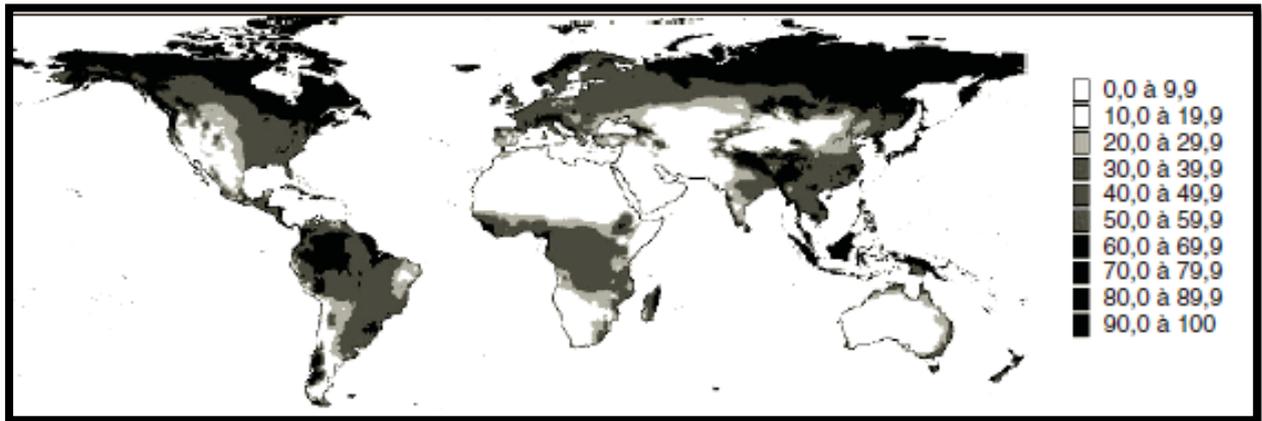


Figure 41: Zones caractérisées par leur valeur de l'indice d'aridité de Martonne, calculé pour la période 1951-2000

Cet indice se calcule par des formules comme ceux de l'UNESCO (1979), UNEP (1992) où : Aridité = Précipitation (mm) /ETP (mm), en prenant en considération cinq paramètres climatique : température, précipitation, vitesse des vents, humidité relative et les heures d'ensoleillement pour classer 5 classes climatiques principales : Hyper - aride, aride, semi-aride, sub-humide et humide.

Tableau 15 : Les zones climatiques selon la classification de l'UNESCO (1979) et l'UNEP (1992)

Zone	UNESCO (1979) P/PET Méthode de Penman	UNEP (1992) P/PET Méthode de Thornthwaite
Hyper aride	AI < 0.03	AI < 0.05
Aride	0.03 < AI < 0.20	0.05 < AI < 0.20
Semi-aride	0.20 < AI < 0.50	0.20 < AI < 0.50
Sub-humide	0.50 < AI < 0.75	0.50 < AI < 0.65

Humide	$0.75 < AI$	$0.65 < AI$
---------------	-------------	-------------

1.3. Caractéristiques des zones arides

Selon l'UNCCD (2012), les zones arides contiennent 46% du carbone mondial, 44 % des terres cultivées, 30% des plantes cultivées, ainsi 8 des 25 « hotspots » de biodiversité mondiaux sont situés en zone aride. 0,5% des espèces végétales de ces zones sont endémiques, mais la perte de leur habitat spécifique est supérieure à 70%.

De plus, les zones sèches constituent des centres de ressources génétiques précieux pour des utilisations futures notamment grâce à un stock important de variétés traditionnelles de plantes cultivées et de populations ou de races animales domestiques adaptées (Roselt/OSS, 2009).

1.3.1. Caractéristiques climatiques

Les zones arides et semi arides sont caractérisées par des valeurs de températures élevées et des précipitations faibles, cependant, la variabilité des valeurs de températures et la saison de pluies divisent les écosystèmes arides et semi arides selon le climat en trois types de climats :

- Un climat méditerranéen où la saison des pluies est en automne et en hiver. Les étés sont chauds et secs ; les températures hivernales sont douces avec une saison humide commençant en octobre et se terminant en avril ou mai, suivie de cinq mois de saison sèche.
- Un climat tropical dont les précipitations se produisent en été. Plus on est loin de l'équateur, plus la saison des pluies est courte. Les hivers sont longs et secs, et la saison humide s'étend du milieu de juin à la fin de septembre, suivie d'une saison sèche de près de neuf mois.
- Un climat continental, dont les précipitations sont régulièrement réparties sur toute l'année, bien qu'il y ait une tendance à plus de pluie en été.

1.3.1.1. Précipitations et ressources hydriques

La répartition des précipitations dans les zones arides varie entre l'été et l'hiver, le climat est caractérisé par des précipitations d'hiver avec des maximas en décembre, janvier et février, et une longue période de sécheresse, pratiquement sans pluie de juin à septembre. L'évaporation sur nappe d'eau libre atteint la valeur moyenne annuelle de 1200 mm. Dans les zones semi

arides du sud de la méditerranée, la faiblesse des précipitations et leurs distributions aléatoires se traduisent souvent par une situation de contrainte hydrique.

Cela est facile à voir lorsqu'on considère les statistiques des précipitations temporelles pour un lieu donné où l'écart entre les plus faibles et les plus fortes précipitations enregistrées au cours des différentes années peut être important, bien qu'il se situe généralement dans une fourchette de plus ou moins 50 pour cent de la précipitation annuelle moyenne (FAO, 2006).

I.3.1.2. Les températures

Les zones arides et semi arides sont caractérisées par des températures élevées qui durent pendant plusieurs mois, en général, on observe durant ces saisons des fluctuations importantes des températures diurnes. Très souvent, pendant la saison sèche les températures diurnes varient entre 35 et 45° C, pendant que les températures nocturnes tombent à 10 à 15 °C.

Ces fluctuations des températures au cours d'une même journée limitent la croissance des espèces végétales (FAO, 2006) ; du même, la poussée de ces espèces est inhibée par les gelées de la saison froide (Hadbaoui, 2013).

I.3.1.3. Les vents

Les vents sont modérés à prédominance Nord et Nord-Ouest, les zones arides (notamment celle du Nord-Africain), sont généralement ouvertes et exposées aux vents (d'une vitesse d'au moins 20 km/h), souvent Sud-Ouest, et en raison de la faible densité du couvert végétal ces zones sont menacées par une forte érosion éolienne.

Le principal dommage causé par le vent en emportant des particules de terre est le tri des matériaux du sol ; l'érosion éolienne enlève progressivement le limon, l'argile et les matières organiques de la surface du sol. Les matières restantes peuvent être sableuses et infertiles. Il est fréquent que le sable s'entasse pour former des dunes et présente une menace grave pour les terres environnantes (FAO, 1975).

1.3.2. Les sols

Les zones arides sont caractérisées par des sols fragiles, pauvres en matière organique, peu humides et souvent exposés à l'érosion hydrique et éolienne, aussi par la présence d'accumulation calcaire. Les ressources hydriques sont faibles, peu renouvelables, inégalement réparties et anarchiquement exploitées (Nadjraoui, 2011).

La profondeur du sol régit la quantité d'humidité du sol et le type de disposition des racines des arbres. En général, les sols colluviaux et alluviaux sont profonds ; mais les sols résiduels sont d'une profondeur très variable selon le degré de la pente, la durée et l'intensité des intempéries et les influences biotiques (cultures, pâturage de bétail, etc). Les sols des crêtes et du haut des pentes sont souvent peu profonds, tandis que ceux du milieu des pentes et des vallées sont de modérément profonds à très profonds. La profondeur des sols dans les régions arides est souvent limitée par un horizon concrétionné. Cette croûte, composée de fer ou de graviers de latérite dans la zone tropicale et de calcite consolidée dans la région méditerranéenne, peut-être plus ou moins continue et se situe entre 5 et 60 centimètres en dessous de la surface (FAO, 1975).

I.3.3. La végétation

La zone aride est caractérisée à la fois par son climat toujours peu pluvieux, et parfois très sec, et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée, très irrégulièrement répartie, et constituant un couvert excessivement lâche (Aubert, 1963).

En général, ce sont les formations steppiques qui dominent les paysages végétaux des zones arides où on trouve des steppes à graminées telles que l'alfa (*Stipa tenacissima*) et le Lygeum (*Lygeum spartum*), des steppes à arbrisseaux xérophytes comme les armoises (*Artemisiac ompestris*, *Artemisia herbaa alba*, *Rhantherium suaweolens*, etc.) et des steppes à halophytes (*Salsola*, *Atriplex*, etc). Dans les sols les plus favorables quelques ligneux hauts (*Acacia tortilis*, *Pistacia atlantica*, etc.) (Skouri, 1993).

La végétation joue un rôle fondamental dans le processus de formation des sols en faisant éclater les particules de roche et en enrichissant le sol par des matières organiques provenant de ses parties aériennes et souterraines. Cependant, le rôle de la végétation est réduit dans les zones arides du fait de la faiblesse du couvert et du développement limité des parties aériennes.

Selon la FAO, dans les zones arides, le couvert végétal est rare. On peut néanmoins distinguer trois formes de plantes :

- Annuelles éphémères : Les plantes qui apparaissent après la pluie, accomplissent leur cycle de vie au cours d'une brève saison (8 à 12 semaines)
- Pérennes succulentes : Des plantes qui peuvent accumuler de l'eau.
- Pérennes non succulentes : Ce sont des plantes qui supportent les stress des zones arides, tel que les graminées, les petites plantes ligneuses.

1.4. Les zones arides du Nord d'Afrique

Selon Le Houerou (1974), les zones arides dans l'Afrique du Nord s'étendent sur 576.500 Km², les zones arides et semi arides du Maghreb sont soumises à un climat méditerranéen, caractérisé par, de 4 à 12 mois secs, ces zones sont situées entre les isohyètes annuelles de 100 à 400 mm et couvrent plus de 63 millions d'hectares d'une végétation basse et clairsemée, soumise à une exploitation humaine très ancienne ; la vocation historique des steppes était l'élevage extensif d'ovins, de caprins et de dromadaires complétés par la culture itinérante des céréales selon le degré d'aridité (semi-aride, aride et per aride).

Réduites à une bande littorale plus ou moins étroite en Égypte et en Libye, les zones arides du Nord d'Afrique prennent leur extension au Maghreb (Tunisie, Algérie et Maroc) (Aidoud et., *al* 2006). Dans les pays du Maghreb ces zones constituent une vaste bande s'étirant d'Est en Ouest relativement homogène aux plans géographique et géomorphologique (Kaabache, 1990).

Selon Barry et Celles (1972,1973) les steppes arides du Nord d'Afrique couvrent les territoires suivants :

- Domaine maghrébin-steppique : il correspond aux Hautes Plaines Algéro- marocaines et aux Hautes Plaines steppiques de Tunisie à climat continental, caractérisé par une saison sèche relativement longue (6 à 7 mois), des températures estivales élevées (moyenne des températures maximales du mois le plus chaud comprises entre 30 et 40°C) et des températures hivernales oscillant entre 0 et 2 °C (moyenne des

températures minimales du mois le plus froid). Les précipitations, irrégulières, sont de l'ordre de 200 à 400 mm par an. Au plan des formations végétales, ce domaine est essentiellement marqué par une steppe dominée, selon les cas, par l'alfa (*Stipa tenacissima*), l'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) et/ou le sparte (*Lygeum spartum*). Sur les reliefs, elle cède place à un matorral constitué de pin d'Alep, de chêne vert et de genévrier de Phoenicie.

- **Domaine méditerranéen-saharien** : il occupe le piémont sud des montagnes méridionales du Maghreb, constituant approximativement la limite septentrionale du Sahara. Il lui correspond une flore saharo-arabique et une végétation steppique à structure simplifiée, devenant monostate et très ouverte, physionomiquement dominée par le remth (*Arthrophytum scoparium*).
- **Domaine saharo-mauritanien** : localisé au sud-ouest marocain, il englobe la région de Taroudant, les plaines du Sous et de Marrakech; il est caractérisé par un climat aride de type océanique, chaud en hiver, et par une flore à caractère tropical (dont *Argania spinosa* et plusieurs euphorbes endémiques).

Tableau 16: Répartition des zones arides du nord de l'Afrique (en millions d'hectares)(Aidoud et.,al, 2006)

Bioclimat	Subhumide et humide	Aride			Total aride	Per-aride
		300-400	200-300	100-200		
P mm/an	400<	300-400	200-300	100-200	100-400	50-100
Algérie	18.1	5.9	7.0	8.7	21.6 (34%)	38.6
Egypte	0	0	0	3.0	3.0 (05%)	3.0
Libye	0.5	1.3	4.2	13.8	19.3 (30%)	15.3
Maroc	19.7	3.8	4.4	3.8	12.0 (19%)	7.0
Tunisie	3.7	1.3	2.8	2.8	6.9 (11%)	5.4
Total	42.0	12.3	18.4	32.1	62.8 (100%)	69.3

1.5. Les steppes arides et semi arides en Algérie

Entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien se trouve une large bande de 300 à 350 kilomètres contenant les hautes plaines céréalières, la steppe présaharienne à vocation pastorale, et les bassins endoréiques les plus caractéristiques. C'est une zone où prédominent les eaux souterraines, la pluviométrie y est entre 100 et 400 mm et la sensibilité à la désertification est particulièrement importante (Safar Zitoun, 2006).

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 (Ikhlef, 2013).

Les étages bioclimatiques s'étalent du semi-aride inférieur frais au hyper aride supérieur frais. Ce zonage bioclimatique est actuellement en cours de révision par les chercheurs qui se penchent sur l'impact des changements climatiques et celui du processus de désertification sur ces limites (Nadjaoui, 2011).

Ainsi, selon Nadjaoui (2004), On distingue :

- Le semi- aride : 300 - 600 mm.
- L'aride : 300 - 100 mm.
- Le Saharien < 100 mm qui occupe 89,5% la superficie totale de l'Algérie. La superficie des zones arides en Algérie selon Le Houerou (1995) est de 216000 Km², et 386000 Km² de zones hyper arides supérieur.

2. La sécheresse

2.1. Définition

Le terme sécheresse est défini en 1975 par l'organisation mondiale de météorologie (OMM) comme suit : « Un déficit, à long terme, de précipitations par rapport à la moyenne, affectant une grande zone pour une ou plusieurs saisons ou années, ce qui réduit considérablement la production primaire dans les écosystèmes naturels et agricoles ».

La notion même de sécheresse varie d'un utilisateur à l'autre ; Les hydrologues peuvent définir la sécheresse d'une manière un peu différente : « la sécheresse est un phénomène naturel qui se déroule lorsque les précipitations sont significativement en dessous des niveaux normaux enregistrés, provoquant un déséquilibre hydrologique et affectant les systèmes de production des ressources naturelles » (ICCD, 1994, Williams et Balling, 1994).

La sécheresse peut apparaître à n'importe quelle saison et peut coïncider avec la période de croissance des végétaux, en causant des déséquilibres écologiques et touchant les paramètres biophysique des surfaces tel que la température du sol et l'évapotranspiration (Ghulam et *al.*, 2007 ; Reichstein et *al.*, 2002). Du même ce fléau peut se reproduire dans tous les régimes climatiques (Wilhite, 2000)

La sécheresse est considérée par plusieurs auteurs comme le phénomène le plus complexe mais le moins compris parmi tous les événements naturels (Hagman, 1984 ; Wilhite, 2000 in Girish et al., 2015). Plusieurs définitions conceptuelles ont classifié la sécheresse en quatre catégories majeures : météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique (Wilhite and Glantz, 1985).

Cependant il faut distinguer entre l'aridité et la sécheresse ; l'aridité se réfère à un rapport négatif entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne (P / PET), Le degré de l'aridité est inversement proportionnel à l'ampleur de ce rapport, la sécheresse est souvent liée à l'aridité car les régions arides sont soumises fréquemment aux vagues de sécheresse.

2.2. Types et dynamique de la sécheresse

Dans de nombreuses régions sèches, la période d'arrêt ou de reprise des pluies est cyclique (c'est le cas en région méditerranéenne). Dans les régions de l'Ouest atlantique, la variabilité est à l'évidence plus forte et les possibilités d'anticipation plus réduites : on distingue a posteriori des années sèches ou pas, avec des fréquences de 1 à 2 années sèches sur 5.

On distingue classiquement 3 types de sécheresse : les sécheresses météorologiques liées à un déficit du cumul de précipitations, les sécheresses agricoles ou édaphiques concernant l'humidité moyenne des sols et les sécheresses hydrologiques liées aux débits des cours d'eau ou au niveau des nappes (Soubeyrou ; et al, 2008) , aussi, la sécheresse socio- économique qui s'associe au déséquilibre de l'offre et la demande de certains produits et services résultant d'une sécheresse météorologique, agricole, ou hydrologique (Wilhite, 2000).

2.2.1. La sécheresse météorologique

Qui se définit comme le temps écoulé entre deux pluies efficaces, c'est à dire capables d'apporter réellement de l'eau dans le sol. Cette acception de la sécheresse conduit à des définitions variables selon les zones. Ainsi, il s'agit d'une période, qui peut varier d'un mois à une année, voire dans des cas extrêmes, à plusieurs années, durant laquelle les précipitations sont inférieures à la normale (Szczypta, 2012), On parlera de « nombre de jours sans pluies » (Bied-charreton, 2009). Elle est basée sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche. Ces définitions doivent

être considérées spécifiques à une région puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre (Layelmam, 2008).

La sécheresse météorologique est un phénomène climatique plutôt qu'un aléa proprement dit, mais on la confond souvent avec d'autres conditions climatiques auxquelles elle s'apparente, notamment l'aridité. Elle ne devient dangereuse que lorsqu'elle se transforme en sécheresse agricole ou hydrologique, qui dépend d'autres facteurs (Nations Unis SIPC, 2011).

2.2.2. La sécheresse hydrologique

Caractérisée par une baisse du débit des cours d'eau du niveau de remplissage (Bied-charreton, 2009), identifiée à partir de l'analyse du cycle de l'eau, concernant l'alimentation des nappes souterraines par la pluviométrie d'automne et d'hiver (qui conditionne les capacités d'irrigation) (Itier et Seguin, 2007) ; Les sécheresses en eaux souterraines existent lorsque la recharge des aquifères est inférieure à la recharge annuelle moyenne sur une période de plus d'un an. Puisque peu de données concernant les aquifères sont disponibles, ce type de définition est peu utilisé. Les caractéristiques de la sécheresse hydrologique tels que la durée et le volume de déficit sont dérivés des simulations des séries climatiques (Dracup *et al.*, April 1980).

L'impact d'une sécheresse hydrologique est important sur les activités humaines, puisqu'elle va avoir de fortes conséquences sur l'irrigation, les activités touristiques, la production d'énergie hydroélectrique, les transports (dans certains pays), l'alimentation en eau domestique et la gestion/protection de l'environnement (Szczypta, 2012).

2.2.3. La sécheresse agricole

La sécheresse agricole ou édaphique, dite aussi « agro-écologique » se produit lorsque les quantités d'eau évaporées par les plantes, les cultures et l'évaporation normale dépassent les apports pluviométriques, elle concerne donc le bilan hydrique du sol et dépend plutôt des précipitations au cours de la saison de végétation. Celle-ci est fréquemment accompagnée d'une hausse des températures, qui intervient sur la physiologie des plantes et les flux du bilan hydrique via l'évapotranspiration. (Itier et Seguin, 2007). Une année sera caractérisée par des mois secs et des mois pendant lesquels les réserves en eau se reconstituent ; si le nombre de mois secs consécutifs est trop important on constatera des états de stress de la végétation naturelle et des cultures, on sera alors dans une situation de sécheresse (Bied-charreton, 2009).

Ces sécheresses dépendent grandement des conditions climatiques, des caractéristiques biologiques et phénologiques des cultures ainsi que des propriétés physiques et biologiques des sols (Layelmam, 2008), ou par une distribution temporelle plus irrégulière (c.à.d. des précipitations moins fréquentes mais plus intenses, phénomène souvent observé sur le pourtour méditerranéen) (Szczypta, 2012).

2.2.4. Les sécheresses socio-économiques

La sécheresse est la catastrophe naturelle la plus coûteuse et stochastique du monde et qui affecte plus de personnes que les autres catastrophes (Wilhite, 2000), la sécheresse socioéconomique définit le lien entre l'offre et la demande d'un produit, marchandise ou un service économique. Elle se produit lorsque la demande excède l'offre à cause d'un manque hydrique relié au climat (Layelmam, 2008).

Ces types de sécheresse peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'élément moteur des autres (Bootsma et al., 1996), En général, le manque de précipitation va causer une sécheresse météorologique, ainsi qu'une sécheresse agricole locale, cette dernière se propagera vers une sécheresse hydrologique à travers le réseau hydrographique (Tallaksen et al., 1997). Cependant, plusieurs études montrent que l'action anthropique est responsable sur intensifier la sécheresse météorologique due à l'augmentation des températures et donc l'évaporation et l'altération de la circulation des moissons sur des vastes régions en Afrique et en Asie, une autre étude (Wada et al., 2013) a montré que la consommation humaine de l'eau peut aussi intensifier la sécheresse hydrologique de 10 à 500% et elle augmente la fréquence mondiale de la sécheresse par 30%, la figure ci-dessous montre les successions et les incidences des types de sécheresse dans le temps.

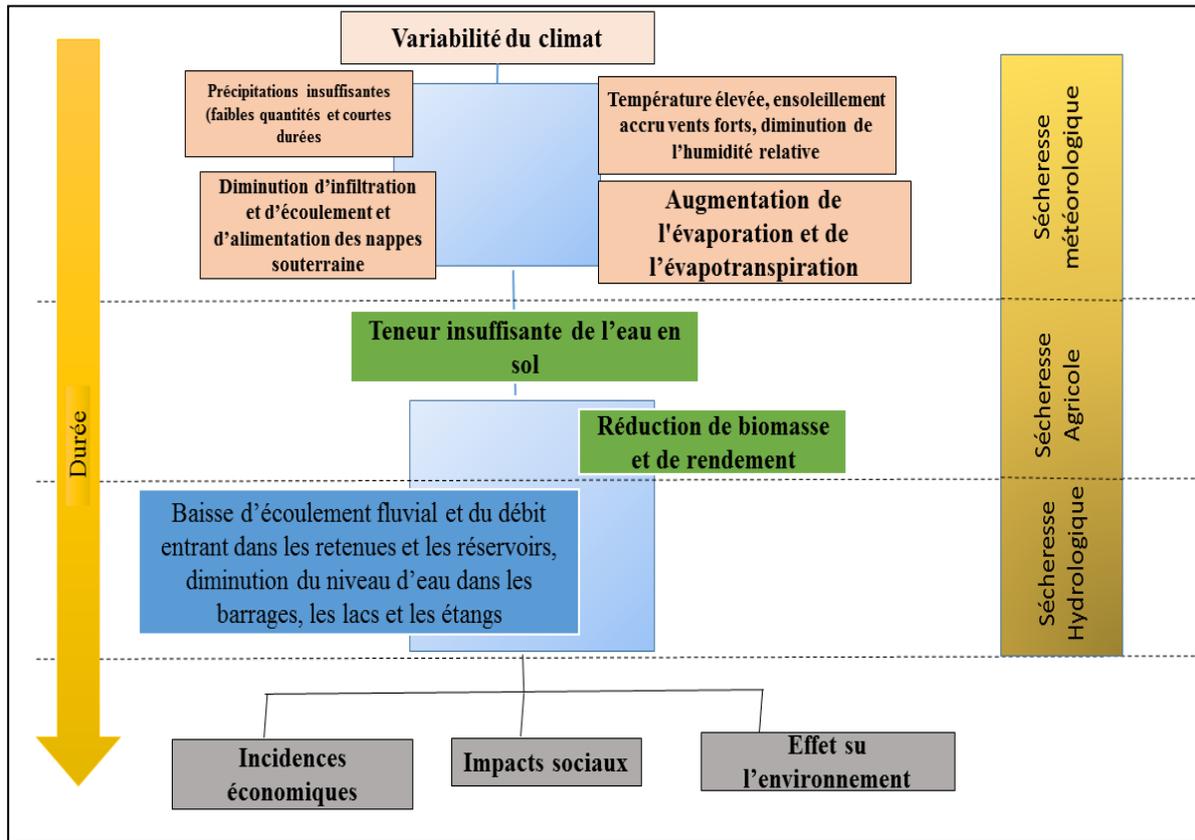


Figure 42: Succession et incidences des types de sécheresse

(centre national de lutte contre la sécheresse, Université de Nebraska, Etats-Unis d'Amérique)

2.3. Impact de la sécheresse

Les changements globaux peuvent intensifier le cycle hydrologique et augmenter la fréquence des événements climatiques extrêmes (Jentsch et Beierkuhnlein, 2008), sur une échelle globale, la sévérité de la sécheresse s'est augmentée notamment durant les dernières décennies (Dai, 2011), spécialement dans les zones aride et semi-arides (Solomon, 2007), ainsi la sécheresse peut avoir des dégâts sur la société humaine et les écosystèmes naturels (Lambers et al., 1998), plusieurs évidences assurent que les sécheresses futures vont être caractérisées par une forte magnitude, longues durées et des fréquences élevées, et seront hors de synchronisation avec les seuils de stress des écosystèmes (Parmesan, 2006).

Selon plusieurs indicateurs anthropogéniques de biodiversité plus que 80% de la population mondiale résident dans des régions de stress en eau (Vorosmarty et al., 2010), les différents écosystèmes ainsi que les sociétés humaines dépendent de la disponibilité de l'eau

(dans les sols, les nappes aquifères, les lacs et les rivières) plus que leur dépendance directe à la précipitation (Van Loon et *al.*, 2013).

Les conditions climatiques extrêmes comme celles de la sécheresse peuvent engendrer des dégâts majeurs et des pertes dans le rendement des céréales, des bétails et même des pertes de personnes ainsi les répercussions économiques sont lourdes (Al-Riffai et Breisinger, 2012; Gupta et *al.*, 2014; Lin et *al.*, 2013 in Girish et *al.*, 2014)

2.3.1. Impact de la sécheresse sur le sol

L'impact de la sécheresse sur les sols varie selon leurs caractéristiques ; certains sols ayant une haute capacité de rétention d'eau et d'autres un faible taux capacité, les sols à faible capacité de rétention d'eau sont plus vulnérables à la sécheresse (Wilhite, 2005).

La diminution de la teneur en eau dans le sol, mène à la diminution de productivité et de matière organique, fragilise sa structure et conduit à l'encroûtement de la surface du sol par éclaboussure de pluie qui peut augmenter le ruissellement de 30 à 50% ou plus conduisant à une diminution de la disponibilité de l'eau et à une érosion plus poussée (Verrecchia et *al.*, 1995), la diminution de l'humidité des sols, se traduit également en une faible activité biologique de la faune et de la flore, et en particulier les symbiotes, ce qui réduit le cycle des géobiogènes (N, P, K, S, Ca, Na, Mg, Fe, Cu, Zn, Co, etc.) en causant une réduction de fertilité (Le Houérou, 1996).

2.3.3. Impact sur les ressources en eau

Le réchauffement du climat projeté par les modèles climatiques annonce une intensification du cycle hydrologique, ce qui signifie de plus forts taux d'évaporation, ainsi qu'une plus grande proportion de précipitations liquides comparativement aux précipitations solides (neigeuses). Les ressources hydriques vont donc subir une pression toujours plus importante dans le cas d'un changement du climat global qui cause une sécheresse provoquant la diminution des ressources en eau. Sur le plan pluviométrique, celui-ci se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps (interannuelle et saisonnière).

Tous les impacts de la sécheresse sont liés à la demande en eau excédant les quantités disponibles. La période de temps de l'arrivée des précipitations jusqu'à ce que l'eau soit

utilisable dans chaque forme diffère grandement, par exemple, la sécheresse agricole se produit sur une échelle de temps plus petite par rapport à celle de la sécheresse hydrologique, en conséquent, les impacts d'un déficit hydrique sont une fonction complexe de la ressource d'eau et de son l'utilisation (Mckee et., *al*, 1993)

L'eau dans les systèmes de stockage hydrologique est souvent utilisée à des fins multiples et concurrentes par exemple, la production d'électricité, la consommation domestique, l'irrigation, les loisirs...etc, compliquant davantage la séquence et la quantification des impacts, la concurrence pour l'eau dans ces systèmes de stockage s'intensifie pendant la sécheresse et les conflits entre les utilisateurs d'eau augmentent considérablement (Wilhite, 2000).

2.3.4. Impact sur le couvert végétal et le rendement agricole

Comme la sécheresse est un problème de précipitation le déficit commence par la réduction de l'humidité du sol donc l'agriculture est le premier secteur touché (ONM, 2006). Les sécheresses longues et sévères peuvent causer des dégâts pour l'agriculture et affecter la sécurité alimentaire (Kumar et *al.*, 2014). Le domaine agricole est un des secteurs les plus sensibles aux changements du climat tan que le rendement agricole dépend des conditions climatiques notamment les céréales (Watson et *al.*, 1996 *in* Yingchun et *al.*, 2015). La sécheresse a des impacts sur la croissance de la végétation, la productivité, la structure, la composition et les fonctionnements des écosystèmes comme la fixation du Carbone et les flux d'énergie (Jentch et *al.*, 2011 ; Xia et *al* 2014) et conduit à l'accumulation de la litière ce qui limite la régénération des plantes (Telmani et El hadi, 1992). Les sécheresses prolongées causent également la mort des arbres, les incendies fréquentes et intensifiées, les infestations des insectes et les maladies sont quelques phénomènes du stress causé par le changement et la variabilité climatique (Vose et *al.*, 1992).

Les plantes des prairies possèdent des stratégies d'évitement ou de tolérance à la sécheresse qui aboutissent à une distribution différentielle, selon les régions et la fréquence des accidents climatiques. La probabilité pour une espèce particulière de disparaître d'une communauté au cours d'un épisode de sécheresse dépend de ses attributs vitaux (traits d'histoire de vie) et de son niveau d'abondance avant la perturbation. (Alard et Balent, 2007), de même, les stratégies de régénération de certaines espèces annuelles sont favorisées par les sécheresses estivales, permettant l'établissement de banques de graines importantes (Anikola *et al.*, 1998).

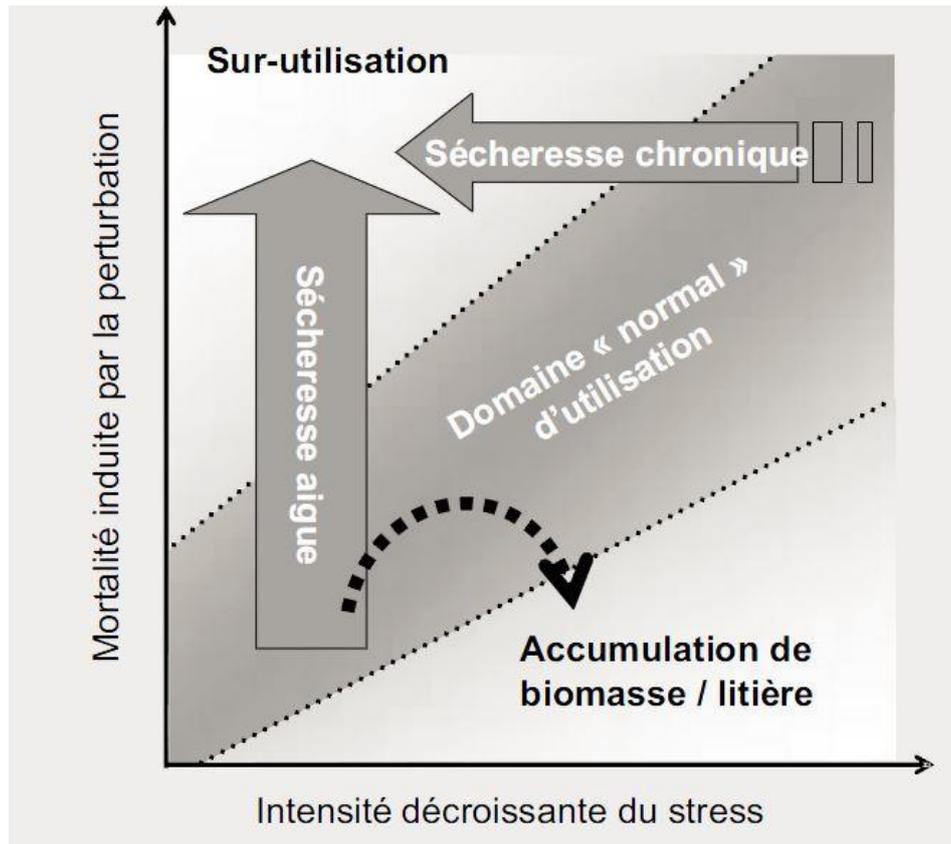


Figure 43: Effet de la sécheresse sur les systèmes pastoraux (intensité et fréquence) (Alard et Balent, 2007)

2.4. La sécheresse en Algérie

Des études historiques et paléo climatiques très précises (dendrochronologie, palynologie, paléobotanique,) ont montré que les épisodes de sécheresse sont récurrents depuis des millénaires en Afrique ; et ont duré plusieurs années de suite. Elles montrent que la sécheresse est un phénomène structurel qui apparaît fréquemment selon une périodicité imprévisible en l'état actuel de nos connaissances ; ce n'est pas un phénomène conjoncturel et passager (Bied-Charreton, 2007).

L'Algérie a connu, au cours de ces vingt dernières années, une sécheresse intense et persistante caractérisée par un important déficit pluviométrique, et qui a touché l'ensemble de l'Algérie, des sécheresses analogues, aussi bien en amplitude qu'en intensité, ont déjà été observées au début du 20^{ème} siècle, entre 1910 et 1940 (Medjreb et Henia, 2011).

Le pays connaît une accentuation des sécheresses et donc une aggravation des phénomènes de désertification, salinisation des sols, pollution des eaux superficielles, du même,

le développement socio-économique des pays de cette région s'est accompagné d'une profonde modification des rapports que l'homme entretient avec la ressource en eau. (Khaldi, 2005) et par conséquent une dégradation progressive des ressources en eau

Les données pluviométriques enregistrées permettent de constater que les moyennes de ces dernières années accusent un déficit important par rapport aux périodes antérieures, ce déficit est de plus de 20% pour la région ouest, 13% pour le centre de 12 % pour l'est du pays (Ould Amara, 2000 ; Bouguerra , 2001), ce qui fait de l' Algérie Aujourd'hui un des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé à 1000 m³ par habitant et par an (Nichane, 2014) ; Notons que dans certaines villes l'eau est rationnée et que la distribution se fait un jour sur deux dans (Djellouli, 2007).

Selon le ministère des ressources hydriques ; pour les 65 barrages en exploitation, le taux de remplissage est de 72,44% avec un volume emmagasiné de 4,93 milliards m³ en 2017, contre environ 6 milliards m³ à la même période de l'année précédente, soit un recul de près de 1 milliard m³ et cette situation va devenir encore plus critique dans les années à venir. Les ressources en eaux renouvelables d'Algérie forment environ 9.500 hm³ inégalement réparties entre le Nord-Ouest, moins arrosé et le centre et l'Est où la mobilisation de cette ressource a accusé un grand retard (Bouguerra, 2001).

Les potentialités des ressources en eau superficielle du nord de l'Algérie, estimés à 13.500 hm³/an en 1979 réévalués à 12.410 hm³/an en 1986, n'est plus actuellement que de 9.700 hm³/an, soit une nette baisse de la ressource, compte tenu des conditions de la sécheresse qui sévit depuis trois décennies les eaux profondes sont représentées par la nappe du continental intercalaire (nappe albienne fossile), découverte en 1954 dans le Sahara algérien (et dont la profondeur va de 1300 m jusqu'à 2.000 m) (Djellouli, 2007).

Selon Meddi et Hubert (2000), la demande en eau est en constante augmentation, notamment pour le secteur de l'agriculture qui absorbe plus de 87 % du potentiel disponible, 13% pour l'eau potable et 5% pour l'industrie.

2.5. Politique de gestion et de lutte contre la sécheresse

Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir. L'augmentation de la population humaine qui entraîne une pression accrue sur l'environnement y contribue grandement. Une

pratique agricole non-adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinée à la surexploitation des réserves hydriques accélère le processus des sécheresses et entraînent parfois une situation irréversible, la désertification (ONU, 1997 ; UNCCD, 2004).

En Afrique, selon les nations unies, la sécheresse menace plus de 15 millions de personne sur le continent, les pays les plus touchés ces dernières années sont ceux du corne d'Afrique (Somalie, Ethiopie, Kenya). Dans le cas des Pays du Maghreb la sécheresse n'est pas un phénomène nouveau. A chaque sécheresse, les différents Gouvernements mettent en œuvre un programme d'actions de lutte contre les effets de la sécheresse dont les pôles sont déterminés par l'impact des effets de la sécheresse sur les secteurs de l'économie nationale les plus touchés, (FAO, 1996).

Aujourd'hui, l'Algérie, la Tunisie et la Lybie tentent une étroite collaboration pour la stratégie de gestion commune du système aquifère du Sahara Septentrionale. C'est ainsi que le programme SASS (Système Aquifère du Sahara Septentrional) initié par l'OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) développe une « conscience de bassin », à travers l'actualisation de l'évaluation des ressources en eau et des scénarii de développement à long terme. Il prépare la mise en place d'un mécanisme de concertation entre les trois pays ; une banque de données commune structurée autour d'un système d'information intégré, évolutif et durable, facilite les échanges de données et développe des outils d'aide à la décision

D'après plusieurs séminaires et rencontres il ressort que la façon de résoudre le problème de l'eau en Algérie est de se tourner résolument vers de nouvelles techniques. On peut préconiser le traitement et la récupération des eaux usées et le dessalement de l'eau de la méditerranée (Khaldi, 2005), de ce fait l'Algérie a opté pour une solution pérenne de la mobilisation de la ressource avec l'Etablissement Public Algérienne des Eaux (EPAE) et l'expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la réalisation de 23 stations monobloc dans le sillage du programme d'urgence adopté par le gouvernement algérien en 2002, afin de faire face à la grave pénurie qui touche l'ensemble du pays. Dans le nord-ouest qui est le plus affecté, la mobilisation des eaux souterraines a atteint son seuil maximal, d'où la surexploitation des nappes superficielles et la détérioration de la qualité de l'eau ; le recours au dessalement d'eau de mer devient donc indispensable pour sécuriser l'alimentation en eau potable. C'est ainsi que 14 grandes stations d'une capacité de 1.940.000 m³/j sont en voie de réalisation ; celle d'Oran est entrée en exploitation depuis mi 2005. Plusieurs secteurs publics

et privés, nationaux et internationaux, sont en charge de ces opérations (Ministère des Ressources en Eau).

3. La désertification

3.1. Définition

La définition de la désertification dans l'article 1 de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) est la suivante : « C'est 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 ».

La première définition de la désertification est donnée par Lavauden en (1927), et qui décrit la désertification comme un phénomène artificiel uniquement causé par l'homme et qui pourrait être combattue (Sinav, 2010).

La Houérou (1968), définit la désertification comme étant un ensemble d'actions qui se traduisent pour une réduction plus au moins irréversible du couvert végétal, aboutissant à l'extension des nouveaux paysages désertiques, ces paysages sont caractérisés par la présence des regs, des hamadas et des ensemble dunaire.

La définition de la désertification acceptée par le programme des nations unies pour l'environnement (UNEP) à Nairobi en 1977 comme : « Une réduction de la production potentiel des terres dans les zones arides et semi-arid et sub-humide et qui peut finalement aboutir à des condition de désert » puis confirmé lors du sommet de l'environnement et du développement à Rio de Janeiro en 1992 : « La dégradation des terres des zones arides, semi-arides, et sèches subhumides », le phénomène de désertification est souvent confondue avec l'avancement du désert, en effet, ce ne sont pas les désert qui s'étendent sur les zones limitrophes, mais plutôt les zones arides et semi-arides et même subhumide qui les entourent qui s'altèrent et s'aridifient de plus en plus (Nahal,2004).

La désertification dans son vrai concept touche 70% des terres arides du monde (exception faites des déserts hyperarides) soit 3600 millions d'hectares. Elle est actuellement perçue comme un suivi d'un milliard environ de personne dont 250 millions sont indirectement touchés. Actuellement, 1/3 de la surface terrestre est soumise à l'effet de ce phénomène, 2/3 du continent Africain sont déjà désertiques ou très arides. La désertification concerne plus de 1.6

milliard d'habitants répartis sur plus de 100 pays. Elle est accompagnée par un impact économique négatif important estimé à plus de 42\$ Million/an. Elle devient le phénomène naturel qui attirent le plus l'attention des autorités et des spécialistes.

3.2. Les indicateurs de la désertification

Un indicateur peut être direct comme la surface totale touchée par la salinisation, ou indirect comme l'indice de l'intégrité de la biodiversité. Ce ne sont pas uniquement des chiffres « bruts ». Ils sont incarnés dans des contextes environnementaux, historiques et institutionnels. Un jeu d'indicateurs valable à un endroit et à un moment donné peut ne plus l'être à un autre endroit ou moment, les indicateurs sont généralement déterminés et définies par des groupes d'experts à l'échelle régionale ou globale lors des études d'impacts et de prévision.

Par exemple ; parmi les indicateurs utilisés par l'observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) on site :

- Le changement du recouvrement végétal
- Mesure de la phytomasse
- La diversité des biotopes
- Le rapport écosystèmes /Agrosystème
- Coefficient d'efficacité de la pluviosité pour la production sur parcelle (CEP).
- Composition floristique globale par observatoire.
- Richesse spécifique globale : espèces pérennes et annuelles par formation.
- Diversité alpha
- Diversité bêta
- Recouvrement de la végétation
- Types biologiques
- Types biogéographiques
- Phytomasse herbacée
- Densité des ligneux
- Endémisme et rareté

Parmi les indicateurs utilisés par le comité scientifique Française de la désertification on site :

- Nombre de personnes tuées et affectées par les catastrophes naturelles, spécialement les sécheresses (nombre).
- Disponibilité en eau (par individu) (m³/an/ind.)
- Pourcentage de la population au-dessous du seuil de pauvreté national ou, par défaut, sous 1USD (ou 2USD) par jour (%).
- Perte économique par individu due aux catastrophes naturelles et liée aux sécheresses et inondations (USD).
- Incendies du couvert végétal : localisation, surface (ha) et périodes.
- Indicateur d'intégrité de la biodiversité (IIB).
- Taux annuel moyen d'érosion du sol (t/ha).
- Indicateur édaphique de changement de l'état de surface des sols sous l'effet du vent.
- Pourcentage du budget national dédié à la gestion durable des terres (%).

Parmi les indicateurs déterminés par le système d'évaluation de la dégradation des terres en Anglais : land degradation assessment (LADA) en 2006 on site :

- Tendances de la productivité primaire nette : peut être déterminé par l'analyse de l'NDVI (indice normalisé et différencié de végétation obtenu des images satellitaires).
- Efficacité d'utilisation des précipitations.
- Le risque d'érosion : donne des informations sur la vulnérabilité de la terre (couverture de la végétation, type de sol, les pentes, émotivité des pluies).
- Indices d'aridité.

Un bon indicateur doit être pertinent par rapport au problème, fondé sur des données et analyse faibles et répondre aux besoins de l'utilisateur, il doit être suffisamment sensible pour donner précocement des indications sur le changement (Rubio et *al.* 1998).

3.3. Les causes de la désertification

Les origines de la désertification sont complexes, elles sont à la fois dues à des causes climatiques telles que l'aridité et la sécheresse (suivie ou non de fortes pluies), les vents, les températures ...etc., et humaines ; comme une mauvaise gestion des ressources naturelles ou par leurs surexploitations. D'une manière générale la science s'accorde à dire que les causes sont majoritairement humaines (UNCCD, 2012).

3.3.1. Causes à origine humaine

Parmi les activités humaines, causes de la dégradation des terres, on peut citer :

- La mise en culture non adéquate des sols fragiles ou exposés au risque de ruissellement de l'eau (d'érosion hydrique) et/ou aux vents (érosion éolienne) ;
- La réduction des temps de repos (jachère) des sols cultivés et le manque de fertilisation organique et minérale ;
- Le surpâturage ; Le surpâturage correspond à un trop long séjour du cheptel se traduisant par un prélèvement annuel d'une qualité d'unité fourragère supérieure à la population des parcours (Hadid.1992). Selon Nadjraoui et Badrani (2008) le surpâturage s'explique par deux facteurs principaux ; le manque de création d'emplois (agricoles et surtout non agricoles) pousse les ménages pauvres à défricher des lopins de terre pour produire un minimum de céréales et les pousse à posséder quelques têtes de caprins et d'ovins pour subvenir à un minimum de leurs besoins, ainsi, la gratuité des unités fourragères prélevées sur les parcours pousse les gros possédants à accroître la taille de leurs troupeaux et les conduits aussi à défricher les parcours pour se les approprier.
- La surexploitation des ressources ligneuses (en particulier pour le bois-énergie).
- La pratique incontrôlée des feux pour la régénération des pâturages, la chasse, les défrichements agricoles, et certains conflits sociaux ;
- Les pratiques agricoles exportatrices nettes de nutriments en particulier via les cultures intensives de rente ;
- L'irrigation sans précaution pouvant conduire au lessivage ou à la stérilisation du sol par les minéraux dont le sel ;
- Le travail du sol inadapté.

3.3.2. Causes à origine climatiques

Les perturbations climatiques sont 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 (Nadjraoui et Badrani, 2008). Si l'action de l'homme est indéniable et largement démontrée, l'impact des conditions climatiques existe également et leurs rôles respectifs sont amplement discutés (Bouzekri, 2015) ; les températures élevées pendant plusieurs mois et la diminution du taux des précipitations conduisent à une sécheresse hydrique, météorologique et agricole en rendant les sols de plus en plus secs ce qui affecte l'accroissement et le

développement naturel du couvert végétal, et en revanche, le sol deviendra plus pauvre en matière organique et en nutriments.

D'autre part, la perte de biodiversité aggrave le changement climatique : la diminution de l'activité primaire et de l'activité microbienne du sol (qui réduit la séquestration du carbone) contribue à l'augmentation de gaz à effet de serre et donc au réchauffement climatique. De son côté, le réchauffement planétaire augmente l'évapotranspiration et modifie le régime des précipitations, ce qui affecte la biodiversité car les espèces doivent développer des stratégies d'adaptation à ces nouveaux paramètres. Il entraîne aussi des modifications dans la structure et la diversité des communautés végétales étant donné que les espèces réagissent de manière différente à des concentrations plus élevées de dioxyde de carbone (CO₂) (Roselt/OSS, 2009).

3.4. La désertification en Algérie

Depuis une quarantaine d'années, l'écosystème steppique a été complètement bouleversé, tant dans sa composition que dans son fonctionnement à travers sa productivité primaire (Aidoud, 1989). 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., et qui 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). 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 écologique et socio-économique (Le Houérou, 1985 ; Aidoud, 1996 ; Bedrani, 1999).

Le bilan établi par le ministère de l'Agriculture (2011) montre que 14 millions d'hectares de zones de montagne au nord sont touchés par l'érosion hydrique, 32 millions d'hectares en zones steppiques sont affectés ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts soumis aux menaces des effets des changements climatiques. Les travaux réalisés par le CNTS (Centre National des Techniques Spatiales) en 1996 confirment que l'évolution de ce fléau naturel durant ces 20 dernières années s'accélère selon un rythme d'environ 40.000 ha/ an. Ces chiffres alarmants nécessitent des décideurs une intervention rapide pour lutter contre ce risque.

3. 5. Politique de gestion et de lutte contre désertification

L'inaction dans le domaine de la lutte contre la désertification à un coût réel non seulement pour les pays touchés mais pour l'humanité, ce coût est bien supérieur à celui de la réhabilitation et à la mise en place d'une gestion durable de ces terres (FAO, 2006).

La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la désertification, en particulier en Afrique (UNCCD), a été adoptée le 17 juin 1994, à l'issue de la cinquième session du Comité Intergouvernemental de négociation, tenue à Paris, au Siège de l'UNESCO, la Convention est entrée en vigueur le 26 décembre 1996 ; elle est ratifiée à l'heure actuelle par 145 Etats. Conformément aux décisions des Etats parties, le Secrétariat de la Convention a son siège à Bonn, en Allemagne (ONU, 1999).

Selon l'UNCCD (2012), Les domaines d'action de la lutte contre la désertification peuvent ainsi être répartis en quatre catégories correspondant à des stratégies différentes et complémentaires :

- Les méthodes correctives (réhabilitation) qui visent à stopper un phénomène et à réparer les dégradations (conservation des eaux et des sols, protection de la végétation...) ;
- Les techniques permettant de mieux gérer et valoriser les ressources (agroécologie, agroforesterie, etc.) ;
- La mise au point de modèles et de systèmes intégrés de gestion des ressources naturelles, c'est-à-dire une gestion globale, qui prend en compte tous les facteurs (socio-économiques, environnementaux...) qui ont une influence sur les ressources naturelles ;
- La mise en place de mécanismes institutionnels et politiques favorables (paix civile, stabilisation des prix, participations de la société civile à la gestion des ressources).

Sur le continent Africain, pendant plus de 10 ans, le réseau Roselt/OSS a fourni un cadre général structuré pour une meilleure compréhension des relations entre la biodiversité, la dégradation des terres et les changements climatiques, notamment à travers son mandat d'harmonisation des approches et des méthodologies à une échelle continentale. Ces travaux permettent ainsi d'envisager des comparaisons à différentes échelles entre les observatoires locaux de différentes régions écologiques, pour une meilleure compréhension de la dynamique de la biodiversité en zones arides (Roselt/OSS, 2009).

Au niveau national, un plan national de lutte contre la Désertification (PNLCD) a été élaboré; il devait s'insérer dans le cadre des différents programmes de développement des zones steppiques et devait viser : l'intensification et l'extension du projet "barrage vert" par la

limitation des labours mécanisés dans les zones steppiques en les localisant, dans le cadre de la mise en valeur, au niveau des zones potentielles agricoles (zones de dépressions ou "dayas") ; la reconstitution des forêts dégradées de l'Atlas Saharien par les reboisements de masse, la mise en défens des paramètres dégradés en vue de reconstituer le tapis pastoral ; la mise en place d'une infrastructure de désenclavement des zones marginalisées.

A la suite de cela, l'Algérie a ratifié la Convention de Lutte contre la Désertification en mai 1996 et s'est engagée à lutter contre ce phénomène par les moyens disponibles dans un cadre national et sur la base d'une coopération sous régionale, régionale et internationale. Elle a instauré la date du 17 juin comme journée de lutte contre la désertification et a institué une commission appelée Organe national de coordination (ONC) à composantes interdisciplinaire et multisectorielle auprès du Ministre de l'Agriculture. Un plan d'action national (PAN) a été enfin mis en place et la Direction Générale des Forêts a été désignée comme point focal de la Convention de lutte contre la désertification.

L'élaboration du plan d'Action national PAN et sa validation le 14 décembre 2003 représentent pour l'Algérie la mesure institutionnelle principale réalisée depuis la publication du rapport national d'Avril 2002, qui cite les programmes, les actions, plans et les projets menés par l'Algérie pour lutter contre la désertification et ébauche les modalités de mise en œuvre d'institutionnalisation et de financement du PAN (Bouzekri, 2015).

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 (Nadjraoui et Badrani, 2008).

4. Apport de la modélisation et de la géomatique dans l'étude de la sécheresse et la désertification

4.1. La géomatique

4.1.1. Introduction et concept

Le mot géomatique vient de « Géo » qui signifie « Terre », et "matique" vient de « informatique », qui signifie le traitement automatique de l'information géographique. La géomatique dérive donc de la géographie qui a de tout temps, visé à expliquer les traces que l'homme laisse sur la planète : frontières, aménagements, modifications des espaces naturels.etc

et à tracer les différentes caractéristiques des écosystèmes (sol, végétation, eau..etc) ainsi que l'écologie des populations et des peuplements (Air de répartition, migration...etc), la géographie a créé des systèmes de repérages qui permettent d'identifier les points sur la terre et les relations entre ces points.

Au sens lexical, la géomatique signifie « application de l'informatique à la géographie (par exemple sous la forme de SIG) » ou encore, « La géomatique est un champ d'activités qui intègre, selon une approche systémique, l'ensemble des moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale requis pour effectuer les opérations scientifiques, administratives, légales et techniques dans le cadre du processus de production et de gestion de l'information sur le territoire. D'une manière générale et générique on peut dire que la géomatique se résume à l'acquisition, la production, la gestion et la diffusion d'informations géoréférencées. Elle couvre un ensemble de techniques telles que les levés cadastraux, la géodésie, la cartographie topographique et thématique, l'hydrographie, la télédétection, le traitement d'images et les systèmes d'information géographique (SIG). » (Paegelow, 2014).

4.1.2. Application de la géomatique dans le suivi et la modélisation de la sécheresse et de la désertification

La télédétection est ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le néologisme « remote sensing » fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque des nouveaux capteurs viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. La commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale définit la télédétection comme suit : « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. »

Bonne (1996) donne à la télédétection la définition suivante : « la télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et des images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou

maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté.

L'image satellitaire présente la deuxième base des données au monde, utilisé pour la modélisation physique de l'environnement après les données climatiques (Pedrotti, 2013), ces dernières offrent une prédiction potentielle mais les images satellitaires offrent une présentation de la surface terrestre, et sont donc un complément pour les modèles à base des données climatiques.

Le suivi et l'évaluation de la sécheresse à partir de la télédétection dépendent de la cause de sécheresse et de l'impact de cette dernière, les images satellitaires peuvent être utilisées pour une alerte précoce des premiers stades de sécheresse en cas d'anomalie dans les séries climatiques (Choudhary et al., 2012). Ces images fournissent une base des données à partir de laquelle, les évidences survenues des périodes de sécheresse dans le passé peuvent être interprétées et combinées avec d'autres informations pour l'élaboration des cartes de sécheresse, ils peuvent aussi assister dans l'évaluation des dégâts, en fournissant une base pour des opérations de secours (Manikiam, 2003).

Au cours des dernières décennies, les images satellites ont été de plus en plus utilisées à des fins agricoles et écologiques (Bokusheva et al., 2016) et plusieurs travaux qui s'intéressent à développer des indices et des méthodologie pour le suivi et l'évaluation du déficit hydrique et de la dégradation des sols et de végétation ont été publiés, on cite des indices de santé végétale qui comprennent, l'indice de température (TCI) et l'indice de santé végétale (VHI) (Kogan et al., 2002) l'indice normalisé de végétation (Rouse et al., 1973), de l'estimation la surface foliaires (Boegh et al., 2002), de sensibilité aux effets atmosphérique (Gitelson et al., 2002), d'absorption de cellulose (Daughtry et al., 2004), de stress hydrique (Ceccato et al., 2001), l'humidité superficielle du sol peut être aussi estimée grâce aux capteurs micro-ondes (Prigent et al., 2005 ; Schmugge, 1983).

On cite également les travaux de Escadafal et al., (1987,1996) et Karimoun (1994) sur l'infertilité et la dégradation des terres en Afrique, les travaux présentés par Randriamanga (1994) sur la sécheresse au Madagascar vue à partir des images infrarouges Météosat et les données conventionnelles qui sont parmi les premières études portant sur le suivi de la sécheresse à l'aide de la télédétection en Afrique dont l'idée originale consiste ici à s'intéresser, non pas à la «source» de la pluie (les nuages), mais à la «cible» (la surface du sol), il s'agit en

effet de mesurer l'impact de la pluie sur le sol à travers l'évaluation de la température de surface, Les travaux sur les caractéristiques du sol et la relation avec développement de l'agriculture dans les régions semi-arides marocaines Yacoubi et *al.* (1998), et par Callot et *al.* (1976). Et celui de Benslimane et *al.*, 2009 dans les régions arides et semi-arides algériennes, celui de Mostphaoui (2014) sur la localisation des sols gypseux et leurs relations avec le milieu physique.

4.1.3. La modélisation et la cartographie de la vulnérabilité en écologie

La modélisation vise en général à faciliter et simplifier la description d'un processus, à prévenir, évaluer un impact, quantifier et mesurer des grandeurs, et à fournir des informations de base pour l'aide à la décision. Un modèle doit fournir des observations, simuler des situations, estimer des grandeurs difficilement accessibles et doit être capable de susciter de nouvelles hypothèses.

Le calcul d'un indice de vulnérabilité pour une période de temps spécifique peut se faire en employant deux modèles de combinaison des facteurs (critères) pris en compte : le modèle multiplicatif et le modèle additif. Ces deux modèles sont différents dans leur conception en ce qui concerne la façon dont chacun des facteurs agit sur les autres pour définir l'indice. Dans le modèle multiplicatif, on présuppose que les facteurs interagissent fortement entre eux et qu'il suffit qu'un des facteurs prenne une valeur de zéro pour que l'indice devienne zéro. Dans un modèle additif l'indice est considéré (le plus souvent) comme la combinaison linéaire entre facteurs. Les facteurs peuvent être considérés d'égale importance ou, en les pondérant, d'importance variable. Puisqu'il n'y a pas d'interaction assumée entre les facteurs, l'indice peut ne pas être nul même si un des facteurs prend une valeur zéro (Cissoko, 2011).

4.1.4. Application du système d'information géographique le suivi et la modélisation de la sécheresse et de la désertification

Les systèmes d'information géographiques (SIG) sont des outils d'observation des territoires et d'analyse spatiale puissante, combinant les informations géographiques et statistiques, ils permettent un suivi cartographié et quantifié des dynamiques territoriales (Walser et *al.*, 2011).

Un système d'information géographique nous permet de visualiser, de questionner, d'analyser et d'interpréter les données afin de comprendre les relations, les modèles et les

tendances grâce à ses diverses capacités telles que la capacité de superposer plusieurs couches de données dans un mode vertical qui est la technique la plus nécessaire et la plus commune du traitement des données géographiques, ainsi que les opérateurs sur les attributs descriptifs qui transforment les valeurs existantes en de nouvelles valeurs comme: la classification d'image, l'agrégation, le changement d'échelle.. etc., et les opérations de transformation des informations qui produisent de nouvelles informations à partir des données géographiques existantes (Bouzekri, 2013).

Selon Khoumeri (2007) ; Les systèmes d'information géographique, sont définis aussi comme des outils d'aide à la planification et la prise de décision, constitués d'une part d'une base de données à référence spatiale, et d'autre part d'un ensemble de procédures techniques permettant l'acquisition de données, leurs traitements, mises à jour et archivage, ainsi que l'analyse des données et l'affichage des résultats. Un SIG intègre généralement cinq fonctionnalités de base dites "5 A":

- L'acquisition : pour la collecte des données grâce à des fonctions de saisie des données sous forme numérique
- L'archivage : grâce à un système de gestion de bases de données (SGBD)
- L'analyse : par des fonctions de manipulation, croisement et transformation des données spatiales au moyen de requêtes dans le SGBD
- L'affichage : pour la restitution des résultats par des fonctions de mise en forme et de visualisation
- L'abstraction : par des fonctions rendant compte de la modélisation de la réalité.

L'apport des SIG par rapport à la cartographie traditionnelle est, d'une part le stockage d'une quantité importante de données, et d'autre part une capacité de traitement de l'information accrue.

Malgré les avantages analytiques des SIG, dans la superposition et la transformation, les SIG ont plusieurs lacunes qui minimisent la fiabilité des résultats obtenus par l'application des fonctionnalités analytiques des SIG. Ces lacunes qui influent sur le domaine de l'aide à la décision sont justifiées par (Laarbi, 2000 ; Malczewski, 2004, Chakar, 2006).

La gestion environnementale est parmi les domaines d'étude qui nécessitent l'application du SIG, notamment en ce qui concerne l'étude des fléaux et des risques naturels tel que la sécheresse et la désertification.

Un des modèles les plus fameux dans le domaine de l'étude de la désertification est celui de MEDALUS (Mediterranean desertification and land use), qui présente une méthodologie adéquate pour l'étude du risque de la désertification en intégrant différents paramètres en prenant le Sol, la végétation et état socio-économique.

Ce modèle a ouvert la porte à plusieurs études ultérieurement, parmi les travaux les plus marquants on cite celui de Al Bakri et. *al* (2014) pour modéliser le risque de désertification en Jordanie, en intégrant trois autres modèle sous forme de couches à base de SIG :

- Couche d'érosion hydraulique en utilisant l'équation universelle de perte de sol (USLE)
- Couche d'érosion éolienne en utilisant le modèle « érosion éolienne et émission de poussière » (WE_DUST_EM).
- Couche de sécheresse en utilisant un indice de stress hydrique de l'évapotranspiration (EWSI).

En Algérie, plusieurs travaux ont porté sur l'étude de la désertification, la dégradation des terres et l'ensablement dans les zones arides et semi arides en appliquant les systèmes d'information géographiques ; Bensaid (2006), Benmessaoud (2009), Bouzekri (2015), Bouhata (2015).

Pour la sécheresse, la plupart des modèles sont basés sur la détection des anomalies de précipitation et de températures à partir des données climatiques sans faire appel à la cartographie et la modélisation spatiale.

Parmi les indices développé pour la modélisation de sécheresse on cite celui de Archad et.,*al* (2009), Zhang et., *al* (2015,) Watinee et., *al* (2015) qui ont développé une série des modèles de suivi de la sécheresse en intégrant des indices météorologiques, satellitaires et socioéconomiques.

Parmi les modèles adaptés par des organisations à l'échelle global on cite le modèle de sécheresse nationale (MSN) adopté par l'organisation de l'agriculture et agro-alimentation Canadienne (AAC) pour surveiller la fréquence et l'amplitude des sécheresses au Canada par

Ainsi que le modèle adopté par le centre de la gestion de la sécheresse dans le Sud-Ouest d'Europe (DMCEE) en 2012 qui utilise une superposition pondérée de plusieurs couches de paramètres liés au risque de la sécheresse tels que la pente, la disponibilité de l'eau souterraine, la durée d'ensoleillement, l'irrigation..etc., et le modèle proposé par l'observatoire du Sahara et du Sahel en 2009 pour la cartographie de la sécheresse dans les pays du Maghreb, qui utilise trois paramètres (Indice d'aridité, pression de pâturage, et la sensibilité du sol).

4.1.3. Analyse multicritère : Analytical Hierarchy Process (AHP)

En écologie, les études de vulnérabilité, de risque et des études d'impact sont des situations d'ordre décisionnel de nature multicritères (Bensaid, 2006). Dans ce genre d'étude émerge la nécessité de disposer une aide à la décision et fournir à un décideur des outils qui lui permettent de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue sont souvent contradictoires (Vincke, 1989).

L'aide à la décision est donc un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis, dans le cadre de décision multicritère, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'actions ou alternatives (Bouzekri, 2015).

Selon Roy (1985), l'analyse multicritère est *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part*.

Selon Bendjemaa (2004), la méthodologie poursuivie dans l'analyse multicritère peut être opérée en grandes quatre étapes :

- Dresser la liste des actions potentielles.
- Dresser la liste des critères à prendre en considération.
- Établir le tableau des performances.
- Agréger les performances.

Selon Guesdon (2011), dans l'analyse multicritère passe par quatre grandes étapes:

- Définition des solutions potentielles (Actions ou scénario) et désignation de la problématique (Tri, choix...etc)
- Analyse des conséquences des actions et évaluation de chaque action sur les critères (Tableau et performance).
- Modélisation des préférences globales et des procédures d'agrégation des performances (Critères à retenir, importance relative des critères).
- Synthèse multicritère (analyse de résultats, sensibilité ou robustesse).

Dans le cas fréquent où l'analyse des conséquences des actions potentielles a conduit à construire plusieurs critères, c'est l'analyse multicritère qui permet de donner des réponses au problème posé, chaque critère attribut un poids traduisant sa contribution dans la décision finale (Bouzekri, 2015).

L'analyse multicritère se fait selon trois approches :

- L'agrégation complète : C'est une démarche de classement des critères dont les principales méthodes sont la méthode des sommes pondérées, les moyennes pondérées, la combinaison linéaire et le processus hiérarchique d'analyse (AHP)
- L'agrégation partielle : C'est une démarche de surclasser des critères, telle que la méthode de ELECTRE
- L'agrégation locale : qui consiste d'abord à chercher une solution de départ puis explorer l'environnement de cette solution pour voir dans quelle mesure on pourrait aboutir à un meilleur résultat (Shärlig, 1973)

Le processus d'hiérarchie analytique est une méthode, créée par Saaty (1993), c'est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de la pondération de chaque critère. La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques (critères), deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée où on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela une échelle adéquate.

Pour une utilisation correcte Saaty (1982) a composé quatre étapes :

- Définir la problématique et l'objectif cible à atteindre.
- Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique (définir les critères de décision à partir de l'objectif cible, ainsi que les sous-critères dont les différentes combinaisons conduiraient aux alternatives.
- Mesurer les poids relatifs des critères en effectuant les combinaisons binaires et en déterminant les priorités par le calcul de l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie.
- Synthétiser les priorités par le calcul des poids globaux exprimé par le vecteur propre issu de la matrice de comparaison, analyser la cohérence des jugements, évaluer les résultats.

En premier, on commence par former une matrice de comparaison (dite matrice réciproque) dans laquelle on compare les critères deux à deux, en utilisant une échelle qui varie entre 1 et 9 selon l'ordre de l'importance ou le degré de contribution de chaque critère, on utilise pour cela une échelle dite « Echelle de Saaty », par exemple : un critère « A » à qui on attribue un poids de 9 par rapport à une autre critère « B » qui aura le poids de 1/9, a des dimension égale au nombre de critères utilisés.

Tableau 17: Matrice de comparaison et calcul des vecteurs propres

Critères	C_1	C_2	C_3	...	C_n	W_i
C_1	$1/C_1$	$W_{1,2}/\Sigma C_2$	$W_{1,3}/\Sigma C_3$	...	$W_{n1}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_1/n$
C_2	$W_{1,2}/\Sigma C_1$	$1/C_2$	$W_{2,3}/\Sigma C_3$	...	$W_{n2}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_2/n$
C_3	$W_{1,3}/\Sigma C_1$	$W_{2,3}/\Sigma C_1$	$1/C_3$	...	$W_{n3}/\Sigma C_n$	$\Sigma C_3/n$
...
C_n	$W_{1, n}/\Sigma C_1$	$W_{2, n}/\Sigma C_1$	$W_{3, n}/\Sigma C_1$	...	$1/\Sigma C_n$	$\Sigma C_n/n$
W_i	ΣC_1	ΣC_2	ΣC_3	...	ΣC_n	

Tableau 18 : Exemple d'une matrice de comparaison pour 5 critères

Critères	A	B	C	D	E
A	1	9	5	7	3
B	1/9 = 0.11	1	3	2	5
C	1/5 = 0.2	1/3 = 0.33	1	3	5
D	1/7 = 0.14	1/2 = 0.5	1/3 = 0.33	1	7
E	1/3 = 0.33	1/5 = 0.2	1/5 = 0.2	1/7 = 0.14	1
Total	1.78	11.02	9.53	13.04	21

Deuxièmement, on doit normaliser la matrice pour que la somme des éléments dans la même colonne donne l'unité (1) en divisant chaque élément par le total de sa colonne.

La dernière étape consiste à calculer le vecteur principal (eigenvector) normalisé en prenant la moyenne par ligne de la matrice normalisée. Les valeurs trouvées constituent les poids à accorder à chaque facteur lors de l'agrégation des critères. Dans le langage du AHP ceci est appelé le « le vecteur priorité ». Puisqu'il est normalisé, la somme de ses éléments est égale à l'unité (Cissokho ,2011)

Saaty a développé une mesure appelée « inconsistance » (illogisme) qui permet justement de déceler ces erreurs de jugement, chose particulièrement utile lorsqu'un grand nombre de critères est employé. Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, on calcule, alors, l'indice de cohérence (IC):

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

Où

n Est le nombre des éléments comparés

λ_{max} est une valeur calculée sur la base de la matrice de SAATY, des vecteurs propres et de n , c'est la somme des produits de chaque élément du vecteur avec la somme des valeurs par colonne de la matrice initiale.

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation :

$$RC = IC / AI$$

Avec $IC = (\lambda_{max} - N) / (N - 1)$, N est le nombre des critères

et AI est un indice aléatoire donné par Saaty (1989) définie selon le nombre de critère.

Le rapport entre IC et indice d'inconsistance aléatoire ne doit pas dépasser les 10%. Sinon il faut réévaluer notre jugement.

Il existe plusieurs modes pour l'intégration SIG-AMC lors de l'utilisation des différents logiciel et programmes d'analyse ; intégration indirect effectuée par un système intermédiaire

qui lie entre deux logiciels ; intégration encastrée où les deux logiciels restent indépendants car chaque logiciel a sa propre base de données, mais une interface du SIG unique pour les deux logiciels ; intégration complète des deux logiciels SIG et analyse multicritère dans un seul logiciel porte les fonctionnalités analytiques des SIG et les fonctionnalités d'analyse multicritère (Bouzekri, 2015).

Conclusion

La sécheresse et la désertification sont des aléas naturels qui menacent des millions de personnes dont plus de 80% vivent dans des pays pauvres ou en voie de développement, ces deux phénomènes sont généralement une combinaison de plusieurs facteurs ; le manque et la diminution des ressources en eau, l'approvisionnement du sol, la dégradation et la salinisation des terres avec une augmentation de la densité de population et une exploitation irrationnelle des ressources naturelles.

Du fait de sa situation géographique, ses conditions climatiques et caractéristiques démographiques, l'Algérie est parmi les pays menacés par ces deux catastrophes, et qui adopte depuis plus de trente ans des stratégies diverses pour y faire face, des stratégies qui nécessitent encore des études approfondies et des politiques de suivi.

L'évolution des techniques de suivi de la surface terrestre en l'occurrence les outils de géomatique, ainsi que le développement des méthodes de modélisation des différents phénomènes naturels au cours des dernières années a facilité les études de suivi des différents fléaux et a contribué à présenter aux chercheurs et aux décideurs plusieurs démarches pour la cartographie des vulnérabilités et des risques afin d'une meilleure prédiction, prévention et gestion.

Chapitre IV



Etude spatiotemporelle des
changements globaux de
la région d'El Hodna

Introduction

La localisation géographique et la structure des étages bioclimatiques font de l'Algérie un gisement relativement important de ressources génétiques. Cependant, la croissance démographique galopante, les conditions climatiques difficiles, la qualité des sols et leur dégradation constante ont diminué fortement l'autosuffisance alimentaire, entraînant une surexploitation des ressources naturelles et des pratiques culturelles non adaptées telles que le surpâturage, le défrichement et autres (Benderradji et al, 2006).

Ce chapitre a l'objectif d'utiliser l'outils de télédétection pour identifier l'impact des fluctue climatique et de l'action anthropique sur le paysage de la région d'étude, par l'étude de l'évolution spatiotemporelle de l'occupation du sol.

1. Choix et prétraitement des données

1.1. Donnée utilisée

Les données utilisées sont des images satellitaires obtenue du satellite Landsat, de trois différentes dates et capteurs (Figure 19 . Fluctuations des taux de précipitations annuelles de la station de M'sila (1988 – 2016)), fournis par l'institut des études géologique des états unis (United States Geological Survey) disponible pour observation et téléchargement, Ces images couvrent une scène de 3425500 ha dont la région d'étude est incluse (Path : 195, Row : 35), on a choisi sont acquise dans des différentes dates ; 19 Avril 2016, 25 Avril 2003, et 13 Avril 1987.

Tableau 19 : Caractéristiques des images utilisées

Satellite	Capteur	Résolution	Bandes spectrales	Longueur d'ondes
Landsat 5	ThematicMapper (TM)	Générale 30m	Bande 1 (Bleu)	0,45- 0,52µm
			Bande 2 (Vert)	0,52- 0,60 µm
			Bande 3 (Rouge)	0,63- 0,69 µm
			Bande 4 (Infra rouge)	0,76- 0,90 µm
			Bande 5 (Moyen infrarouge 1)	1.55-1.75 µm
			Bande 6 (Infrarouge thermique)	10.42-12.50 µm
			Bande 7 (Moyen Infrarouge 2)	2.08-2.35 µm
Landsat 7	ETM+	Générale 30 m	Bande 1 (Bleu)	0,45- 0,515 µm
			Bande 2 (Vert)	0,52- 0,605 µm
			Bande 3 (Rouge)	0,63- 0,69 µm
			Bande 4 (Infra rouge)	0,76- 0,90 µm
			Bande 5 (Moyen infrarouge 1)	1,55- 1,75 µm
			Bande 6 (Infrarouge thermique)	10,42-12,50 µm
			Bande 7 (Moyen Infrarouge 2)	2,09- 2,35 µm
			Bande 8 (Panchromatique)	0,50- 0,90 µm
Landsat8	OLI (Operational land manager) .	Générale : 30m	Bande 1 (Aérosol)	0.435-0.451 µm
			Bande 2 (Bleu)	0.452- 0.512 µm
			Bande 3 (Vert)	0.533- 0.590 µm
			Bande 4 (Rouge)	0.636- 0.673 µm
			Bande 5 (Infrarouge)	0.851- 0.879 µm
			Bande 6 (Moyen Infrarouge 1)	1.566- 1.651 µm
			Bande 7 (Moyen Infrarouge 2)	2.107- 2.294 µm
			Bande 8 (Panchromatique)	0.503-0.676 µm
			Bande 9 (Cirrus)	1.363- 1.384 µm
			Bande 10 (Infrarouge Thermique TIRS1)	10.60-11.19 µm
			Bande 11 (Infrarouge Thermique TIRS2)	11.50-12.51 µm

1.2. Prétraitement et calibration des images

Dans une étude de détection de changements, les images utilisées doivent présenter des caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que les différences provenant de leur comparaison puissent être associées à de réels changements d'état du territoire et non à des artefacts liés aux conditions de prise de vues des images (Lounis et Belhadj, 2005).

1.2.1. Correction Radiométrique

La normalisation radiométrique unifie les informations spectrales dans le même système métrique (Biday et Bhosle, 2011), il existe de nombreuses approches pour obtenir une correction radiométrique, un ensemble de méthodes d'étalonnage des images à unités de réflectance standard en utilisant des rayonnements atmosphériques (Fraser et al., 2005)

La correction radiométrique de l'imagerie satellitaire est divisée en deux grandes catégories, à savoir absolu et relatif, la correction radiométrique absolue convertit le nombre numérique d'un pixel à un pourcentage de valeur de réflectance à l'aide de modèles atmosphériques (Richter, 1990), les procédures de correction radiométriques relatives consistent à appliquer aux images le modèle d'inversion afin de corriger les effets atmosphériques et calculer la réflectance pour l'image de référence par la méthode des points noirs (Belhadj, 1998), puis à déterminer la corrélation à partir des sites invariants, entre l'image de référence et l'image à corriger (Lounis et Belhadj, 2005).

La calibration tente de compenser les erreurs radiométriques contre les défauts du capteur, les variations de l'angle de balayage et le bruit du système pour produire une image qui représente un véritable rayonnement spectral au niveau du capteur.

1.2.2. Correction Atmosphérique FLAASH

FLAASH est un outil de correction atmosphérique de premier principe qui corrige les longueurs d'ondes dans les régions infrarouges visibles à infrarouge proche et à ondes courtes, jusqu'à $3\mu m$. FLAASH fonctionne avec la plupart des capteurs hyper spectrales et multi spectrales. La récupération de vapeur d'eau et d'aérosol n'est possible que lorsque l'image contient des bandes dans des positions de longueur d'onde appropriées. Cet outil peut corriger les images collectées dans les géométries de visualisation verticale ou inclinée

FLAASH-IDL est commercialement disponible en tant que complément au connu logiciel Environnement pour Visualisation d'Images (ENVI) vendu par ITT Exelis Visual Information Solutions (Perkins et al., 2012).

2. Suivi du changement spatiotemporel de l'occupation du sol

2.1. Exploitation des données cartographiques et thématique

Pour pouvoir réaliser des cartes d'occupation du sol et suivre le changement spatiotemporel de l'état environnemental de la région il est nécessaire de revenir aux différents documents cartographiques anciens et récents.

Les cartes utilisées dans cette étape sont :

- Carte topographique de la région de Barika de l'année 1955, à l'échelle 1 :250000.
- Cartes topographiques des régions de M'sila et de la région de Maadhid de l'année 1957, à l'échelle 1 : 50000.
- Carte topographique de la région de Boussaâda de l'année 1932 à l'échelle 1 : 200000.
- Carte d'occupation du sol de la wilaya de M'sila réalisée par les services de la conservation des forêts de la wilaya de M'sila de l'année 2014 à l'échelle 1 : 240000.
- Cartes d'occupation du sol des hauts plateaux du centre et de l'Ouest de l'année 2007, réalisé par le Bureau National d'Etude sur le développement rural (BNEDER).
- Cartes d'occupations du sol pour chaque commune de la wilaya de M'sila, de l'année 2014, à l'échelle 1 :140000, réalisée par la conservation des forêts de la wilaya de M'sila (Monographie des communes).
- Cartes pédologique, géologique et cartes des essences forestières réalisées dans le cadre d'une étude consacrée à la caractérisation et la délimitation des zones montagneuses d'El Hodna, réalisée par : Territoire Aménagement. Développement (Bureau d'Ingénierie et d'études Techniques T.A.D) de l'année 2008.

2.2. Missions de prospection et d'observation sur terrain

Le but de cette étape est de connaître, prospecter, et délimiter le terrain d'étude. Ces missions comportent la prise des photos numérique, des coordonnées de points de positionnement (GPS) en notant les descriptions générales de la parcelle : le type d'occupation de sol (Maquis, steppe, terres agricole, agglomération...etc.), l'aspect géomorphologique et hydrographique et le type de recouvrement végétale en prenant des échantillons de végétation et de sol (pour des analyses ultérieures) si nécessaire.

Les sorties sur le terrain d'étude ont été réalisées sur un laps de temps de trois ans durant la saison printanière des années 2014, 2015, 2016, ainsi que la saison automnale de l'année 2015, 2016.

2.3. Classification supervisée

L'évolution qu'a connue le domaine de la télédétection spatiale et de la micro-informatique ces dernières décennies a rendu cette « spécialité » ou technique un moyen très efficace et économique pour collecter et analyser les informations concernant des phénomènes diversifiés. Le but de l'analyse et de l'interprétation d'une image satellitaire est d'identifier, mesurer et analyser les objets contenus dans l'image afin de pouvoir extraire l'information utile (Raissouni, 2012).

La classification d'une image satellitaire est basée sur l'identification et le regroupement de différents thèmes d'après leurs signatures spectrales, Dans le cas de la classification supervisée, l'opérateur définit a priori les classes qu'il désire constituer et recueille un certain nombre de réalités terrain se rapportant à chacune des classes qu'il envisage de mettre en évidence (Bensaid, 2006).

Une classification supervisée par maximum de vraisemblance a été appliquée sur une composition colorée de trois années (1987, 2003, 2016), dans cette étude l'occupation du sol est classifiée en onze (11) classes : affleurements rocheux, agglomérations urbaines, Terres agricoles, Steppes à Alfa, Parcours steppiques, barrage, Chott El Hodna (Sebkha) présenté par l'étendu de la zone humide et les zones périphériques couvertes par des croutes de sol salé, halophytes, forêts et maquis, dunes de sable, et sol nu.

La steppe à Alfa (*Stipa tenacissima*) est ressortie comme une classe indépendante des parcours steppiques en vue de sa dominance par rapport aux autres formations végétales dans la région (steppe à armoise, à sparte, a remt) et ainsi pour montrer l'intense régression qu'elle subisse.

2.4. Validation des résultats et matrice de confusion

La classification supervisée appliquée sur les composites colorés des années 1987, 2003, et 2016 a abouti à une cartographie de Onze classes d'occupations du sol pour les trois dates, les matrices de confusion montrent un indice de kappa de 0.8709, 0.851, 0.902 (Voir annexes).

Le diagramme ci-dessous résume les étapes de l'élaboration des cartes d'occupations du sol et le suivi du changement spatiotemporel.

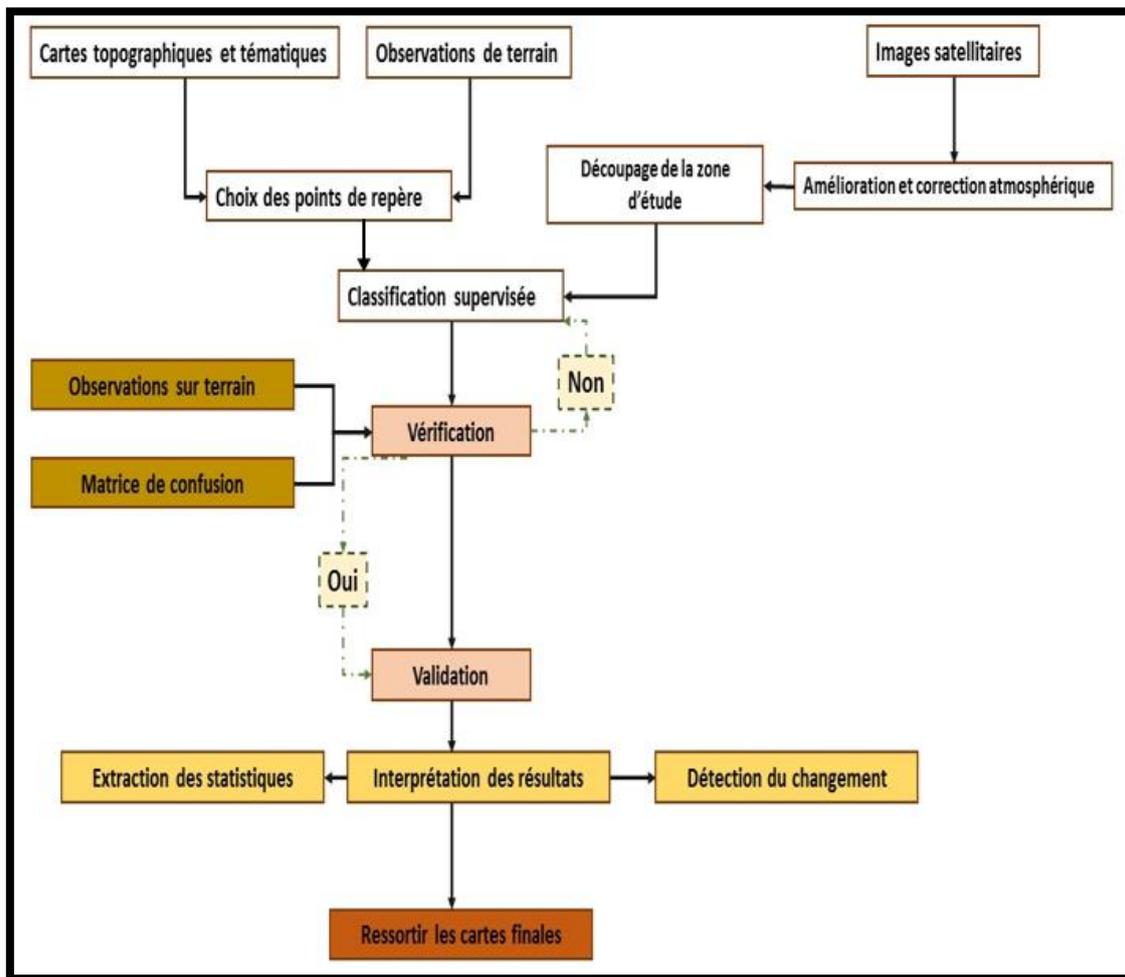


Figure 44 : Diagramme méthodologique du suivi des changements spatiotemporels de l'occupation du sol.

2.5. Résultats

Les résultats de la cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre les années 1987, 2003, et 2016 sont présentés par la Figure 45, puis rapportés en chiffres sur le Tableau 20 : Dynamique des unités d'occupation du sol en chiffres entre 1987 – 2003 et 2016 .

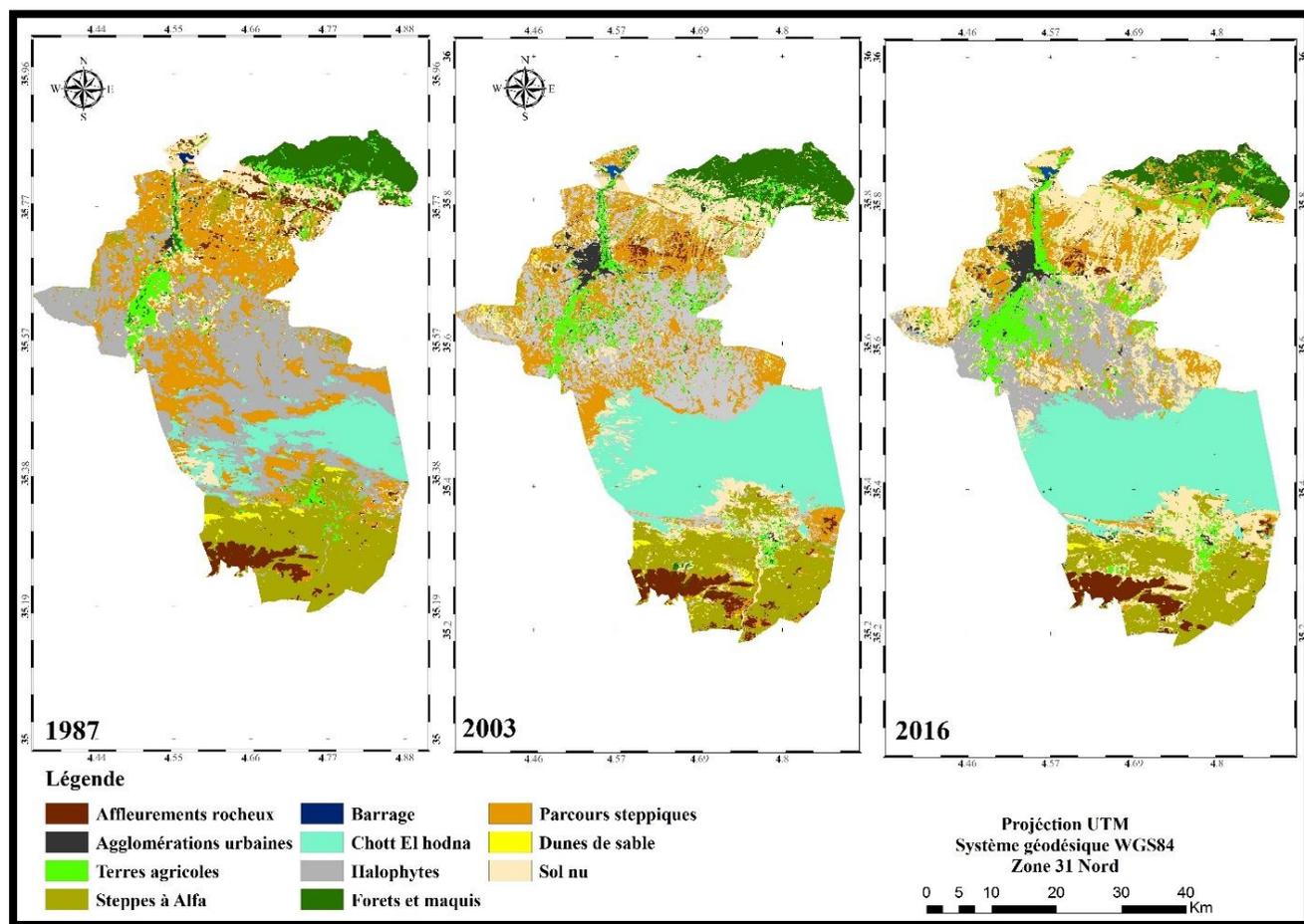


Figure 45 : Cartes d'occupation du sol en 1987- 2003- 2016

Tableau 20 : Dynamique des unités d'occupation du sol en chiffres entre 1987 – 2003 et 2016

Classes	1987		2003		2016	
	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)
Affleurements rocheux	3.85	7819.91	3.89	7899.57	3.92	7954.75
Agglomérations urbaines	0.53	2296.55	1.31	2651.52	2.71	5493.63
Terres agricoles	4.34	8811.27	4.76	9667.27	7.67	15570.38
Steppes à Alfa	16.54	33556.29	11.65	23643.75	9.81	19905.57
Barrage	0.10	202.47	0.12	234.39	0.10	207.52
Etendu du Chott El Hodna	8.28	15590.28	21.46	43535.43	23.32	47321.56
Halophytes	27.29	55368.80	19.19	38934.98	11.90	24144.85
Maquis et forêts	6.32	12821.55	7.48	15182.66	4.10	8323.99
Parcours steppiques	23.69	48061.20	16.90	34293.73	11.48	23295.26
Dunes de sable	0.65	1325.43	0.70	1410.94	0.24	491.20
Sol nu	8.40	17042.62	12.54	25442.17	24.74	50187.64
total	100.00	202896.36	100.00	202896.36	100.00	202896.36

2.5.1. Etat d'occupation du sol en 1987

En 1987, les halophytes étaient la classe dominante dans la zone d'étude sur une extension de 27.29% de 55368.80 ha soit 27.29% de la superficie total, suivis par les parcours steppiques qui occupaient 23, 69%, et les steppes à Alfa par 16.54%.

Les terres agricoles formaient 4.34 % seulement localisées principalement sur les communes de Ouled madhi et M'sila au long de Oued El K'sob cela est dû aux techniques d'irrigation traditionnelles utilisées à l'époque où Oued El K'sob ainsi que Oued M'cif au Sud de la zone d'étude présentaient la seule ressource en eau d'irrigation, à côté de quelques puits traditionnels, les terres agricoles au niveau de la commune de Maadhid reposent principalement sur l'arboriculture.

Le sol nu formait 8,15% de la superficie total localisé sur le piémont de Maadhid, les forêts et les maquis formaient 6.32% de la zone d'étude soit 12821.55 ha principalement sur les monts de Maadhid.

2.5.2. Etat de l'occupation du sol en 2003

Le premier changement à remarquer entre l'occupation du sol de l'année 1987 et 2003 est l'augmentation de l'étendue du Chott El Hodna (Sebkha) jusqu'à 44225.28 ha soit une augmentation de 28635 ha, ainsi que l'augmentation de la surface occupée par des agglomérations urbaines (jusqu'à 7.80%), en l'occurrence l'évolution de la ville de M'sila au centre de la zone d'étude (Chef-lieu de la wilaya),

De l'autre côté, l'accroissement de la surface d'agglomération et l'augmentation de l'activité anthropique a conduit à une dégradation de la steppe à Alfa (diminution d'environ 9912 ha), les halophytes (diminution de 16433 ha) et les parcours steppiques (diminution de 13767), et par conséquent une augmentation de la surface du sol nu notamment autour du Chott et sur les piémonts de Maadhid de l'ordres de 8400 ha.

La surface des terres agricole a connu une légère augmentation jusqu'à 4.76% soit 9667.27 ha, de même la surface des forêts et des maquis a connu une augmentation jusqu'à 15182.66 ha, il est à signaler que la superficie occupée par les affleurements rocheux et le barrage de Oued El K'sob a connu une augmentation de l'ordre de 0.04 % et 0.02 à respectivement.

2.5.3. Etat de l'occupation du sol en 2016

Jusqu'à l'an 2016, la surface d'agglomérations a augmenté jusqu'à 5493.63 ha, ainsi que l'étendue de la sebkha qui a continué son accroissement jusqu'à 47321.56 ha soit 23,32 %, et le sol nu à 50187.64 soit 24.74%, du même la surface occupée par les terres agricoles a augmenté jusqu'à 15570.38 ha soit 7.67%.

En revanche, les classes des parcours steppiques, les steppes à Alfa, les forêts, et les halophytes ont connu une dégradation intense avec des pertes des milliers d'hectares dans chaque classe.

Les unités d'occupation qui ont connu une certaine stabilité sont celle du barrage et des affleurements rocheux, tandis que les dunes de sables ont connu une diminution marquante d'environ 900 ha.

2.6. Discussion

Au vue de ces résultats on peut constater que les unités d'occupation du sol peuvent être divisées en trois catégories : celle qui ont subi une dégradation, celle qui ont gardé une certaine stabilité (Barrage et Affleurement rocheux), et celles qui ont subi un accroissement.

L'étendue du chott El Hodna a connu un accroissement entre les trois dates, les facteurs climatiques sévères, l'augmentation de la température et de l'évapotranspiration, la modification du régime pluvieux ainsi que l'action anthropique et le surpâturage ont joué un rôle très important dans cette dynamique en causant la mort des halophytes et des parcours et par conséquent faciliter l'extension du chott.

Les agglomérations urbaines ont subi une croissance estimée des milliers d'hectares entre 1987 et 2016, cette extension est le résultat de l'augmentation des besoins socio-économiques et l'émergence de la ville de M'sila ainsi qu'une série de centres urbains au cœur de la région d'El Hodna situées sur des axes routiers qui lient entre l'Est et l'Ouest du pays (Barika- M'sila, M'sila-Bourdj Bou Ariridj, M'sila-Boussaâda, M'sila-Medea, M'sila-Setif), ces agglomérations ont connu une évolution de population très rapide durant cette période suite aux événements politiques et la situation sécuritaire du pays pendant les années quatre-vingt-dix, qui a mené à une exode vers les centres urbains.

La surface des terres agricole a connu une légère augmentation entre 1987 et 2003 (Figure 46) puis une augmentation d'environ 3% entre 2003 et 2016 (Figure 47), vers le début des années 2000 , le secteur agricole a connu un certain développement caractérisé par l'utilisation de nouvelles techniques d'irrigation et d'exploitation où le nombre de forage a multiplié (Abdesselam, 2013), les politiques de mise en valeur des terres a permis de l'exploitation irriguée des terres et l'encouragement des plantation arboricoles au détriment de la réalisation des exploitations pastorales dont la steppes a plus besoin (Mouhous, 2005) , cela a réanimé le secteur agricole dans la région, cependant il est important de signaler que la mal gestion des eaux d'irrigation et d'exploitation des nappes profondes peut générer des problèmes de salinisation des terres.

Du même côté, la diminution des exploitations forestière entre la période 1987-2003 a permis à la surface occupée par des forêts et des maquis de s'accroître d'environ 2300 ha, mais le retour des activités agricoles et l'évolution urbaine notamment celle de la commune de Maadhid au Nord de la zone d'étude a causé une perte de 6858.67 ha de forêts, remplacée principalement par des terres agricoles et des agglomérations.

La combinaison des facteurs climatiques et anthropiques ont conduit à la dégradation des formations steppiques de l'ordre de 13650 ha pour les steppes à Alfa, 24765 ha pour les parcours steppiques et 312223 ha pour les halophytes, en conséquent la surface des sols nus a augmenté de plus de 30000 hectare entre 1987 et 2016 (Figure 48).

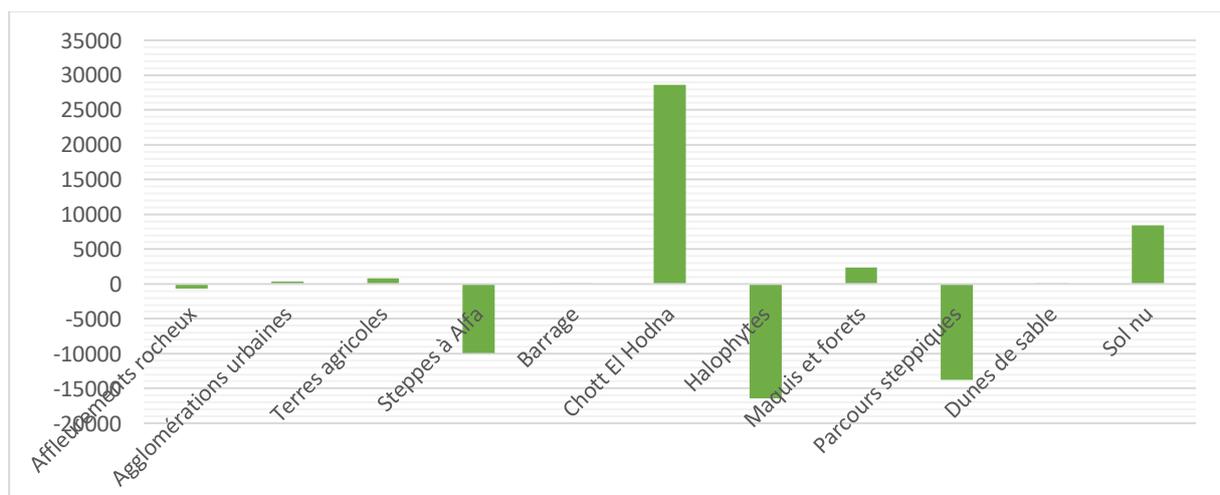


Figure 46 : Différences des surfaces d'occupations de sol entre 1987 – 2003 en hectare

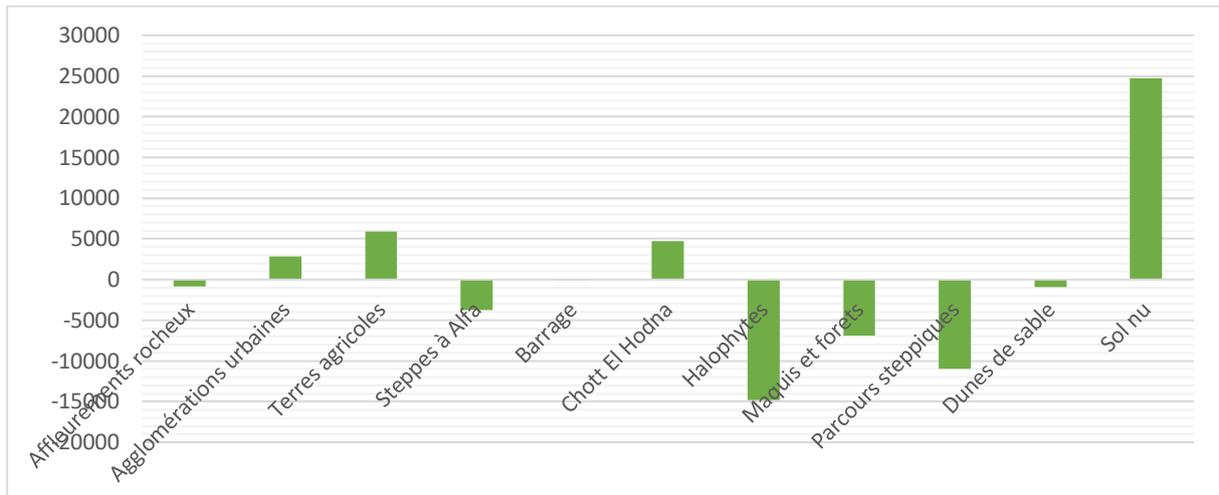


Figure 47 : Différence entre les surfaces d'occupation du sol entre 2003-2016 en hectare.

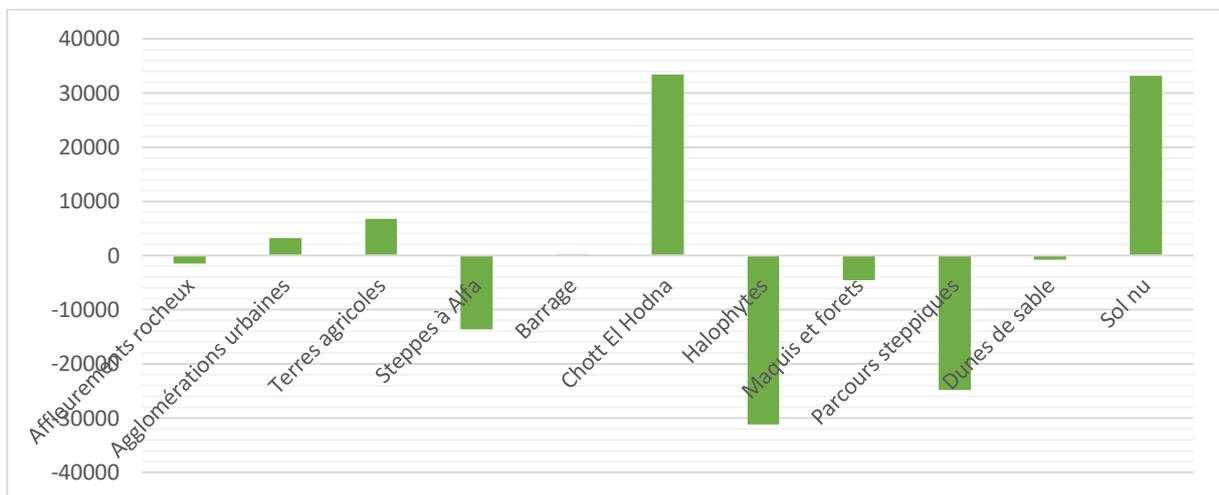


Figure 48 : Différence entre les surfaces d'occupation du sol entre 2016-1987 en hectare.

3. Analyse du changement des unités d'occupation du sol entre 1987 et 2016

Les résultats de l'étude de changement d'unité d'occupation du sol sont cartographiés dans la Figure 49, puis illustré sur une matrice de transition.

Le taux de non changement est estimé de 40.99% de la zone d'étude, ce qui fait que près de 59% de la surface a subi un changement d'occupation du sol entre l'an 1987 et 2016, cette analyse illustre l'évolution de chaque unité dans le temps et dans l'espace par rapport aux autres unités (classe d'occupation).

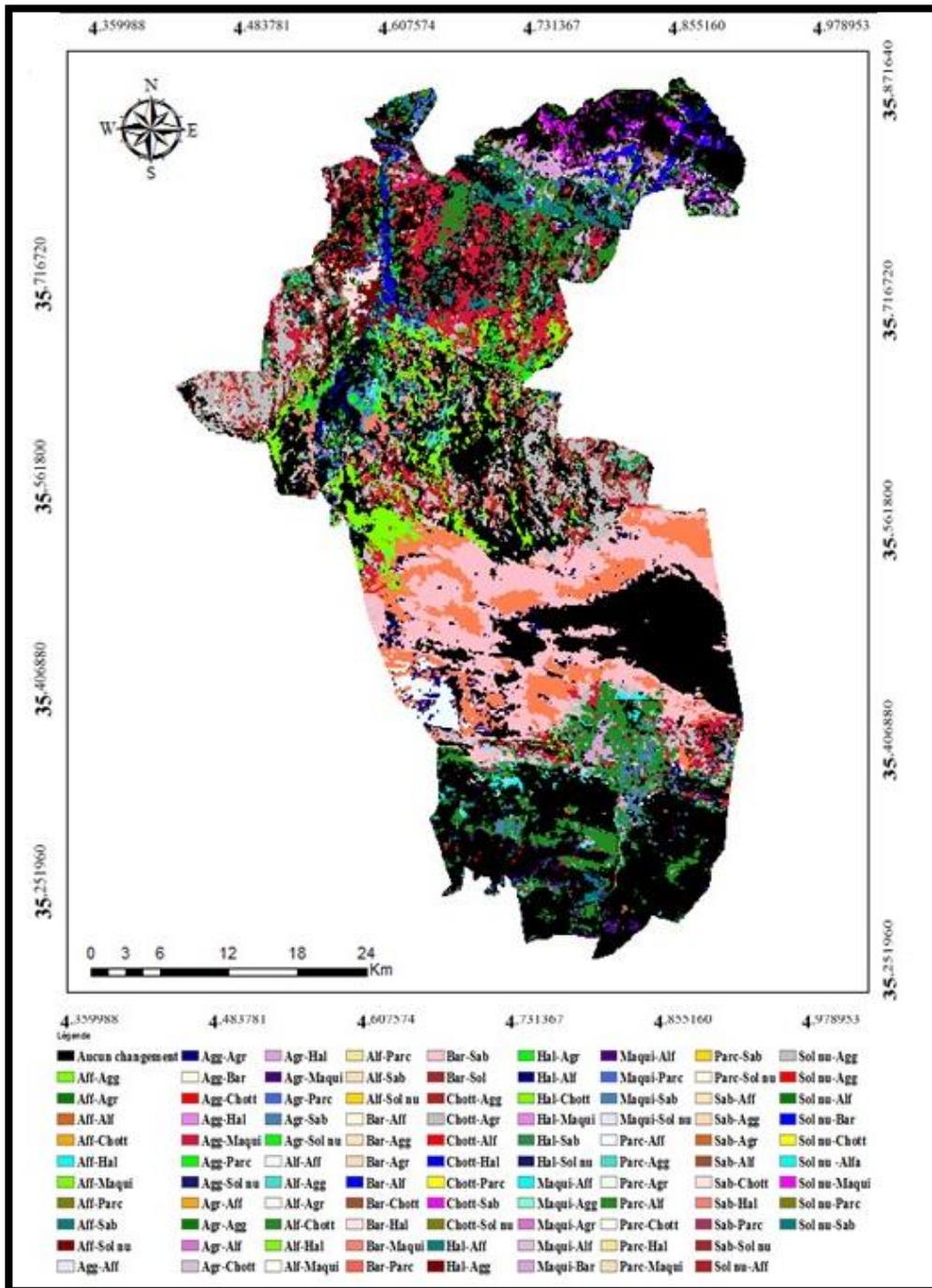


Figure 49 : Carte des unités de changements d'occupation du sol entre 1987 et 2016

(Aff : Affleurements rocheux, Agg : Agglomérations urbaines, Agr : Terres Agricoles, Alf : Steppes à Alfa, Bar : Barrage, Chott : Chott El Hodna, Hal : Halophytes, Maqui : Forêts et maquis, Parc : Parcours steppiques, Sab : Dunes de sable, Sol nu : Sol nu)

3.1. Les unités sans changements

Les surfaces qui n'ont pas changé sont localisées sur Chott el Hodna, les anciennes dunes de sables, des affleurements rocheux et des parties de djebel Maadhid et de la steppe à Alfa au sud du chott formant une surface de 44850.56 ha soit environ 22% de la zone d'étude.

3.2. Les affleurements rocheux

La surface occupée par les affleurements rocheux n'a pas vraiment changé au cours du temps ; seulement 3283 ha ont changé, dont 94.15 ha sont devenu des agglomérations urbaines, 224.64 ha sont transformé en terres agricoles, 118 ha sont envahi par les steppes à Alfa, 2 ha par le Chott, 22 ha par les halophytes, et 72 ha par les forêts, la plus large superficie est celle de la transition en sol nu estimée de 2023 ha, les affleurements rocheux ayant changé sont situés près de la villes de M'sila et dispersée autours des monts de Maadhid puis planté

3.3. Les agglomérations

La surface des agglomérations urbaines ayant transformé en d'autres unités d'occupations de sol est estimé de 2025 ha seulement, cela est dû à l'urbanisation très intense dans la région, comme il a été mentionné précédemment, la classe des agglomérations est en évolution très rapide, ce sont les agglomérations urbaines qui envahi d'autres types d'occupation et non pas le contraire.

3.4. Les terres agricoles

Environ 5162 ha de terres agricole ont subi une transformation vers d'autres types d'occupation du sol pendant la période 1987-2016, 375 ha sont devenu des terres agricoles, 657.39 ha sont envahi par les halophytes, 1226 ha par des parcours steppiques et 2383.53 ha sont devenu des sols nus, le taux de changement est moyen par rapport aux autres classes, les terres agricoles ont en revanche remplacé des larges superficies de forêts et de formations steppiques.

3.5. Les steppes à Alfa

Près de 14893.12 ha d'Alfa sont remplacé par d'autres types d'occupation du sol, 10818.07 ha sont remplacés par le sol nu, 1430.44 ha, par les parcours steppiques, les

agglomérations et les affleurements urbaines ont remplacé respectivement 347.04 ha et 729.51 ha, cette perte est le résultat de l'évolution des constructions urbaines et l'action anthropique très intense, ainsi que les conditions climatiques qui deviennent de plus en plus défavorables pour la durabilité et la résilience des écosystèmes steppiques.

3.6. Le barrage d'Oued El Ksob

Le barrage a connu une légère modification d'étendue, où 3.32 ha sont transformés en agglomérations urbaines sur ses périphéries, 1.16 ha en terres agricoles, 2.15 ha en maquis ce qui fait une surface totale d'environ 7.28 ha est modifiée entre 1987 et 2016.

3.7. Chott El Hodna

D'après la matrice de transition et la carte des changements on remarque que la surface Chott El Hodna (Sebkha) n'a pas été envahi ou remplacée par d'autres unités d'occupation, tandis de l'étendue a éliminé des milliers d'hectares de steppes.

3.8. Les halophytes

C'est une des classes qui ont subi une large modification entre les deux dates ; 1286.19 ha sont remplacés par des agglomérations urbaines autour de la ville de M'sila, Ouled Madhi et Souamaa, 2591.72 ha remplacés par des terres agricoles sur la plaine de M'sila, 18978.15 ha sont envahi par le chott (sebkha), et 13016.98 sont transformés en sols nus, la surface totale des halophytes qui a subi une transition est de 40455.58 ha.

3.9. Les forêts et les maquis

La surface totale des forêts ayant subi une transition est estimée 4690.98 ha, dont 2098.45 ha sont perdus et remplacés par des terres agricoles, 1438.98 ha par des parcours steppiques, et 591 ha par le sol nu suite à une déforestation intense notamment au niveau de la commune de Maadhid où plusieurs hectares de forêts sont devenus des terres agricoles.

3.10. Les parcours steppiques

Près de 38018.26 ha de parcours entre 1987 et 2016, 828.80 ha sont devenus des affleurements rocheux, 13854.69 ha sont devenus des sols nus, 7309.05 ha des halophytes et 11276.81 ha sont envahis par l'étendue du chott.

3.11. Les dunes de sables

Les dunes de sables situées au sud de la zone d'étude au niveau de la commune de M'cif, n'ont pas eu une large dynamique durant la période d'étude ; 995 ha est la surface ayant subi une modification dont près de 260 ha sont remplacés par des formations steppiques suites aux travaux de fixations des dunes, 205 ha sont exploités pour devenir des terres agricoles.

3.12. Le sol nu

C'est l'unité qui a subi le plus de changement, d'une superficie de 10384.33 ha dont 2500 ha sont devenues des terres agricoles, 1703.38 ha font aujourd'hui partie du chott (sebkha), 1340 ha sont envahis par les halophytes et 3383.29 ha par les parcours steppiques.

Tableau 21 : Matrice de transition d'occupation de sol entre 1987 et 2016 (superficie en ha)

	Aff	Agg	Agr	Alf	Bar	Chott	Hal	Maqui	Par	sable	Sol nu
Aff	0.00	3.60	2.70	729.52	0.00	0.00	4.50	58.10	828.81	0.00	188.68
Agg	94.16	0.00	375.10	347.04	3.33	27.16	1286.19	491.20	1616.51	36.15	875.03
Agr	224.65	130.76	0.00	1322.71	1.17	5.66	2591.72	2098.45	2684.44	5.85	2500.26
Alf	118.98	0.00	375.10	0.00	0.00	0.09	25.18	3.42	445.79	553.98	202.34
Bar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.12
Chott	2.07	1317.40	22.39	81.93	0.00	0.00	18978.15	0.00	11276.82	34.26	1703.38
Ha	22.03	95.51	657.40	13.76	0.00	13.04	0.00	9.35	7309.06	0.00	1340.60
Maqui	72.21	2.88	119.79	0.54	2.16	1.26	0.00	0.00	0.09	0.00	173.75
Par	725.47	298.66	1226.84	1430.44	0.63	44.16	4540.17	1438.99	0.00	25.00	3383.30
Sab	0.00	0.00	0.00	149.11	0.00	0.00	12.68	0.00	2.07	0.00	2.88
Sol nu	2023.81	176.80	2383.53	10818.08	0.00	59.09	13016.98	591.48	13854.69	339.76	0.00

Conclusion

Ce chapitre, a présenté une analyse de l'évolution d'occupation du sol et du dynamique du milieu pendant une période de 29 ans, les résultats les plus marquantes sont l'augmentation surfaces occupée par un sol nu de d'environ 16.34% entre 1987- 2016 soit 33145.02 ha ainsi que et les surfaces occupées par des terres agricoles durant la période 1987- 2016 d 3.33% soit 6759.12 ha, du même l'étendue de la dépression saline de Chott El Hodna a triplé pendant la même période, en revanche, les formations steppiques et les maquis de la zone d'étude ont subi une dégradation intense notamment entre 2003 et 2016, cela est conséquent du défrichement des écosystèmes et de l'expansion urbaine au détriment des terres agricoles et des forêts. .

Chapitre V



Approche indicielle pour le
suivi de l'évolution de la
zone d'étude

Introduction

Le suivi quantitatif de l'état environnemental de la surface de la terre est un des buts principaux de la télédétection, ce qui fournit un complément des données météorologiques qui peuvent avoir certaines lacunes.

Les indices de la végétation et du sol sont largement utilisés pour analyser le changement de l'environnement en particulier dans le contexte de la sécheresse et de l'évaluation des risques de dégradation des terres.

L'objectif principal de ce chapitre est d'offrir une approche indicielle pour le suivi quantitatif de la désertification et de la sécheresse dans la région d'El Hodna, A travers les indices de végétation et du sol calculés à partir des images satellitaires ainsi que des indices météorologiques.

Afin de calculer les différents indices suivant nous avons choisi que calculer la moyenne annuelle de chaque scène pour trois dates (1987, 2003, et 2016), afin d'avoir des résultats adéquates et des valeurs de moyennes annuelles et non pas d'un seul mois ou jour.

1. Indice normalisé et différencié de végétation (NDVI)

Cet indice proposé pour la première fois par Rouse et al., en 1973, qui vise à analyser l'état, la densité, la distribution et l'état sanitaire du couvert végétal, c'est l'indice le plus utilisé lors des études de végétation, de détection de sécheresse, d'occupations du sol, d'épidémiologie et de dégradation des terres (Chilar et al., 1997, Goward et al., 1991, Bokusheva et al., 2016, Watinee et al., 2015), L'NDVI mesure le taux total de la biomasse verte dans chaque pixel de l'image satellitaire (Bokucheva, 2016). Le NDVI est calculé à partir de la soustraction au canal proche infrarouge (où la végétation a des fortes réflectances) le canal Rouge (les surfaces minérales ont des forte réflectance) selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Où :

PIR : Canal infra-rouge, *R* : Canal rouge

Les valeurs de cet indice varient entre -1 et 1, des valeurs élevées de NDVI indiquent une végétation dense, en bonne état sanitaire et bien irrigué, par contre, les périodes sèches sont caractérisées par un manque de ressources en eau, et une végétation en stress lié aux conditions hydrique et thermal défavorables, résultant en valeurs faibles de l'indice NDVI.

Les valeurs de l'NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondent aux surfaces occupées par les nuages, l'eau et la neige pour lesquelles a une réflectance plus élevée dans le rouge que dans le proche infrarouge, pour les roches et les sols nus les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de zéro (influence des minéraux par apport à l'activité chlorophyllienne) (Bouzekri, 2015).

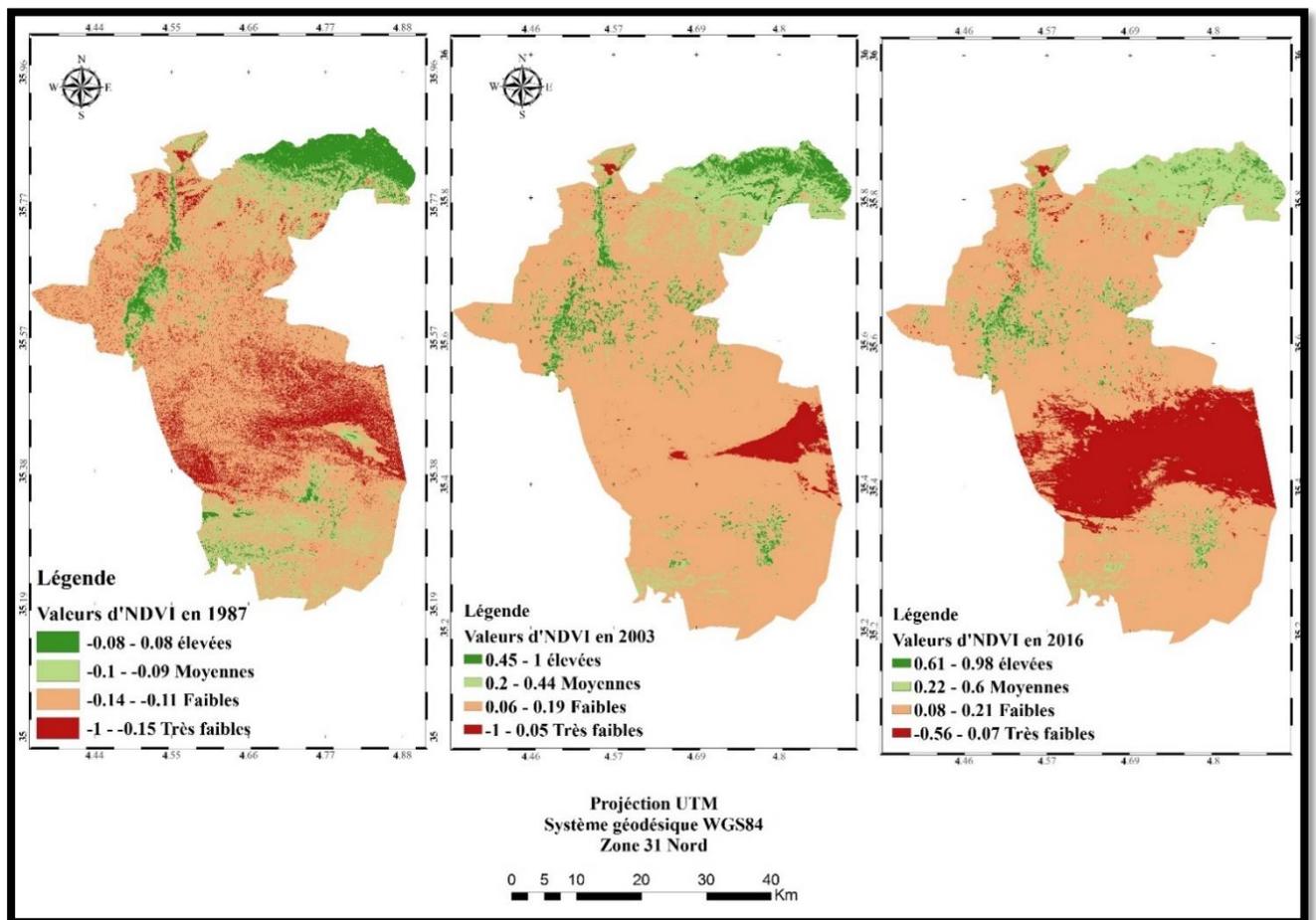


Figure 50 : Carte de l'indice NDVI des années 1987, 2003, 2016.

Les valeurs de l'indice NDVI sont classées en quatre catégories : Faibles, moyenne, élevées, très élevées.

En 1987 les valeurs élevées occupaient une surface de 11688.84 ha ces valeurs présentent la région forestière de Maadhid et les terres agricoles tout au long d'Oued El k'sob, ainsi que sur la commune de M'cif et Djebel Meharga au sud, les régions à valeurs moyennes occupaient 28660.75 ha soit environ 40% de la zone d'étude réparties sur une large partie du sud de la zone d'étude qui présente des steppes notamment des steppes à Alfa, ainsi que les piémonts de Maadhid, les surfaces à valeurs faibles de l'indice NDVI occupaient 162355.80 ha, réparties sur le reste de la région qui présente des halophytes, des parcours steppique, et des champs abandonnés. Les zones à valeurs faible d'NDVI couvraient seulement 190.95 ha (0.09 % de la superficie totale) présentés par l'eau du barrage El K'sob et des parties de sol nu et le chott.

L'an 2003 qui a connu une certaine augmentation de la surface agricole a connu une diminution de la surface à valeurs élevée d'NDVI vers 60920.71 ha répartie sur les forêts de Maadhid et les terres agricoles, la classes à valeurs moyenne occupaient 97979.24 ha réparties sur les piémonts de la région montagneuse de Maadhid et les périphéries des terres agricoles. Les régions à valeurs faibles d'NDVI occupaient 33421.35 ha réparties sur une presque le reste de la zone d'étude (parcours, steppes, halophytes...etc), tandis que les valeurs très faible d'NDVI occupaient une surface de 10575.051 ha soit 5.21 % de la zone d'étude présentées par les eaux du barrage El K'sob, et une partie du Chott El Hodna.

En 2016, les surfaces à valeurs élevées ont également continu leur diminution vers 60063.978 ha distribuée sur les terres agricoles des communes de M'sila, Ouled madhi, Souamaa, une partie des monts de Maadhid. Les valeurs moyennes de l'NDVI sur les steppes et les piémonts de Maadhid sont rétrécies d'une façon remarquable, suite à la dégradation de la steppe occupaient 83446.06 ha sur les périphéries des forêts et les terres agricoles, les valeurs faibles occupaient 45450.027 ha et les valeurs très faibles occupaient 13936.28 ha d'une augmentation de 3361 ha par rapport à l'année 2003 et de 13745.33 ha par rapport au 1987.

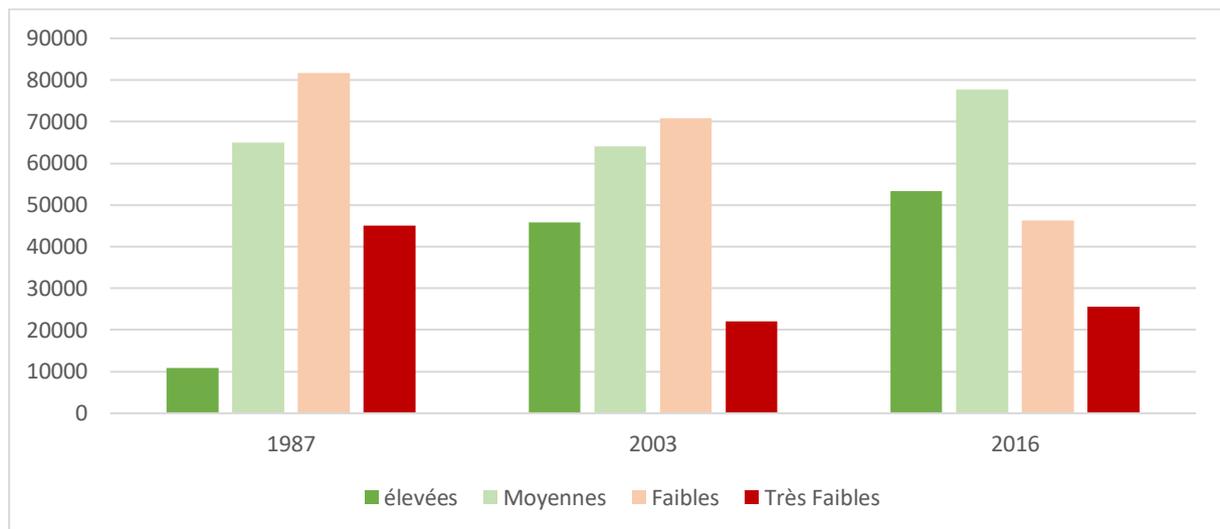


Figure 51 : La superficie des classes de l'NDVI par hectare pour les années 1987, 2003, 2016.

2. Indice de rougeur

Appelé aussi indice de fer ferrique, il constitue un des indices les plus utilisés en télédétection pour analyser les signatures spectrales des sols, cet indice est fonction de la couleur des surfaces, il est surtout plus sensible à la présence des matériaux de couleur rouge dans le sol, donc il traduit la présence d'oxyde de fer dans le sol (Bouzekri, 2015).

L'indice de rougeur est considéré parmi les indices les plus pertinents par rapport à l'état de dégradation du milieu (Escadafal, 1996). Cet indice traduit la présence de matériaux de couleur rouge dans les sols, comme par exemple les oxy-hydroxydes de fer qui recouvrent souvent les grains de sable par opposition aux croûtes et encroûtements gypseux qui sont d'une couleur blanchâtre (Ghram-Massedi et Delaître, 2017).

Dans le cas des zones arides, où la matière organique est en faible teneurs, les sols sont souvent colorés par les oxydes de fer, ces derniers sont les composants spectraux les plus dominants lors de l'observation des régions arides par télédétection, l'intensité d'absorption due aux oxydes de fer est liée à l'indice de rougeur qui combine la bande du rouge et du vert (Escadafal et Huete, 1992).

$$IR = (R - V)/(R + V)$$

Où :

R= Canal rouge et V= Canal vert

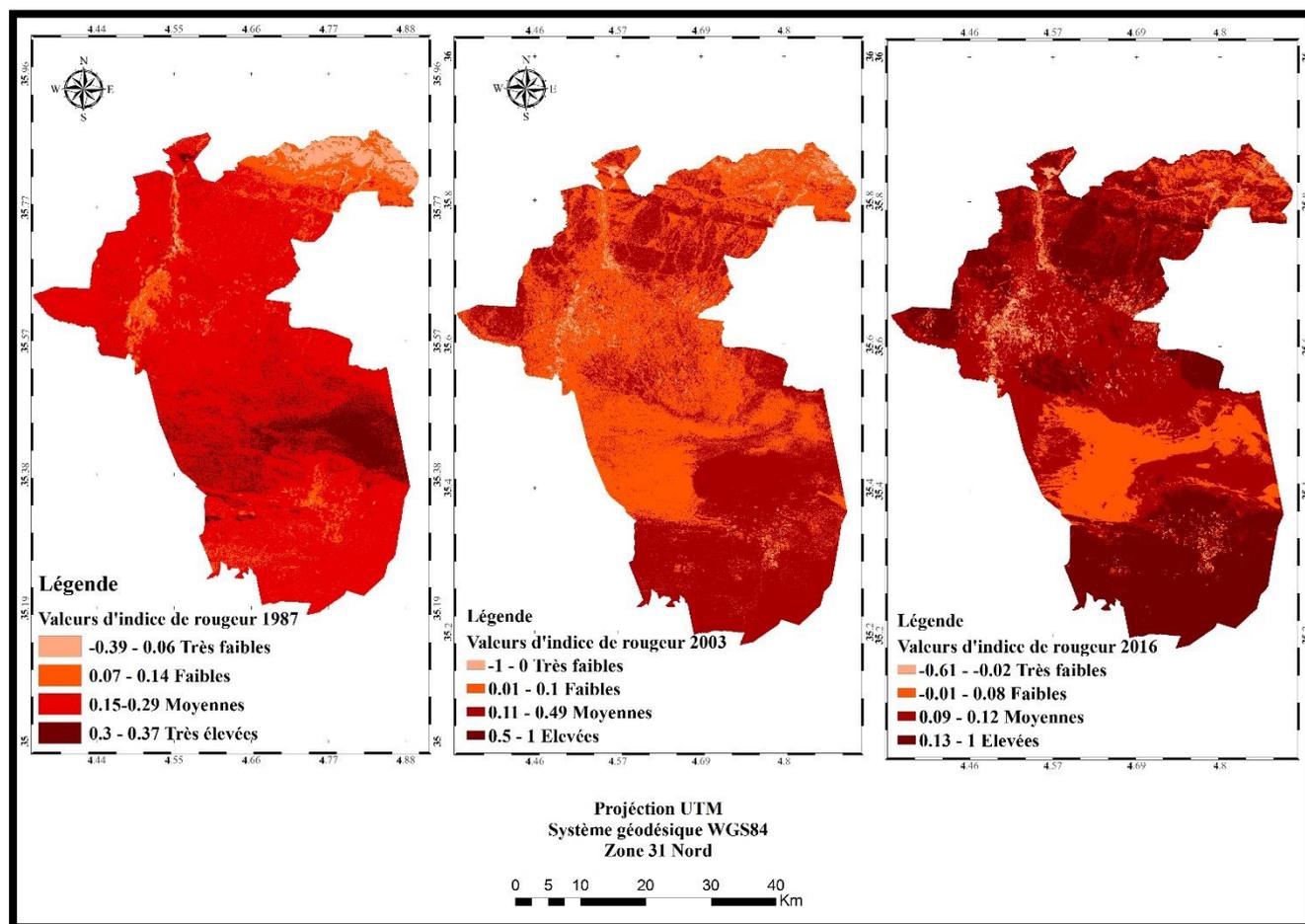


Figure 52 : carte de l'indice de rougeur (IR) (1987, 2003, 2016)

En 1987, les valeurs très faibles et faibles de cet indice occupaient respectivement 4158.96 ha et 133652.07 ha, ces valeurs représentent le couvert végétal de la zone d'étude à cette époque localisés principalement sur les monts de Maadhid et sur les champs des cultures maraichères de la plaine de M'sila et de Ouled Madhi, et M'cif au sud, aussi la végétation steppiques, les valeurs moyennes occupaient une surface de 133652.07 ha, localisé sur les hautes plaines où le couvert végétal est chétif composé principalement d'halophytes, les valeurs élevée qui variaient seulement entre 0.3 et 0.37 occupaient une surface de 6252.55 ha ce sont les valeurs qui présentent le sol nu, et sableux.

En 2003, Les valeurs qui présentent le couvert végétal formaient environ 9000 ha, les valeurs moyennes à élevées qui traduisent une dégradation des sols occupaient plus de 10000 ha, ce qui indiquent le taux de dégradation qui a touché le sol de la région, ces sols sont situé sur les périphérie du chott, les piémonts des montagnes, sur les sols nu et sableux, ces sols forment environ 60 % de la zone d'étude.

En 2016, on remarque que les zones à valeurs faibles et très faibles ont considérablement rétréci pour couvrir environ 69250 ha, environ 75400 ha sont caractérisés par les valeurs moyennes de cet indice et 54233 ha sont les zones à valeurs très élevées.

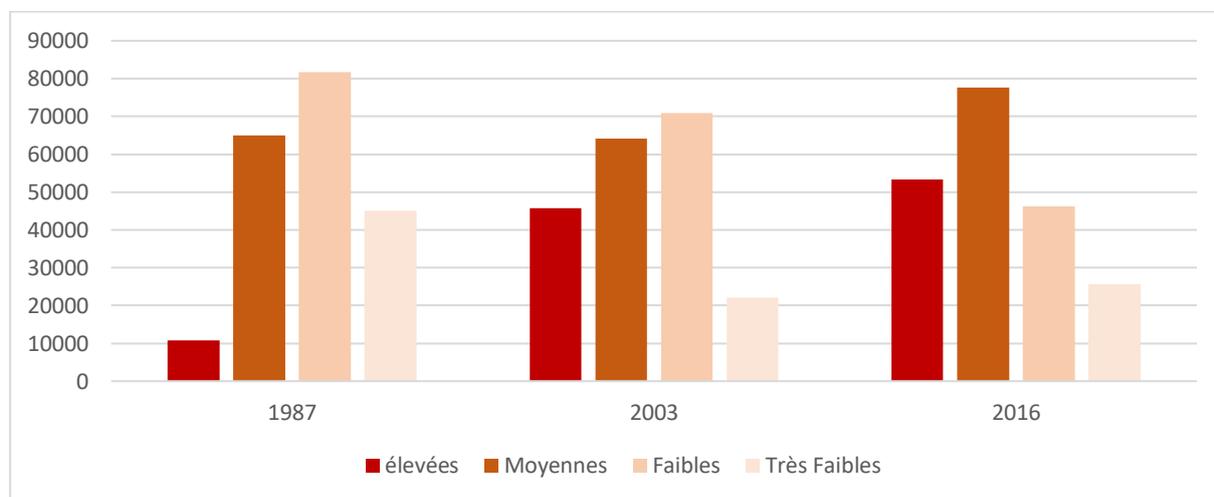


Figure 53 : La superficie des classes de l'indice de rougeur par hectare pour les années 1987, 2003, 2016

3. Indice de salinité

Plusieurs études ont utilisé la télédétection pour le suivi de la salinité des sols durant les trois dernières décennies, en général par des capteurs multi spectraux : Landsat Thematic mapper (TM) ou Multi spectral Scanner System (MSS) ou Enhanced Thematic Mapper (ETM), SPOT, Terra-ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), LISS-III (Linear imaging self-scanning sensor) et IKONOS (Dwivedi, et al., 2008, 2001, Verma et al, 1994, Douadi et al, 2006, Khan et al, 2001). Plusieurs de ces travaux ont mis en évidence la relation entre la salinité et la réflectance spectrales des composants du sol, qui ont constaté que les croûtes de sel sur les surface du sol montrent une forte réflectance dans les bandes de visible et dans le proche infrarouge (Schmid et al., 2008, Singh et Sirohi, 1994), ces études utilisent soit une approche indicielle (Douadi et al., 2006, Khan et al., 2001, 2005, Bannari et al., 2008) ou des méthodes de classification des images satellitaires (Allibed et Kumar, 2013).

L'indice utilisé dans cette étude est celui proposé par Khan et al, (2001) pour détecter la salinité dans un écosystème aride.

$$IS = \sqrt{B * R}$$

Où : B: Canal bleu et R: Canal rouge

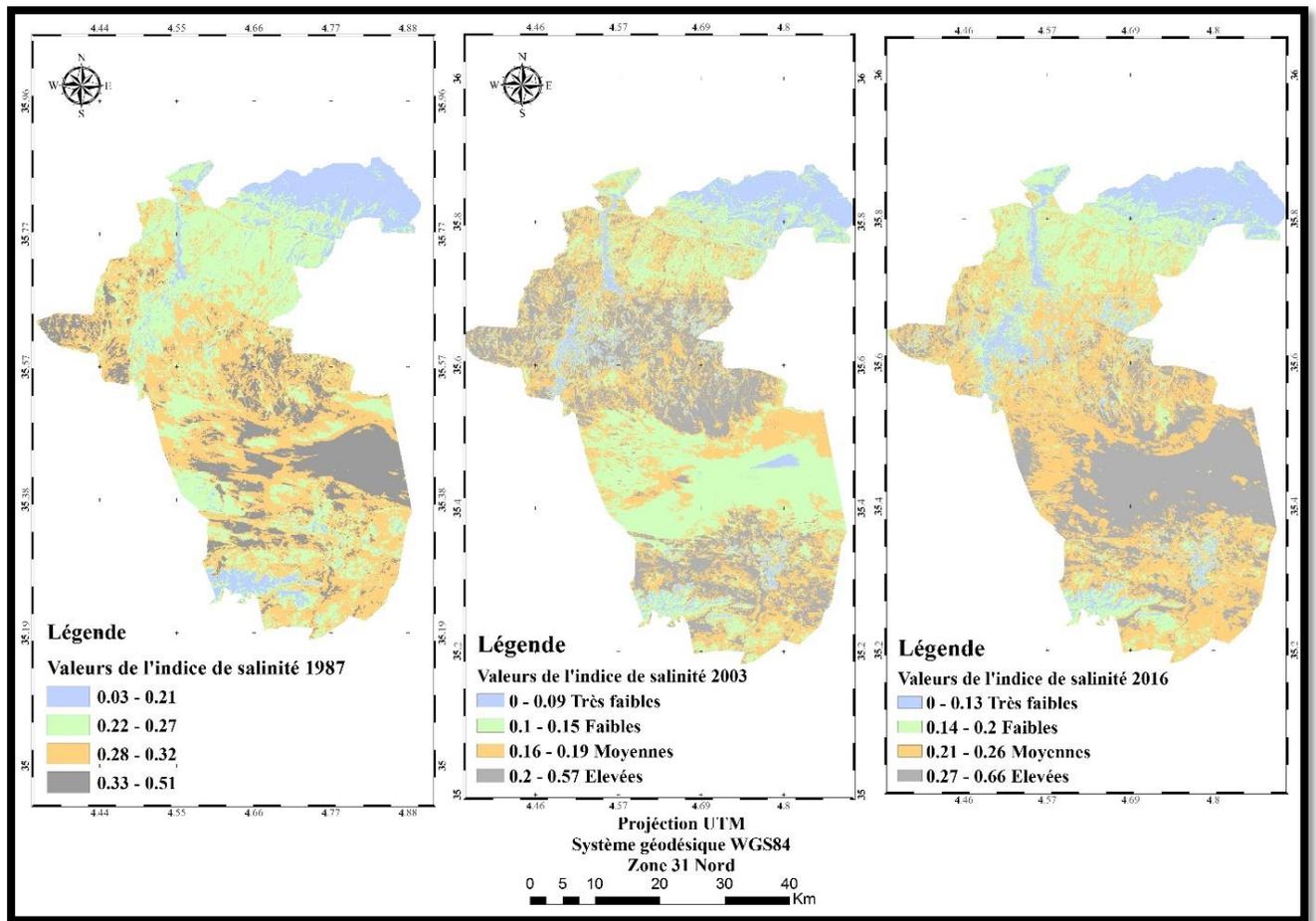


Figure 54 : Carte d'indice de salinité (2016, 2003, 1987)

En 1987, les taux très faibles de salinité occupaient 45065.26 ha de la zone d'étude (22.21%), les régions forestières et les terres agricoles sont les plus caractérisés par ces valeurs, ainsi, les valeurs faibles qui caractérisent les zones couvertes par une steppe à Alfa et des parcours occupant environ 81738 ha soit 40.28%, ce qui fait que plus de 60% de la zone d'étude était caractérisée par des taux faibles de salinité. Les taux moyens représentent des zones plutôt à moyenne et basse altitude (vers la dépression du Chott El Hodna) et couvrent environ 64991.38 ha soit 32% sur des sols nus et des Halophytes. Les valeurs les plus élevées occupaient 10813.31 ha seulement soit 5.32% de la superficie totale marqués évidemment sur la dépression saline de Chott El Hodna.

En 2003, les zones caractérisées par des valeurs très faibles ont rétréci jusqu'à 22118.63 ha soit, 10.90% l'augmentation des surfaces agricoles durant cette période, et la dégradation des steppes à Alfa et des piémonts de montagnes et la transformation des parcours en sols nus

ont joué un rôle dans l'augmentation de salinisation de ces terres, les surfaces à valeurs faibles ont également diminuées durant jusqu'à 64103.28 ha soit 31.60% sur les steppes dégradé et les steppes et les parcours. La surface à valeurs moyennes à élevées a augmenté jusqu'à 92964.55 ha ces valeurs représentent sur les sols nus, les halophytes et des parties du Chott El Hodna.

En 2016, les espaces à valeurs très faibles ont légèrement augmenté jusqu'à 25656.37 ha soit 12.64%, les valeurs faibles occupaient 46254 ha soit 22.8%, les surfaces à valeurs élevées et très élevées ont augmenté jusqu'à 77645.77 ha et 53268.05ha soit 38.26 % et 26.25 %.

Ces résultat montrent l'importance de prendre en considération la lutte contre un risque qui menace l'activité agricole et les ressources en eau dans la région, la salinisation des terres est due à la combinaison des facteurs climatiques extrêmes (faibles précipitation, température élevée, évapotranspiration élevée) et de la surexploitation des ressources naturelle (irrigation irrationnelle, défrichement de la steppe...etc) ce qui augmente la concentration des sels dans les terres, cela apparait souvent sous forme de croutes blanches sur la surface des sols surtout sur les périphéries des terres agricoles (Figure 55).

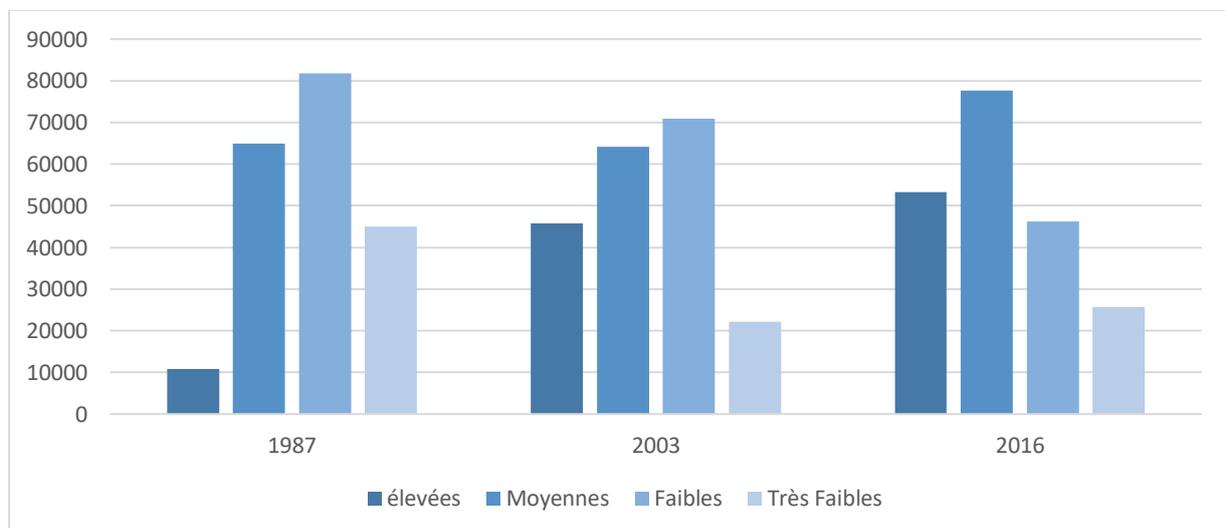


Figure 55 : La superficie des classes de l'indice de salinité par hectare pour les années 1987, 2003, 2016



Figure 56 : Apparition des croutes de sel sur la surface de la terre

Cette situation s'est aggravée en 2016 en indiquant un déficit hydrique très intense où les valeurs faibles et très faibles de cet indice occupaient une surface de 63.44% de la zone d'étude.

4. Indice ajusté de sol et de végétation

L'indice de végétation ajusté au sol et modifié (SAVI, Soil-Adjusted Vegetation Index) est un indice de végétation qui tente de minimiser les influences de la luminosité du sol à l'aide d'un facteur de correction de luminosité du sol. Il est souvent utilisé dans les régions arides où la couverture végétale est faible.

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L)$$

Où : NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge

Rouge = valeurs de pixel du canal proche rouge

L = surface de couvert végétal

NIR et Rouge se rapportent aux canaux associés à ces longueurs d'ondes. La valeur L varie selon l'ampleur du couvert végétal. En règle générale, dans les zones sans couvert végétal $L=1$; dans les zones à couvert végétal modéré, $L=0.5$; et dans les zones à très fort couvert végétal, $L=0$ (ce qui est l'équivalent de la méthode NDVI). Cet indice génère des valeurs comprises entre -1,0 et 1,0, les valeurs élevées de cet indice indiquent un bon état de végétation,

Les variations spatiotemporelles de cet indice sont cartographiées dans la figure ci dessous.

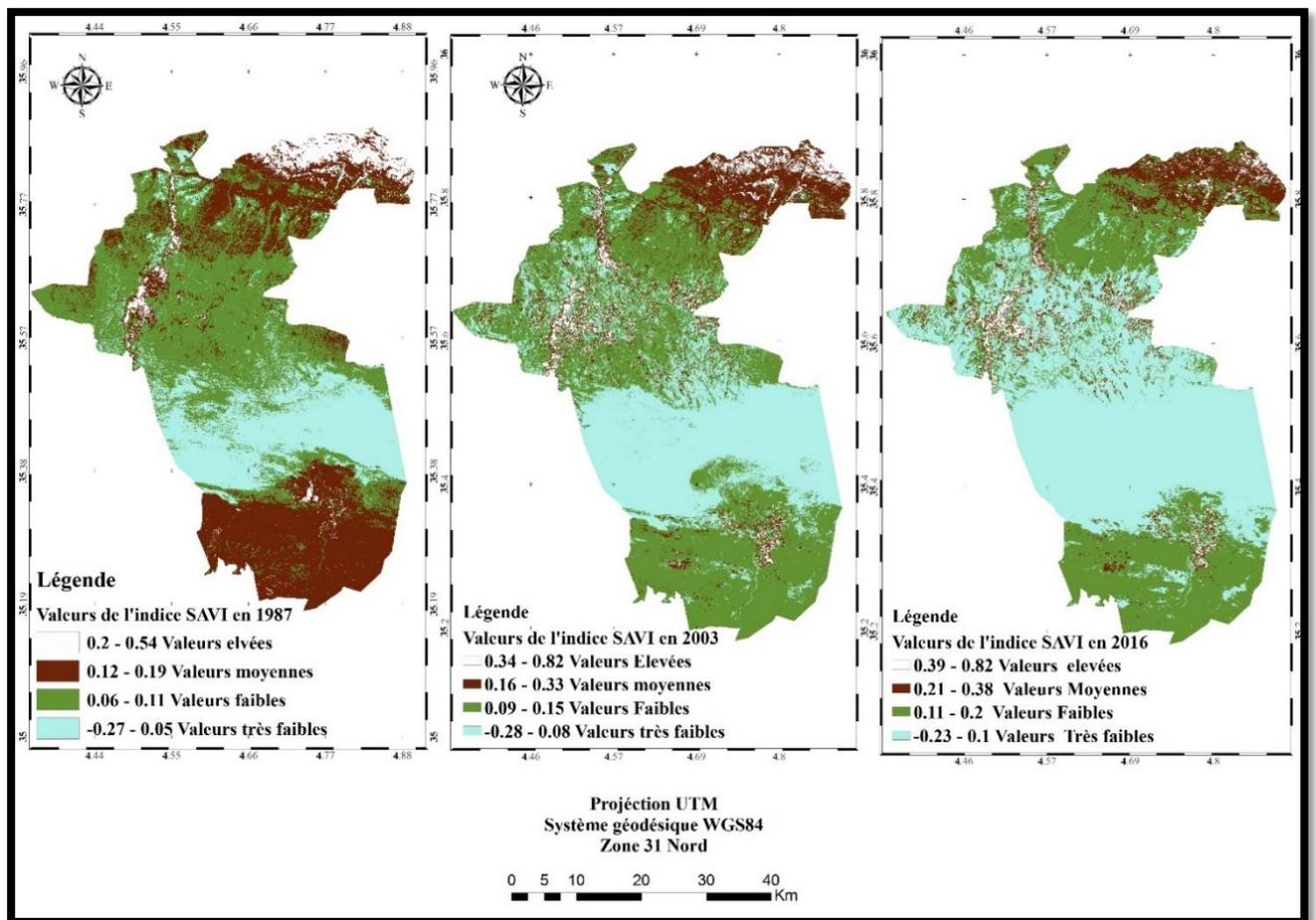


Figure 57 : Cartes de l'indice ajusté de sol et de végétation

En 1987 les valeurs élevées qui variaient entre, 0.2 et 0.54 occupaient 10813.31 ha localisées principalement sur les monts de Maadhid dans le nord, les valeurs moyennes occupaient 64991.38 ha sur les steppes à Alfa, et les autres formations et parcours steppiques, les valeurs faibles sont localisées sur les terres couvertes d'halophytes et de sol nu, les valeurs très faibles occupaient 45065.23 ha soit 22.21 % ces valeurs représentent le chott et quelques parties des sol nus et les agglomérations.

En 2003, les valeurs élevées variaient entre 0.34 et 0.82, et formaient 9657.96 ha soit une baisse de 1155.35 ha par rapport à 1987, les valeurs moyennes diminuaient jusqu'à 26130.08 ha, tandis que les surfaces à valeurs élevées faibles et très faibles augmentaient jusqu'à 9642.87 ha et 70614.46 ha ce qui indique que la qualité du couvert végétal et de sol a dégradé pendant cette période.

En 2016, la zone à valeurs élevées, s'est rétréci pour atteindre 6981.29 ha, principalement sur les terres agricoles, les valeurs faibles et très faibles occupaient environ 176955.63 ha, ces chiffres affirment les résultats précédents et montrent que la région d'étude a subi une dégradation intense de végétation et de sol.

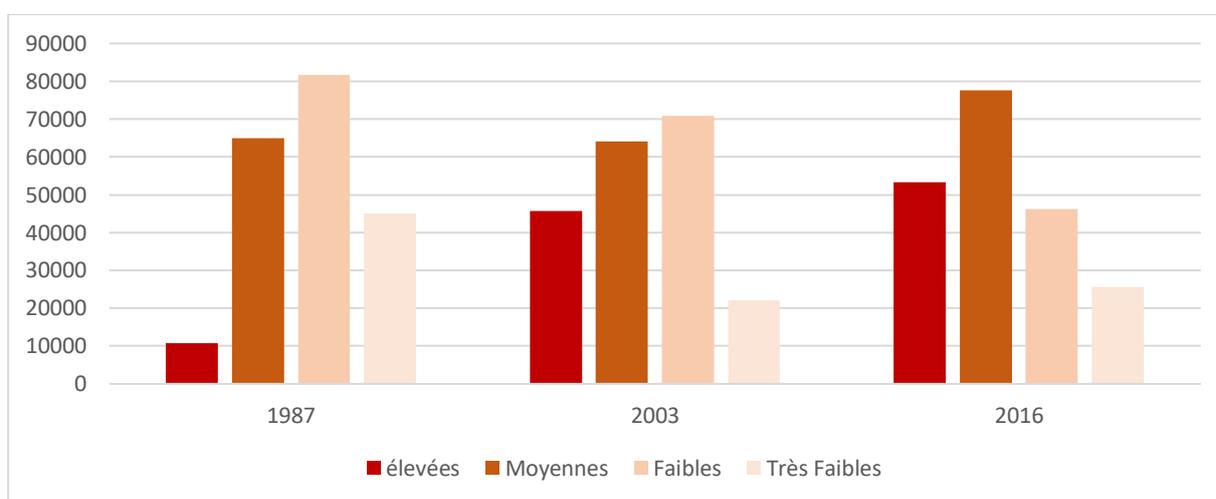


Figure 58: La superficie des classes de l'indice SAVI par hectare pour les années 1987, 2003, 2016

5. Estimation de la température de surface

L'extraction de la température de surface du sol par télédétection fait souvent appel aux bandes thermiques, La télédétection infrarouge thermique consiste à mesurer l'énergie radiative émise par la surface terrestre, ce qui permet d'en déduire la température de surface, les capteurs mesurent une luminance spectrale liée à la température de surface par la loi de Planck (Madureira et al, 2010)

Certains logiciels de traitement d'images classiques tels qu'ENVI, IDRISI, ERDAS intègrent un module de génération d'une image température de surface en utilisant des paramètres de calibration et d'ajustement (Benmechta, 2016), pour cette étude, les étapes sont facilitées par le calcul manuel du programme ENVI 5.3 dans l'outil de « bandmath ».

Pour estimer la température de surface à partir des images ETM et ETM+, la première étape est de convertir les codes numériques des pixels de l'image en unités de radiance absolue, puis en température de brillance puis en température de surface, (convertir le code numérique CN en radiance L_0 , puis en température de surface de sol.

Conversion des codes numériques en unité de radiance se fait selon la formule :

$$L\lambda = (L \min \lambda + (L \max \lambda - L \min \lambda) QDN / Qmax)$$

Où :

$L\lambda$ Radiance spectrale reçue.

$L \min$ et $L \max$ sont les radiances spectrales minimales et maximales détectées pour $Q_{dn}=0$ et $Q_{dn}=255$ respectivement.

DN : Valeur de pixel.

$Qmax$ est la valeur maximale du CN

λ : Longueur d'onde.

La conversion de la radiance en température de brillance se fait selon la formule :

$$BT = K2 / \ln \left(\frac{k1}{l} + 1 \right)$$

Où :

Où BT = Temperature de brillance.

, $L\lambda$ = Radiance spectrale (Watts / (m² * srad * μ m))

, $k1$ et $k2$ sont des constants déterminés selon le capteur du satellite utilisé dans l'étude :

	K1	K2
ETM	607.76	1260.56
ETM+	666.09	1282.71
OLI Bande 10	1321.08	1201.14
OLI Bande 11	777.89	480,980

La température est déterminée selon l'équation :

$$ST = BT + \frac{1}{1 + w * BT/P * LN(e)}$$

Où

BT = Température de brillance

w = La longueur d'onde de la radiance émis 11.5 μm

$P = h * c / s$ (1.438 * 10⁻² mk), h constant de plank (6.626 * 10⁻³⁴ Js),

S : constant de Boltzmann constant (1.38 * 10⁻²³ Jk),

C : la vitesse de lumière (2.998 * 10⁸ m/s)

e : L'émissivité de la surface de la terre

$$e = 0.004PV + 0.986.$$

PV : proportion de la végétation : $PV = (NDVI - NDVI_{\text{min}} / NDVI_{\text{max}} - NDVI_{\text{min}})$.

La température de la surface du sol est obtenue en Kelvin, qu'il faut convertir en degré Celsius (par soustraire 273.15 à l'aide de l'outil Band math sur ENVI ou Raster calculator sur ArcGIS).

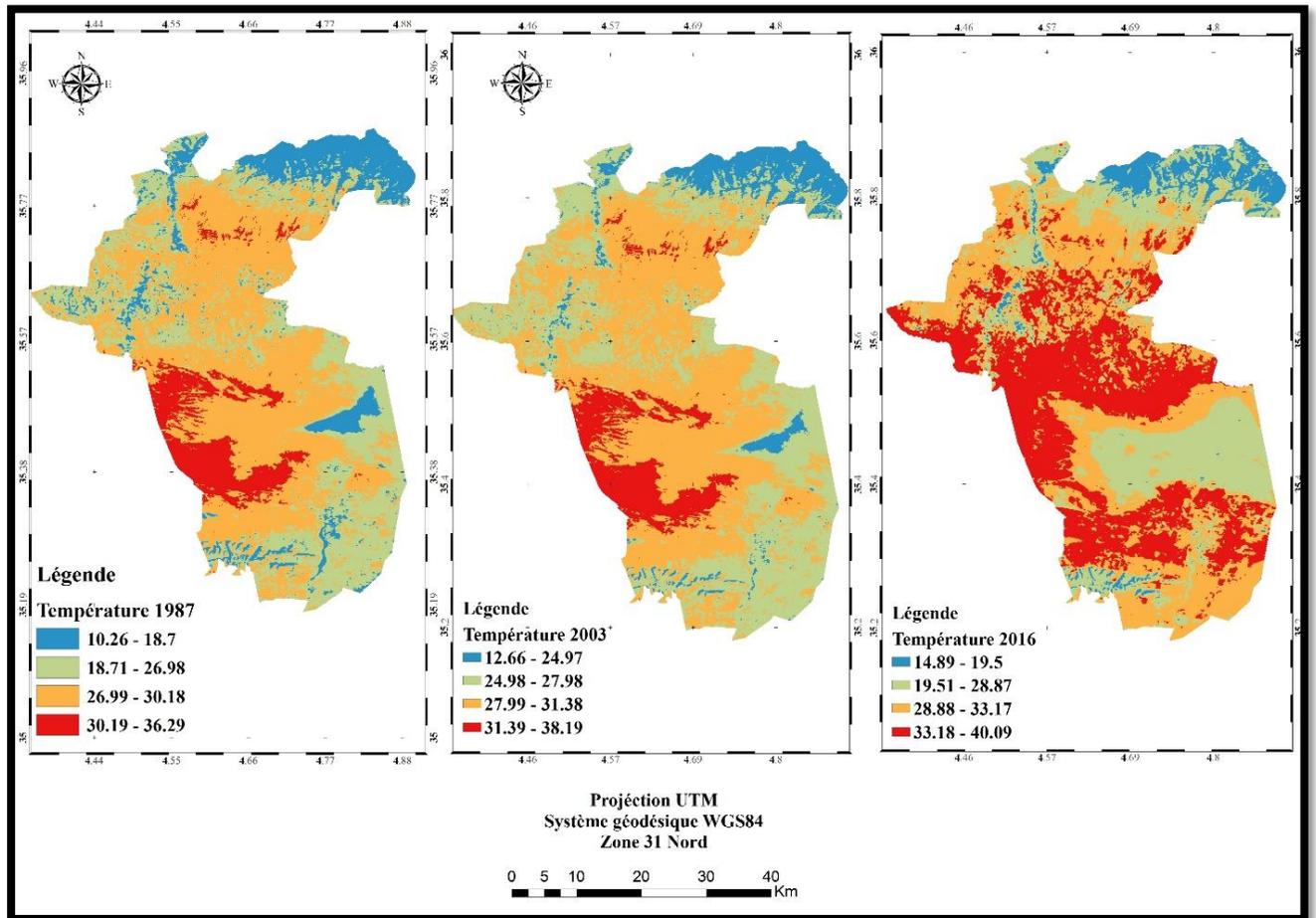


Figure 59 : Carte de la température de la surface du sol estimée dans l'année 1987, 2003,2016.

En 1987, les températures les plus basses varient entre 10.27 et 18.7°C généralement sur les zones montagneuses de Maadhid (1200 à 1859 m) et Djebel M'harga dont l'exposition est généralement Nord, et sur les terres agricoles au long de Oued El K'sob, l'altitude élevée et le couvert végétal assez dense, ce permet à la surface du sol de garder une température si basse et ambiante durant la saison printanière, cette classe occupe 39720.05 ha soit 19.57%, La deuxième classe dont les températures varient entre 18.71 et 26.98 °C, et qui occupe des zones où les altitudes varient entre 700 à 1200 m et dont l'exposition est Sud à Sud-Est couverts par une végétation des steppe et de parcours d'une densité moyenne et sur les périphéries des terres agricoles et sur des parties du Chott El Hodna qui restent partiellement humides durant la saison printanière, cette classe occupe 52274.99 ha soit 25.75%. Les températures moyennement élevées varient entre 26.99 et 30.18 °C occupent une superficie de 53072.43 ha soit 26.15 % et caractérisent les zones à moyenne altitude (500 à 700 m) et couvert par une végétation clairsemée (champs abandonnés et halophytes), Les températures les plus élevées occupent une

superficie de 57876.11 ha soit 28.51 % et varient entre 30.19 et 36.29°C, cette classe caractérise les zones à basse altitude (300 à 500 m) où la végétation dégradée, et les sols sont nus.

En 2003, l'intervalle des températures les plus basses est limité entre 12.66 et 24.97°C et caractérise une superficie de 20745.48 ha soit 10.22%, évidemment sur les zones à altitude élevée et à exposition Nord (Djebel Maadhid et M'harga), la deuxième classes et celle des températures assez amiantes varie entre 24.98 et 27.98 °C, et caractérise les zone piémonts des montagnes et les périphérie des terres agricoles couvrant une superficie de 84329.91 ha soit 41.55% ,les températures moyennement élevées varient entre 27.99 et 31.38°C sur une superficie de 80026.80 ha soit 39.43% de la zone d'étude caractérisant les moyennes altitudes surtout sur les plaines à expositions Sud, les températures les plus élevées varient entre 31.39 et 38.19°C en particulier sur des partie du chott où l'altitude ne dépasse pas 320 m et également sur les sols nus.

En 2016, le seuil des températures basses a augmenté jusqu'à un intervalle entre 14.89 et 19.5°C évidemment sur les hautes altitudes sur une superficie qui a rétrécie jusqu'à 12448.82ha soit 6.13% seulement, les températures moyennes varient entre 19.51 et 28.87 °C sur une superficie de 52027.27 ha soit 25.63% de la zone d'étude , ces valeurs caractérisent les piémonts des Maadhid, les périphérie des terres agricoles et une partie du Chott El Hodna, les températures considérées comme assez élevées varient entre 28.88 et 33.17°C sur les plaine à moyenne altitude et autour du Chott et couvrent 74737.049 soit 36.82% de la superficie totale , les valeurs les plus élevées occupent 63730.45 ha soit 31.40% de la zone d'étude caractérisent toujours les basses altitudes, dont le sol est occupé par des steppes dégradées, des Halophytes, du sable, et du sol nu est varient entre 33.18 et 40.09°C.

L'augmentation des températures de la surface du sol, et le changement spatiotemporel de la distribution de ses valeurs peuvent être liés aux climatiques durant les trois décennies passées, marquées par une diminution des taux de précipitation et une augmentation des températures. Ainsi, l'action anthropique présentée par défraichir les espaces forestières, les feux de forêts, et la propagation des agglomérations urbaines a aussi joué un rôle primordial dans ce bouleversement des valeurs de température ; la dégradation du couvert végétal rend le sol de plus en plus exposé à l'ensoleillement et donc au réchauffement.

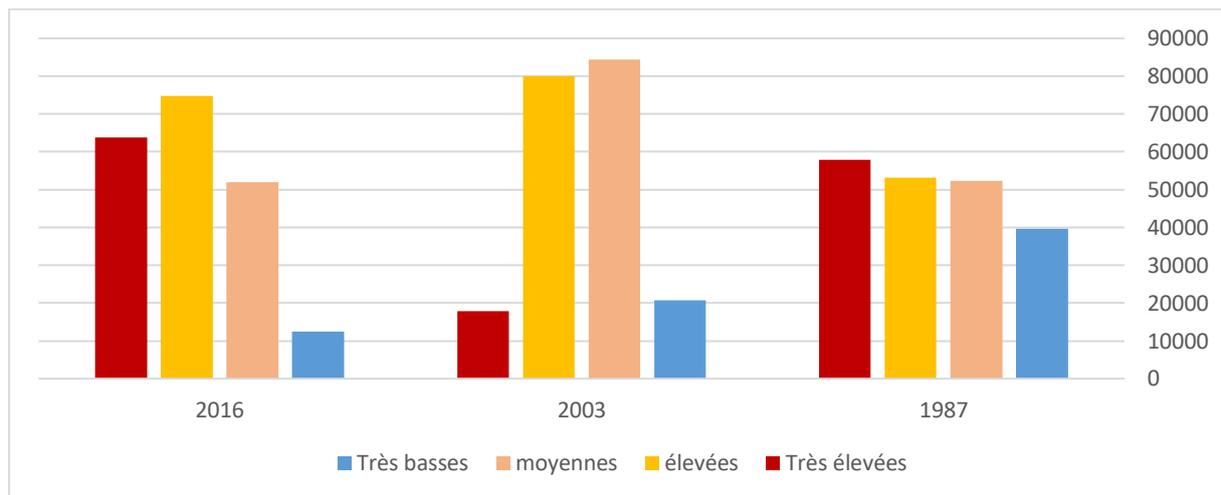


Figure 60 : La superficie des classes de la température de la surface du sol par hectare pour les années 1987, 2003, 2016

Conclusion

L'utilisation des données de la télédétection ont pour objectif de détecter et de suivre, les changements de la surface terrestre en particulier : la biomasse, le stress hydrique, l'état et la qualité du sol.

La détection des changements des indices de végétation et des sols, entre la période de 1987-2016 nous a aidé à évaluer l'évolution des de la végétation et du sol, ainsi.

Les résultats obtenus constituent une contribution à la localisation des zones dégradées, et montrent une régression de qualité de végétation et de sol ces résultats nous donnent une alerte précoce à la désertification et la sécheresse.

Chapitre VI



Cartographie et
modélisation de la
vulnérabilité de la zone
d'étude à la sécheresse et
à la désertification

Introduction

L'Algérie, à l'instar des pays en voie de développement qui connaît une dégradation des ressources non-renouvelables, ou difficilement renouvelables, comme les forêts, les sols et les eaux à cause de la pauvreté et la croissance démographique (Benmessaoud et al .2009, Benmessaoud, 2011), la variabilité climatiques présentée surtout en une diminution des taux de précipitation annuelle, modification du régime saisonnier et augmentation des températures, combinées avec les l'actions anthropiques destructives et l'exploitation exhaustive des ressources naturelles , ont fait des steppes algérienne des zones fragiles, de plus en plus dégradées au cours des dernières années, où les différents écosystèmes et la biodiversité sont menacés d'être perdus à jamais.

A cet égard, il est devenu très nécessaire d'adopter des stratégies adéquates pour la prévision des différents risques d'aléas destructives, l'évaluation et le suivi de la vulnérabilité des écosystèmes, et la susceptibilité de ces derniers à résister face aux fléaux naturelle tel que la désertification et la sécheresse.

Dans notre pays la gestion et la conservation du milieu physique (aride et semi-aride) sont basées généralement sur des études de cartes thématiques, missions sur le terrain et travaux, utilisant généralement des méthodes classiques, menées par des organismes nationaux tels que : ANAT, BNEDER, DSA, HCDS, qui nécessite un temps et des moyens humains considérables pour être réalisé et dont le coût est assez élevé (Bensaid, 2006)

Récemment, l'étude des risques menaçant les zones arides algériennes ont fait l'objet de plusieurs études en utilisant des données satellitaires (Benseliman, 2008) et cartographiques en se basant sur des démarches d'étude universels tels que le modèle MEDALUS (Benmessaoud, 2010 et Bouzekri, 2014), ou bien développer des prototypes d'étude (Bensaid, 2006).

Ce chapitre présente deux démarches d'étude utilisées pour la cartographie des zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification dans la région d'étude, en se basant sur des modèles existant mais en prenant en considération la nature de la région d'étude, avec l'intégration de l'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision.

1. Notion de vulnérabilité

La vulnérabilité est un élément clé pour l'ancrage des évaluations des impacts des changements climatiques dans les processus de la planification du développement et des stratégies d'adaptation (Messouli, 2012). Elle est définie comme le degré de susceptibilité d'un écosystème d'être endommagé et son incapacité de faire face aux effets néfastes (Houghton et *al.*, 2001), c'est le degré de perte d'un élément ou d'un ensemble d'éléments exposés en cas de phénomènes dangereux (Julião et *al.* 2009).

Cependant il faut distinguer entre la notion de vulnérabilité et celle du risque, ce dernier désigne la possibilité d'occurrence d'un phénomène dangereux (aléa) et l'estimation respective de ses conséquences sur les personnes et les biens ou sur l'environnement, exprimés en dommages corporels et/ou préjudices matériels et fonctionnels, directs ou indirects (vulnérabilité).

L'aléa correspond à la probabilité de l'occurrence d'un phénomène ou d'une action potentiellement destructrice (ou capable de provoquer des dommages), d'une certaine brutalité, dans une zone et une période de temps données.

2. Données utilisées

- Données météorologiques : Données de précipitations et des valeurs de température annuelles et mensuelles d'une période de 32 ans de deux stations météorologique (M'sila et Boussaâda).
- Données satellitaires : Image satellitaire Landsat du capteurs Operational Land Imager (OLI).
- Données cartographiques :
 - Cartes d'occupations du sol pour chaque commune de la wilaya de M'sila, de l'année 2014, à l'échelle 1 :140000, réalisée par la conservation des forêts de la wilaya de M'sila (Monographie des communes)
 - Cartes topographiques des régions de M'sila et de la région de Maadhid de l'année 1957, à l'échelle 1 : 50000.
 - Carte topographique de la région de Boussaâda de l'année 1932 à l'échelle 1 : 200000.

- Carte d'occupation du sol de la wilaya de M'sila réalisée par le service de la conservation des forêts de la wilaya de M'sila de l'année 2014 à l'échelle 1 : 240000.
- Cartes d'occupation du sol des hauts plateaux centre et Ouest de l'année 2007, réalisé par le Bureau National d'Etude sur le développement rural (BNEDER).
- Carte d'indices de développement rural soutenable (IDRS) pour les wilayas de M'sila, Djelfa et Laghouat.
- Données alphanumériques sur les statistiques la population et l'agriculture, et le pâturage.
- Données pédologiques.
- Modèle numérique du terrain (MNT).

3. Cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse

3.1. Démarche d'étude

Afin de surveiller et d'évaluer l'impact de la sécheresse, plusieurs études ont développé une série d'indices et des paramètres pour le suivie et la détection (Dracup, et al., 198, Wilhite et Glants, 1985). Cependant les systèmes de surveillance de la sécheresse devraient être intégrés et basés sur des multiples facteurs physiques et socioéconomiques pour bien comprendre sa magnitude, son étendue et son impact (Wilhite, 2005)

La méthodologie repose sur l'utilisation d'un modèle SIG basé sur deux projets d'évaluations régionaux de la sécheresse : le DMCSEE (centre de surveillance de la Sécheresse du sud-est de l'Europe) présenté en 2012 et de l'OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) un modèle présenté en 2009 pour classer les zones vulnérable sécheresse dans les pays de l'Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, Maroc).

La cartographie de la vulnérabilité de la sécheresse est généralement basée sur les entrées calculées qui proviennent de cartes thématique, images à distance, climat et statistiques socioéconomique. Notre approche repose sur l'utilisation d'une série d'intrants liés à la sécheresse pour construire un SIG modèle basé sur deux expériences existantes : méthodologie OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) et DMCEE méthodologie (Centre de gestion de la sécheresse pour Europe du Sud-Est).

En 2009, l'observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) a proposé un modèle SIG basé sur la superposition de plusieurs facteurs pondérés pour la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse dans les pays d'Afrique du Nord. Ce modèle a utilisé l'aridité, la pression de pâturage

et la sensibilité du sol en tant que paramètres à laquelle les poids ont été attribués par des experts selon l'importance de chaque paramètre dans la vulnérabilité à la sécheresse (Safar Zitoun, 2006).

Tableau 22 : Paramètres utilisés dans la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse selon le modèle proposé par l'OSS (2009)

Paramètre	Poids
Aridité	0.65
Pression de pâturage	0.22
Sensibilité du sol	Capacité de rétention
	Occupation du sol	0.13

Le Centre de gestion de la sécheresse pour le sud-est d'Europe (DMCEE) a proposé en 2012 une méthodologie pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse dans les pays du sud-est de l'Europe en utilisant également la superposition pondérée de plusieurs couches spatiales.

Tableau 23 : Les paramètres utilisés pour la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse selon le modèle de DMCEE.

Paramètre	Poids
Pente	0.1623
Eau souterraine disponible	0.0518
Durée d'ensoleillement	0.3071
Précipitation	0.1180
Occupation du soleil	0.0858
Type de sol	0.2232
Irrigation	0.0518

3.2. Choix et hiérarchisation des critères

La contribution de la présente étude est de proposer une méthodologie basée sur les modèles précédemment présentés et élaborer une carte de vulnérabilité à la sécheresse, selon une méthode analytique pondérée, Cette méthode considère généralement les critères de sélection appliqués à un phénomène naturel comme d'inégale importance. Elle tend à introduire une hiérarchie entre variables en affectant à chaque critère un poids qui correspond à son importance par rapport aux autres critères (Bensaid, 2006), dans le cas du phénomène de sécheresse nous avons choisi quatre critères en vue de les intégrer dans le modèle analytique,

Pour une analyse multicritère, nous avons opté à l'utilisation de la méthode de l'AHP (Analytic hierarchy process) facilite et simplifie notre évaluation selon une hiérarchisation des

critères utilisés ; les paramètres et les indices calculés formeront des couches spatiales de sous critères dont les attributs numériques vont permettre de déterminer l'échelle numériques des critères de décision, ces derniers, seront présentés comme des couches de sensibilité de climat, sol et socio économie et entreront dans l'évaluation finale pour cartographier la vulnérabilité à la sécheresse.

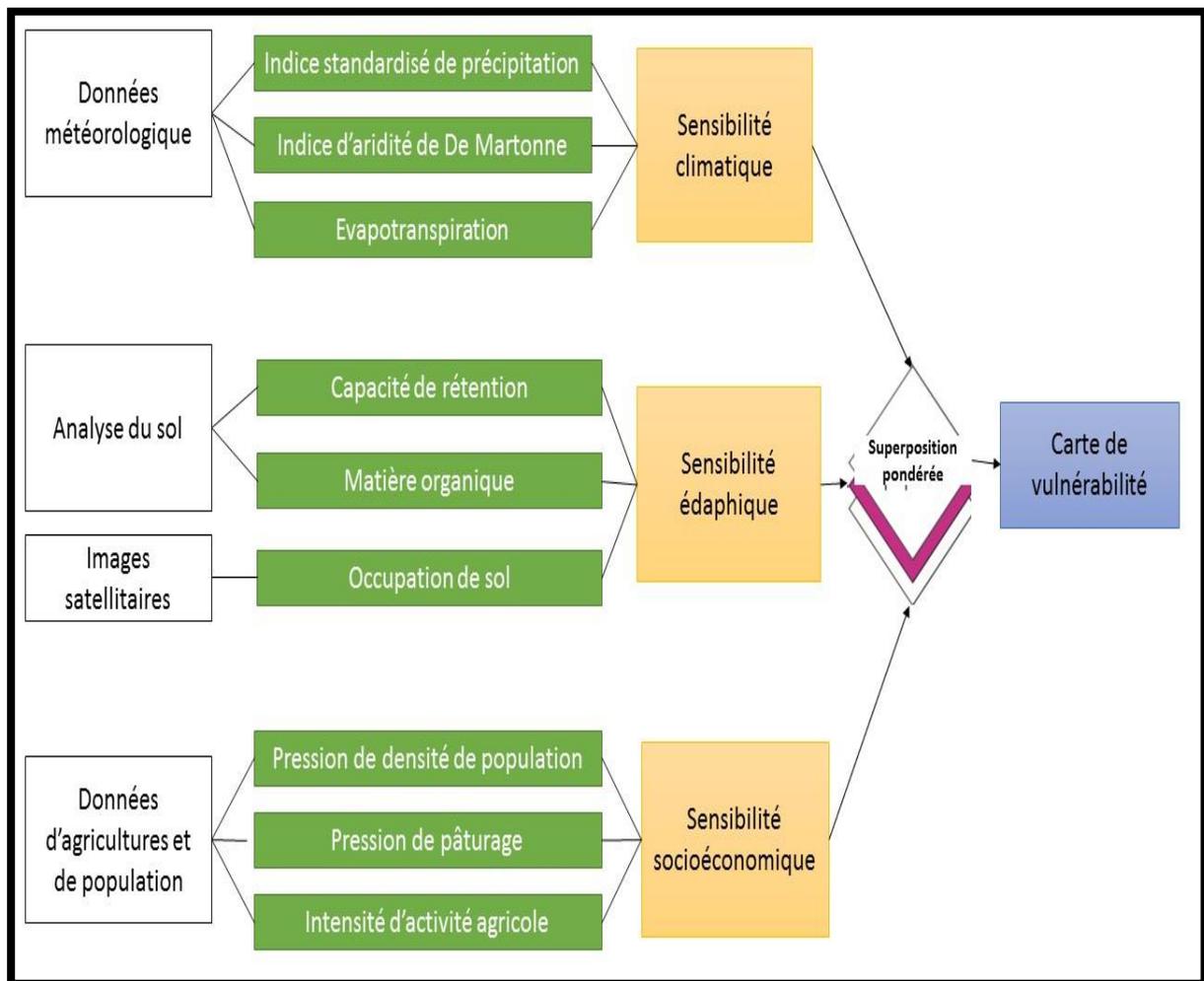


Figure 61 : Diagramme de la démarche d'étude

Tableau 24 : Scores attribués aux sous critères entré dans la cartographie de la sécheresse

Facteur	Paramètre	Valeur	score
Climat	SPI	0.95 - 1.44	1
		0.66 - 0.95	2
		0.08 - 0.65	3
		-1.57	4
	AI	7.5 - 9.7	4
		6.8- 7.4	3
		5.2-6.7	2
		4.5-5.1	1
	ETP	34.35- 40.21	1
		40.22-47.60	2
		47.61-55.53	3
		55.54-64.62	4
	Sol	CR	12%-24%	4
25% - 36 %			3
37%-44%			2
45%-60%			1
MO		1.61%- 2.69%	1
		1.11%-1.60%	2
		0.60 %-1.10%.	3
		0.10% -0.59%	4
Occupation du sol		Barrage	1
		Maqui et forets	2
		Terres agricoles	2
		Affleurement	3
		Agglomération	3
		chott	4
		Steppes à alfa	5
		Halophytes	6
		Parocours	5
		Dunes	4
		Sol nu	7
		Socioéconomie	Population	8279 -4648	1
46484-84690	2		
84690 - 12228956	3		
122895- 161100	4		
Paturage	15562 - 2729		1
	27299-39035		2
	39035-50772		3
	50772-62509		4
SAU (ha)	41056-52593		1
	52593-64130		2
	64130- 75668		3
	7566-8720		4

Les indices calculés à partir des données climatiques et qui ont servis comme sous-critères pour cartographier la sensibilité climatique, sont présentés dans le deuxième chapitre de cette thèse.

La construction de la couche de sensibilité du sol a nécessité, une analyse au laboratoire pour définir ses propriétés (Capacité de rétention et matière organique) vu le manque des cartes historiques de la qualité des sols de la région. Des échantillons de sol ont été prélevés sur des cercles aléatoires dans 85 points d'échantillonnage, après le retrait la couche de litière de (0 à 20 cm de profondeur).

Au laboratoire, les échantillons de sol ont été tamisés (<2 mm), puis la capacité de rétention des sols (capacité de maintien) a été déterminée à partir de chaque échantillon en utilisant la méthode « Européenne » où un échantillon de sol est arrangé avec une quantité d'eau dans un cylindre qui est placé sur une membrane absorbante jusqu'à ce que l'excès d'eau soit attiré par la gravité; Une fois l'équilibre atteint, la capacité de rétention est calculée en fonction du poids de l'eau contenue dans l'échantillon comparé à son poids sec. La matière organique a été définie en laboratoire en utilisant la Méthode de titrage Walkley-Black (Walkley, Black, 1939).

Ces paramètres sont cartographiés suivant la méthode d'interpolation spatiale en utilisant la pondération inverse de la distance (IDW) fournies par l'extension du Spatial d'analyste sous le programme ArcGIS, cette méthode est basée sur le pesage à distance inverse, les valeurs proches contribuent davantage aux valeurs interpolées que des observations lointaines, en d'autres termes, l'influence des données d'un point connu est inversement proportionnelle à la distance de l'emplacement du point inconnu qui sera estimé (Kerdsueb et Teartisup, 2014), un point en entrée a une influence isotropique sur une valeur interpolée.

Les statistiques socioéconomiques sont fournies par la conservation des forêts de la wilaya de M'sila. Les données étaient traitées et entré dans une base de données SIG et également interpolés spatialement en utilisant l'outil d'interpolation IDW.

Une fois les différents paramètres sont calculés, l'étape suivante consiste à reclasser chaque couche de sous-critère en intervalles de valeur à l'aide de l'outil de reclassification ArcGIS), les scores de 1 à 7 ont été attribués à chaque classe, où 1 représente une classe de valeur favorable, par exemple, pour l'indice SPI entrer « 1 » comme un score pour une classe

de valeurs qui varie entre 0,95 et 1,44 signifie que cette classe est climatiquement plus favorable que la classe où les valeurs se situent entre 0,07 et -1,5 à laquelle un score de « 4 » est donné.

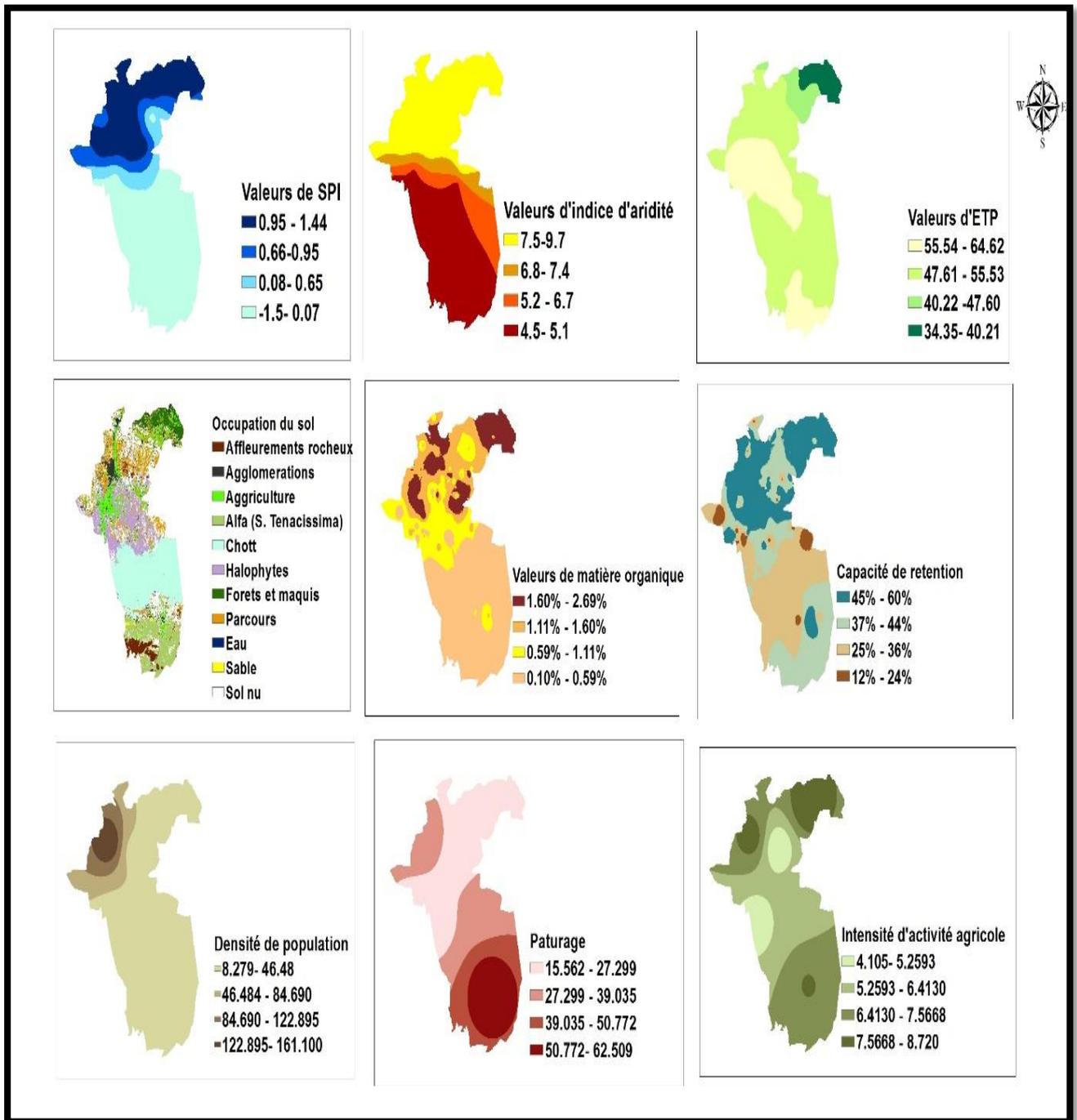


Figure 62 : Carte des sous-critères

3.3. Analyse multicritère pour la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse

La méthode de décision multicritères est une branche d'une classe générale de modèles de recherche opérationnelle qui est adapté pour résoudre des problèmes complexes à incertitude élevée, objectifs contradictoires, avec différentes formes de données et d'informations, d'intérêts et perspectives multiples, et le suivi des évolutions des systèmes biophysiques et socio-économiques (Wang, et al., 2010).

La première étape consiste à former une série de comparaison paire à paire en associant ces critères en fonction de leur importance relative et leur influence sur la vulnérabilité à sécheresse, on a utilisé une échelle de nombres qui indiquent combien de fois un élément est plus important ou dominant est au-dessus d'un autre, les valeurs de cette échelle varient entre 1 et 9 (Saaty, 1980). Par exemple, entrer 3 dans la position climat/sol signifie que le facteur climatique est trois fois plus important et influence une vulnérabilité à la sécheresse dans l'étude zone que le facteur du sol, et entrer 1 dans la position climat/ pression socio-économique signifie que les deux facteurs sont tout aussi important (Tableau 25).

Tableau 25 : les poids attribués aux critères selon l'échelle de Saaty

Critère	Climat	Pression Socioéconomique	Sol
Climat	1	3	5
Pression Socioéconomique	$1/3 = 0.3333$	1	3
Sol	$1/5 = 0.2$	$1/3 = 0.3333$	1
Somme	1.5333333	4.33333	9

L'étape suivante est calculer le vecteur propre (Vp) qui est déterminé en calculant la moyenne géométrique pour chaque critère, après cela, le coefficient de pondération pour chaque critère est déduit en divisant chaque vecteur propre par la somme des vecteurs, la somme des coefficients de pondération doit être égal à 1.

Tableau 26 : Coefficients des poids finaux

Criteria	Weight
Critère de climat	0.6333
Critère de sol	0.1062
Critère de pression socioéconomique	0.2605
Somme	1

Les résultats obtenus par la méthode AHP doit être vérifiées pour assurer que les jugements de la matrice réciproque de décision sont cohérents, cette vérification est évaluée par l'indice décohérence CI, la notion de cohérence dans la comparaison par paire de SAATY (1977-1980) est basée sur le respect de la transitivité de notre jugement, cela passe par le calcul de l'indice de cohérence :

$$CI = (\lambda_{max} - K)/(K - 1)$$

Où K est le nombre des éléments comparés.

λ_{max} Est une valeur calculée sur la base de la matrice de SAATY, des vecteurs propres et de K

Saaty prouve que la valeur propre maximale de la matrice normalisée est égale à la dimension de cette dernière dans le cas d'un jugement parfaitement cohérent. Dans un cas concret, cette valeur peut être calculée avec une bonne approximation en prenant la somme des produits de chaque élément du vecteur avec la somme des valeurs par colonne de la matrice initiale.

SAATY (1990) a défini un indice de cohérence aléatoire (IA) d'une matrice de même Dimension, où IA c'est un indice obtenu par un grand nombre de simulation et fixé en fonction du nombre de critères.

Tableau 27. Tableau d'indice aléatoire de Saaty

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AI	0.	0.	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Dans le cas de notre étude λ_{max} qui est égale à la somme des produits de chaque poids avec la somme par colonne de la matrice initiale

$$\lambda_{max} = (0.6333 * 1.5333) + (0.1062 * 9) + (0.2605 * 4.3333) = 3.05$$

$$CI = (3.05 - 3) / (3 - 1) = 0.025$$

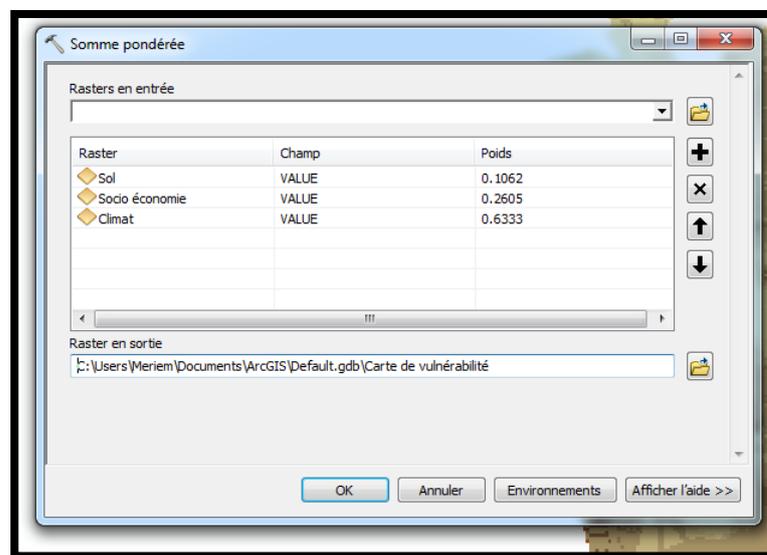
Après cela un ratio de cohérence (CR) doit être calculé :

$$CR = CI / AI = 0.025 / 0.58 = 0.04$$

D'après SAATY, si CR 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 0,04, ce qui confirme que notre jugement est cohérent.

La dernière étape consiste à agréger et à compiler les couches de climat, sol et socio-économie pour construire la carte finale de vulnérabilité en utilisant une méthode de somme pondérée (Outil de somme pondérée dans ArcGIS 10.2.2) où chaque couche est par son poids calculé.

Figure 63. Outil de somme pondérée sur le logiciel ArcGIS



3.4. Résultats et discussion

3.4.1. Critères de décision

Sensibilité du climat

Les zones non sensibles forment 37,61% soit 64135.53 ha de la zone d'étude, située principalement sur les montagnes de Maadhid au nord (1.200 -1.900 m), et sur les terres agricoles en M'sila et M'tarfa. Les zones légèrement et modérément sensibles, respectivement 2,66% soit 66265.95 ha et 35,70% soit 72434 ha situés aux périphéries du chott, où les altitudes varient entre 400 et 440 m. Les zones sensibles et très sensibles forment 21,93% de la zone d'étude, soit 44495.17 ha et 2,08% soit 4220.22 ha principalement situés sur les altitudes inférieures des plaines de M'cif au sud de la zone d'étude.

Sensibilité du sol

Les zones non sensibles constituent 22,55% soit 45753.12 ha de la surface totale le couvert végétal de cette région est assez dense, formé de terres agricoles et des futaies de Pin d'Alep, l'irrigation permanente des terres agricoles et le climat frais sur les hautes altitudes offrent une qualité de sol assez favorable. Les zones légèrement et modérément sensibles forment 16,10% soit 32666.31 ha et 23,27% soit 47213.98 ha respectivement, réparties sur les parcours, les champs abandonnés et les steppes à Alfa. Les zones sensibles forment 6,24% de la surface soit 12660.73 ha où le couvert végétal est clairsemé et formé par des halophytes et des champs de plantes spontanées. Les zones très sensibles forment 31,82% soit 64561.62 ha, principalement situées sur les sols nus et sablonneux où l'humidité et la rétention d'eau est très faible.

Sensibilité socio-économique

Le degré de sensibilité socioéconomique diminue en allant loin des agglomérations urbaines et des zones industrielles ; les zones non sensibles forment 18,56% soit 37657.56 ha de la surface totale, située sur les plaines de M'tarfa et sur des parties de la chott El Hodna. Les zones légèrement et modérément sensibles forment respectivement 39,91% soit 80975.79 et 32,11% soit 65150 ha situées aux périphéries des agglomérations urbaines. Les zones sensibles et très sensibles forment 3,21% soit 6512.97 ha et 6,10% 12376.76 ha sont situés sur les agglomérations urbaines principalement la ville de M'sila (800 000 habitants).

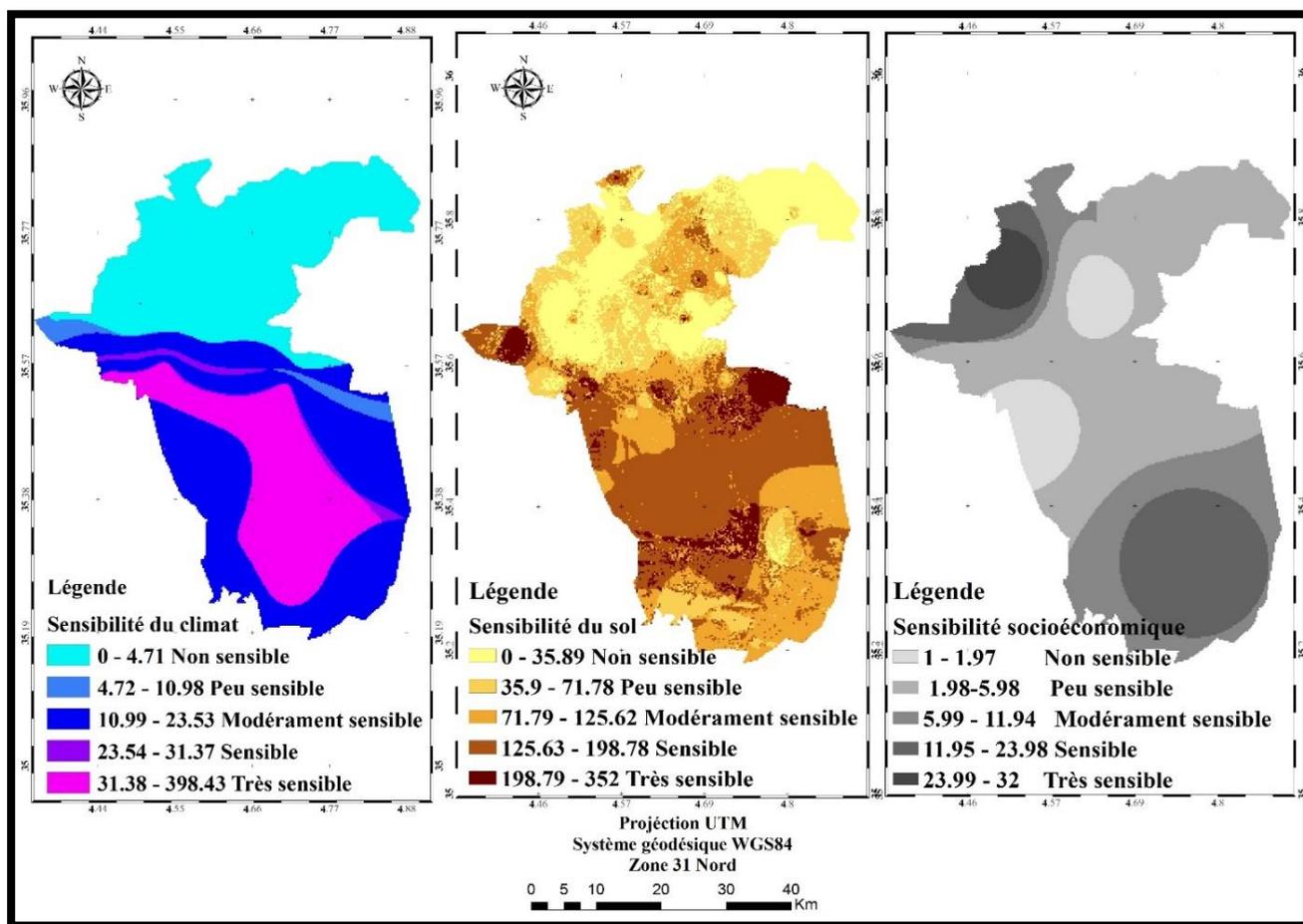


Figure 64 : Cartes de sensibilité climatique-édaphique- socioéconomique zones d'étude

2.4.2. Carte de vulnérabilité

L'analyse précédente a permis d'élaborer une carte décisionnelle pour l'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse, cette carte classe la zone d'étude en cinq classes de vulnérabilité selon la valeur de pixels qui est comprise entre 0 et 5.

Tableau 28 : La classification des situations de vulnérabilité à la sécheresse

Classes de vulnérabilité	Situation de vulnérabilité	Valeurs attributs
Classe 1	Non vulnérables	0 – 1.49
Classe 2	Légalement vulnérables	1.50 – 2.00
Classe 3	Vulnérables	2.01- 2.65
Classe 4	Modérément vulnérable	2.66 – 3.20
Classe 5	Très vulnérables	3.21- 5

Les régions non vulnérables forment 21,37% soit 43358.95 ha de la zone d'étude, situées principalement sur les montagnes (1 293 m à 1 859 m) où le sol est humide et moins exposé (exposition nord), et sur les terres agricoles où la végétation la couverture est plus dense et irriguée en permanence, ce qui fait de cette région un biotope favorable, ayant le privilège des taux élevés de précipitations, et aussi d'être éloignée de la pression anthropique, ces zones, notamment la région de Maadhid présentent un milieu hautement favorable par rapport au reste de la zone d'étude, la densité du couvert végétal et l'isolation des perturbations anthropiques font de cette région un sanctuaire de plusieurs espèces animales et végétales.

Les zones légèrement vulnérables forment 16,28% soit 33031.52 ha de la surface, situées principalement sur les versants du sud, et sur les périphéries des terres agricoles, ces zones nécessitent des approvisionnements permanents en eau ce qui exacerbent la pression et la surexploitation de ces ressources.

Les zones modérément vulnérables forment 10,06% soit 21527.30 ha de surface et sont situées sur les parcours et les champs abandonnés réservés au pâturage. Les zones vulnérables et très vulnérables forment respectivement 32,81% soit 66570.29 ha et 19,46% soit 39483.63 ha de la superficie totale, réparties sur le reste de la zone d'étude sur les sols nu et sablonneux, et aussi sur la Sebkha.

Cette carte de synthèse est destinée à contribuer à la clarification et la simplification des prises de décision en ce qui concerne les problèmes de sécheresse, et de mettre à la disposition des décideurs, chercheurs, écologistes et agriculteurs un document qui sert à aider de planifier les actions d'interventions afin de lutter et de prévenir les dégâts qui peuvent résulter d'un fléau comme la sécheresse.

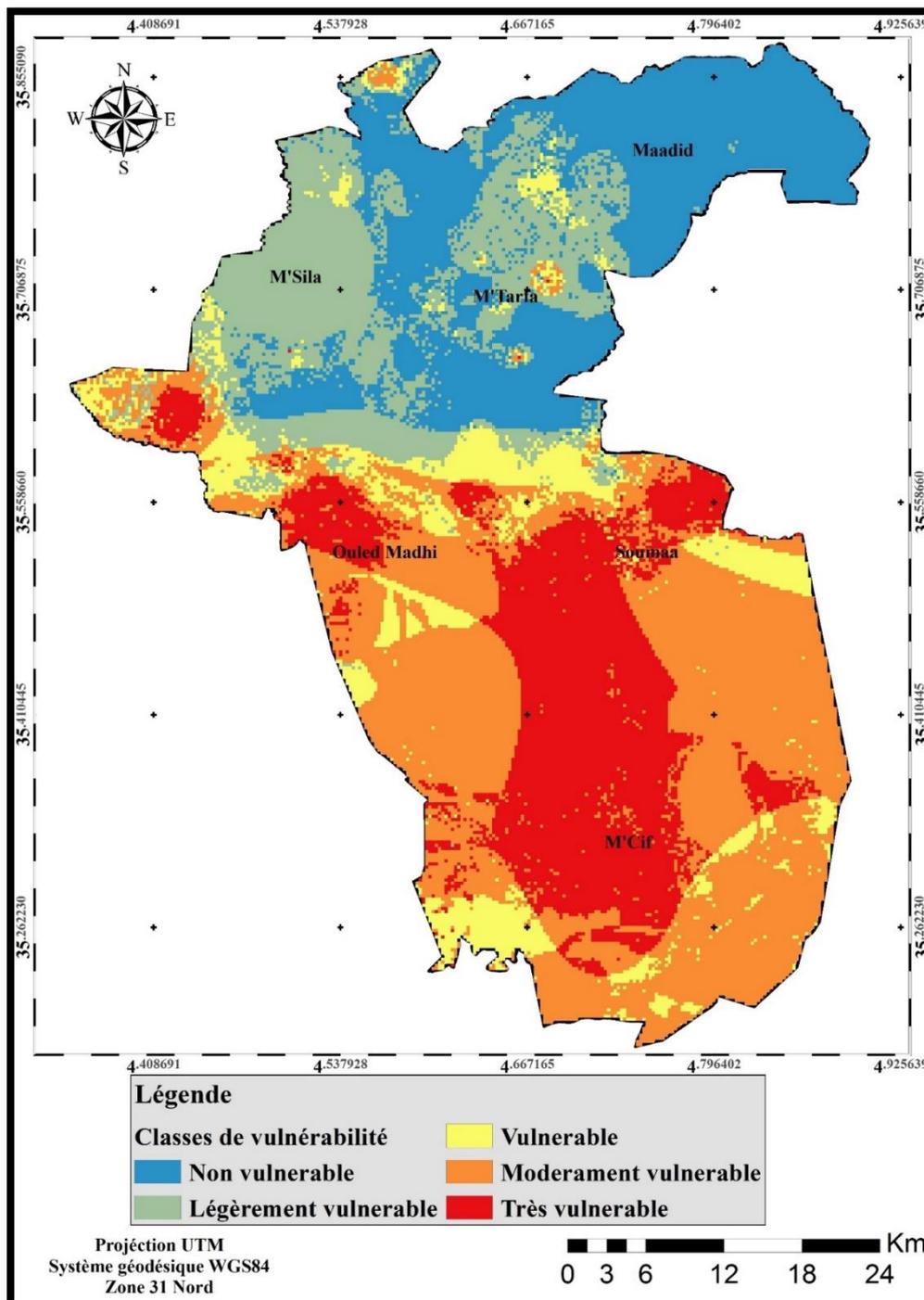


Figure 65 : Carte de vulnérabilité à la sécheresse

4. Cartographie de la vulnérabilité à la désertification

4.1. Démarche d'étude

Cette méthode, présente un indice de cartographie de l'aléa de la désertification (Indice Intégré de Désertification) basée sur le calcul d'une série de modèles (critères), cet indice vise à combiner de manière semi-quantitative plusieurs processus conduisant à la désertification et est simulé via des modèles mécanistes à empiriques. Les résultats sont standardisés et pondérés pour être insérés dans la formulation de l'IDI (Santini et., *al*, 2010).

La particularité de l'IDI est de prendre également en compte la dimension temporelle des phénomènes de dégradation et de désertification en intégrant la valeur standardisée des aléas actuels, simulés pour les composantes uniques de la désertification, et leur variation par rapport au passé.

Cet indice adopté par le centre euro-méditerranéen des études des changements climatiques, prend en considérations six facteurs : érosion hydrique, érosion éolienne, fertilité du sol, productivité végétale et intrusion des eaux de mer sur deux dates différentes dont le calcul de la différence permet de cartographier le phénomène de la désertification, cet indice est la moyenne arithmétique des fonctions exponentielles pondérées de ces facteurs et leur variation du passé, en appliquant des pondérations selon l'importance du processus.

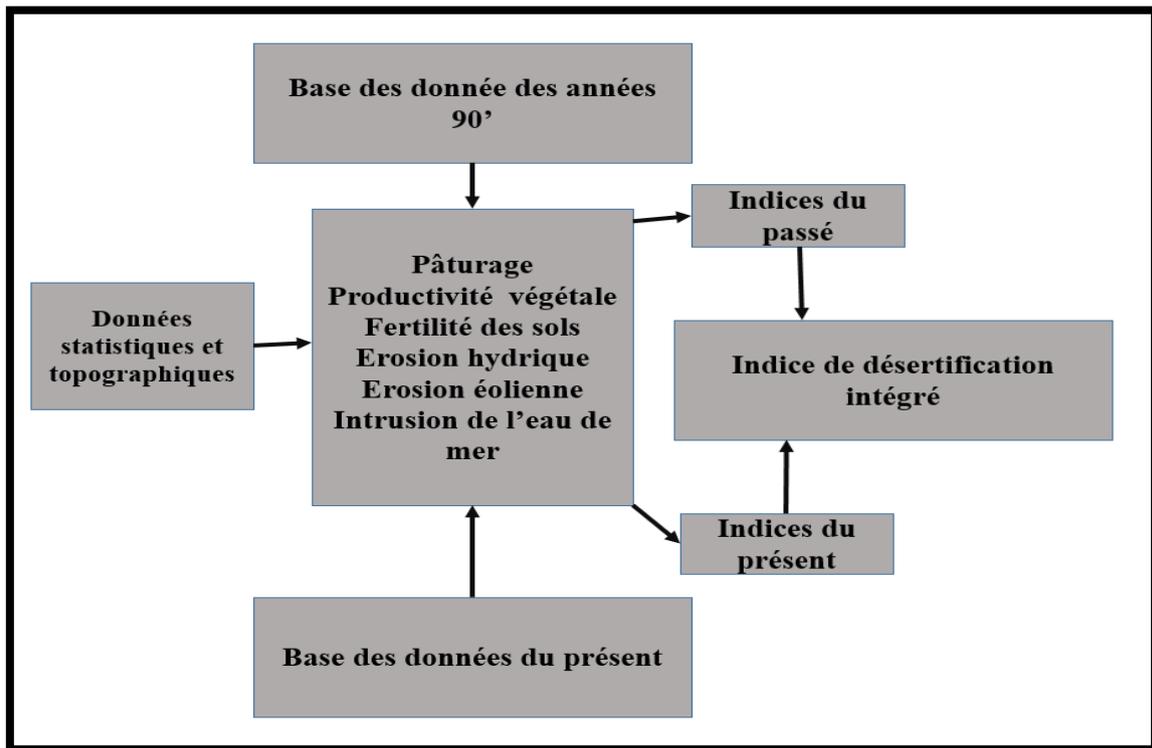


Figure 66 Organigramme pour le calcul de l'indice de désertification intégré IDI

L'analyse d'un aléa ou d'un phénomène humain ou naturel implique une analyse des tendances passées des dangers et des menaces des différents facteurs sur le territoire, l'analyse et l'évaluation de la vulnérabilité consiste à déterminer l'existence et l'exposition au danger avec la capacité de résilience (Kuitsou, 2011).

Dans le cas de notre étude, on a pris les facteurs calculés pour une seule date afin de cartographier la vulnérabilité, les facteurs qu'on a pris sont l'érosion hydrique, l'érosion éolienne, la salinité, l'occupation du sol et la densité des cheptels.

4.1.1. Cartographie d'érosion hydrique

Afin de calculer l'érosion hydrique de la région nous avons utilisé l'équation universelle de perte de sol (USLE) :

$$A = R * K * LS * C * P$$

Où

A= Perte en sol

R= Facteur de précipitation, selon Roose (1977).

$$R = 0.0295.P$$

K= Facteur de sol (érodabilité), ce facteur est en fonction de la teneur en limon et particule fins (m), en matière organique (a), structure du sol (b), et perméabilité (c) (Wischmeier and Smith, 1978), ce facteur est obtenu selon la carte pédologique de la région ainsi que les analyses des échantillons du sol.

$$K = 27.66 * m^{1.14} * 10^{-8} * (12 - a) + 0.043 * (b - 2) + 0.0033 * (c - 3).$$

LS= Facteur topographique. $LS = 0.10 + 0.12 * S$

S= Facteur de pente, extrait du modèle numérique d'altitude (MNA), fourni par le satellite Aster.

C= Facteur agronomique, dans le cas de notre étude, on estime ce facteur à partir de l'indice NDVI.

P= Facteur des aménagements de protection, qui traduit les travaux d'aménagement et de gestion pour lutter contre l'érosion, Seules des observations de terrain pourraient permettre de le calculer par comparaison de la perte de sol avec les pratiques antiérosives et de la perte sur le même sol sans aucune pratique. Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée (Mostphaoui et al., 2013).

Les résultats de la cartographie de ces facteurs sont présentés dans la figure suivante.

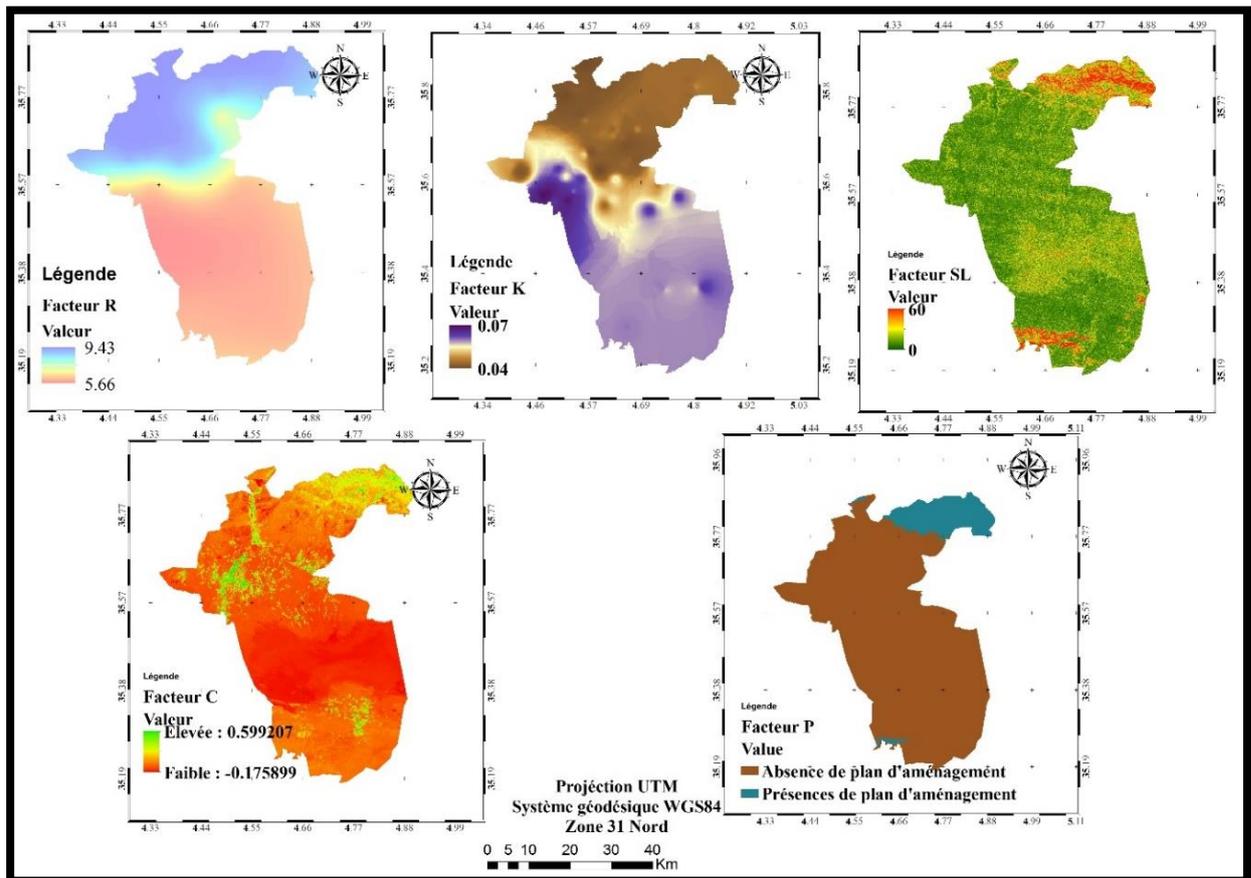


Figure 67 : Cartographie des facteurs entrés dans le calcul de l'équation de perte de sol USLE.

La cartographie de la probabilité à l'érosion hydrique, montre que la région nord est la plus vulnérable à l'érosion hydrique en raison de son altitude, pentes, et la quantité de précipitation élevée par rapport au reste de la zone d'étude, ces zones forment environ 3.73% de la zone d'étude localisée sur les monts de Maadhid et les piémonts, les zones les moins vulnérables forment environ 65% de la zone d'étude localisées sur les communes de Ouled Madhi, Souamaa, et M'cif, ce sont des zones de basse altitude et de faible pente (Figure 71 : Critères entrants dans la cartographie de la vulnérabilité à la désertification).

4.1.2. Cartographie d'érosion éolienne

Pour la cartographie de l'érosion éolienne nous avons utilisé l'indice présenté par Cissoko (2011), en se basant sur les données satellitaires ainsi que l'indice de probabilité :

$$IV = (V_{gv} * 0.513 + V_{gs} * 0.138 * H * 0.074 * E * 0.276)$$

Où

IV = Indice de vulnérabilité à l'érosion éolienne

V_{gv}= Végétation verte, dans le cas de cette étude ce paramètre est représenté par l'indice de végétation verte GRVI, Cet indice est sensible aux taux de photosynthèse des auvents forestiers, car les réflectances vertes et rouges sont fortement influencées par les changements dans les pigments des feuilles (Spirada et., *al*,2006)

$$GRVI = PIR/V$$

V_{gs}=Végétation sèche, représenté par l'indice multi bandes de sécheresse, Trois bandes spécifiques ont été choisies en raison de leur réponse unique aux variations de l'humidité du sol et de la végétation. L'indice utilise la différence entre deux bandes d'absorption d'eau dans la région infrarouge courte (1640 et 2130 nm) comme mesure de la sensibilité à l'eau dans la végétation et le sol. Cet indice est également couramment utilisé dans la détection des incendies de forêt (Wang et Qui, 2007).

$$NMDI = \sigma_{860} - (\sigma_{1640} - \sigma_{2130}) / \sigma_{860} + (\sigma_{1640} - \sigma_{2130})$$

H= Humidité.

E= Erodabilité du sol.

Le calcul de l'humidité du sol passe par un modèle conceptuel illustré dans la figure suivante :

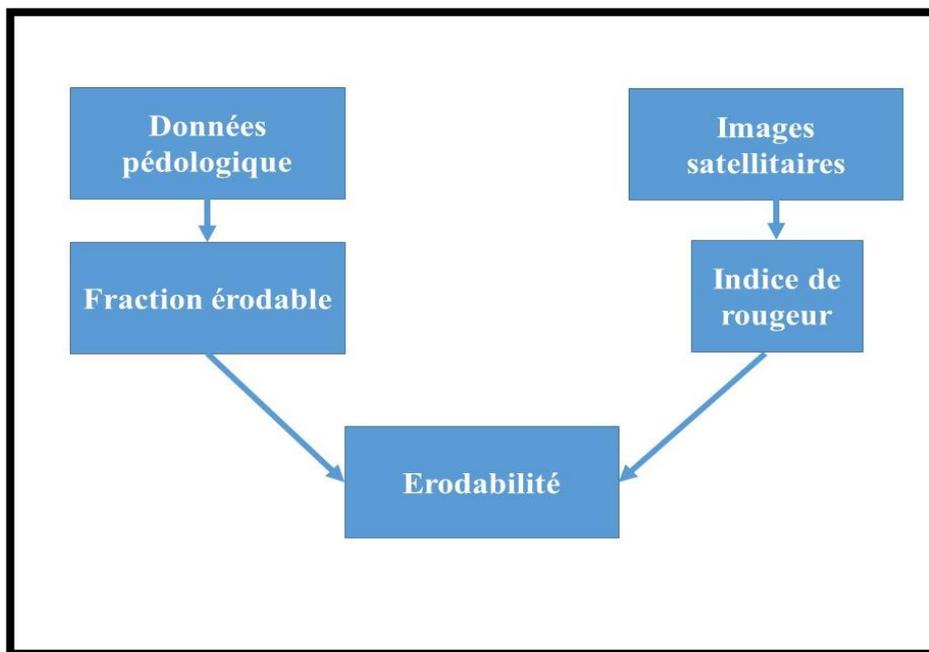


Figure 68 : Modèle conceptuel pour le calcul de l'érodabilité (Cissoko, 2011)

Du même, pour calculer l'humidité on a suivi le modèle suivant :

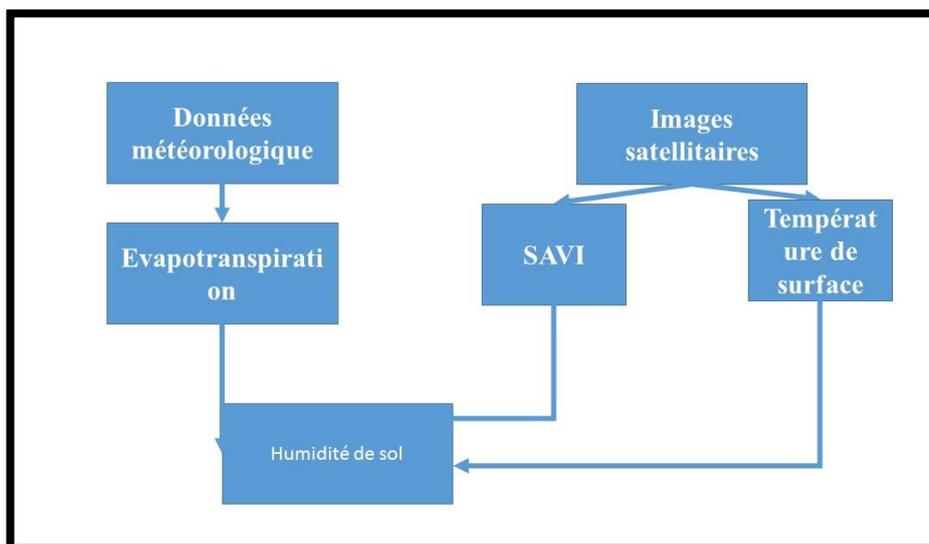


Figure 69 : Modèle conceptuel pour le calcul de l'humidité du sol (Cissoko, 2011).

Les résultats de la cartographie des entrées de cet indice sont présentés dans la figure suivante :

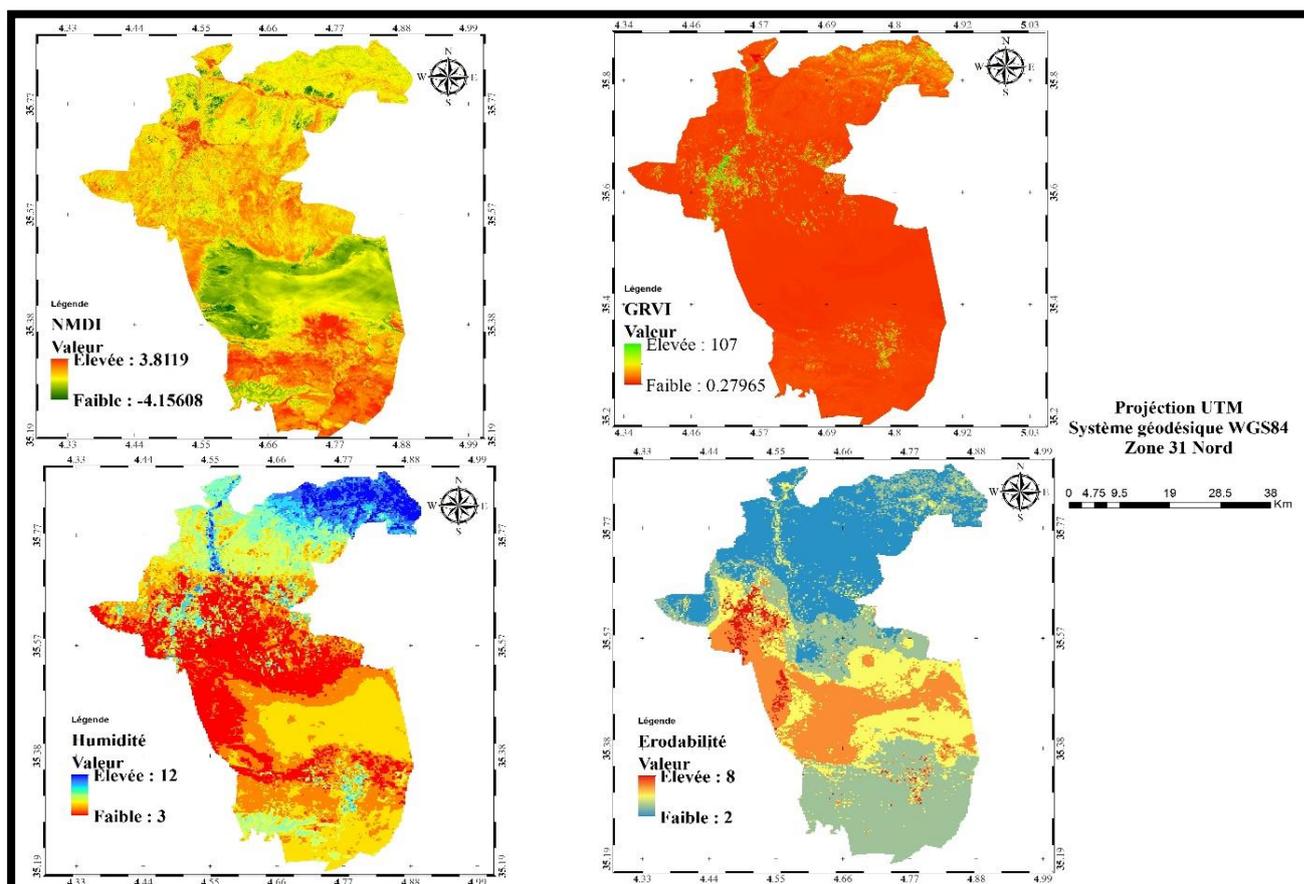


Figure 70 : Cartographie des entrées du modèle de vulnérabilité à l'érosion éolienne (IV)

Les résultats de la cartographie de l'indice de vulnérabilité à l'érosion éolienne sont présentés dans la Figure 70 : Cartographie des entrées du modèle de vulnérabilité à l'érosion éolienne (IV) , ces résultats montrent qu'environ 34% de la zone d'étude est dans une situation très vulnérable à l'érosion éolienne soit 6905.14 ha dans le Sud-Ouest de la zone d'étude au niveau de la commune de Ouled Madhi, environ 23.02 % de la zone d'étude est faiblement vulnérable à l'érosion éolienne représenté par la commune de Maadhid, M'sila et M'tarfa.

4.1.3. Salinité

La salinité est un des facteurs les plus importants dans le processus de la dégradation des sols, dans la zone d'étude, et comme il a été illustré au niveau du chapitre 4, la salinité touche aujourd'hui une large surface et affect l'installation, la distribution et la répartition des espèces végétales, l'indice de salinité du sol, présenté précédemment est utilisé pour la construction de cette couche.

4.1.4. Occupation du sol

La carte d'occupation du sol utilisée est celle issue d'une classification supervisée de l'image satellitaire de 2016, présentée dans le chapitre 5.

4.1.5. Densité des cheptels

La cartographie du surpâturage est basée sur les données du nombre de têtes de bovins, ovins et caprins pour chaque commune, interpolé spatialement, c'est la commune de M'cif qui est considérée comme la plus dense, la densité est plus faible sur les régions de Maadhid et Ouled madhi.

Les résultats de la cartographie de ces critères sont présentés dans la figure suivante :

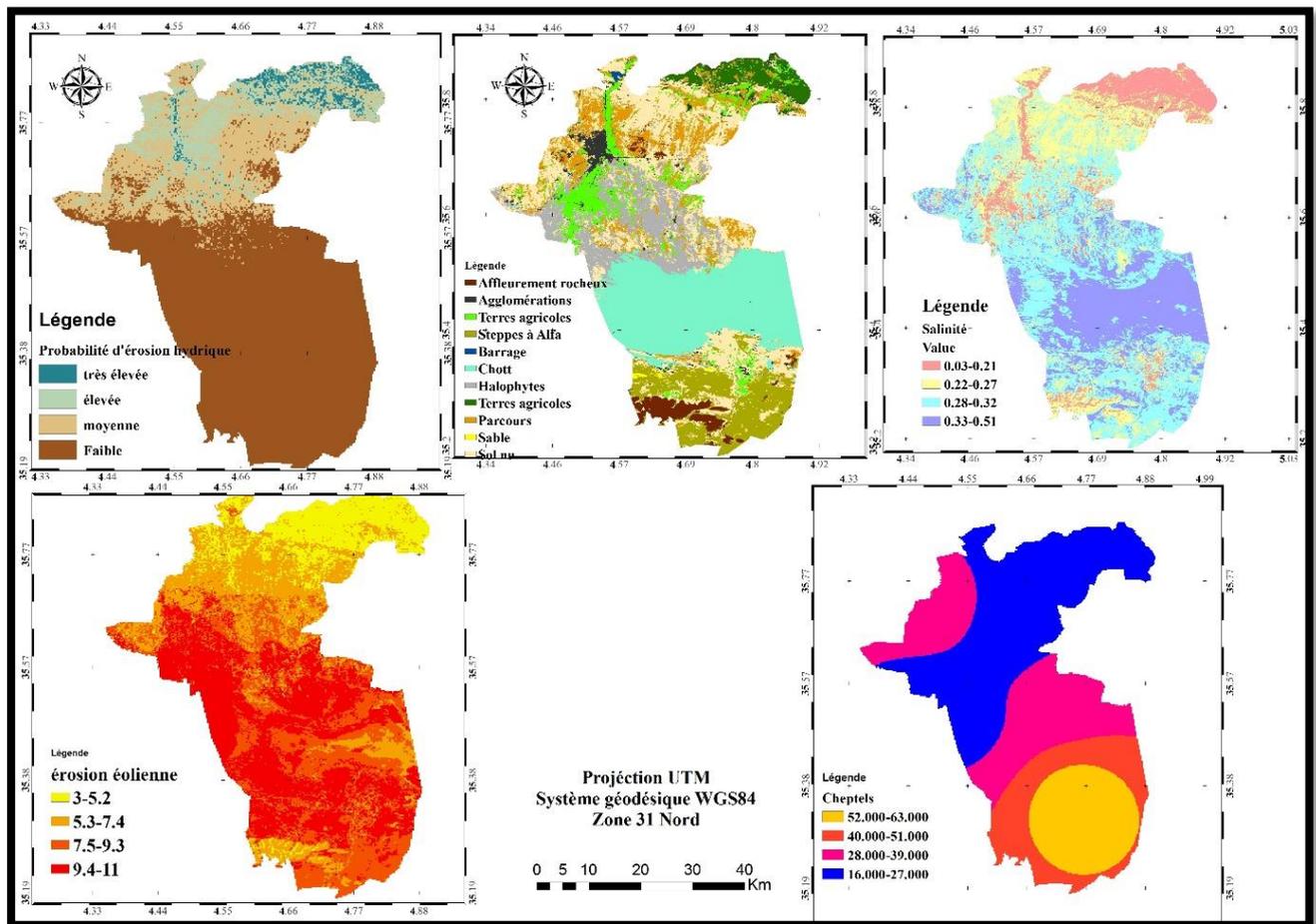


Figure 71 : Critères entrants dans la cartographie de la vulnérabilité à la désertification.

Tableau 29 : Scores attribués aux sous critères entré dans la cartographie de la désertification

Facteur	Valeurs	score attribué
USLE	Très élevée	4
	Elevée	3
	Moyenne	2
	Faible	1
Occupation du sol	Barrage	0
	Maqui et forets	3
	Terres agricoles	3
	Affleurement	1
	Agglomération	2
	chott	2
	Steppes à alfa	4
	Halophytes	4
	Parocours	4
	Dunes	1
	Sol nu	3
Salinité	0.03 - 0.21	1
	0.22-0.27	2
	0.28-0.32	3
	0.33-0.51	4
E.éolienne	3-5.2	1
	5.3-7.4	2
	7.5-9.4	3
	9.4-11	4
Chepteles	16000-27000	1
	28000-39000	2
	40000-51000	3
	52000-63000	4

4.2. Intégration de l'analyse multicritère dans la cartographie de la vulnérabilité

Comme indiqué précédemment, la première étape consiste à former une série de comparaison paire à paire en associant ces critères en fonction de leur importance relative et leur influence sur la vulnérabilité à sécheresse, on a utilisé une échelle de nombres qui indiquent combien de fois un élément est plus important ou dominant est au-dessus d'un autre, les valeurs de cette échelle varient entre 1 et 9 (Saaty, 1980). Une matrice carrée est alors formée (matrice dite réciproque) de dimension égale au nombre de critères utilisés. Chaque élément de la matrice représente la contribution relative d'un critère par rapport à un autre. Dans notre cas, nous aurons une matrice de 4x4 car quatre critères sont utilisés pour estimer l'indice de vulnérabilité.

Tableau 30 : Poids attribué selon l'échelle de Saaty

Critère	Erosion Hydrique	Erosion éolienne	Salinité	Occupation du sol	Densité de cheptels
Erosion hydrique	1	1/3	1	5	3
Erosion éolienne	3	1	1	3	3
Salinité	1	1	1	3	3
Occupation du sol	1/5	1/3	1/3	1	1/3
Densité de cheptels	1/3	1/3	1/3	3	1

Les poids à accorder à chaque facteur sont les éléments du vecteur propre (Eigenvector) correspondant à la valeur propre maximale (Eigenvalue) de cette matrice. Pour les calculer, Saaty propose une façon simple avec des résultats très proches par rapport à la méthode classique de calcul des valeurs et des vecteurs propres d'une matrice.

Tableau 31 : Poids de chaque critère

Critères	Poids
Erosion hydrique	0.23764344
Erosion éolienne	0.32771037
Salinité	0.25542122
Occupation du sol	0.0674179
Densité de cheptels	0.11180707
Somme	1

Nous devons également vérifier ces résultats afin de confirmer la cohérence e notre jugement :

$$\lambda_{max} = (0.23764344 * 5.53333) + (0.32771037 \times 2.866666333) + (0.25542122 \times 2.66666633) + (0.0674179 * 15) + (0.11180707 \times 1033333) = 5.10$$

$$CI = (5.10 - 5) / (5 - 1) = 0.0253$$

Après cela un ratio de cohérence (CR) doit être calculé :

CR= CI/AI, pour 5 critère on prend AI= 1.12 (Tableau 27. Tableau d'indice aléatoire de Saaty)

$$CR = 0.0253/1.12 = 0.02$$

Notre Ratio de cohérence est inférieur à 0.1 ce qui confirme que notre jugement est cohérent.

La dernière étape consiste à agréger et à compiler les couches d'érosion éolienne, érosion hydrique, salinité, occupation du sol et densité des cheptels pour construire la carte finale de vulnérabilité utilisant une méthode de somme pondérée (sur ArcGIS 10.2.2).

4.3. Carte de vulnérabilité à la désertification

La cartographie de la vulnérabilité à la désertification a révélé une délimitation spatiale de quatre zones de vulnérabilité pour présenter une carte décisionnelle, cette carte est le résultat d'agrégation basée sur la méthode de la somme pondérée.

La délimitation spatiale est faite dans l'échelle de valeurs compris entre 1 et 4, un pixel de valeurs élevée indique une vulnérabilité également élevée.

Zones à vulnérabilité faible dont la valeur de pixel varie entre 1 et 1.85 occupent environ 13.19 % de la superficie totale soit 26774.46 ha, localisées sur les régions montagneuses et forestières qui malgré leurs pentes accentuées, ont le privilège d'une altitude élevée, d'un couvert végétal assez dense, d'un sol plus stable et une bonne réception de précipitation avec des valeurs de températures diminuées.

Zones à vulnérabilité moyenne dont les valeurs varient entre 1.86 et 2.25 occupent 16.82%, soit 34136.55 ha, localisées sur les périphéries des forêts et des terres agricoles, ces zones ont un couvert végétal moins dense, formé essentiellement de végétation steppique herbacée.

Zones à vulnérabilité élevée, ont une valeur de pixel entre 2.26 et 2.95 et occupent environ 33.51 % de la zone d'étude soit 67999.12 ha, présentées par les parcours steppiques et les halophytes où le couvert végétal est plus clairsemé, les sols dans ces zones est plus fragile et vulnérable caractérisé par une faible teneur en matière organique.

Zones à vulnérabilité élevée, la valeur de pixel qui présente ces zones vari 2.96 et 4 entre occupent environ 36.46 % de la superficie de la zone d'étude soit 73986.21 ha, les zones de cette situation sont les régions sud.

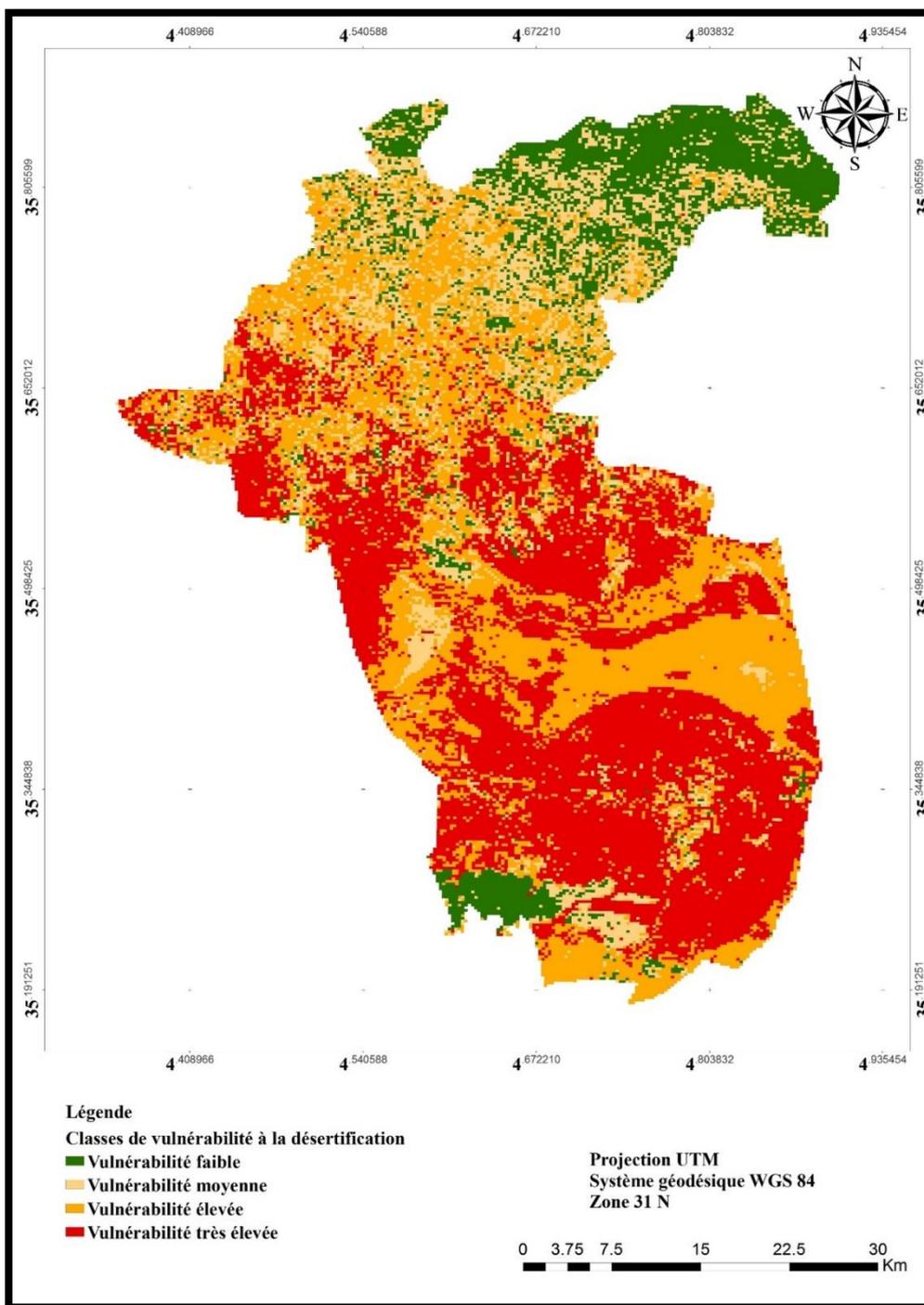


Figure 72 : Carte de vulnérabilité à la désertification

Conclusion

L'objectif de cette étude était de présenter des démarches pour évaluer les situations de vulnérabilité à la sécheresse et la désertification dans la région d'El Hodna, et d'élaborer des cartes décisionnelles pour aider à évaluer les zones vulnérables à ces deux phénomènes afin de mieux prévenir les dégâts, cette cartographie est basée sur des méthodologie régionales et internationales existante mais d'une démarche qui convient avec la nature de la zone d'étude et les données disponibles, cette méthodologie a également montrer le potentiel de d'analyses multicritères comme un outil d'aide à la décision.

L'évaluation de la vulnérabilité à la sécheresse et la désertification dans la région d'El Hodna a montré que de larges surfaces sont déjà vulnérables et extrêmement vulnérables ou, notamment dans le Sud de la zone d'étude et autours des agglomérations urbaines.

Les zones légèrement vulnérables à la sécheresse forment 16,28% soit 33031.25ha, les zones modérément vulnérables forment 10,06% soit 20411.37 ha de surface, les zones vulnérables et très vulnérables forment respectivement 32,81% soit 66570.29 ha et 19,46% soit 39483.63 ha.

Pour la vulnérabilité à la désertification les zones à vulnérabilité faible occupent environ 713.19 % soit 26774.46 ha, les zones à vulnérabilité moyenne occupent environ 16.82% soit 334136.55 soit 34136.55 ha, les zones à vulnérabilité élevée occupent environ 33.51% de la zone d'étude soit 67999.12 ha, et les zones à vulnérabilité élevées occupent environ 36.46% ce qui fait 73986.21 ha.

Les larges superficies dont la situation est vulnérable nécessite une intervention immédiate pour mettre des plans de gestion qui convient afin de protéger les différents écosystèmes surtout steppique, et de mettre des stratégies rationnelle pour l'exploitation des ressources naturelle.

Chapitre VII



Proposition d'un plan
d'aménagement, des
scénarios et des
perspectives

Introduction

Les terres de la steppe algérienne subissent un processus de dégradation continue auquel ont contribué le surpâturage et une agriculture inadaptée. L'altération du milieu naturel (affectant à la fois les terres privées et les terres communes), par les comportements des agents économiques, est favorisée par une carence de l'information et des institutions existantes. La politique environnementale mise en œuvre par l'état est apparue inefficace, nous apparaît qu'un usage écologiquement viable des terres communes exige leur cogestion associant État et communautés (Khaldi, 2005).

Pour comprendre et décider quelles mesures et procédures à suivre pour une gestion et un développement durable et lutter contre la sécheresse et la désertification, il est important de diagnostiquer le degré de vulnérabilité dans tout le territoire d'une région par réaliser des cartes de risque et de vulnérabilité.

Ce chapitre vise à présenter, une vue générale pour un aménagement adéquat, selon les cartes de vulnérabilité réalisées précédemment, et de donner une visualisation sur les scénarios à venir.

1. Gestion et aménagement

1.1. Milieu forestier

La région forestière présentée par la commune de Maadhid présente une situation faiblement vulnérable à la désertification et à la sécheresse par rapport au reste de la zone d'étude, mais cela n'empêche pas que cette région doit faire l'objet d'un aménagement qui vise à préserver l'écosystème.

Selon la conservation des Forêts de la Wilaya de M'sila, La caractérisation des conditions forestières et écologiques a été faite en examinant successivement :

- La synthèse des potentialités et contraintes des milieux naturels et forestiers, telles qu'elles ressortent des cartes thématiques, des cartes des formations forestières et du rapport sur la caractérisation des forêts.
- Mise en valeur actuelle des forêts et des terres à vocation forestières.
 - Gestion sylvicole des forêts.

- Equipement des forêts : réseau existant en pistes et tranchées pare feux ; comparaison avec besoins normatifs.
- Programmes réalisés, rythmes de réalisation ha/an.

Parmi les plans d'aménagement proposés pour la mise en défens des écosystèmes forestiers de la zone d'étude on cite la création de pistes, tranchées pare feux, postes vigies, et maison forestière et la réhabilitation des sites archéologique au sein de cette région (El Kalaa) en sensibilisant des effets néfastes de la pression anthropique en l'occurrence les feux de forêts et la pollution, notamment la sensibilisation des agriculteurs de l'importance d'une exploitation rationnel des terres agricole et de l'effet inverse de l'expansion de ces derniers aux détriments de la forets



Figure 73 : L'action anthropique dans la région de Maadhid (Cliché personnel)



Figure 74 : Le site archéologique d'El Kalaa des Hammadides au sein de Djebel Maadhid (Cliché personnel).

1.2. Les terres agricoles

Le secteur public agricole se trouvera toutefois rapidement confronté à des problèmes de gestion, d'approvisionnement en intrants, de financement, de rémunération de ses produits et de commercialisation. L'agriculture est touchée par un phénomène de décapitalisation et surtout par la salinisation des eaux et des sols, la préservation des terres agricoles concerne le maintien d'une quantité d'eau suffisante pour l'irrigation, l'utilisation des maisons de serres et la réhabilitation des sols.

1.3. Le chott

Le programme d'aménagement du chott est une opération intégrée, pluridisciplinaire et multi-acteurs qui permettrait à court terme la réhabilitation et la préservation de la zone humide et à long terme la création d'un noyau de dynamisme social, culturel et économique, ceci passe tout d'abord par protéger le site contre les rejets de déchets, délimiter l'espace pour limiter la prolifération anarchique de l'urbanisation, aussi la réduction des impacts des vents asséchant par la mise en place d'un plan d'aménagement à brise vent au sud du Chott.

La mise en défens du chott passe également par la préservation de la faune et de la flore qu'il abrite, en luttant contre le braconnage et la destruction de l'habitat et la chasse aléatoire.



Figure 75 : Outarde houbara d'Afrique (*Chlamydotis undulata*), un oiseau menacé de disparition de la région

(source : la conservation des forêts de la wilaya de M'sila)



Figure 76 : Avifaune aquatique du Chott

(source : la conservation des forêts de la wilaya de M'sila)

1.4. Préservation des ressources en eaux

La préservation des eaux passe par une série de mesure à prendre en considération :

- Lutte contre la pollution et la contamination des eaux par les déchets urbains et industriels.
- La collection des eaux de précipitation dans des retenues collinaires et des réservoirs pour réduire la pression sur les nappes phréatiques.
- La réhabilitation des canaux d'irrigations qui existaient pendant l'époque coloniale et jusqu'aux années soixante-dix, et qui ont servi comme un lien entre le barrage d'Oued El K'sob et les terres agricoles dans la plaine.

1.5. Le reboisement

A partir d'une sélection d'espèces appropriées ayant des fonctions spécifiques par rapport à leur capacité de lutter contre l'érosion et d'enrichir les sols. Certaines espèces sont toujours plus indiquées que d'autres. Le choix doit donc se faire de manière très judicieuse pour éviter des effets contraires à ceux attendus.

Le reboisement va contribuer à améliorer les caractéristiques physico-chimiques du sol, et de lutter contre l'érosion éolienne et hydrique, bien que garder la température de la surface du sol en valeurs favorables pour la faune et la flore.

Dans le cas de notre zone d'étude, un reboisement de reconversion des cultures marginales et les parcours érodés en pentes fortes sur les piémonts de Djebel Maadhid et de Meharga, ainsi, un reboisement d'extension de forêts existantes.



Figure 77 : Plan de reboisement dans Djebel Maadhid.

1.6. Lutte contre l'érosion hydrique

Pour réduire les dégâts causés par l'érosion hydriques il est proposé d'adopter la méthode des bandes d'arrêts qui consiste à la mise en place des bandes de cultures de 100 mètres, disposées perpendiculairement à la pente et séparées par des bandes de végétation intercalaires de 10 mètres (Roose et Bertrand, 1971, Roose, 1974 et 1975).

Aussi, la mise en place des édifications, le long des courbes de niveau, de banquettes de terre, de section trapézoïdale, hautes de 50 centimètres, distantes de 25 mètres sur une pente de 2 % et dont l'emprise au sol (3,5mètres environ) n'est pas excessivement contraignante.

1.7. Limiter l'érosion éolienne

Les brises vent vont assurer une réduction des impacts des vents de sable desséchants de direction Sud et Sud-Ouest, elle consiste à placer des barrières physiques au sens des vents, cela va contribuer à limiter l'avancée du sable notamment vers les terres agricoles dans la commune de M'cif et d'Ouled Madhi.

1.8. Fixation des dunes

Le principe fondamental de la fixation des dunes est d'empêcher le sable de se déplacer pendant un laps de temps suffisant pour permettre à une végétation naturelle ou plantée de s'y établir.

Pour maîtriser l'ensablement, il faut réduire le phénomène de saltation, soit en stabilisant le sol, soit en atténuant le gradient de vitesse du vent près de la surface du sol (Benguerai, 2011).

La fixation des dunes se fait selon deux méthodes :

- Fixation mécanique : consiste à placer un obstacle linéaire (palmes de dattier, branchages d'épineux, chaume de mil) interposé entre la source de sable et la zone menacée à protéger.
- Fixation biologique : consiste à la reconquête des espaces nus et des dunes mouvantes en les couvrant d'une végétation aussi dense que possible.

Dans le cas de la zone d'étude, les projets de fixation des dunes sont effectivement installés pour la partie sud de la région d'étude.



Figure 78 : Fixation des dunes dans la région de M'cif (conservation des forêts de la wilaya de M'sila)

1.9. Réhabilitation du sol

La restauration de la fertilité des sols passe par la préservation de la matière organique restante par des apports d'amendements organiques, des techniques d'agriculture de conservation sont susceptibles de réduire la baisse du taux de matière organique et les menaces sur la fertilité du sol, les sources de matière organique pouvant être incorporé aux sols sont peu nombreuses, il s'agirait donc de trouver des gisements de matière organique hors agriculture. Deux sources majeures apparaissent : les boues résiduelles des stations d'épuration et la fraction organique des déchets ménagers (Benssaoud, 2015).

Dans les sols arides, l'azote est souvent le seul élément fertilisant important, nécessaire, après des années de récolte il arrive qu'il soit utile d'apporter aussi du phosphate et du potassium, ainsi, la présence de la quantité excessive des sels dans les sols modifie, non seulement, les propriétés physico-chimiques des sols, mais aussi, influe sur la croissance des plantes, ce qui est important dans la mise en valeur des sols salés. La mise en valeur implique l'évacuation de l'excédent des sels solubles et du sodium échangeable.

La première chose à faire est d'assurer un drainage convenable puisqu'il faut éliminer du sel, par lessivage, en particulier des sels solubles, ainsi que le sodium est déplacé par le calcium, ou d'autres cations que l'on ajoute sous forme soluble ((Massoumi, 1968)

1.10. Réhabilitation pastorale

L'activité de l'élevage occupe une place assez importante dans la vie économique de l'espace steppique. Le cheptel, essentiellement ovin, qui y vit, représente environ 70% de l'effectif total du pays, soit 14 millions de têtes sur 20 millions en 2010. Les communautés tribales exploitent les espaces de parcours qui sont propriétés communes sur la base d'un droit de jouissance coutumier.

L'élaboration d'une stratégie d'exploitation et de gestion des parcours steppiques doit s'inscrire dans une stratégie de développement agropastoral intégré qui doit à son tour améliorer les deux secteurs ; agricole et pastoral. Pour cela, cette stratégie doit se greffer à une gestion patrimoniale pour faire une affectation équitable des espaces entre l'agriculture et le pâturage selon leurs potentialités (Senoussi et *al*, 2011).

La réhabilitation pastorale passe par une série de procédures tels que la mise en défens des parcours, Au niveau de la wilaya de M'Sila une superficie de 2400 hectares a été mise en défens jusqu'à l'année 2004 (HCDS, 2008). Cette technique a donné lieu à des résultats appréciables mais elle a nécessité un temps plus ou moins long pour une reconstitution végétale considérable et jusqu'à l'année 2004, des superficies de l'ordre de 20 809 ha ont été plantées par des différentes espèces pastorales.

Contrairement à la mise en défens classique, on peut employer une assistance à la mise en défens pour une reconstitution rapide de la végétation. Autrement dit, il s'agit d'une accélération du processus de régénération en agissant sur la surface du sol par un labour en courbes de niveaux qui augmentera sa rugosité et favorise par la même le piégeage des grains et des débris organiques, et les eaux de ruissellement (Hadbaoui, 2013).

2. Les perspectives d'avenir dans la zone d'étude

Selon la conservation des forêts de la wilaya de M'sila, Le Plan de Développement de Wilaya (PDW) est à définir dans une perspective à long terme car le développement forestier est à évolution très lente. C'est pour cela que la durée de ce plan est fixée à 20 ans correspondant à une période d'aménagement de 20 ans, ou 2 périodes de pré aménagement de 10 ans.

La période de 20 ans sur laquelle s'étalera le plan d'action à réaliser est subdivisée en 4 tranches quinquennales à partir de l'année 2010, c'est-à-dire à la fin du plan quinquennal en cours 2005 – 2009.

Cette planification périodique permettra une gestion assez souple des programmes à réaliser avec notamment des actualisations, révisions ou ajustements réguliers tous les 5 ans, ceci en fonction de l'évolution de la structure des peuplements, de l'évolution de l'érosion, de l'évolution démographique et des besoins nouveaux en reboisement et également en fonction des changements de priorités du secteur.

Les actions à programmer sont réparties par sous zone et selon 3 priorités correspondant à des périodes quinquennales. Les actions à programmer dans les délais les plus proches (premières priorités) sont celles relatives aux études préalables (notamment les études d'aménagement) et à la création des équipements nécessaires à la protection et à la gestion des forêts à aménager et des reboisements (pistes, tranchées pare feux,), les autres actions,

notamment les travaux sylvicoles qui seront dégagés par les études sont à programmer en 2^{ème} et 3^{ème} priorité.

En une vision globale des perspectives de la zone d'étude nous pouvons mettre deux scénarios :

Dans le cas d'une mobilisation globale où tous les acteurs prendraient conscience des risques réels encourus et des menaces à affronter dans l'avenir, et d'une prise en charge des différents plans d'aménagements régionaux et nationaux et des différents programmes de développement, la protection de ces ressources, leur réhabilitation, ainsi que leur exploitation rationnelle permettront d'une part d'asseoir une base économique et, d'autre part, de léguer aux générations futures un territoire capable d'assurer leurs besoins.

La prise en charge des différents plans d'aménagement et de développement va assurer :

- Une protection des ressources en eaux et en ressources naturelle, et une préservation de la biodiversité.
- Une prévention des risques naturels tels que la désertification et la sécheresse.
- Une préparation pour faire faces aux catastrophes naturelles sur tous les niveaux.
- Diminution de la vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification, notamment pour les régions forestières et pré-forestière.
- Une fixation des dunes efficace et une réduction des effets néfastes des vents de sable.
- Une assurât de la sécurité alimentaire.

Dans le cas de continuations des conditions et des tendances actuelles, sans changement majeurs dans les démarches et les méthodes d'actions et sans implication des acteurs locaux et des principaux concernés.

Ce scénario comporte des risques qu'il faudrait assumer : aggravation des menaces agro écologiques, et dégradation agricole, poursuite de la situation de vulnérabilité et de sous-développement notamment dans les régions rurales, des déséquilibres du territoire.

On enregistrera peut être de nombreux échecs et quelques retards difficiles à rattraper du fait de l'ampleur des perturbations climatiques et écologiques, de la poursuite des pratiques agricoles et pastorales ruineuses (labours en zone steppique, défrichements, surcharge des parcours, pillage des mise en défens...), de la faiblesse des capacités et des moyens de réalisation des programmes

qui seraient engagés, de la faiblesse des capacités de suivi et d'évaluation des projets, de la non implication des acteurs et des bénéficiaires des programmes, de la faiblesse organisationnelle des acteurs opérateurs (agro pasteurs, petits éleveurs, agriculteurs, jeunes porteurs de projets...) (Sahli, 2011).

Cela, mettra la zone d'étude dans une situation critique caractérisée essentiellement par :

- Une augmentation des risques menaçant la biodiversité et les espaces naturelles.
- Une amplification de l'action anthropique, accompagnée par une forte pression sur les ressources naturelles résulte souvent d'une inconscience individuelle ou collective
- Augmentation de la pression mis sur tout effort de développement et d'aménagement de territoire.
- Le patrimoine historique et archéologique, et la richesse naturelle seront semis à une convoitise, de conflits d'intérêts, de gaspillage et d'exploitation inconsidérée.

2.1. Simulation future de l'état du milieu

Afin de simuler l'état du milieu nous avons opté pour la technique de l'automatisme cellulaire (Cellular automata), qui offre une simulation spatiale en se basant sur les données de deux dates différentes.

Pour notre cas d'étude nous avons choisi de faire une simulation de l'occupation du sol, plus précisément une simulation de l'état de couvert végétal dans le futur vers l'an 2026 en se basant sur les données de 2003 et de 2016.

Pour cela on a reclassé les unité d'occupation du sol en trois unités seulement :

- Unité de couvert végétal : qui inclue les steppes à Alfa, les halophytes, les parcours steppiques, les maquis, et les terres agricoles.
- Unité stérile (non vivante) : qui inclue le sol nu, le sable, le chott, les agglomérations et les affleurement rocheux.
- Unité stable : présentée par le barrage d'El k'sob.

La simulation de ce Scénario a été développée selon une analyse de cellular-automata, selon le modèle de MARKOV intégré sur le logiciel IDRISI.

La première étape nécessite, d'entrer les deux couches d'occupation de sol (en 3 unités), et indiquer la durée de temps entre les deux dates, puis indiquer la durée de temps sur laquelle on souhaite faire notre projection pour que le logiciel crée une estimation de transition .

La deuxième étape demande entrer un paquetage de couches différentes (groupe raster) sur lesquelles les unités précédentes dépendent, on a choisi d'entrer une couche de moyennes précipitation pour l'unité de végétation, une couche de pression anthropique pour la couche d'unité inerte et une couche de direction de flux extraite du modèle numérique d'altitude.

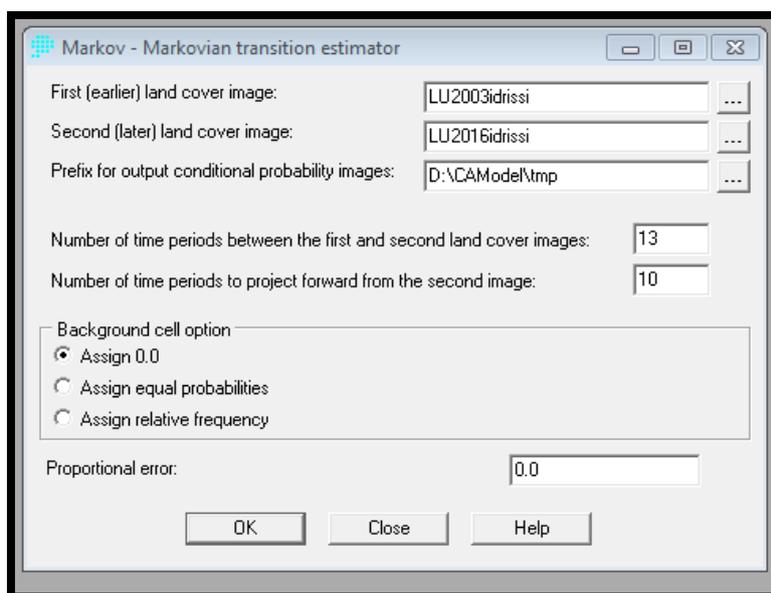


Figure 79 : Création de transition d'estimation MARKOV

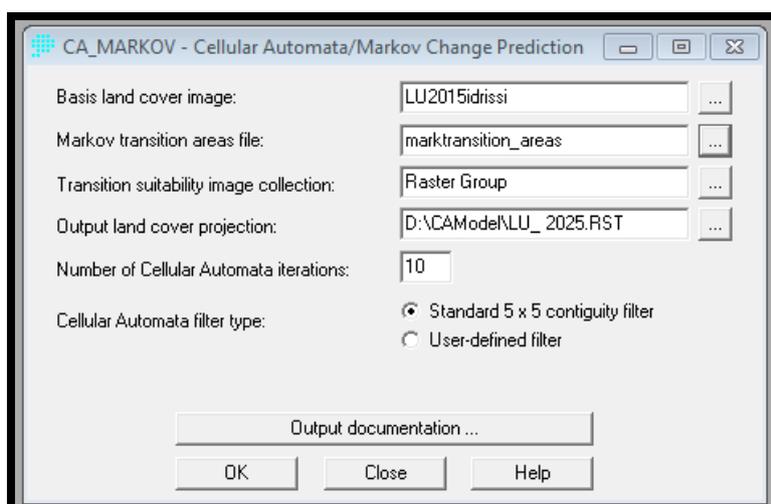


Figure 80 : Entré du modèle MARKOV

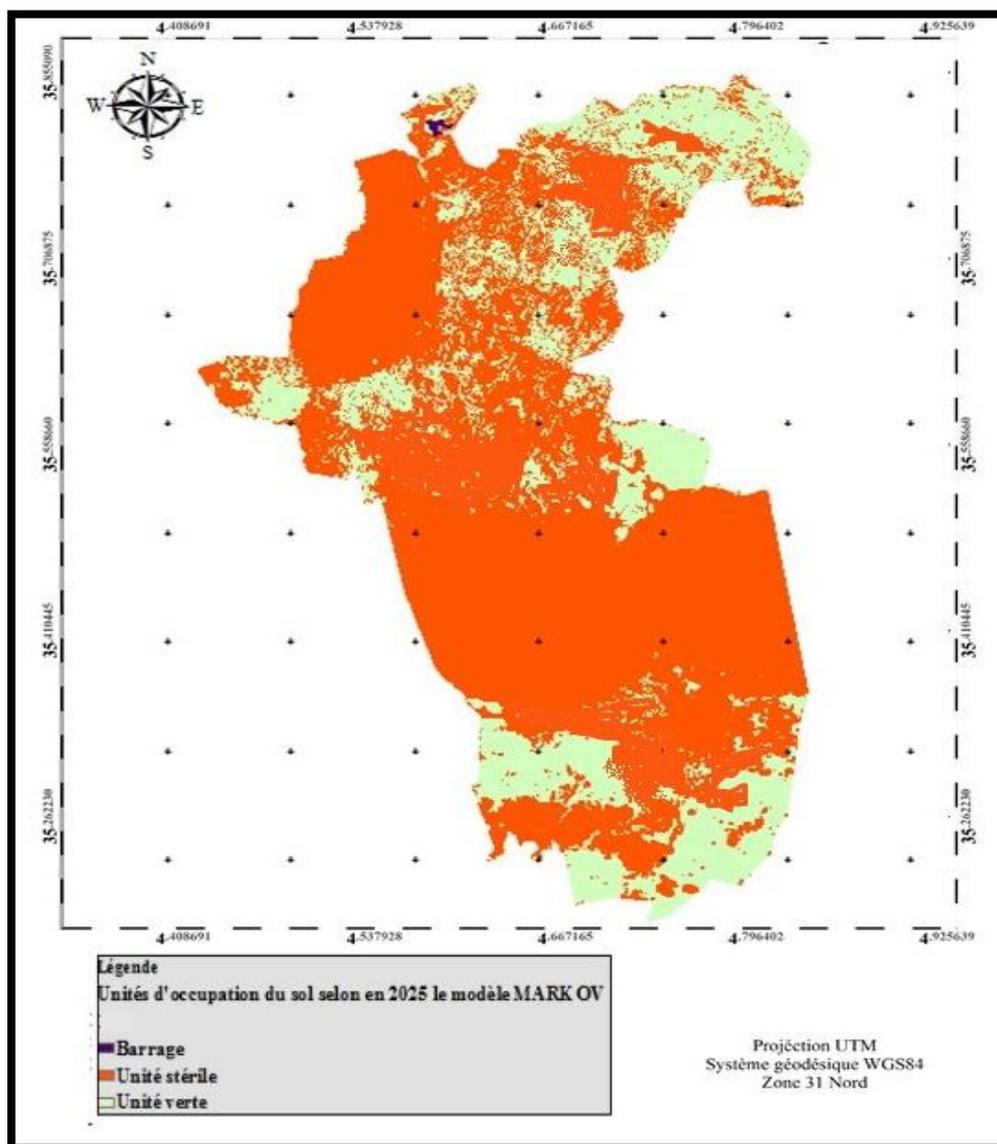


Figure 81 : Scénario projeté à 2025 selon le modèle de MARKOV

Selon cette cartographie, au bout de dix ans, les unités stériles occuperont environ 66.14%, cette unité s'étendra pour occuper presque tout le Nord-Ouest de la zone d'étude, la surface totale de cette unité est d'environ 68533.15 ha, la surface de végétation occupera environ 33.77 % de la zone d'étude soit 134197.17 ha.

3. Perspectives d'étude

Cette étude a permis de donner une investigation sur l'état du milieu et la situation de vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification, elle consiste à mettre à la disposition des décideurs et des planificateurs des cartes de vulnérabilité à ces deux catastrophes afin de mie

gérer, conserver et prévenir les dégâts, au même temps offrir une étude spatiotemporelle de l'état des différents écosystèmes dans la région, cette contribution nécessite encore des approfondissements afin de mieux cerner les situations de vulnérabilité dans des zones plus larges, et avoir une simulation future comme perspectives il est envisagé de :

- Utiliser des images à très haute résolution (Ikonos, Quickbird, Spot), dont les tailles de pixels sont inférieures à celle des images du satellite Landsat, cela va aider à une meilleure observation de l'état du couvert végétal et du sol, et les techniques LiDar.
- Avoir accès à des données socioéconomiques plus approfondis et plus détaillés ce qui permet de calculer d'autres indices d'action anthropique tel que le revenu par habitant, soin vétérinaires, types de traitements agricoles.
- Analyser l'état de vulnérabilité dans le passé puis faire une simulation future, cette étape nécessite avoir des données socioéconomiques et pédologiques des années passées.
- Multiplier le nombre d'échantillons en ce qui concerne l'étude des paramètres du sol afin d'avoir des résultats plus adéquats.
- L'analyse des profils du sol permet de donner des informations importantes en ce qui concerne l'état.
- Multiplier le nombre des stations d'échantillonnage et travailler sur des zones d'une plus grande superficie.
- Prendre en considération les différents indices de biodiversité faunistique et floristique à travers des relevées et des séries d'échantillonnage et d'identification.

Conclusion

Tout travail de diagnostic et de cartographie de vulnérabilité ou de risque doit être suivi par des propositions des différents plans d'aménagement possible, et d'une visualisation des tendances et des scénarii du future afin.

Ce chapitre a donné certains plans d'aménagement possible pour assurer le développement durable la préservation, la conservation et la réhabilitation dans la zone d'étude, , ainsi, dans ce chapitre on a essayé de donner deux scénarios futurs de deux visions « optimiste » et « pessimiste » pour la mise en œuvre d'une politique de développement rural durable et d'une stratégie de lutte contre la désertification et la sécheresse : un scénario "pessimiste" de prolongement de la tendance actuelle sans grand changement mais avec des risques de poursuite de la situation de dégradation des ressources et de sous-développement le un scénario "optimiste" basé sur une démarche de développement et d'aménagement durable

qui va assurer une bonne gestion et protection des ressources steppiques et forestière en gardant un équilibre avec l'activité agricole et pastorale.



Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de cartographier les zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification dans la région d'El Hodna au centre d'Algérie, à travers une modélisation en intégrant les outils de Géomatique ainsi que la méthode de l'analyse multicritère comme un outils d'aide à la décision pour pondérer les différentes couches de facteurs lors de notre modélisation.

De même, les données de télédétection ont assisté au suivi de l'évolution de l'état d'occupation de sol, sol entre 1987,2003 et 2016, ces données ont été utilisée également dans estimation numérique de risque de la désertification et de la sécheresse, dans une approche indicielle pour suivre les changements des différents paramètres et caractéristiques de la surface de la terre.

La région d'El Hodna est située au centre de l'Algérie, est une zone caractérisée par une hétérogénéité paysagère et des formation géologiques, géomorphologiques, hydrologique et végétale diverses, une analyse climatique et bioclimatique de la région a montré une différenciation de la distribution des précipitations, des températures et des valeurs des différents indices climatiques entre le Sud et le Nord de la zone d'étude.

Les cartes d'occupation du sol, élaborées suite à une classification supervisée des images satellitaires issues de trois périodes (1987, 2003, 2016) ont mis en valeur une dégradation du milieu et ont révélé des changements majeurs , tels que l'augmentation considérable dans des surfaces d'agglomérations urbaines d'un ordre d'environ 224161.37 ha entre 1987 et 2016, ainsi que l'augmentation de la superficie des zones occupées par des terres agricoles durant la période 1987- 2003 de 856 ha et de 5903.11 ha entre 2003 et 2016.

Suite à la diminution des précipitation et l'augmentation des températures et en combinaison avec un surpâturage intense aux alentours ; chott El Hodna a marqué une évolution progressive dans son étendue d'environ 27945.15 ha entre 1987 et 2003 et de 3786.13 ha entre 2003 et 2016.

Du même, cette analyse révèle l la diminution de la surface de la steppe à Alfa de 9912.54 ha entre 1987-2003 et 3738.18 ha entre 2003-2016 ainsi, la surface des forêts a connu

un accroissement de 2361.11 ha entre 1987 et 2003 puis une régression de 6858.67 ha durant les années qui suivent.

Une approche indicielle pour l'évaluation des changements globaux dans la zone d'El Hodna a montré une diminution dans les unités des surfaces qui représentent un bon fonctionnement et un état favorable du milieu, et en revanche, une augmentation des surfaces occupées par des valeurs qui indiquent des dégradations ou des conditions défavorables.

Lors de la cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification, la première étape était de créer les couches de critères à partir de certains indices et paramètres qui forment des sous-critère en utilisant des données satellitaire, météorologiques, statistiques, cartographiques et à pédologique, la deuxième étape étaient de reclasser chaque sous critère en attribuant des scores à chaque classe de valeurs, une fois reclassés, les indices et les paramètres feront l'objet d'une cartographie pour former les cartes de critères.

L'intégration de l'analyse multicritère a complété le rôle cartographique du système d'information géographique, en aidant à pondérer chaque critère selon son importance dans les phénomènes étudiés.

La cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse a montré que les régions non vulnérables forment 21,37% soit 43297.47 ha de l'étude zone située principalement sur les montagnes, les zones légèrement vulnérables forment 16,28% soit 32984.69 ha, les zones modérément vulnérables forment 10,06% soit 20382.43 ha de surface et sont situés sur des affleurements rocheux, les parcours et les champs abandonnés, les zones vulnérables et très vulnérables forment respectivement 32,81% soit 66475.90 ha et 19,46% soit 3942.65 ha de la superficie totale, répartis sur le reste de la zone d'étude couvrant le sol nu et sablonneux à l'aspect sud, et aussi chott El Hodna.

La cartographie de la vulnérabilité à la désertification a montré que les zones à vulnérabilité occupent environ 13.19 % de la superficie totale soit 26774.46 ha, localisées sur les régions montagneuses et forestières, les zones à vulnérabilité moyenne occupent environ 16.82%, soit 34136.55 ha, localisées sur les périphéries des forêts et des terres agricoles, les zones à vulnérabilité élevée occupent environ 33.51% de la zone d'étude soit 67999.12 ha, localisées sur les zones steppiques et les parcours, les zones à vulnérabilité extrême occupent

environ 36.46% de la superficie de la zone d'étude soit 73986.21 ha sont généralement les sols nus et les halophytes.

Il est très important d'agir le plus tôt possible pour réhabiliter, conserver et préserver les écosystèmes dans la région d'El Hodna, notamment, l'unité des steppes à Halfa et les parcours steppiques classées comme vulnérables suite à l'intensité de la pression anthropique et la dégradation qu'elles causent, les terres agricoles elles-mêmes nécessitent une intervention pour la réhabilitation des sols suite à l'augmentation des taux de salinité, et surtout une rationalisation dans l'exploitation des eaux.

En conclusion, cette étude a permis de donner une vue globale et assez adéquate sur la situation de vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification dans la région d'El Hodna, néanmoins, cette étude doit être complétée par d'autres travaux pour mieux évaluer l'état environnemental et de compléter les lacunes ; nous envisageons ces perspectives dans les études futures :

- Passer à l'utilisation des images satellitaires à haute et très haute résolution.
- Utiliser la technologie Laser et l'outil LiDar (light detection and ranging) ou (laser detection and ranging), pour mieux accéder à l'analyse des propriétés des sols, du couvert végétal et des nappes.
- Passer à d'autres méthodes de pondération de critères et de choix d'expertise.
- Utiliser des critères socioéconomiques plus adéquats tels que la disponibilité en eau par individu (m³/an/ind.).
- Utiliser des indicateurs de biodiversité tel que la biodiversité alpha et l'indice d'intégrité de biodiversité.



Références

Références

Bibliographiques

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), en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences Filière : Sciences Agronomiques Option : Pédologie 209 pages + annexes.
- Agoussine M. (2003). Les divers aspects de l'hydrologie en régions arides et semi arides, cas du sud-est marocain. Terre & Vie,Rabat, 70..
- Aidoud A., Le Floc'h, E, Le Houerou, H.N. (2006) Les steppes arides du Nord de l'Afrique. Revue sécheresse, 17, 19-30
- Aidoud A Et Touffet J (1996) : La régression de l'alfa (*Stipa tenacissima*), graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes.
- Aidoud A. (1989) Les écosystèmes à Armoise blanche (*Artemisia herba-alba Asso.*). II: Phytomasse et productivité primaire. Biocénoses, 1, 70-90.
- Alard D, Balent, G, 2007, Sécheresse : quels impacts sur la biodiversité en systèmes prairie aux et pastoraux ?, Fourrages (2007) 190, 197-206.
- Al bakri A (2014) Portfolio Diversification Strategy and the Impacts on the Middle East Real Estate Investment Decision, International Journal of Economics and Finance (IJE) 6 (2), 62-74
- Allibed A, Kumar, L, (2013), Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review, Advances in Remote Sensing, 2013, 2, 373-385.
- Al Rifaii P, Breisinger C (2012), Droughts in Syria: An Assessment of Impacts and Options for Improving the Resilience of the Poor, Quarterly, Journal of International Agriculture 51(1) · January 2012.
- Amroun A (2008), Hydraugeologie et qualité des eaux souterraine de la plaine de M'sila, Mémoire afin d'obtenir le diplôme de Magister en Hydraufeologie, Université d'El Hadj Lakhdar , Batna
- Akinola M.O., Thompson K., Buckland S.M. (1998) : “Soil seed bank of an upland calcareous grassland after 6 years of climate and management manipulations”, J. of Applied Ecology, 35, 544-552

- Arshad et al., (2009)M. Arshad, B. Sharoona, T. Mahmood Inoculation with *Pseudomonas* spp. containing ACC deaminase partially eliminate the effects of drought stress on growth, yield and ripening of pea (*P. sativum* L.) *Pedosphere*, 18 (2008), pp. 611-620
- Asadi Zarch M A, Sivakumar B, Sharma A, 2015, Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI), *Journal of Hydrology*. Volume 526, Pages 183-195.
- Aubert G (1963), Etude de sol et classification, La classification pédologique française, Cah ORSTOM, série de pédologie, 3 1-7.
- Bagnouls F Et Gaussen H 1957 : les climats biologiques et leur classification. *Ann, Géog*, Fr355, PP193-220
- Bahlouli H, S M Al marzoug, A Khar, (2012) , Solitons in PT-symmetric potential with competing nonlinearity, *Physics Letters A* 376 (45), 2880-2886
- Bannari A, Guedona A M, El-Hartib A, Cherkaouic F Z ,El-Ghmari A, 2008. Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor," *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 39, No. 19-20, 2008, pp. 2795-2811.
- Barkat T. (1998).- Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Rev. Sécheresse* n° 3. pp. 201-208.
- Barry (J. P.), CELLES (J. C.), (1973), Le problème des divisions bioclimatiques et floristiques au Sahara algérien. *Naturalia monspeliensia*, sér. Bot. 23-24, 5-48.
- Bedrani S., Bensouiah R. (2000). Les causes de la dégradation des parcours steppiques : résultats d'une enquête. *Annales de l'Institut national agronomique El Harrach*, 01/01/2000, vol. 21, n. 1-2, p. 14-32.
- Bedrani S., 1999.- " Situation de l'agriculture, de l'alimentation et de l'économie algérienne ". CIHEAM. Paris.
- Belaid Dj, 2015, Utilisation Des Boues Residuelles De Station D'epuration En Algerie, collection dossier agronomiques.
- Belhadj, A., 1998, "Contribution au logiciel d'analyse et de traitement d'images satellitaires (L.A.T.I.S). Analyse spatiale-spectrale d'images satellitaires appliquées à

la cartographie thématique", Thèse de Doctorat d'Etat, spécialité Traitement d'images et Télédétection, Université de Sciences et des Technologies Houari Boumediene-USTHB, Alger, Algérie

- Belloum A, Dekhil S, 1993 Management of Grazing Lands and Development of Steppe Lands in Algeria, MEDIT, 4 - 3 rd Issue, pp 32-35.
- Benderradjil M, Alatou J, Arfa A, Benachour K (2000), Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène en Algérie, New Medit, vol 5, n.4, (December 2006), pp. 15-22
- Bendjemaa A (2004) A comparison between one year of daily global irradiation from grounded-based measurements versus Meteosat images from seven locations in Tunisia. Solar Energy, 48-5, 325-333.
- Benduerai A (2011), Évolution du phénomène de désertification dans le sud oranais (Algérie), thèse de doctorat en sciences, université de Tlemcen.
- Benmessaoud H (2015), Use of GIS to study the socio-economic impact on the physical environment in the eastern Aurès (Algeria), 14 (2), pp. 445-458
- Benmessaoud H 2009 : Etude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse de Doctorat, Université de Batna, 220p+ annexes
- Benmessaoud H, Kalla M, Driddi H 2009 : Évolution de l'occupation des sols et désertification dans le Sud des Aurès (Algérie).M@ppemonde, vol (94), N°6.
- BenKedja R, Belhadj M Z, Boudoukha A (2012), Impact d'une pollution anthropique et d'une contamination naturelle sur la qualité des eaux du barrage de Zit Emba. Est algérien, La Houille Blanche, 34-41
- Bensaid 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 Es Senia Oran Algérie, 325p.
- Bensaid A, Barkil M, Talbi O, Benhanifa K et Mendas A 2(007), l'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision pour la localisation spatiale des zones à forte pression anthropique: le cas du département de Naàma en Algérie. Télédétection, Vol (7),N°1-2-3-4, PP359-371.

- Benslimane M, Hamimed A, El Zerey W, Khaldi A, 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 no. 3 (2008).
- Biday S G, Bhosle U (2010), Radiometric Correction of Multitemporal Satellite Imagery 1, World Academy of Science, Engineering and Technology, 241-245
- Bied-Charreton M, 2009, Sècheresse, désertification et développement en Afrique, Cours de master2 – 2007- UVSQ et CERDI.
- Birem (2006), بلدية المسيلة المختلطة دراسة اقتصادية واجتماعية 1945- بين 1884, Mémoire en vue de l'obtention d'un diplôme de Magister en Histoire et civilisations de la méditerranée, Université de Constantine, 200 pages +Annexes
- BNEDER(2007),Evaluationtechniqueetfinancièredeprojetsd'élevage:bovins,ovins,caprin dans la commune de M'cif.
- BNEDER (2008) , Etuded'unschémadirecteurpourleszonessteppiques et agro pastorales de la wilaya de M'sila.
- Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C. B., Jensen N. O., schelde K., and Thomsen, A (2002), Airborne multispectral data for quantifying leaf areaindex, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture, Remote Sens. Environ., 81, 179–193, doi:10.1016/s0034-4257(01)00342-x,).
- Bonne F. (1996) : Précis de télédétection, Volume 2 - Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 642 p.
- Bokushevaa R., Koganb F, Vitkovskayac ., I., S. Conradta, M. Batyrbayeva, Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuringagainst drought-related yield losses, Agricultural and Forest Meteorology 220 (2016) 200–206
- Bootsma A, Boisvert J B, De Jong R., Baier W (1996). La sècheresse et l'agriculture canadienne: Une revue des moyens d'action. *Sècheresse* 7 :277-285.
- Boudad B, Sahbi H, Manssouri I. Manssouri T. Boudebbouz B (2015), Prédiction de la sécheresse dans le bassin d'Inaouène en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple, Journal of SAWIS, ISSN: 2351-9096 Volume – 2015 - N° 01

- Bouchetata T. B. et Bouchetata A. A. (2011) 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.
- Bouhata R. (2015), use of landsat tm for mapping land use in the endorheic area - case of gadaine plain (eastern Algeria). Analele Universității din Oradea, Seria Geografie, Editura Universității din Oradea, Oradea, no 2/2014 (December), pp. 101-107.
- Bouguerra K. (2001). Potentialités en ressources en eau superficielle du nord du pays (Algérie). N° 71/ANRH/DHYL, 10p.
- Bouzekri A. 2014. Multicriteria evaluation of critical situations to desertification risk in Aurès, Terri-tory Management. Doctoral thesis.El hadj lakhdra university Batna, Algeria, pp167, 168 (In French with English summary).
- Bouzekri A, 2013, Evaluation multicritère des situations Critiques au risque de la désertification Dans les aures (algerie), Thèse Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3ème cycle En Aménagement du territoire et gestion des risques majeurs, 200 pages + Annexes
- Boyadgiev T. G. (1974), Contribution à la connaissance des sols gypseux. The Euphtates pilot irrigation project. F.A.O., Raqqa. 22 p
- Bryant, E.A., 2005. Natural Hazards. University, Cambridge, UK, Cambridge.
- Callot G (1976) Analyse d'un système géo-pédologique régional. Thèse d'État, USTL, Montpellier, 105 p et annexes.
- Chakhar S 2006 : Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique. Thèse de l'Université Dauphine, DFR Science des organisation265p+ annexe.
- Chen Z., Yang, G., 2012. Analysis of drought hazards in North China: distribution and interpretation. Nat. Hazards 65 (1), 279–294.
- Choudhary V et Jain P .c (2012), Screening of alkaline protease production by fungal isolates from different habitats of Sagar and Jabalpur district (M.P), J. Acad. Indus. Res. Vol. 1(4) September 2012, 215-220
- Chuvieco E., Martí N M. P. Palacios A., Assessment of diVerent spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination, int. j. remote sensing, 2002, vol. 23, no. 23, 5103–5110.

- Cihlar J , Ly H, Li Z, Chen J , Pokrant H, Huang, F (1996), Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies—Artifacts and corrections, *Remote Sensing of Environment* Volume 60, Issue 1, April 1997, Pages 35-57
- Cihlar J., Manak, D., & Voisin, N. (1994). AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing. *Remote Sensing of Environment*, 48, 77– 88.
- Cissokho R. 2011. Développement d'un indice de vulnérabilité à l'érosion éolienne à partir des images satellitaires dans le bassin arachidier du Sénégal : Cas de la région de thies, Doctoral geography thesis. University of montreal. 128.132.
- Clark S C. 1996. Mediterranean ecology and an ecological synthesis of the field sites. Mediterranean desertification and land use In *Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification*. European Commission Community Research. EUR 1888. Pp 23.
- Claudin J., Le Houerou H.N. et Haywood M. (1975) Etude phytoécologique du Hodna Publ. FAO, Rome, 154 p. et 2 cartes.
- D.P.A.T, 2008. Direction de la Planification et l'Aménagement du Territoire. Données sur la population de la wilaya de M'Sila. Doc. multigraphié.
- Dai A. 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Climatic Change* 2 (1) : 45–65.
- Daoudi A., Benterki N., Terranti S., 2010. La lutte contre la désertification des parcours steppiques : L'approche du développement Agro-pastoral intégré. I.S.D.A. (Innovation & Sustainable Development In Agriculture and Food), Montpellier, 11 p.
- .Daughtry E.R, .Hunt Jr. J.E, McMurtrey III (2004), Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance, *Remote Sensing of Environment* Volume 90, Issue 1, 15 March 2004, Pages 126-134
- Djebaili S, (1984) Steppe algérienne : Phytosociologie et écologie. OPU, Alger 177p
- De Martonne E, (1926), Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La Meteorologie*, 449-458.
- Delaître (2017), R, Suivi à long terme d'une région aride par images Landsat-MSS et Spot-HRV : Le cas de la région Menzel Habib (Tunisie), Recueil des actes/proceedings du colloque international : L'observation spatiale, un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunisie 23- 27 Novembre 1998.

- DGF (2004), Rapport national de l'Algérie sur la mise en oeuvre de la convention de lutte contre la désertification.
- Diaz HF, Eischeid JK (2007), Disappearing “alpine tundra” Köppen climatic type in the western United States - *Geophysical Research Letters*, View issue TOC, Volume 34, Issue 18
- Douaoui A. (2005), Variabilité spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du bas-Cheliff. Thèse doc. Etat, INA El Harrach, 261 p.
- Dracup J A, Kil S, Edwin G. (1980), On the definition of droughts. *Water Resources Reseach*, 16 : 2-4.
- D.S A, (2008). Direction des Services Agricoles de la wilaya de M'Sila Rapport sur la wilaya de M'Sila, 12 p.
- D.S.A, (2011). Direction des Services Agricoles de la wilaya de M'Sila. Statistiques Agricoles de la wilaya de M'Sila. Doc. multigraphié.
- Dwivedi R, et al., 2008. Generation of Farm-Level Information on Salt-Affected Soils Using IKONOS-II Multispectral Data,” In: G. Metternicht and J. Zinck, Eds., *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*, CRC Press, Boca Raton.
- Dwivedi R. S. 2001 *Soil Resources Mapping: A Remote Sensing Perspective,*” *Remote Sensing Reviews*, Vol. 20, No. 2, 2001, pp. 89-122.
- Emberger L, (1955), Une classification biogéographique des climats, *Trav, inst, Bot. Montpellier*, vol(7), PP 3-34.
- Emberger L, (1964), Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000e de Boussaâda. (feuille n°36) Serv., Géol. de l'Algérie. Alger.
- Escadafal R Et Huete A, (1991), Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'alimentation des indices de végétations obtenus par télédétection. *CA, Acad, Sci, Paris*, T321, série II: 385-1391.
- Escadafal R Et Pouget M, (1989), Comparaison des données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale).

- Escadafal R, Huete A, (1991), Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection, Académie des sciences. Paris , t 312, série II, p 1385-1391.
- Escadafal R, Huete A, (1992), Soil optical properties and environmental applications Of remote sensing, International society of Photometry 709- 715.
- FAO (1968), Études géophysiques dans le bassin du Chott El Hodna. Tech. rep., 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.
- FAO (199), The state of food and agriculture, Food security: some macroeconomic dimensions, Tech.rep.FAO, Rome, Italy.
- FAO (2006), Global network on integrated soil management for sustainable use for salt affected soils, Rome, Italy.
- Fraser R.H., Abuelgasim A., Latifovic R. (2005) A method for detecting large-scale forest cover change using coarse spatial resolution imagery Remote Sensing of Environment, Volume 95, Issue 4, 30 April 2005, Pages 414-427
- Ghram Missedi A, Delaître E, Les états de surface en zone aride à partir d'indices radiométriques et de classifications multitemporelles d'images Landsat TM prises sur la région de Menzel Habib (Tunisie méridionale), Sécheresse 2007 ; 18 (4) : 305-13.
- Ghulam, A., Li, Z.-L., Qin, Q., Tong, Q., 2007. Exploration of the spectral space based on vegetation index and albedo for surface drought estimation. J. Appl. Remote Sens. 1, 013529-013529-013512.
- Guesdon, G (2001), Methods and tools for multi-criteria decision support comparison Saaty, Faculty of Science and Engineering, Laval University, 2011
- Guiraud R. (1966), Géologie et hydrogéologie du bassin versant du chott El-Hodna. Travaux des collaborateurs 96 p 6 pl.
- Guiraud R. (1971), Carte géologique de Souk Ouled Nadja. 1/50 000.
- Guiraud R. (1973) Evolution post-Triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sciences, Université de Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.

- Guiraud R (1990) Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie (d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines). Mémoire des publications de l'ONIG . 257 p. 115 fig., 12 pl. h.t.
- Guirish G, Ambili G , K, Gregory S J, Anushka C,K (2015), Drought risk mapping of south-western state in the Indian peninsula – A web based application, Volume 161, 15 September 2015, Pages 453-459.
- Gitelsonac A, Yoram A, .Kaufman J, Stark R, Rundquista D (2002), Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, Remote Sensing of Environment, Volume 80, Issue 1, April 2002, Pages 76-87
- Guesdon, G (2001), Methods and tools for multi-criteria decision support comparison Saaty, Faculty of Science and Engineering, Laval University, 2011.
- Goward, S. N., Markham, B., Dye, D. G., Dulaney, W., & Yang, J. (1991). Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. Remote Sensing of Environment, 35, 257– 277.
- Guyenne, TD(ed); Calabresi, G(ed)- European coordnated effort for monitoring th earth's environment : apilot project compaing on Landsat Thematic Mapper application (1985-87), PP301-307.
- Hadbaoui I, (2013), Les parcours steppiques dans la région de M'Sila : quelle gestion pour quel devenir? Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de magistère Département des sciences agronomiques Option : Elevages en zones arides, Universite Kasdi Merbah – Ouargla, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers, 139, pages et annexes.
- Hadeid M, (2008) Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes., La revue électronique des sciences de l'environnement,Vol 8 (1)
- Hagman, G, (1984) Prevention Better Than Cure, Report on Human and Environmental Disasters in the Third World, prepared for the Swedish Red Cross, Stockholm.
- Halitim O, (1985), Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie) : Morphologie, distribution et rôles des sels. Thèse Doctorat en sciences, Université de Rennes, 336p+annexes.

- Hallegatte, S,(2006). A cost-benefit analysis of the New Orleans flood protection system. Regulatory Analysis 06-02. Washington D.C, USA: AEI-Brookings Joint Center.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs DJ. 2001. Climate Change. The Scientific Basis. Cambridge University Press,
- Huete A, R, (1988), A soil-adjusted vegetation index (SAVI), Remote Sensing of Environment, Volume 25, Issue 3, August 1988, Pages 295-309
- Huete Ar, (1989), Soil influence in remotely sensed vegetation - canopy spectre in theory and application of optical. Remote Sensing, PP107-141.
- ICCD (1999), Italian Committee to combat Drought and Desertification, Guidelines for the National Action Programme”
- Ikhlef N, (2013), Evaluation d'un projet de lutte contre la désertification, Mémoire de Master of Science
- Itier, B, Seguin, B (2007), La sécheresse : caractérisation et occurrence, en lien avec le climat Fraser, R. S., Ferrare, R. A., Kaufman, Y. J., Markham, B. L., &Mattoo, S. (1992). Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 13(3), 541–557.
- Jentsch A, Kreyling J, Elmer M, Gellesch E, Glaser B, Grant C, Hein R, Marco L Mirzae H, Stefanie E. Nadler, Nagy L, (2011), Climate extremes initiate ecosystem-regulating functions while maintaining productivity, Journal of Ecology, Special feature, Ecological consequences of climate extremes 689-702.
- Gentch A, Beierkuhnlein (2015), Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystemsLimites de la recherche dans le domaine des changements climatiques : effets des évènements météorologiques extrêmes sur les écosystèmes, Comptes Rendus Geoscience Volume 340, Issues 9–10, September–October 2008, Pages 621-628.
- Joulil, I, Bitar, K, Salama, H, Amraoui, Mokssit, Tahiri, M, 2013, La sécheresse météorologique au bassin hydraulique de Oum Rbia durant les dernières décennies, Larhyss Journal, n° 12, , pp. 109-127
- Julião, P. R.; Nery, F.; Ribeiro, J.L.; Branco, M.C. & Zêzere, J.L, (2009) - Guia metodológico para a produção de cartografia Municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. 93p.

- Kaabach M, (1990), les groupements végétaux de la région de Boussaâda (Algérie) : essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb. Thèse doctorat en sciences, Université de Paris-sud, centre d'ORSAY.
- Khan, N. M., Rastoskuev, V. V., Shalina, E.V. AND Sato, Y., (2001): Mapping Salt affected Soils using remote sensing Indicators simple approach with the use of GIS IDRISI. Proceeding so the 22 and Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November, Singapore. Center for Remote Imaging, sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore; Singapore Institute of Surveyors and Valuers; Asian associionon remote sensing.
- Karimoun S., (1994), Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Zinder (Niger) et analyse par télédétection de l'évolution de la désertification. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de, Liège, Liège.
- Kauth, R., and G. Thomas. "The Tasselled Cap-A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen By Landsat" In *Proceedings of the LARS 1976 Symposium of Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, IN: Purdue University, pp. 4B41-4B51.
- Kieken M (1975), Etude géologique du Hodna, du Titteri et de la partie occidentale des Bibans (Algérie). T1 217p. t2 298 p. 232 fig. 20 pl. H.t
- Kieken M et Dame R (1962), Carte géologique de M'Sila 1/50 000.
- Khaldi A, 2005, Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida", Thèse Présentée à la faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire Pour l'obtention du diplôme de Docteur d'Etat (Option : Hydrogéologie).
- Khan N, Rastoscuev V V, Shalina E V, Yohei S, (2001), Mapping salt affected soils using remote sensing indicators a simple approach zith the use of GIS IDRISI, 22nd Asian conference on remote sensing, 5- 9 Novembre 2011, Singapore.
- Khoumri E (2007), Représentation des données spatiales à différents niveaux d'abstraction : application à l'archéoastronomie, Thèse de doctorat, Université de Corse-Pasquale Paoli , 150 pages +annexes.
- Kogan, F. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices.. *Eos*, 83: 557–564.
- Köppen W, (1923), *Dien Klimate Der Erde*, Walter De Gruyter, Berlin.

- Kottek M; Grieser, J; Beck, C; Rudolf, B; Rubel, F, (2006), World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, Volume 15, Number 3.
- Kosmas C, Kirkby M Et Geeson N (1999) The Medalus Project: Mediterranean desertification and land use, Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. Project ENV 4 CT 950119(EUR 18882).
- Kuitscouc D, 2011. « Concepts d'aléas, de vulnérabilité, de risques et de catastrophes. 15ème Ecole d'été en évaluation environnementale ». Présenté à 15ème Ecole d'été en évaluation environnementale, Douala, Cameroun.
- Kumar A, Dixit S T. Ram R. B. Yadaw K. K. Mishra N. P. Mandal ,(2014), Breeding high-yielding drought-tolerant rice: genetic variations and conventional and molecular approaches, Journal of Experimental Botany, Volume 65, Issue 21, 1 November 2014, Pages 6265–6278.
- Laarbi A, (2000), SIG et analyse multicritère. Paris, Hermès Sciences Publications.
- Lambers, H., F. S. Chapin, and T. L. Pons. 1998. Plant physiological ecology. Springer, New York.
- Layelman M, (2008), Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. Projet de mise en place d'un système d'Alerte précoce à la sécheresse, LIFE 05 TCY/TN/000150.
- Ladghem Chikouche M (2001), Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, Directions des ressources en eau des wilayas de M'sila et de Batna.
- Le Houreau H N, (1968), La désertification de Sahara septentrional et des steppes limitrophes. Annales algériennes des géographes, N°6, PP2-27.
- Le Houerou, 1974. Fire and vegetation in the Mediterranean Basin. In R Komarek (Ed.) Proceedings, annual Tall Timbers fire ecology conference. Tall Timbers Res. Sta Tallahassee, Florida, 237-277.
- Le Houreau H N, Claudin J, Poujet M, (1977), Étude bioclimatique des steppes algériennes. Bull, Soc, Hist, Nat, Afr, Nord, 68, Fasc, 3et 4, PP33-75.e Houerou H N, Claudin J Et Pouget M, 1977 : Étude bioclimatique des steppes Algériennes. Bull, Soc, Hist, Nat, Afr, Nord, 68, Fasc, 3et 4,

- Le Houerou H.N. Nd, 1993 : ‘‘Évolution climatique et désertification’’. in : Les climats Subtropicaux et leur évolution : de l’observation spatiale à la modélisation, Toulouse, éditions Cépaduès, pp. 639-647.
- Le Houerou H.N., 1991 : La Méditerranée en l’an 2050 : impacts respectifs d’une éventuelle évolution climatique et de la démographie sur la végétation, les écosystèmes et l’utilisation des terres. La Météorologie no 36, pp. 4-37.
- Le Houerou, N (1995), Climate change drought and desertification intergovernmental panel on climate change (IPCC) Working group II adaptation et mitigation, 53p.
- Lounis B, Belhadj A A, (2005), Processus de Correction Radiométrique Relative "PCRR" Appliqué Aux Images Landsat TM Multi- Dates, 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 27-31, 2005 – TUNISIA.
- Liu Yan-ling, Tian Ji-chun, Han Xiang-ming, Deng Zhi-ying (2005), Comparison of Different Dough Rheological Measurement and The Path Coefficient Analysis on Bread Quality, 《Scientia Agricultura Sinica》 2005-01.
- Madani Dj, Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone à déficit hydrique, Université El Hadj Lakhdar Batna Algérie – Thèse de Magister en sciences agronomiques 2007.
- Malzewski J, (2004), GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. Progress in planning. 62, PP3-65.
- Martín, M, (1998), Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Iberica a partir de imágenes NOAA AVHRR. Doctoral thesis, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- Manikiam B (2003), Remote sensing applications in disaster management, Mausam, 54, 1, 73-18.
- Martinez-Lozano, J., Tena, F., Onrubia, J., De La Rubia, J., (1984). The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography. Agric. For. Meteorol. 33 (2), 109–128.
- Massoumi M A, (1968), caractérisation et amélioration Des sols sales et a alcalis, Paris .
- McKee T B, Doesken N J. Kleist J (1993), The relationship of drought frequency and

duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorology Society. Pp .179-184.

- Meddi, M., Humbert, J. (2000) Variabilité pluviométrique dans l'ouest algérien durant les cinq dernières décennies. In: Proc. lième Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Nice, France, Septembre 2000).
- Medjerab A. et L. Henia (2011), Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale, Cour. Savoir, 11, 71-79.
- Messouli M, (2012), Developpement d'un concept d'indice de vulnerabilite au changement climatique et environnementale au niveau regiona, «Projet pilote d'appui aux petits producteurs pour une meilleure adaptation aux CC dans la région du Tadla Azilal» Beni Mellal 4-5 novembre 2012
- Metternicht G, Zinck J. A, (1997) .Spatial Discrimination of Salt- and Sodium-Affected Soil Surfaces,” Interna- tional Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 12, , pp. 2571-2586.
- 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
- Mishra, A., Singh, V., (2010). A review of drought concepts. J. Hydrol. 391 (1), 202–216.
- Moring A, Nemet A, Bihari A ,(2012), National Drought Mitigation Center (DMCEE). 2000. Estimation and mapping of drought vulnerability on the basis of climate, land use and soil parameters using GIS technique.
- Mostphaoui T (2015) , Les sols Gypseux :Localisationet relationavec le milieu physique, thèse en vue de l'obtention deu diplôme de doctorat en science, Unveristé d'ElHadj Lakhdar, Batna, 230 p + annexes.
- Mostphaoui T, Merdas S, Sekaa B, Hanafi M. T, Benazzouz M.T, (2013), cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie, Journal Algérien des Régions Arides, numéro spécial, 2013.
- Mouhous A. (2005), Les causes de la dégradation des parcours steppiques. These de Magister, INA El- Harrach 126 p.

- National Drought Mitigation Center (DMCEE), (2000). Conclusions and recommendations from the Central and Eastern European Workshop on Drought Mitigation. Drought Network News 12(2):11-12.
- Nedjraoui D (2004), Évaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation. Cahier Options Méditerranéennes, N°62, PP239-243.
- Nedjraoui D, Bedrani S. (2008) La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement Volume 8 Numéro 1
- Nadjraoui D.(2011). Steppe Ecosystems vulnerability in ALgeria. In: Proceeding of international conference on Climatic change effect on breeding and sustainable managment of rangelands in the arid and semi-arid zones of the Maghreb, ouergla, (Algeria), Nov 21- 24. pp: 41- 53. (In French with English summary)
- Nedjraoui D, (2004), Évaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation. Cahier Options Méditerranéennes, N°62, PP239-243.
- Nations unies, SIPC, Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes (2011), Cadre d'action, Pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes.
- Neffati M, Sghaier M, Labbene Y (2015), Rapport principal Analyse de la vulnérabilité des écosystèmes et des moyens de subsistance (Livelihoods) des populations au changement climatique en zones arides et désertiques de la région MENA, Projet MENA Delp, Projet de coordination et de partage de connaissance sur les moyens de subsistance et les écosystèmes désertiques en profit de l'Algérie, le Jordanie, le Maroc et la Tunisie.
- Nichane M, Khelil M, (2014), Climate change and water ressources in Algeria, vulnerability, impact and adaptation strategies. Revue des Bioressources 2 :2 (In French with English summary)
- Observatoire du Sahara et du Sahel (2009), Indicateurs écologiques du rosel/oss, désertification et biodiversité des écosystèmes circum-sahariens, CollectionRoselt/OSS., contribution technique.
- Office national de météorologie (2006), Prévision Numérique du Temps Principales réalisations en matière de Prévision au Centre National des Prévisions Météorologiques de l'Office National de la Météorologie.

- O. N. M (2016) : Données climatologiques de la station de M'sila.
- Office national de météorologie (2010), cartes des couloirs gelifères du nord de l'Algérie 1980-2006.
- Office national des statistiques (2015), Bulletin Trimestriel des Statistiques, N°1(2000) .-ALGER: ONS, 2015
- Organisation Mondiale de Météorologie (2016), Déclaration provisoire de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2016, Publié 14 novembre 2016 Press Release Number: 15.
- Ozenda P. 1982. Les végétaux dans la biosphère. Ed. Doin., France.Paris, 340 p
- Paegelow M (2004), Géomatique et géographie de l'environnement de l'analyse spatiale à la modélisation prospective. Habilitation à Diriger des recherches. Université de Toulouse, Le Mirail, 2 tome, de 211 et de 20p.
- Pedrotti F (2013), Plant and vegetation mapping, DOI, 10.1007/978-3-642-30235-0, Publisher Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 294 p
- Peressotti, A., Pecchiari, M., Tirone, G., Valentini, R., 2002. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? Glob. Change Biol. 8, 999–1017.
- Perkins T, Cappelaere P, Adler-Golden S, Mandl D, (2012), High-speed atmospheric correction for spectral image processing, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 8390:83900V-83900V-7 · May 2012 with 36
- Pouget M., 1980. (b) : Les relations sol- végétation dans les steppes sud Algéroises. Travaux et documents de l'ORSTOM. N° 116. Paris, 555p.
- Prigent, C., F. Aires, W.B. Rossow, and A. Robock, 2005: Sensitivity of satellite microwave and infrared observations to soil moisture at a global scale: Relationship of satellite observations to in situ soil moisture measurements. J. Geophys. Res., 110, D07110, doi: 10.1029/2004JD005087.
- Quezel S, Santa, S. (1962, 1963) Nouvelle Flore d'Algérie et des Régions Désertiques Méridionales. 2 Tomes, Editions CNRS, Paris, 1170.Santa P.
- Randriamanga (1994), Etude par télédétection des variabilités climatiques de Madagascar et leur impact sur l'homme et l'environnement,

- Raissouni Ahmed, (2012), modélisation et cartographie de la sensibilité et de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale par sig et usle (rif nord occidental, maroc). These pour l'obtention du doctorat en sciences et techniques discipline : géosciences de l'environnement spécialité : géomatique appliquée à l'environnement. universite abdelmalek essaadi. faculte des sciences et techniques deTanger ufr : océanologie et climatologie de part et d'autre du détroit de gibraltar
- Redjam A, Tachrifet A (2008), urbanisation au Hodna et emergence d'un systeme de villes sur l'axe m'sila-barika : une approche spatio-temporelle.
- Reichstein, M., Tenhunen, J.D., Roupsard, O., Ourcival, J.m., Rambal, S., Miglietta, F.,
- Roy B, (1985) : Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris, Économica, XXII+423p.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D , Papale D (2005), On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm, *Global Change Biology* (2005) 11, 1–16.Rei.
- Rognon P, (1997). Sécheresse et Aridité : Leur impact sur la désertification au Maghreb. *Sécheresse*, 7: 287-297.
- Roose E, J, (1977), Adaptation des methodes de conservations des sols aux conditions ecologiques et socio-econiques de l'Afrique de l'Ouest, Extrait de l'Agronomie, tropicale XXXII , 2,Avril-Juin 1977.
- Roose E, J,(1974), Contribution à l'étude de l'influence de la sécheresse sur l'évolution actuelle de certains sois ferrugineux tropicaux en zone sahélienne, ORSROM, Abidjan, 18p.,Multigr.
- Roose E, J, (1974), Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas. In: Soil condioner for reducing soil erosion in humid tropical areas. In soil conditioners ,SSSA special publication, no: 7,chapi 12, pp.131-7.
- Richter, R, (1990), A fast atmospheric correction algorithm applied to LandsatTM images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, pp. 159–166.
- Rikimaru A, Roy P.S,Milatake S, (2002), Tropical forest cover density mapping, *Tropical Ecology* 43(1):39-47 · January 2002 with 65 Reads.

- Rubio J L, Bochet E, (1998), Desertification indicators as diagnostic criteria for desertification risk assessment in Europe. *Journal of Aride Environnement*, N°39, PP 113-120.
- Saaty T, (1980), *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw Hill International, New York. pp 287.
- Saaty, T.L, (1982), *Decision Making for Leaders; The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, Belmont, CA: Wadsworth. Translated to French, Indonesian, Spanish, Korean, Arabic, Persian, and Thai, latest edition, revised, (2000), Pittsburgh: RWS, Publications.
- Saaty, T.L. and Alexander, J, (1989), *Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process*, New York: Praeger.
- Saaty, T.L. and Forman, E.H. (1993), *The Hierarchon – A Dictionary of Hierarchies*, Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Safar Zitoun M, (2006), Evaluation of existing drought early warning systems at national level: Case of Algeria. Establishment of an early warning system for drought in 3 countries on the southern shore of the Mediterranean: Algeria, Morocco and Tunisia. *Oservatoire du Sahara et du Sahel n :82*. pp 5.6. (In French with English summary).
- Sahli Z, (2011), Aménagement et Lutte contre la désertification : cas du Plan d'aménagement de la wilaya (PAW) de Nâama Sud-Ouest Algérien", Communication au Séminaire « Politiques, programmes et projets de lutte contre la désertification, quelles évaluations ? », CSFD, 29-30 juin 2011, Montpellier.
- Santini M, Caccamo G, Laurenti A, Noce S, Valentini R, (2010), A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index, *Applied Geography* 30 (2010) 394–415.
- Savornin J, (1920), *Etude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien*. 502p. 94 fig. 1 carte orotecto. H t 1/800 000.
- Scharling A, (1985), *Décider sur plusieurs critères : ponorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses Polytechniques et et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.
- Schmugge T J, (1983), *Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances*, IEEE Transactions on Geoscienc... > Volume: GE-21 Issue: 3.

- Schmid T, Koch M, Gumuzzio J, (2008), Application of Hyperspectral Imagery to Soil Salinity Mapping,” In: G. Metternicht and J. Zinck, Eds., *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*, CRC Press, Boca Raton, 2008, pp. 113-137.
- Sebhi S, (1987), Mutation du monde rural Algérien. Le Hodna. (Algérie) Ed. OPU Alger. 252 p.
- Sennoussi A., Chehema A, Bensemaoune Y, (2011), La steppe algérienne à l’aube du IIIème millénaire : quel devenir ?. *Annales des sciences et Technologie*, vol. 3, n. 2, p. 129-138.
- Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., Wood, E.F., (2004), A simulated soil moisture based drought analysis for the United States. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 109 (D24).
[http://dx.doi.org/ 10.1029/2004JD005182](http://dx.doi.org/10.1029/2004JD005182)
- Sheffield, J., Wood, E. F. & Roderick, M. L, (2012), little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491, 435–438
- Skouri M (1993), La désertification dans le bas s in Méditerranéen : Etat actuel et tendance, Etat de l’Agriculture en Méditerranée. Les sols dans la région méditerranéenne : utilisation, gestion et perspectives d’évolution, Zaragoza : CIHEAM Cahiers Options Méditerranéennes; n. 1(2) 1993 pages 23- 37
- Singh R. P. Sirohi, A, (1994), Spectral Reflectance Proper-ties of Different Types of Soil Surfaces, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 4, 1994, pp. 34-40.
- Sinav E (2010), Les défis de la mise en oeuvre de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, Essai présenté au Département de biologie en vue de l’obtention du grade de maître en écologie internationale (maîtrise en biologie incluant un cheminement de type cours en écologie internationale), Faculté des sciences département de biologie, Sherbrooke, Québec, Canada, 80p
- Solomon S, (2007), IPCC (2007): Climate Change The Physical Science Basis, AA(NOAA/ESRL/CSD, 325 Broadway, Boulder, CO 80305, United States
Publication: American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract id. U43D-01.
- Soubeyroux, J M, Franchisteguy E, Habets L, Noilhan F, Baillon J, Regimbeau M, Vidal F, Lemoigne J F, Morel P, (2008) , Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études.

- Sparovek G, Berndes G, Egeskog A, De Freitas M, Gustafsson S, Hansson J, (2007), Sugarcane ethanol production in Brazil: an expansion model sensitive to socioeconomic and environmental concerns, *Biofuel, Bioproducts and Biorefining revue*, Volume 1, Issue 4 . Pages 270-282.
- Sripada, R, Ronnie W, Jeffery G, Alan D, (2006), Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-season Nitrogen Requirements in Corn." *Agronomy Journal* 98 (2006): 968-977
- Szczypta, C, (2012) , Hydrologie Spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen, These en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) , 197 p
- Tallaksen L M, Henrik M, Benete C, (1997), On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume Définition et modélisation de la durée et du volume déficitaire des étiages, *Hydrological Sciences Journal* Volume 42, 1997 - Issue 1.
- Tatar H, (1985), Les Milieux et l'Occupation du Sol dans le Bassin Versant du K'sob, Thèse de Doctorat., 3e cycle, Université de CAEN, 106 p.
- Tilman, D. & El Hadi, A, (1992) Drought and biodiversity in grasslands. *Oecologia*, 89, 257–264.
- Thorntwaite C W, (1948), an approach toward a rational classification of climate, the geographical review, Vol 38:1, 55-94.
- Tilman, D., El Haddi, A. (1992): "Drought and biodiversity in grasslands", *Oecologia*, 89, 257-264.
- UNCCD (2012), Zero net land degradation, a sustainable development goal for Rio 20+ to secure the contribution of our planet's land and soil to sustainable development, including food security and poverty eradication, p 17. UNCCD secretariat. Bonn. Access date: 2012-05-01.
- UNCCD (2004), Resolution adopted by the general assembly, general assembly, on the report of the Second Committee (A/49/729/Add.6).
- UNEP (1992) World Atlas of Desertification. Edward Arnold, London.
- UNESCO (1979). Map of the World Distribution of Arid Regions: Explanatory Note.

- Urike L, Robert S. Lennart B, et al, (1993). The Koppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models, *Climate Researches*, 3:177-193.
- VanLoon M, Vellinga P, (2013), Trade-offs between biodiversity and flood protection services of coastal salt marshes, *Current Opinion in Environmental Sustainability* Volume 5, Issues 3–4, September 2013, Pages 320-326.
- Verma K, Saxena R K, Barthwal A. K. Deshmuch S. N., (1994). Remote Sensing Technique for Mapping Salt Affected Soils,” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 9, pp. 1901-1914
- Verrecchia R, E, Lanen W, Abarbanell J, (1995), Analysts' forecasts as proxies for investor beliefs in empirical research, *Journal of Accounting and Economics*, Volume 20, Issue 1, July 1995, Pages 31-60,
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno Jim ,(2007) , A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index, *Journal of Climate* 23 (7), 1696-1718.
- Villa J M, (1980), La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro - Tunisiens. Thèse de sciences, Pierre et Marie, Paris VI, 450p.
- Vincke P, (1989 , L'aide à la décision. Bruxelles, Edition de l'Université de Bruxelles, 179p.
- Vörösmarty C J, McInty P B, Gessner M O, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, (2010), Global threats to human water security and river biodiversity, *Nature*, volume 467, pages 555–561.
- Vose, R. S., R. L. Schmoyer, P. M. Steurer, T. C. Peterson, R. Heim, T. R. Karl, and J. K. Eischeid, (1992), The Global Historical Climatology Network: Long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data. Oak Ridge National Laboratory Environmental Sciences Division Publ. 3912, 324 pp.
- Wada Y, Beek P H, Wanders N, Beirens M, (2013), Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide, *Environmental Research Letters*, Environ. Res. Lett. 8 (2013) 034036 (14pp).
- Walkley, A. and I. A. Black, (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.

- Wang J, Jing Y, Zhang C F, et al, (2010), Review on multi-criteria decision analysis aid insustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Review* 13:2263–2278.
- Wang, A., Li, K.Y., Lettenmaier, D.P, (2008). Integration of the variable infiltration capacity model soil hydrology scheme into the community land model. *J. Geophys. Res.* 113, D09111.
- Wang, L, Qu J, (2007), «NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation Moisture with Satellite Remote Sensing." *Geophysical Research Letters* 34 L20405.
- Wasler T, Demou E, Lang D, Hellweg S, Prospective Environmental Life Cycle Assessment of Nanosilver , *Environmental Sustainability*, 10 (3): 125–134
- Watinee Thavorntam • Netnapid Tantemsapya • Leisa Armstrong A combination of meteorological and satellite-based drought indices in a better drought assessment and forecasting in Northeast Thailand, *Nat Hazards* (2015) 77:1453–1474
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., (1978), *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook 282. USDA-ARS, USA.
- Wilhite DA. Glantz, M.H, (1985), Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10 (3): 111–120.
- Wilhite DA,(2005), *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press, Boca Raton. pp. 7-8-9.
- Wilhite, D.A., (2000), *Drought: A Global Assessment*, vol. 1. Routledge, New York.
- Williams M, McArthy M, Pickup,(1994) Desertification, drought and landcare : Australia’s role in an international convention to combat desertification, *Australian Geographer* Volume 26, 1995 - Issue 1
- WMO, (2006), *Drought Monitoring and Early Warning: Concepts, Progress and Future Challenges*. World Meteorological Organization. WMO No.1006. pp 24.
- Xia, Y., M. Ek, C. Peters-Lidard, D. Mocko, M. Svoboda, J. Sheffield, and E. Wood, (2014), Application of USDM statistics in NLDAS-2: Optimal blended NLDAS drought index over the continental United States. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 2947–2965.

- Yakoubi M, Hallam F, Oufdou K, (1998), Qualité des eaux souterraines dans une région aride du maroc: impact des pollutions sur la biodiversité et relations crustacés – bactéries d'intérêt sanitaire, *Environmental Technology*, Volume 29, 2008 - Issue 11.
- Yang, Z., Zeng, Q., (2001), *Glacier Hydrology*. Chongqing Press, Chongqing, China (in Chinese).
- Yasef M. Saltani Z, (2009), Synthesis of zoning: final report. Establishment of an early warning system for drought in 3 countries on the southern shore of the Mediterranean: Algeria, Morocco and Tunisia. *Oservatoir du Sahara et du Sahel* pp 2-3-4.
- Zhang D, Han J, Cheng G, (2015), Object Detection in Optical Remote Sensing Images Based on Weakly Supervised Learning and High-Level Feature Learning , *IEEE Transactions on Geoscien...* > Volume: 53 Issue: 6
- Zhang G, Wagle P, Xiangoming X, Dong J, (2015), Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean croplands and tallgrass prairie under severe drought, *Remote Sensing of Environment* Volume 162, 1 June 2015, Pages 154-168.



Annexes

Annexes

Annexe 1 matrice de confusion de la classification supervisée 2016

Confusion Matrix: D:\classification\2015\14_5\finale_classification_2016

Overall Accuracy = (657675/681252) 96.5392%

Kappa Coefficient = 0.9023

Class	Ground Truth (Pixels)					
	EVF:Layer:	afEVF:Layer:	agEVF:Layer:	agEVF:Layer:	alEVF:Layer:	ba
Unclassified	7	22	30	8	0	
Layer: aff.sh	40781	0	0	287	0	
Layer: agg.sh	19	18329	15	0	0	
Layer: agr.sh	9	597	7407	20	3	
Layer: alf.sh	392	0	9	29193	0	
Layer: bar.sh	0	0	0	0	1563	
Layer: chott.	0	4	0	0	0	
Layer: hal.sh	9	43	623	0	0	
Layer: maqui.	0	0	9	0	4	
Layer: parc.s	27	325	167	154	0	
Layer: sab.sh	0	0	0	73	0	
Layer: sol.sh	273	661	146	462	0	
Total	41517	19981	8406	30197	1570	

Class	Ground Truth (Pixels)					
	EVF:Layer:	chEVF:Layer:	haEVF:Layer:	maEVF:Layer:	paEVF:Layer:	sa
Unclassified	76	2	1	2	2	
Layer: aff.sh	5	0	0	0	0	
Layer: agg.sh	1254	20	3	36	52	
Layer: agr.sh	66	0	24	46	0	
Layer: alf.sh	99	0	0	0	21	
Layer: bar.sh	0	0	0	0	0	
Layer: chott.	536924	134	0	0	0	
Layer: hal.sh	4709	5137	0	0	0	
Layer: maqui.	0	0	8937	0	0	
Layer: parc.s	1873	94	72	1386	0	
Layer: sab.sh	0	0	0	0	5061	
Layer: sol.sh	6970	82	0	313	4	
Total	551976	5469	9037	1783	5140	

Class	Ground Truth (Pixels)	
	EVF:Layer: so	Total
Unclassified	12	162
Layer: aff.sh	53	41126
Layer: agg.sh	23	19751
Layer: agr.sh	145	8317
Layer: alf.sh	0	29714
Layer: bar.sh	0	1563
Layer: chott.	5	537067
Layer: hal.sh	2816	13337
Layer: maqui.	22	8972
Layer: parc.s	143	4241
Layer: sab.sh	0	5134
Layer: sol.sh	2957	11868
Total	6176	681252

Class	Ground Truth (Percent)					
	EVF:Layer:	afEVF:Layer:	agEVF:Layer:	agEVF:Layer:	alEVF:Layer:	ba
Unclassified	0.02	0.11	0.36	0.03	0.00	
Layer: aff.sh	98.23	0.00	0.00	0.95	0.00	
Layer: agg.sh	0.05	91.73	0.18	0.00	0.00	
Layer: agr.sh	0.02	2.99	88.12	0.07	0.19	
Layer: alf.sh	0.94	0.00	0.11	96.68	0.00	
Layer: bar.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	99.55	
Layer: chott.	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
Layer: hal.sh	0.02	0.22	7.41	0.00	0.00	
Layer: maqui.	0.00	0.00	0.11	0.00	0.25	
Layer: parc.s	0.07	1.63	1.99	0.51	0.00	
Layer: sab.sh	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	
Layer: sol.sh	0.66	3.31	1.74	1.53	0.00	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Annexes

Class	Ground Truth (Percent)					
	EVF:Layer:	chEVF:Layer:	haEVF:Layer:	maEVF:Layer:	paEVF:Layer:	sa
Unclassified	0.01	0.04	0.01	0.11	0.04	
Layer: aff.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Layer: agg.sh	0.23	0.37	0.03	2.02	1.01	
Layer: agr.sh	0.01	0.00	0.27	2.58	0.00	
Layer: alf.sh	0.02	0.00	0.00	0.00	0.41	
Layer: bar.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Layer: chott.	97.27	2.45	0.00	0.00	0.00	
Layer: hal.sh	0.85	93.93	0.00	0.00	0.00	
Layer: maqui.	0.00	0.00	98.89	0.00	0.00	
Layer: parc.s	0.34	1.72	0.80	77.73	0.00	
Layer: sab.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	98.46	
Layer: sol.sh	1.26	1.50	0.00	17.55	0.08	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Class	Ground Truth (Percent)	
	EVF:Layer: so	Total
Unclassified	0.19	0.02
Layer: aff.sh	0.86	6.04
Layer: agg.sh	0.37	2.90
Layer: agr.sh	2.35	1.22
Layer: alf.sh	0.00	4.36
Layer: bar.sh	0.00	0.23
Layer: chott.	0.08	78.84
Layer: hal.sh	45.60	1.96
Layer: maqui.	0.36	1.32
Layer: parc.s	2.32	0.62
Layer: sab.sh	0.00	0.75
Layer: sol.sh	47.88	1.74
Total	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Pixels)	(Percent)	(Pixels)
Layer: aff.sh	0.84	345/41126	1.77	736/41517
Layer: agg.sh	7.20	1422/19751	8.27	1652/19981
Layer: agr.sh	10.94	910/8317	11.88	999/8406
Layer: alf.sh	1.75	521/29714	3.32	1004/30197
Layer: bar.sh	0.00	0/1563	0.45	7/1570
Layer: chott.	0.03	143/537067	2.73	15052/551976
Layer: hal.sh	61.48	8200/13337	6.07	332/5469
Layer: maqui.	0.39	35/8972	1.11	100/9037
Layer: parc.s	67.32	2855/4241	22.27	397/1783
Layer: sab.sh	1.42	73/5134	1.54	79/5140
Layer: sol.sh	75.08	8911/11868	52.12	3219/6176

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Pixels)	(Percent)	(Pixels)
Layer: aff.sh	98.23	40781/41517	99.16	40781/41126
Layer: agg.sh	91.73	18329/19981	92.80	18329/19751
Layer: agr.sh	88.12	7407/8406	89.06	7407/8317
Layer: alf.sh	96.68	29193/30197	98.25	29193/29714
Layer: bar.sh	99.55	1563/1570	100.00	1563/1563
Layer: chott.	97.27	536924/551976	99.97	536924/537067
Layer: hal.sh	93.93	5137/5469	38.52	5137/13337
Layer: maqui.	98.89	8937/9037	99.61	8937/8972
Layer: parc.s	77.73	1386/1783	32.68	1386/4241
Layer: sab.sh	98.46	5061/5140	98.58	5061/5134
Layer: sol.sh	47.88	2957/6176	24.92	2957/11868

Annexe 2 matrice de confusion de la classification supervisée 2003

Confusion Matrix: D:\classification\2003\14_05\finale_classification_2003

Overall Accuracy = (747254/799044) 93.5185%
Kappa Coefficient = 0.8515

		Ground Truth (Pixels)					
Class	EVF:Layer:	afEVF:Layer:	agEVF:Layer:	agEVF:Layer:	alEVF:Layer:	ba	
Unclassified		6	11	24	7	5	
Layer: aff.sh	7986	0	62	26	0	0	
Layer: agg.sh	0	6856	8	0	6		
Layer: agr.sh	0	203	1827	13	6		
Layer: alf.sh	351	0	9	26211	0		
Layer: bar.sh	0	0	0	0	1657		
Layer: chott.	0	0	4	0	2		
Layer: hal.sh	0	213	229	104	3		
Layer: maqui.	38	37	1476	0	1		
Layer: parc.s	395	34	135	1053	0		
Layer: sab.sh	0	0	0	195	0		
Layer: sol.sh	0	237	259	111	0		
Total	8776	7591	4033	27720	1680		

		Ground Truth (Pixels)					
Class	EVF:Layer:	chEVF:Layer:	haEVF:Layer:	maEVF:Layer:	paEVF:Layer:	sa	
Unclassified		21	92	31	2	3	
Layer: aff.sh	0	7	62	92	0	0	
Layer: agg.sh	0	402	0	45	0	0	
Layer: agr.sh	0	506	1457	0	0	0	
Layer: alf.sh	0	66	0	32	15		
Layer: bar.sh	3717	0	0	0	0		
Layer: chott.	578664	816	0	0	0		
Layer: hal.sh	6240	35166	10	68	13		
Layer: maqui.	0	121	76377	11	0		
Layer: parc.s	21	12477	33	3026	0		
Layer: sab.sh	0	0	0	0	3167		
Layer: sol.sh	15926	2115	1172	224	109		
Total	604589	51768	79142	3500	3307		

		Ground Truth (Pixels)	
Class	EVF:Layer:	so	Total
Unclassified		21	223
Layer: aff.sh	0	8235	
Layer: agg.sh	76	7393	
Layer: agr.sh	156	4168	
Layer: alf.sh	0	26684	
Layer: bar.sh	0	5374	
Layer: chott.	0	579486	
Layer: hal.sh	41	42087	
Layer: maqui.	184	78245	
Layer: parc.s	143	17317	
Layer: sab.sh	0	3362	
Layer: sol.sh	6317	26470	
Total	6938	799044	

		Ground Truth (Percent)					
Class	EVF:Layer:	afEVF:Layer:	agEVF:Layer:	agEVF:Layer:	alEVF:Layer:	ba	
Unclassified		0.07	0.14	0.60	0.03	0.30	
Layer: aff.sh	91.00	0.00	1.54	0.09	0.00	0.00	
Layer: agg.sh	0.00	90.32	0.20	0.00	0.36		
Layer: agr.sh	0.00	2.67	45.30	0.05	0.36		
Layer: alf.sh	4.00	0.00	0.22	94.56	0.00		
Layer: bar.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	98.63		
Layer: chott.	0.00	0.00	0.10	0.00	0.12		
Layer: hal.sh	0.00	2.81	5.68	0.38	0.18		
Layer: maqui.	0.43	0.49	36.60	0.00	0.06		
Layer: parc.s	4.50	0.45	3.35	3.80	0.00		
Layer: sab.sh	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00		
Layer: sol.sh	0.00	3.12	6.42	0.40	0.00		
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		

Annexes

Class	Ground Truth (Percent)				
	EVF:Layer: ch	EVF:Layer: ha	EVF:Layer: ma	EVF:Layer: pa	EVF:Layer: sa
Unclassified	0.00	0.18	0.04	0.06	0.09
Layer: aff.sh	0.00	0.01	0.08	2.63	0.00
Layer: agg.sh	0.00	0.78	0.00	1.29	0.00
Layer: agr.sh	0.00	0.98	1.84	0.00	0.00
Layer: alf.sh	0.00	0.13	0.00	0.91	0.45
Layer: bar.sh	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00
Layer: chott.	95.71	1.58	0.00	0.00	0.00
Layer: hal.sh	1.03	67.93	0.01	1.94	0.39
Layer: maqui.	0.00	0.23	96.51	0.31	0.00
Layer: parc.s	0.00	24.10	0.04	86.46	0.00
Layer: sab.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	95.77
Layer: sol.sh	2.63	4.09	1.48	6.40	3.30
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
	EVF:Layer: so	Total
Unclassified	0.30	0.03
Layer: aff.sh	0.00	1.03
Layer: agg.sh	1.10	0.93
Layer: agr.sh	2.25	0.52
Layer: alf.sh	0.00	3.34
Layer: bar.sh	0.00	0.67
Layer: chott.	0.00	72.52
Layer: hal.sh	0.59	5.27
Layer: maqui.	2.65	9.79
Layer: parc.s	2.06	2.17
Layer: sab.sh	0.00	0.42
Layer: sol.sh	91.05	3.31
Total	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Layer: aff.sh	3.02	9.00	249/8235	790/8776
Layer: agg.sh	7.26	9.68	537/7393	735/7591
Layer: agr.sh	56.17	54.70	2341/4168	2206/4033
Layer: alf.sh	1.77	5.44	473/26684	1509/27720
Layer: bar.sh	69.17	1.37	3717/5374	23/1680
Layer: chott.	0.14	4.29	822/579486	25925/604589
Layer: hal.sh	16.44	32.07	6921/42087	16602/51768
Layer: maqui.	2.39	3.49	1868/78245	2765/79142
Layer: parc.s	82.53	13.54	14291/17317	474/3500
Layer: sab.sh	5.80	4.23	195/3362	140/3307
Layer: sol.sh	76.14	8.95	20153/26470	621/6938

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Layer: aff.sh	91.00	96.98	7986/8776	7986/8235
Layer: agg.sh	90.32	92.74	6856/7591	6856/7393
Layer: agr.sh	45.30	43.83	1827/4033	1827/4168
Layer: alf.sh	94.56	98.23	26211/27720	26211/26684
Layer: bar.sh	98.63	30.83	1657/1680	1657/5374
Layer: chott.	95.71	99.86	578664/604589	578664/579486
Layer: hal.sh	67.93	83.56	35166/51768	35166/42087
Layer: maqui.	96.51	97.61	76377/79142	76377/78245
Layer: parc.s	86.46	17.47	3026/3500	3026/17317
Layer: sab.sh	95.77	94.20	3167/3307	3167/3362
Layer: sol.sh	91.05	23.86	6317/6938	6317/26470

Annexe 3 Annexe 3 Matrice de confusion après une classification supervisé 1987

Ground Truth (Percent)						
Class	EVF:Layer:	chEVF:Layer:	haEVF:Layer:	maEVF:Layer:	paEVF:Layer:	sa
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Layer: aff.sh	0.00	0.41	0.34	4.60	0.00	0.00
Layer: agg.sh	6.17	6.23	0.12	4.15	0.00	0.00
Layer: agr.sh	0.62	2.31	9.67	0.00	0.00	0.00
Layer: alf.sh	0.01	0.48	0.00	4.26	3.34	0.00
Layer: bar.sh	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Layer: chott.	49.76	5.08	0.00	0.22	0.48	0.00
Layer: hal.sh	28.90	67.17	0.00	4.94	0.36	0.00
Layer: maqui.	0.00	0.02	89.31	0.00	0.00	0.00
Layer: parc.s	12.69	13.61	0.00	79.35	0.00	0.00
Layer: sab.sh	0.00	0.00	0.00	0.00	95.59	0.00
Layer: sol.sh	1.56	4.69	0.55	2.47	0.24	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)		
Class	EVF:Layer: so	Total
Unclassified	0.00	0.00
Layer: aff.sh	9.50	1.26
Layer: agg.sh	10.65	5.51
Layer: agr.sh	1.66	1.82
Layer: alf.sh	4.46	3.50
Layer: bar.sh	0.00	0.43
Layer: chott.	1.49	37.88
Layer: hal.sh	7.90	26.45
Layer: maqui.	1.20	9.06
Layer: parc.s	20.09	11.48
Layer: sab.sh	0.00	0.41
Layer: sol.sh	43.05	2.21
Total	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Layer: aff.sh	20.83	11.79	520/2496	264/2240
Layer: agg.sh	94.53	68.52	10355/10954	1304/1903
Layer: agr.sh	92.94	75.02	3358/3613	766/1021
Layer: alf.sh	6.36	6.88	442/6954	481/6993
Layer: bar.sh	50.94	1.42	434/852	6/424
Layer: chott.	1.04	50.24	786/75336	75270/149820
Layer: hal.sh	83.25	32.83	43783/52595	4306/13118
Layer: maqui.	1.59	10.69	286/18026	2123/19863
Layer: parc.s	96.90	20.65	22115/22822	184/891
Layer: sab.sh	2.08	4.41	17/819	37/839
Layer: sol.sh	82.88	56.95	3640/4392	995/1747

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Layer: aff.sh	88.21	79.17	1976/2240	1976/2496
Layer: agg.sh	31.48	5.47	599/1903	599/10954
Layer: agr.sh	24.98	7.06	255/1021	255/3613
Layer: alf.sh	93.12	93.64	6512/6993	6512/6954
Layer: bar.sh	98.58	49.06	418/424	418/852
Layer: chott.	49.76	98.96	74550/149820	74550/75336
Layer: hal.sh	67.17	16.75	8812/13118	8812/52595
Layer: maqui.	89.31	98.41	17740/19863	17740/18026
Layer: parc.s	79.35	3.10	707/891	707/22822
Layer: sab.sh	95.59	97.92	802/839	802/819
Layer: sol.sh	43.05	17.12	752/1747	752/4392

Annexes 4 Coordonées des points d'échantillonnage de sol avec les valeurs en Matière organique

Num	Long DD	Lat DD	MO
1	4.81447222	35.8588889	2.61
2	4.80214444	35.8222861	2
3	4.79969444	35.8048389	2.5
4	4.78986111	35.822	2
5	4.79025	35.788925	1.9
6	4.79323889	35.7734139	1.8
7	4.78494167	35.7623306	1
8	4.71736667	35.7237111	0.6
9	4.71094444	35.7775444	0.5
10	4.71263611	35.7192583	2.3
11	4.78358611	35.7593861	1.3
12	4.587	35.529	1.3
13	4.72513889	35.5897222	1.4
14	4.72155556	35.5776389	1.3
15	4.73004444	35.59775	0.1
16	4.744	35.5678861	0.13
17	4.70641111	35.5371861	0.2
18	4.76906111	35.5656556	0.1
19	4.66054444	35.65895	0.1
20	4.67419444	35.6494361	1.9
21	4.65898056	35.6776194	2
22	4.66012222	35.6788528	2.1
23	4.66598611	35.6834028	2.6
24	4.66572778	35.6836667	2.6
25	4.66391667	35.6473	2.5
26	4.650975	35.6390556	2.7
27	4.63271389	35.7263389	0.9
28	4.60336111	35.7296111	2
29	4.56713333	35.7333417	2.6
30	4.68033611	35.7124389	0.5
31	4.63568056	35.7098778	2
32	4.62763056	35.713675	1.9
33	4.59269722	35.7183472	1.5
34	4.59798889	35.7092139	1
35	4.60365556	35.7047278	0.9
36	4.62814722	35.7000333	0.9
37	4.64931111	35.6951167	0.5
38	4.59792778	35.6734833	0.6
39	4.58178056	35.6630778	2
40	4.55002778	35.8019167	1.9
41	4.54944444	35.8163333	2
42	4.57851389	35.8216028	2.4

43	4.55099444	35.8047889	1.4
44	4.56995278	35.7872167	1.6
45	4.54111111	35.7808667	1.5
46	4.57776667	35.7712472	1.4
47	4.555625	35.7483694	1.9
48	4.56309722	35.6711917	0.3
49	4.50691944	35.6553722	1.3
50	4.50491111	35.6467361	2.1
51	4.48742222	35.6584306	2.3
52	4.50837222	35.6277417	2
53	4.562	35.48	0.13
54	4.53861667	35.5671111	0.15
55	4.52389444	35.569975	0.3
56	4.49563889	35.583	0.2
57	4.52800278	35.5586306	1.2
58	4.48619444	35.5737361	1.2
59	4.47515	35.5685167	1.3
60	4.576	35.51	0.67
61	4.49865556	35.5545111	0.3
62	4.55627222	35.6031222	0.9
63	4.62776111	35.5588083	0.2
64	4.74436389	35.3611694	0.5
65	4.82619167	35.3669139	0.13
66	4.80513056	35.3609306	0.37
67	4.79047222	35.3584111	1.2
68	4.73588889	35.3656694	0.9
69	4.72741389	35.3710417	0.1
70	4.72034167	35.3627083	0.1
71	4.61493889	35.3194083	0.1
72	4.65816111	35.2816083	0.3
73	4.71445	35.7741472	0.9
74	4.80735833	35.8076028	1.3
75	4.40093333	35.6341833	0.8
76	4.42765	35.6200778	0.15
77	4.52606389	35.7868583	0.3
78	4.56724167	35.8557972	0.9
79	4.59929167	35.6244972	0.9
80	4.56501389	35.6577389	0.5
81	4.52533056	35.6101083	2
82	4.54187778	35.5771694	0.9
83	4.65793333	35.681025	0.9
84	4.71513333	35.6270944	1
85	4.63374167	35.6031694	0.8

Annexe 5 Coordonées des points pris pour extrapolation des données climatiques

	Long DEG	long MIN	lon SEC	lati DEG	lati MIN	lati SEC	Long DD	Lat DD	Altitude
MS1	4	33	24.06	35	43	27.03	4.55668333	35.724175	592
MS2	4	33	23.86	35	48	25.61	4.55662778	35.8071139	567
MS3	4	41	23.85	35	46	46.37	4.68995833	35.7795472	708
MS4	4	40	8.82	35	48	37.05	4.66911667	35.8102917	518
MA1	4	47	53.48	35	48	35.58	4.79818889	35.8098833	889
MA2	4	49	34.72	35	50	18.98	4.82631111	35.8386056	1565
MA3	4	44	21.42	35	48	28.9	4.73928333	35.8080278	1049
MA4	4	48	17.33	35	47	37.05	4.80481389	35.793625	920
MT1	4	37	26.89	35	42	8.28	4.62413611	35.7023	479
MT2	4	39	41.51	35	39	3.11	4.66153056	35.6508639	437
MT3	4	35	55.24	35	37	29	4.59867778	35.6247222	427
MT4	4	41	11.78	35	43	25.53	4.68660556	35.7237583	535
SO1	4	44	1.65	35	34	50.14	4.73379167	35.5805944	417
SO2	4	42	44.69	35	32	42.13	4.71241389	35.5450361	401
SO3	4	39	43.12	35	31	3.99	4.66197778	35.517775	398
SO4	4	42	54.87	35	29	44.28	4.71524167	35.4956333	393
OM1	4	32	16.82	35	34	32.36	4.53800556	35.5756556	411
OM2	4	27	31.31	35	33	32.31	4.45869722	35.558975	407
OM3	4	32	44.78	35	32	59.26	4.54577222	35.5497944	404
OM4	4	36	18.01	35	31	28.89	4.60500278	35.5246917	492
MC1	4	46	39.12	35	21	15.04	4.77753333	35.3541778	401
MC2	4	44	18.18	35	16	10.16	4.73838333	35.2694889	450
MC3	4	43	57	35	20	8.79	4.7325	35.335775	406
MC4	4	39	2.79	35	19	35.55	4.650775	35.3265417	401

Annexe 6 Procédure pour la méthode de Walkley black pour l'analyse de matière organique.

- 1) Prendre 2 g de sol séché à l'air dans une fiole conique.
- 2) Ajouter 10 ml de solution de $K_2Cr_2O_7$ 1N et ajouter soigneusement 10 ml de H_2SO_4 concentré et bien mélanger avec une légère rotation.
- 3) Laissez le mélange refroidir pendant une demi-heure avec de légères secousses occasionnelles. (Si la couleur du mélange semble verte, ajouter 10 ml supplémentaires de solution de $K_2Cr_2O_7$ 1 N. La couleur verte indique que tout agent oxydant ajouté est utilisé pour oxyder le carbone organique.)
- 4) Ajouter 150 ml de dw, 10 ml de H_3PO_4 (85%) et 0,2 g de NaF en séquence.
- 5) Ajouter 3 ml de diphenylamine (dissoudre 0,25 g d'indicateur dans 10 ml de poids sec et ajouter lentement 50 ml de H_2SO_4 concentré) avant d'effectuer le titrage. Le mélange apparaît en violet foncé.
- 6) Titrer l'excès de solution de $K_2Cr_2O_7$ dans le ballon avec une solution de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (1N).
- 7) Effectuer un titrage à blanc (Cette étape est essentielle pour normaliser la solution de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ par rapport à la solution standard de $K_2Cr_2O_7$).

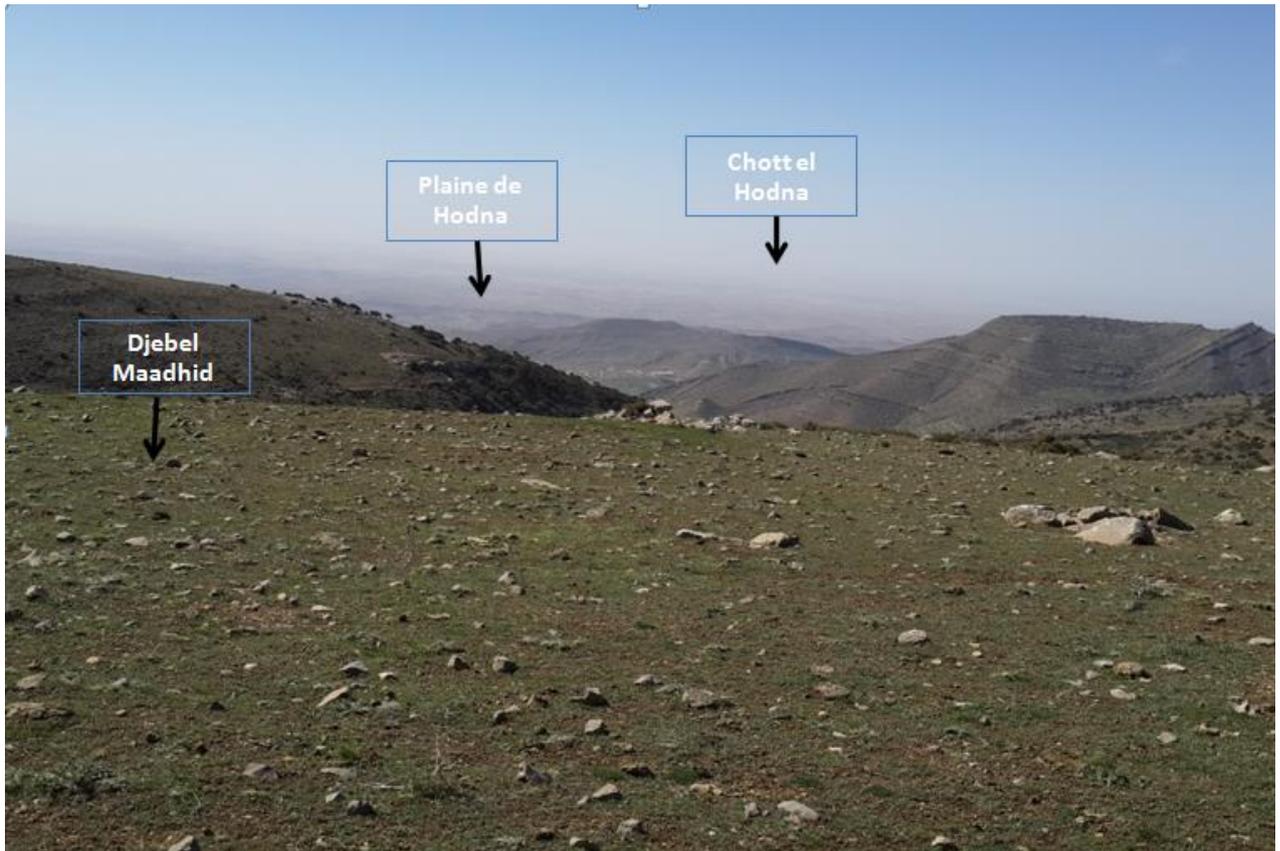
$$C \text{ dans le sol (\%)} = [(B-T) \times S \times 0,003 \times 1,3 \times 100] \div W$$

Où,

- B = Quantité de $FeSO_4$ requise pour le titrage à blanc.
- T = Quantité de $FeSO_4$ requise pour le titrage du sol.
- S = Résistance de $FeSO_4$ (à partir du titrage à blanc).
- W = poids du sol.

$$\text{Matière organique dans le sol (\%)} = \% \text{ organique C} \times 1,724$$

Annexe 7 Vue générale des paysages de la zone d'étude



Annexe 8 : Variation des valeurs de l'indice SPI

Altitude	1988	1991	1994	1997	2000	2003	2006	2009	2012	2014	2016
1565	1.30	1.53	0.39	0.19	1.26	1.45	1.64	1.83	1.02	1.15	1.42
1049	1.30	0.53	0.29	0.02	0.27	0.60	0.93	1.26	1.59	1.81	1.36
567	1.10	0.33	0.20	0.00	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
708	1.10	0.33	0.19	-0.01	0.03	0.35	0.67	0.99	1.32	1.53	1.08
518	1.12	0.31	0.20	-0.01	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
889	1.10	0.33	0.20	0.00	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
592	1.10	0.33	0.09	-0.18	0.05	0.37	0.70	1.03	1.36	1.58	1.13
920	1.10	0.33	0.19	-0.01	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
479	1.10	0.13	0.12	-0.11	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
437	1.10	0.13	0.12	-0.11	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
427	1.10	0.10	0.11	-0.12	0.07	0.40	0.73	1.06	1.39	1.61	1.16
535	1.10	0.13	0.10	-0.13	0.05	0.37	0.70	1.03	1.36	1.58	1.13
417	-0.92	-0.93	0.08	0.27	-0.81	-1.01	-1.22	-1.42	-1.62	-1.76	-1.52
401	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.60	-0.80	-1.00	-1.20	-1.40	-1.54	-1.52
398	-0.99	-1.18	-1.02	-0.70	-0.61	-0.81	-1.02	-1.22	-1.42	-1.56	-1.54
393	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.61	-0.81	-1.02	-1.22	-1.42	-1.56	-1.54
411	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.60	-0.80	-1.00	-1.20	-1.40	-1.54	-1.52
407	-0.99	-1.18	-1.01	-0.68	-0.85	-1.11	-1.38	-1.65	-1.92	-2.09	-1.57
404	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.85	-1.11	-1.38	-1.65	-1.92	-2.09	-0.97
392	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.61	-0.81	-1.02	-1.22	-1.42	-1.56	-1.54
401	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.74	-0.97	-1.19	-1.42	-1.65	-1.80	-0.78
450	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.74	-0.97	-1.19	-1.42	-1.65	-1.80	-1.08
406	-0.98	-1.16	-0.99	-0.66	-0.75	-0.98	-1.21	-1.44	-1.66	-1.82	-1.10
401	-0.99	-1.18	-1.01	-0.68	-0.77	-1.01	-1.24	-1.48	-1.72	-1.88	-1.06

Annexe 9 Variations des valeurs de l'indice EM (Ecart à la moyenne)

Altitude	1982	1985	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2008	2011	2014	2016
592	-7.17	14.37	5.43	82.17	10.25	121.96	-11.15	142.13	-10.95	13.13	132.75	10.70
567	-7.39	14.10	5.19	86.30	9.99	126.09	-11.36	146.25	-6.80	17.27	136.88	10.44
708	-7.26	14.54	5.50	86.28	10.38	126.05	-11.29	146.21	-6.80	17.27	136.84	10.83
518	-7.12	14.26	5.39	82.15	10.17	121.94	-11.07	142.10	-10.95	13.13	132.73	10.62
889	-7.91	15.84	5.99	82.13	11.30	121.90	-12.30	142.06	-10.94	13.12	132.69	11.80
1565	-7.52	15.06	5.70	82.11	10.75	121.87	-11.69	142.03	-10.94	13.12	132.69	11.22
1049	-7.42	14.87	5.62	82.04	10.61	121.76	-11.54	141.90	-10.93	13.11	132.54	11.07
920	-7.40	14.82	5.60	82.22	10.57	122.04	-11.50	142.22	-10.95	13.14	132.84	11.04
479	-7.32	13.97	5.14	82.37	9.90	122.26	-11.25	142.48	-10.98	13.16	133.09	10.34
437	-7.06	14.14	5.35	83.37	10.09	123.19	-10.98	143.38	-9.82	14.27	134.00	10.53
427	-7.05	14.13	5.34	86.38	10.08	126.20	-10.97	146.38	-6.80	17.29	137.01	10.52
535	-7.10	14.21	5.37	7.87	10.14	10.79	-11.03	-13.38	-13.79	-13.51	-16.64	10.58
417	-7.05	14.12	5.34	7.61	10.08	10.53	-10.96	-13.58	-13.99	-13.43	-16.54	10.52
401	-73.29	-108.02	-110.80	7.96	-16.27	10.92	-52.26	-13.54	-13.96	-13.66	-16.82	-35.79
398	-69.13	-103.85	-106.64	7.81	-12.12	10.71	-48.10	-13.27	-13.69	-13.86	-17.01	-31.63
393	-69.12	-103.82	-106.61	8.68	-12.12	11.90	-48.09	-14.75	-15.21	-13.83	-17.03	-31.62
411	-73.28	-108.00	-110.79	8.25	-16.27	11.31	-52.25	-14.02	-14.46	-13.56	-17.03	-35.78
407	-73.26	-107.97	-110.75	8.14	-16.26	11.17	-52.23	-13.84	-14.27	-15.06	-18.55	-35.77
404	-73.24	-107.94	-110.73	8.11	-16.26	11.13	-52.22	-13.80	-14.23	-14.32	-17.63	-35.76
392	-73.18	-107.84	-110.63	7.54	-16.24	10.43	-52.18	-13.45	-13.86	-14.13	-17.41	-35.73
401	-73.34	-108.09	-110.88	7.74	-16.28	10.62	-52.29	-13.16	-13.57	-14.09	-17.35	-35.81
450	-73.48	-108.29	-111.08	7.74	-16.31	10.61	-52.39	-13.16	-13.57	-13.73	-16.86	-35.87
406	-72.22	-106.97	-109.76	7.78	-15.15	10.67	-51.17	-13.23	-13.64	-13.44	-16.55	-34.68
401	-69.20	-103.95	-106.74	7.73	-12.13	10.61	-48.15	-13.15	-13.56	-13.44	-16.55	-31.66

Annexe 10 Variations de l'indice RN (Rapport à la normal)

Altitude	1982	1985	1988	1991	1994	1997	2000	2003	2006	2009	2014	2015	2016
592	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
567	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
708	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
518	93.76	112.50	112.45	98.98	174.18	144.93	106.54	172.99	187.47	89.98	184.69	109.31	113.19
889	93.57	112.27	112.22	98.78	172.94	143.90	106.33	171.76	186.13	89.80	183.38	109.08	112.39
1565	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
1049	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
920	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
479	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
437	93.57	112.27	112.22	98.78	174.18	144.93	106.33	172.99	187.47	89.80	184.69	109.08	113.19
427	93.57	112.27	112.22	98.78	172.94	143.90	106.33	171.76	94.36	89.80	183.38	109.08	112.39
535	93.57	112.27	112.22	98.78	106.66	103.72	106.33	88.24	94.36	89.80	85.19	109.08	84.94
417	93.57	112.27	112.22	98.78	106.66	103.72	106.33	88.24	94.36	89.80	85.19	109.08	84.94
401	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.55	83.21	85.19	78.08	84.94
398	54.35	32.39	80.32	70.70	106.87	103.93	83.05	88.42	94.36	83.21	85.37	78.08	85.12
393	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
411	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
407	53.96	32.16	79.75	70.20	106.66	103.72	82.46	88.24	94.36	82.62	85.19	77.52	84.94
404	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
392	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
401	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
450	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
406	54.35	32.39	80.32	70.70	106.66	103.72	83.05	88.24	94.36	83.21	85.19	78.08	84.94
401	53.96	32.16	79.75	70.20	106.66	103.72	82.46	88.24	94.36	82.62	85.19	77.52	84.94

Annexe 11. Variations des valeurs de l'indice IDP

Altitude	1985	1992	1995	1997	1997	1998	1999	2001	2005	2007	2009	2011	2014	2016
592	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.38
567	14.62	72.67	55.66	77.57	47.75	71.85	81.33	76.36	31.64	94.33	91.11	90.63	88.29	89.29
708	14.85	72.90	55.66	77.57	47.75	71.85	81.33	76.36	31.64	94.33	91.11	90.63	88.29	89.29
518	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.38
889	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.66
1565	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.18
1049	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.38
920	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.33
479	14.85	72.90	51.61	72.94	43.90	67.37	76.60	71.76	28.21	89.27	86.13	87.22	83.38	84.27
437	14.85	72.90	52.69	74.18	44.93	68.57	77.87	72.99	29.13	90.62	87.47	88.13	84.69	85.69
427	14.85	72.90	55.66	77.57	47.75	10.46	81.33	76.36	31.64	94.33	91.11	90.63	88.29	89.29
535	14.85	72.90	6.84	6.87	3.93	10.23	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
417	14.85	72.90	6.63	6.66	3.93	10.46	9.16	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.81	-4.81
401	-81.22	12.05	6.84	6.87	1997.00	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
398	-80.71	12.03	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.76	-2.49	-11.81	-5.64	50.83	-14.63	-4.63
393	-80.71	10.21	6.84	6.87	3.72	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
411	-81.22	14.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
407	-81.22	14.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
404	-81.22	14.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
392	-81.22	11.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
401	-81.22	14.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
450	-81.22	15.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
406	-81.08	15.07	6.84	6.87	3.93	10.46	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63
401	-80.71	15.07	6.84	6.87	3.93	71.85	9.39	-11.58	-2.29	-11.63	-5.45	51.02	-14.63	-4.63

Annexe 12. Méthode d'extrapolation des précipitations

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	TOTAL
P° moy mensuelles (mm)	16.48	9.6	8.67	11.48	14.69	3.12	2.3	3.34	11.43	17.12	11.23	12.44	121.9

Altitude de la station 442 m, Altitude du point à extrapoler = 592 m,

$X_d = 592 - 442 = 150$, X_d : Différence d'altitude entre une altitude de la zone d'étude et l'altitude de la station de référence

Pour le versant Nord On calcul l'accroissement de la pluviométrie en mm

$A = X_d/100 * 40 = 60$, le coefficient de correction sera $C = (A+P_{tot})/A = 60+121.9/121.9 = 1.49$

Pour le versant Nord On calcul l'accroissement de la pluviométrie en mm

$A = X_d/100 * 20 = 30$, le coefficient de correction sera $C = (A+P_{tot})/A = 30+121.9/121.9 = 1.25$

On multiplie la valeurs des précipitation de chaque mois par la valeur du coefficient de correction :

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jult	Aut	Sep	Oct	Novembre	Décembre	TOTAL
P Nord	24.6	14.3	9.2	12.2	15.6	3.3	2.4	3.5	12.1	18.1	11.9	13.2	140.5
P Sud	20.5	9.9	8.9	11.8	15.1	3.2	2.4	3.4	11.8	17.6	11.6	12.8	129.1

Résumé

L'Algérie confronte aujourd'hui plusieurs menaces liées aux changements climatiques, la pression socioéconomique croissante et la surexploitation des ressources naturelles, tel que la sécheresse et la désertification notamment dans les régions aride et semi-aride.

L'objectif principal de ce travail, est de modéliser et cartographier les zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification dans la région d'El Hodna, suivant une méthodologie basée sur l'utilisation des outils de Géomatique et l'intégration des méthodes mathématiques qui permettent une meilleure prise de décision lors de l'élaboration des cartes de synthèse et de la modélisation de la vulnérabilité, également de présenter une analyse changement de l'état environnemental de la zone d'étude,

Les résultats montrent que la région d'El Hodna, a subi durant les dernières années une dégradation intense qui a touché l'ensemble des unités de l'écosystème, et qu'environ 50 % de la zone d'étude est en état de forte vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification, ces zones sont localisées dans le Sud et le Sud-Est de la zone d'étude,

Mots clés : Sécheresse ; Désertification ; vulnérabilité ; SIG ; Modélisation ; El Hodna

ملخص

تواجه الجزائر حاليا العديد من التهديدات المتعلقة بتغير المناخ، وتزايد الضغط الاجتماعي والاقتصادي مع الإفراط في استخدام الموارد الطبيعية، مثل الجفاف والتصحر وخاصة القاحلة وشبه القاحلة كمنطقة الحضنة.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تخطيط ومناطق المناطق المعرضة للجفاف والتصحر في منطقة الحضنة، وفق منهجية تعتمد على استخدام أدوات الجيوماتك وادخال الطرق الرياضية. التي تسمح بتحسين صنع القرار أثناء تطوير خرائط التوليف ونمذجة حالة الضعف، وكذلك لتقديم تحليل لتغير للحالة البيئية لمنطقة الدراسة.

وتشير النتائج إلى أن منطقة الحضنة شهدت خلال السنوات الأخيرة تدهورا شديدا أثر على كامل وحدات النظام الإيكولوجي، و ان نحو 50% من منطقة الدراسة في حالة حساسية تجعلها عرضة للجفاف والتصحر، وتقع هذه المناطق خاصة في جنوب وجنوب شرق منطقة الدراسة

كلمات مفتاحية: الجفاف ; التصحر; التعرض; نظم المعلومات الجغرافية; نمذجة ; منطقة الحضنة

Summary

Algeria faces currently several threats related to climate changing, the increasing of socio-economic pressure and the overuse of natural resources, such as drought and desertification especially arid and semiarid as the region of El Hodna.

The main objective of this work is to model and map areas vulnerable to drought and desertification in the El Hodna region, following a methodology based on the use of Geomatics tools and the integration of mathematical methods. That allow better decision-making while the development of the synthesis maps and vulnerability modeling, also to present a change analysis of the environmental state of the study area

The results show that the region of El Hodna, has undergone during the last years an intense degradation which affected the whole of the units of the ecosystem and that about 50% of the study area is in a state of high vulnerability to drought and desertification, these areas are located in the South and South-East of the study area

Key words: Dought; Desertification; Vulnerability; GIS; Modeling; El Hodna.