

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Biotechnologies Végétale et Microbienne, Biodiversité et Environnement (BIOBIO)

Structure de Recherche : Botanique et Valorisation des Ressources Végétales et Fongiques (BOVAREF)

Discipline : Biologie

Spécialité : Ecologie, Géomatique et Modélisation

Présentée et soutenue le 19/12/2020 par :

SINSIN Tudal Emmanuel Mahouénan

Modélisation de la vulnérabilité à la désertification dans le contexte des changements globaux au Maroc
(Cas de l'arganeraie à Essaouira et Tiznit et des écosystèmes dunaires à Errachidia)

JURY

RHAZI Laila
EL ABOUDI Ahmed
MOUNIR Fouad
QARRO Mohamed
MASTERE Mohamed
TALEB Mohamed Sghir

PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V Rabat
PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V Rabat
PES, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI) de Salé
PES, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI) de Salé
PH, Institut Scientifique, Université Mohammed V Rabat
PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V Rabat

Présidente
Directeur de Thèse
Co-Directeur de Thèse
Rapporteur/ Examineur
Rapporteur/ Examineur
Rapporteur/ Examineur

Année Universitaire : 2020-2021

Dédicaces

« Tout est possible à qui ose, travaille et n'abandonne jamais » (Xavier Dolan)

Après ces quatre (4) années de recherche, Je tiens à dédier ce travail, à ma famille; principalement à mon cher père Monsieur SINSIN G. R. et ma chère mère Madame SINSIN née SOSSA Ph. A. pour l'amour, le soutien et les encouragements de tous les jours que vous m'avez prodigués tout au long de ma vie. Je prie chaque jour pour que DIEU vous accorde une longue vie de santé, qu'il vous protège et vous comble de bonheur.

J'ai une pensée toute particulière au Professeur MOUNIR Fouad et à sa femme Mme Amina que je remercie pour tout. Vous êtes devenus pour moi comme une famille d'accueil et une source d'inspiration.

A ma très chère N. Yari pour le soutien et les conseils dans les moments difficiles et surtout à moi-même sans qui je n'aurais jamais été au bout de ce travail.

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Aux termes de ce travail, je tiens à témoigner ma gratitude au Centre de Recherche – Biotechnologies Végétale et Microbienne, Biodiversité et Environnement (BIOBIO) et à la Structure de Recherche – Botanique et Valorisation des Ressources Végétales et Fongiques (BOVAREF) de la Faculté des Sciences de Rabat qui a couvert mon sujet de Thèse réalisé sous l’encadrement du Professeur EL ABOUDI Ahmed de la Faculté des Sciences de Rabat et du Professeur MOUNIR Fouad de l’Ecole Nationale Forestière d’Ingénieurs (ENFI) de Salé.

Je tiens donc à adresser mes vifs remerciements à mon Encadrant, Monsieur EL ABOUDI Ahmed, Professeur de l’Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et encouragements, son expertise et son implication constante dans la réalisation de ce travail.

Je réitère toute ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur MOUNIR Fouad, Professeur de l’Enseignement Supérieur à l’Ecole Nationale Forestière d’Ingénieurs (ENFI) de Salé, qui a bien voulu co-encadrer ce travail. J’ai toujours eu auprès de lui une écoute attentive et des conseils précieux.

Je remercie Madame RHAZI Laila, Professeure de l’Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat pour avoir accepté de présider ma séance de soutenance et pour ses remarques pertinentes lors de ma soutenance.

Je n’oublie pas Feu Monsieur QARRO Mohamed (paix à son âme), Professeur de l’Enseignement Supérieur à l’Ecole Nationale Forestière d’Ingénieurs (ENFI) de Salé qui a examiné et rédigé un rapport sur ma Thèse.

Je remercie également Monsieur MASTERE Mohamed, Professeur Habilité à l’Institut Scientifique de Rabat pour son rapport, son examen et ses remarques pertinentes lors de ma soutenance.

Je remercie également le Professeur de l’Enseignement Supérieur TALEB Mohamed Sghir, de l’Institut Scientifique de Rabat pour son rapport, son examen et ses remarques pertinentes lors de ma soutenance.

Je remercie également Monsieur AIT LHAJ Abderrahmane de l'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'arganier (ANDZOA) et Monsieur OUIDDER Farid de l'Agence de Coopération Internationale Allemande (GIZ) pour avoir accepté de co-encadrer mon stage de 6 mois à la GIZ dans le cadre du projet Centre National de l'Arganier à Agadir.

Enfin, j'adresse mes remerciements à l'ensemble du personnel académique, militaire et administratif de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI) de Salé pour l'accueil.

Résumé

La désertification affecte près de la moitié de la surface de la planète (41%). Malgré l'ampleur du phénomène, la désertification reste encore insuffisamment maîtrisée. L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer le phénomène de la désertification sous la forme dans laquelle elle se présente dans les écosystèmes les plus vulnérables du Maroc. Le but étant de comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes afin de proposer des solutions stratégiques spécifiques de renforcement des capacités d'adaptation de la population locale et de la résilience du milieu biophysique face au changement climatique et à la pression anthropique. Dans ce but, une description de l'état actuel des connaissances sur la désertification a été présentée, suivi de l'identification des zones du Maroc les plus vulnérables à la désertification à l'aide de l'analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée. Enfin, une évaluation plus poussée de la désertification a été effectuée dans deux écosystèmes caractéristiques du Maroc à savoir l'arganeraie au Sud-ouest (à Essaouira et Tiznit) et les écosystèmes dunaires à l'Est (à Errachidia). Dans la zone de l'arganeraie, on a noté une augmentation de la superficie occupée par les terrains de culture sous arganiers au détriment des écosystèmes naturels d'arganiers notamment dans les zones à faible pente ($< 5\%$). A Errachidia, l'utilisation du modèle Saisonnier Autorégressif Intégré à Moyenne Mobile (SARIMA) a révélé une augmentation de l'étendue des dunes de sable à un taux de 1,7% par an. Cette augmentation serait principalement causée par l'effet combiné des facteurs climatiques fluctuant d'une année à l'autre.

Mots-clefs (5) : Désertification, Vulnérabilité, Arganeraie, Dunes, Changement climatique.

Abstract

Desertification affects almost half of the planet's surface (41%). Despite the extent of the phenomenon, desertification is still little mastered. The main objective of this thesis is to assess the phenomenon of desertification in the form in which it occurs in the most vulnerable ecosystems in Morocco. The aim is to understand the functioning of these ecosystems in order to propose specific strategic solutions to strengthen the adaptive capacity of the local population and the resilience of the biophysical environment against climate change and anthropogenic pressure. To this end, a description of the current state of knowledge on desertification was presented, followed by the identification of the most vulnerable areas to desertification in Morocco using the multi-criteria analysis by the weighted sum method. Finally, a more in-depth assessment of desertification was carried out in two Morocco's characteristic ecosystems, namely the argan tree area in the southwest (in Essaouira and Tiznit) and the dune ecosystems in the east (in Errachidia). In the argan tree area, there has been an increase in the area occupied by cultivated land under argan trees to the detriment of natural argan ecosystems, especially in low-slope areas (<5%). In Errachidia, the use of the Seasonal Autoregressive Integrated with Moving Average (SARIMA) model revealed an increase in the extent of sand dunes at a rate of 1.7% per year. This increase would be mainly caused by the combined effect of climatic factors fluctuating from year to year.

Key Words (5): Desertification, Vulnerability, Argan tree area, Dunes, Climate change.

Biographie de l'auteur

PROFIL

SINSIN Tudal est actuellement Docteur en Biologie avec une spécialisation en Ecologie, Géomatique et Modélisation. Il est également un Ingénieur d'Etat des eaux et forêts spécialisé en Ecologie et Gestion des Ressources Naturelles.

A ce titre, Dr. SINSIN a participé, depuis 2016, à de nombreuses études dans divers projets (du FIDA, de l'ADA, du HCEFLCD, de la GIZ ou encore du MCA-Morocco) auprès de différents bureaux d'études à savoir : GIS4DS (Geographic Information System for Decision Support), BETAF (Bureau d'Etudes spécialisé dans les Travaux d'Aménagement des Forêts), Uniconsult, TTOBA (Bureau d'Etudes technique Ingénierie, Conseil et Travaux et CID (Conseil Ingénierie et Développement). SINSIN Tudal travaille également avec l'AMSR (Association Marocaine des Sciences Régionales) et des particuliers.

Les travaux menés dans le cadre de ces études tournent autour de : la photo-interprétation, la cartographie, l'analyse de données statistiques, les travaux d'inventaire forestier, les Etudes d'impacts sur l'environnement et la rédaction de rapports.

Dr. SINSIN a participé également de 2016 à 2020 à la dispense des travaux pratiques du cours de Télédétection et SIG aux étudiants de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé/Maroc (ENFI).

FORMATIONS

→ **Doctorat en Biologie - spécialité : Ecologie, Géomatique et Modélisation (bac +8)**

Obtenu en 2021 à l'Université Mohamed V, Faculté des Sciences de Rabat au MAROC

→ **Technicien Spécialisé en Développement Informatique (bac +2)**

Obtenu en 2019 à l'Ecole de Marketing et Informatique Appliquée à la Gestion (MIAGE) au MAROC

→ **Ingénieur d'Etat des Eaux et Forêts - option : Ecologie et Gestion des Ressources Naturelles (bac +6)**

Obtenu en 2016 à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé au MAROC

→ **Diplôme en Foresterie Générale (bac +4)**

Obtenu en 2014 à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé au MAROC

→ **Diplôme d'Etudes Universitaires Générales (DEUG) en Biologie (bac +2)**

Obtenu en 2012 à l'Université Mohamed V, Faculté des Sciences de Rabat au MAROC

→ **Baccalauréat scientifique (série D)**

Obtenu en 2010 au Collège Ste Félicité de Godomey au BENIN

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- Guedegbe, T., Sinsin, T. & Doukkalils, M.R. Land Degradation Neutrality in Africa Possible? *OCF policy center, Policy Brief*. 2018
- Sinsin, T., Mounir, F., & El Aboudi, A. Comparative analysis of spatio-temporal dynamics in the plain and mountain argan ecosystems, Morocco. *International Journal of Environmental Studies*, 2020. DOI: 10.1080/00207233.2020.1723960
- Sinsin, T., Mounir, F., & El Aboudi, A. Conservation, valuation and sustainable development issues of the Argan Tree Biosphere Reserve in Morocco. *Environmental & Socio-economic Studies*, 8, 1, 2020, 28-35. DOI: 10.2478/environ-2020-0004
- Sinsin, T., Mounir, F., & El Aboudi, A. Assessment of vulnerability to desertification using the multi-criteria analysis by the weighted sum method. *Journal of Global Ecology and Environment*. 10,1, 2020. 6-23.
- Sinsin, T., Mounir, F., & El Aboudi, A. Modelling of the spatio-temporal dynamic of sand dunes and analysis of the driving factors influencing this dynamic in the district of Errachidia, Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*.

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

- Analyse et suivi des indicateurs de la désertification dans la partie sud du royaume du Maroc. *Congrès International MORGE0 sous le thème : Technologie géospatiale : Applications et perspectives à l'Ecole Hassania des Travaux Publics de Casablanca (Maroc) – 2017 ;*
- Perception du public au changement climatique et de son impact sur les inondations dans la vallée de l'Ourika. *Congrès International de l'Association Marocaine des Sciences Régionales (AMSR) sous le thème : L'Ambition de la Durabilité à l'Aune de la Complexité des Territoires et de la Société de Risques – 2017 ;*
- Analyse de la vulnérabilité de l'arganeraie face aux facteurs de désertification au sud du Maroc. *Congrès International de l'Arganier sous le thème : Réserve de biosphère Arganeraie : vers un changement de paradigme – 2017 ;*
- Analyse comparative de la dynamique spatio-temporelle dans l'écosystème d'Arganiers de plaine et de montagne. *Congrès International de l'Arganier sous le thème : Capital naturel de l'Arganeraie : valeur et valorisation – 2019.*

Sommaire

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Résumé	iv
Abstract	v
Biographie de l'auteur.....	vi
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
Liste des annexes.....	xv
Introduction.....	1
A-Généralité	1
B- Problématiques de l'étude.....	2
1- Le monde face à la désertification	2
2- Ampleur du phénomène de la désertification au Maroc.....	3
3- Changements globaux et leurs impacts	4
C- Objectifs de l'étude et approche méthodologique générale.....	6
2- Analyse de la vulnérabilité à la désertification	7
3- Analyse des dynamiques spatio-temporelles.....	7
4- Proposition de solutions adéquates et spécifiques à chaque région.....	8
Chapitre I : Etat actuel des connaissances et revue bibliographique.....	9
I-1-Désertification.....	9
I-1-1- Histoire et Définitions du terme « Désertification »	9
I-1-3- Causes et conséquences de la désertification	13
I-1-4- Indicateurs de la désertification	15
I-1-5- Moyens de lutte contre la désertification	20
I-2-Ecosystèmes à arganiers ou Arganeraie	23
I-2-1- Systématique et répartition de l'arganier	23
I-2-2- Aspect général de l'arganier	27
I-2-3- Evolution du couvert végétal et impact anthropique dans l'arganeraie.....	27
I-2-4- Mode de gestion et d'exploitation	33
I-2-5- Augmentation de l'intérêt pour l'huile d'argan et implications.....	35

I-2-6- Changement dans les habitudes de la population et dans les modes de gestion.....	37
I-3-Ecosystèmes dunaires d'Errachidia.....	40
I-3-1- Formations dunaires	40
I-3-2- Type de dunes.....	42
I-3-3- Problèmes liés aux écosystèmes dunaires.....	44
Chapitre II : Évaluation de la vulnérabilité à la désertification	46
II-1- Introduction	46
II-2- Zone d'étude	47
II-3- Indicateurs et sources de données	50
II-4- Approche méthodologique	52
II-5- Résultats et Discussion.....	56
II-6- Conclusion	67
Chapitre III : Analyse des dynamiques spatio-temporelles	68
III-1- Analyse comparative de la dynamique spatio-temporelle dans les écosystèmes d'arganiers suivant le gradient de pente, Sud-Ouest Marocain.....	68
III-1-1- Introduction	68
III-1-2- Zones d'étude	69
III-1-4- Résultats	102
III-1-5- Discussion	110
III-1-3- Approche méthodologique.....	111
III-1-6- Conclusion.....	119
III-2- Modélisation de la dynamique spatio-temporelle des dunes de sable et analyse de l'influence des facteurs écologiques sur cette dynamique dans la province d'Errachidia, Sud-Est Marocain.....	120
III-2-1- Introduction	120
III-2-2- Zone d'étude.....	122
III-2-3- Sources de données	137
III-2-4- Approche méthodologique.....	139
III-2-5- Résultats	142
III-2-6- Discussion	149
III-2-7- Conclusion.....	150
Conclusion générale	152
A-Recommandations pour lutter contre la désertification	154

1- Mesures prioritaires dans l'Arganeraie	155
2- Méthodes de lutte contre l'ensablement.....	158
B- Perspectives de la thèse.....	160
1- Générales	160
2- Au Maroc	160
3- Au Bénin	161
Références bibliographiques	162
Annexes	184

Liste des tableaux

Tableau 1 :Liste des indicateurs potentiels sélectionnés comme set optimum à envisager dans les programmes de suivi de la désertification	17
Tableau 2 : Répartition des superficies des peuplements d'arganier par province	30
Tableau 3: Caractéristiques des zones homogènes	49
Tableau 4 : Classes d'occupation du sol choisies pour l'analyse de vulnérabilité	52
Tableau 5 : Echelle de Saaty	55
Tableau 6 : Matrice de comparaison des facteurs de vulnérabilité	56
Tableau 7 : Occupation des forêts et matorral du Maroc	60
Tableau 8 : Valeur des différents indicateurs par zone homogène.....	62
Tableau 9 : Poids des différents indicateurs.....	63
Tableau 10 : Gisement de marbre dans la province de Tiznit	101
Tableau 11: Résumé des problèmes et recommandations proposées pour chaque zone homogène du Maroc	154

Liste des figures

Figure 1 : Relations et boucles de rétroaction entre désertification, changement climatique et perte de la biodiversité.....	6
Figure 2 : Description schématique des chemins menant à la désertification.....	12
Figure 3 : Aire de répartition de l'arganeraie	24
Figure 4 : Aire potentielle de répartition de l'arganeraie	26
Figure 5 : Répartition spatiale des zones de la RBA	29
Figure 6 : Modèle de l'organisation de l'espace dans l'arganeraie	34
Figure 7 : Type de dunes à Errachidia.....	44
Figure 8 : Carte des zones homogènes du Maroc	48
Figure 9 : Méthode d'analyse multicritère	53
Figure 10 : Carte d'occupation du sol du Maroc	59
Figure 11 : Vulnérabilité des zones homogènes sans pondération des indicateurs	65
Figure 12 : Vulnérabilité des zones homogènes avec pondération des indicateurs	66
Figure 13 : Situation géographique de la zone de l'arganeraie.....	70
Figure 14 : Situation géographique et administrative de la province d'Essaouira	72
Figure 15 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Essaouira	73
Figure 16 : Carte des pentes de la province d'Essaouira	75
Figure 17 : Carte géologique de la province d'Essaouira.....	76
Figure 18 : Carte des types de sol de la province d'Essaouira	77
Figure 19 : Carte des points d'eau et SIBE de la province d'Essaouira	80
Figure 20 : Carte des étages de végétation	82
Figure 21 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 1987	83

Figure 22 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 2002	84
Figure 23 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 2017	85
Figure 24 : Répartition des productions agricoles au titre de la campagne agricole 2014-2015.....	87
Figure 25 : Situation géographique et administrative de la province de Tiznit.....	89
Figure 26 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Tiznit	90
Figure 27 : Carte des pentes de la province de Tiznit.....	91
Figure 28 : Carte géologique de la province de Tiznit	92
Figure 29 : Carte des types de sol de la province de Tiznit	93
Figure 30 : Carte des points d'eau et SIBE de la province de Tiznit.....	95
Figure 31 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 1987	96
Figure 32 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 2002	97
Figure 33 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 2017	98
Figure 34 : Types de formations végétales à Essaouira et Tiznit.....	108
Figure 35 : Evolution de l'occupation du sol à Essaouira	109
Figure 36 : Evolution de l'occupation du sol à Tiznit.....	104
Figure 37 : Dynamique de changement de l'arganeraie en fonction des pentes à Essaouira	106
Figure 38 : Evolution de la densité dans l'arganeraie en fonction des pentes à Essaouira.....	107

Figure 39 : Dynamique de changement de l'arganeraie en fonction des pentes à Tiznit	108
Figure 40 : Evolution de la densité dans l'arganeraie en fonction des pentes à Tiznit	109
Figure 41 : Situation géographique et administrative de la province d'Errachidia	123
Figure 42 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Errachidia	124
Figure 43 : Carte des pentes de la province d'Errachidia	126
Figure 44 : Carte géologique de la province d'Errachidia.....	127
Figure 45 : Carte des types de sol de la province d'Errachidia	128
Figure 46 : Carte des zones humides et SIBE de la province d'Errachidia	130
Figure 47 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 1987	132
Figure 48 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 2002	133
Figure 49 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 2017	134
Figure 50: Contraction et expansion des dunes en termes de distributions spatiales et temporelles par période dans la province d'Errachidia de 1989 à 2019	143
Figure 51 : Dynamique des dunes de sable de 1987 à 2019	144
Figure 52 : Evolution des facteurs climatiques de 1987 à 2019.....	144
Figure 53 : Résultat de la prévision de la série chronologique sur l'étendue des dunes de sable de 2019 à 2069.....	145
Figure 54 : Carte de changement du couvert végétale par période dans la province d'Errachidia de 1989 à 2019.....	148

Liste des annexes

Annexe 1 : Série chronologique des superficies des dunes de sable par année.....	184
Annexe 2 : Algorithme en Python du modèle SARIMA	185
Annexe 3 : Moyenne annuelle des différents facteurs climatiques.....	192
Annexe 4 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 1989 et 1995 à Errachidia	193
Annexe 5 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 1995 et 2001 à Errachidia	194
Annexe 6 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2001 et 2007 à Errachidia	195
Annexe 7 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2007 et 2013 à Errachidia	196
Annexe 8 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2013 et 2019 à Errachidia	197
Annexe 9 : Matrices de confusion des cartes d'occupation du sol sur la base des ROI	198
Annexe 10 : Résultats des tests de corrélations.....	200
Annexe 11 : Liste des articles publiés et Indexation des journaux.....	210
Annexe 12 : Fiche descriptive des peuplements sur terrain	211

Introduction

A-Généralité

La désertification peut être définie comme la dégradation des sols, qui résulte d'une évolution simultanée des conditions climatiques, édaphiques et biotiques cédant la place à l'aridification de l'environnement. C'est un phénomène mondial qui touche environ 33% du monde (Eswaran, et al., 2001) et 41% des terres émergées (MEA, 2005). Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le mot « Désertification » ne s'applique pas seulement aux régions hyperarides ; elle affecte également les zones arides, semi-arides et subhumides sèches (Dregne, 1990 ; Katyal & Vlek, 2000).

La désertification est causée par l'action combinée de la pression anthropique et de l'aridité climatique (Cornet, 2002 ; UNCCD, 2014) qui conduit à la régression des forêts, à la pollution et à la diminution de la disponibilité des ressources en eau, à la dégradation des parcours et des sols, et à l'extinction de plusieurs espèces animal et végétal (Benbrahim, et al., 2004). Elle accélère également le changement climatique et réduit la productivité des terres (Wu & Ci, 2002 ; Li, et al., 2006 ; Loireau, et al., 2007).

L'Afrique est le deuxième continent (après l'Asie) avec la plus forte proportion de zones très vulnérables (Nguyena & Liou, 2019). Dans les régions méditerranéennes de l'Afrique, qui sont économiquement et socialement défavorisées (comme au Maroc), la désertification affecte de vastes zones et entrave le développement durable (UNEP, 1991). Malgré sa large ouverture sur l'océan Atlantique et la mer Méditerranée, le Maroc est soumis à des influences continentales et sahariennes, qui augmentent l'aridité du nord au sud et d'ouest en est. Selon certains auteurs, toutes les régions marocaines sont vulnérables à la désertification et au changement climatique (Philippe, 1993 ; Benbrahim, et al., 2004 ; Mokhtari, et al., 2014). En effet, l'aridité touche plus de 90% du territoire marocain (Stour & Agoumi, 2008 ; Hammouzaki, 2013) et les parcours occupent 82% de ces terres arides (Mahyou, et al., 2010). La situation est accentuée par la variabilité intra et interannuelle des précipitations et l'érosion des couches supérieures du sol notamment dans les zones de montagne (Benbrahim, et al., 2004).

B- Problématiques de l'étude

1- Le monde face à la désertification

La désertification affecte près de la moitié de la surface de la planète et touche tous les continents sauf l'Antarctique. Les études de l'UNCCD, de l'UNEP et d'autres organisations comme la FAO, la GIZ, ... ont accumulé assez d'informations sur l'état de la dégradation des terres et des eaux de la planète, et sur l'extension et les tendances de la désertification. Selon ces études, les processus de désertification, qui sont dus principalement à la surexploitation agricole, au surpâturage, à la déforestation et à la variabilité climatique, affectent directement 110 pays (UNCCD, 2009), aussi bien des pays en développement que des pays développés. Ces études indiquent également que, globalement, 24% des terres du globe sont dégradées et que cette dégradation affecte les niveaux de vie de plus de 1,5 milliard de personnes. Elles soulignent que 78% des terres dégradées sont situées dans les régions humides, tropicales et boréales, 8% dans les régions subhumides sèches et 14% dans les régions semi arides et arides. L'évaluation des ressources en eau montre que 32,6% de la population mondiale connaissent déjà des limitations marquées et que cette ressource est rare pour 8,1% (UNCCD, 2009). En termes de superficie forestière, la FAO estime que, depuis 1990, les pays en développement ont perdu environ 13 millions d'hectares par an et que 29 pays ont perdu 90% de leurs forêts (FAO, 2014).

Les facteurs de désertification varient d'une zone géographique à l'autre (Geist & Lambin, 2004) et les zones arides s'avèrent être les zones les plus gravement touchées par le phénomène. Ces zones occupent 41 % de la superficie des terres de la planète et abritent plus de 2 milliards d'individus soit le tiers de la population mondiale en 2000. 37 % des zones arides sont en Afrique, 33 % en Asie, 14 % en Australie et 20 à 70% de ces zones arides sont déjà dégradées (MEA, 2005). La vulnérabilité accrue des zones arides vis-à-vis de la désertification peut être expliquée par les principaux facteurs suivants :

- ✓ La variabilité des pluies est plus forte dans les zones sèches qu'ailleurs et la succession d'années de sécheresse persistante est une cause importante de la fragilité de ces milieux.
- ✓ Les précipitations sont de type orageux et donc leur agressivité est très importante.
- ✓ La pédogenèse y est très lente en comparaison de l'érosion accélérée déclenchée par la mise en valeur agricole et les précipitations orageuses.

- ✓ Pour répondre à la croissance démographique continue même les sols les plus pauvres ou les plus érodés sont mis en culture afin de rehausser la productivité.
- ✓ Les systèmes écologiques sont fragiles et à faible résilience ce qui fait que les potentialités du milieu y baissent plus rapidement et les vitesses de reconstitution sont plus lentes que dans les zones à climat moins contraignant (Cornet, 2002).
- ✓ Les mécanismes d'aménagement ne prennent pas en considération la spécificité des milieux.

2- Ampleur du phénomène de la désertification au Maroc

Le Maroc est un pays méditerranéen caractérisé sur une grande partie de son territoire (93%), par un climat aride ou semi-aride (FAO, 2017). Cette aridité couplée à la pression anthropique grandissante est la cause de la vulnérabilité à la désertisation dans toutes les régions du Maroc (Sinsin, 2018). En effet, le Plan d'Action National de Lutte Contre la Désertification (PAN-LCD) du Maroc a révélé en 2001 un état des lieux alarmant. Il indiquait que :

- Le niveau de déforestation atteint chaque année 31 000 ha environ, répartis en : 22 000 ha correspondant à une récolte de bois de feu dépassant la capacité productive de la forêt, 5000 ha de défrichements, 3000 ha d'incendies, et 1000 ha pour d'autres utilisations.
- Les parcours connaissent quant à eux un appauvrissement de leur couvert végétal et près de 8,3 millions d'hectares de terrains de parcours sont fortement dégradés notamment dans les zones de l'Oriental, de l'Arganeraie, du Présahara et du Sahara. D'un autre côté, le défrichement touche chaque année près de 65 000 ha pris sur les meilleures terres de pâturage.
- Les terres d'agriculture pluviale, elles sont constamment soumises à différentes formes d'érosion éolienne et hydrique entraînant des pertes importantes en fertilité et en couche arable des sols. Les conclusions dégagées par une étude datant de 1973 indiquaient que sur les 7.7 millions d'ha de terrains cultivés recensés à cette époque, 5.5 millions ha sont soumis à une érosion intense.
- Les terres irriguées ne sont pas exemptes des menaces puisqu'elles subissent une dégradation dues à des prélèvements abusifs d'eau ou des rejets polluants. La salinisation est la forme de dégradation des terres irriguées la plus visible rencontrée dans la plupart des

périmètres irrigués. Les données disponibles, permettent d'évaluer la superficie des terres menacées par la salinité à 500 000 ha situées pour la plupart dans les périmètres de grande hydraulique.

Cependant, une étude de cartographie du couvert végétale réalisée en 2015 sur l'ensemble du territoire national suivi d'une analyse comparative a montré que la superficie occupée par le domaine forestier n'a pas cessé d'augmenter depuis 2005 (Elqaidi, 2016 ; Sinsin, 2016). Cette augmentation reste faible mais elle est un peu plus importante années après années.

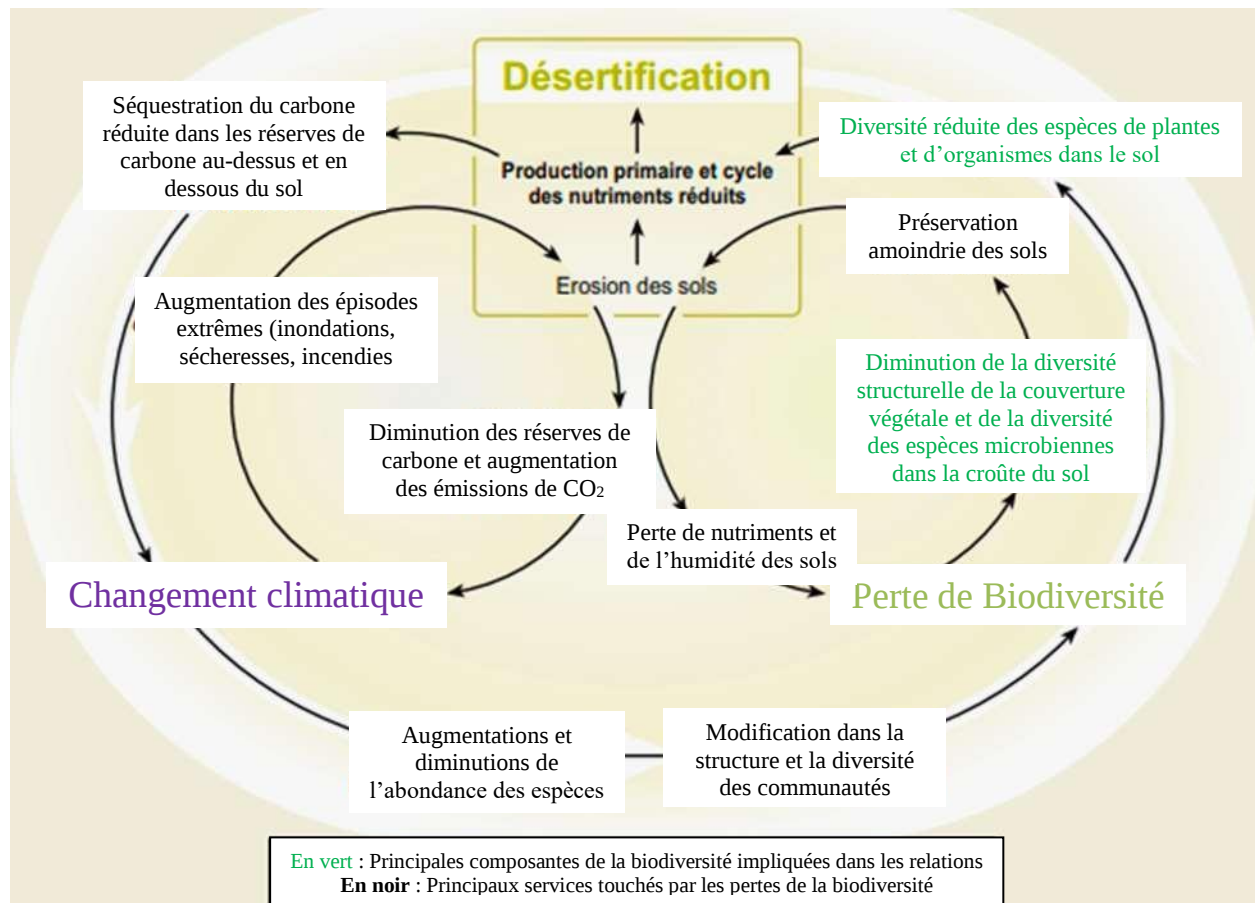
3- Changements globaux et leurs impacts

Les problèmes environnementaux sont généralement perçus comme une addition de phénomènes indépendants et aux causes multiples. Parmi ces problèmes figurent : la croissance démographique, le changement climatique, l'érosion, la perte de la biodiversité marine ou continentale, la dégradation des sols, l'usage intensif des ressources hydriques, la raréfaction des ressources énergétiques fossiles ou minérales, la pollution chimique de l'air et de l'eau, etc... Cependant, ces perturbations sont très étroitement liées les unes aux autres et sont la cause de changements environnementaux à l'échelle de la planète (ANR, 2013). Ces changements sont connus sous le nom de « changements globaux » ou « changement global ». Ils peuvent être regroupés en deux catégories interconnectés : les changements climatiques et les changements anthropiques. Les changements climatiques concernent toutes les perturbations liées à l'augmentation des températures et à la diminution des précipitations à savoir : la sécheresse, les inondations ou autres catastrophes naturelles. Ces phénomènes sont souvent la cause de famine, de migrations, d'instabilité politique et de conflits. Les changements anthropiques sont quant à eux liés à la croissance démographique et à de mauvaises pratiques et techniques d'exploitation des ressources naturelles. Ces deux forment de changements sont étroitement liées et maintiennent des relations de cause à effet.

En effet, l'essor de l'humanité tel qu'on le connaît repose sur le développement et l'intensification de l'agriculture au sens large (cultures et plantations, élevage et pastoralisme, agroforesterie) pour faire face aux besoins alimentaires et énergétiques d'une population mondiale de plus en plus nombreuse. Ainsi, de nombreuses forêts et terres sont exploitées abusivement entraînant des perturbations des grands cycles biogéochimiques (carbone, soufre, azote, phosphore, potassium).

S'ajoute à cela la forte urbanisation et l'industrialisation qui est la principale cause des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il s'en suit l'augmentation des températures, la perte du couvert végétale et l'érosion entraînant ainsi la dégradation du sol.

Les changements globaux (anthropiques et climatiques) et la désertification sont donc profondément liés. Cependant cette relation est assez complexe et pas toujours suffisamment comprise. D'une part, la désertification implique une perte de la diversité biologique, laquelle est impliquée dans la plupart des services fournis par les écosystèmes notamment dans les zones sèches. La richesse spécifique au niveau d'un écosystème contribue à la formation du sol et au cycle des nutriments. En concert avec une communauté de micro et macro-décomposeurs très diverses, la biodiversité participe à la production primaire qui, d'un côté, fournit nourritures, fibres et bois de chauffage et de l'autre, séquestre du carbone, ce qui régularise le climat de la planète. Une exploitation excessive des terres et de la végétation entraîne une perte de cette production primaire, donc une diminution de la séquestration de carbone, voire sa libération dans l'atmosphère, provoquant ainsi une rétroaction significative sur le système climatique mondial. D'autre part, les changements climatiques peuvent affecter négativement la biodiversité et aggraver la désertification à cause d'une augmentation des températures et la réduction des précipitations dans les zones sèches (MEA, 2005).



(Source : MEA, 2005)

Figure 1 : Relations et boucles de rétroaction entre désertification, changement climatique et perte de la biodiversité

C- Objectifs de l'étude et approche méthodologique générale

L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer le phénomène de la désertification sous la forme dans laquelle elle se présente dans les écosystèmes les plus vulnérables du Maroc. Le but étant de comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes afin de proposer des solutions stratégiques spécifiques de renforcement des capacités d'adaptation de la population locale et de la résilience du milieu biophysique face au changement climatique et à la pression anthropique.

Cet objectif principal se scinde en plusieurs objectifs spécifiques à savoir :

1- Mise en évidence de l'état actuel des connaissances sur la désertification

Cette mise en évidence s'est fait en se basant sur une recherche bibliographique approfondie. Elle a consisté à dans un premier temps à définir le phénomène de la désertification et son évolution au fil du temps. Ensuite, il a été question de collecter les données disponibles sur les caractéristiques climatiques, hydrologiques, géomorphologiques, pédologique, floristique et faunistique des milieux étudiés. Les recherches se sont poursuivies en incorporant la dimension économique et sociale de la population locale grâce à une collecte de données auprès des administrations locales ou d'autres sources d'informations (les collectivités locales, les personnes ressources et la population elle-même).

2- Analyse de la vulnérabilité à la désertification

L'évaluation de la vulnérabilité à la désertification des zones bio-géographiquement homogènes du Maroc s'est fait à l'aide de l'analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée. Cette analyse a pour finalité de présenter une méthode simple, complète et efficace qui rendrait possible et plus facile l'évaluation de la vulnérabilité à la désertification dans une zone, à grande échelle.

3- Analyse des dynamiques spatio-temporelles

3-1- Justificatif du choix des zones pour l'analyse des dynamiques spatio-temporelles

Le Maroc est caractérisé par des écosystèmes très variés typiques des milieux sous climat méditerranéen. Cependant, certains de ces écosystèmes présentent des caractéristiques spécifiques qui les rendent unique en leur genre. On peut citer par exemple l'arganeraie qui doit sa spécificité à l'arganier qui est la seule espèce de la famille des Sapotacées (normalement d'origine tropical) au Maroc. De plus, l'arganier est utilisé dans de nombreux domaines qui vont de la médecine à l'alimentation en passant par le cosmétique (Charrouf, 1998 ; M'hirit, et al., 1998 ; Moukal, 2004) et participe à la vie de plus de deux millions d'habitants (dont 60% en milieu rurale) uniquement dans la région de l'arganeraie¹ (d'après le recensement de 2014).

¹ La région de l'arganeraie s'étend depuis la région de Safi au nord jusqu'à la frange saharienne aux environs de l'Oued Noun au sud et de la côte atlantique à l'ouest jusqu'au massif de Sirroua à l'est (Nouaim, 2005).

Les écosystèmes dunaires présentent aussi une spécificité dans le contexte Marocain. En effet, les dunes sont spécifiques au climat chaud et désertique. Elles sont la cause d'ensablement qui menace les habitations, les terrains de cultures et les plans d'eau.

Ces deux écosystèmes forment le dernier rempart contre la désertisation du Maroc, qui provient notamment du Sud et de l'Est. Ainsi, l'arganeraie au Sud-ouest et les écosystèmes d'Errachida à l'Est ont été au centre de l'étude d'analyse de la dynamique spatio-temporelle.

3-2- Le phénomène de la désertification dans l'Arganeraie

Dû à une insuffisance d'outils de suivi du phénomène de la désertification, a été conduite une étude comparative de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol suivant le gradient de pente, à Essaouira où le bioclimat est principalement semi-aride et à Tiznit où le bioclimat est aride voire désertique.

3-3- Le phénomène de la désertification au niveau des écosystèmes dunaires

Cet objectif a consisté à évaluer et à prédire l'évolution de la superficie occupée par les dunes de sable dans la province d'Errachidia puis à essayer d'en comprendre les causes. Le modèle utilisé a permis de prévoir l'expansion et la contraction des dunes de sable au cours des 50 prochaines années via une analyse de la série chronologique des superficies des dunes de sable. Puis, sachant que les causes de la désertification peuvent être physiques, biologiques ou humaines et pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes dunaires, a été réalisé un test de corrélation entre les facteurs naturels et humains et la dynamique des dunes de sable.

4- Proposition de solutions adéquates et spécifiques à chaque région

L'objectif ultime des études d'identification et de modélisation des facteurs de désertification comme celles réalisées dans ce projet de thèse est d'arriver à préserver les écosystèmes naturels, en proposant des solutions adaptées qui permettent l'amélioration des modes et techniques de gestion et de conservation, et la rationalisation des usages.

Chapitre I : Etat actuel des connaissances et revue bibliographique

I-1-Désertification

I-1-1- Histoire et Définitions du terme « Désertification »

A travers son discours contre Rullus, prononcé en 63 avant Jésus Christ, le sénateur Cinéron fut le premier (à notre connaissance) à énoncer les conséquences de la dégradation des forêts notamment sur la population riveraine.

Plus de deux milles ans plus tard le problème de la dégradation des forêts reste toujours d'actualité et le terme « dégradation » a donné lieu à celui de « désertification ».

De nombreuses définitions de la désertification se sont succédées au fil des années. La désertisation a d'abord été définie par Le Houérou (1962) comme un ensemble d'actions qui se traduisent par une réduction plus ou moins irréversible du couvert végétal aboutissant à l'extension des paysages désertiques nouveaux. Ces paysages sont caractérisés par la présence de regs, des hammadas et d'ensemble dunaires. En 1977, lors de la Conférence des Nations Unies sur la Désertification (CNUD ou UNCOD) tenue à Nairobi (Kenya), il a été suggérer la définition suivante : « La désertification est la diminution ou la destruction du potentiel biologique du sol et peut conduire finalement à des conditions de désert ». Ces deux définitions ne font allusion ni aux causes de la désertification, ni aux zones climatiques susceptibles d'être affectées par ce phénomène.

Dregne (1977) propose la définition suivante : « la désertification est l'appauvrissement d'écosystèmes arides, semi-arides ou subhumides sous les effets combinés des activités humaines et de la sécheresse. Le changement dans ces écosystèmes peut être mesuré en terme de baisse de la productivité des cultures, d'altération de la biomasse et du changement dans la diversité des espèces végétales et animales, d'une accélération de la dégradation des sols et de risques accrus pour l'existence des populations ». Cette définition souligne l'interaction entre les activités anthropiques et le processus de désertification.

Ainsi, en 1982 la définition adoptée par la CNUD en 1977 a été remplacée par celle de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (OAA) et du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui stipule que « La désertification est une expression complète des processus économiques et sociaux ainsi que naturels ou qui détruisent l'équilibre entre le sol, la végétation, l'air et l'eau, dans les zones soumises à l'aridité édaphiques et / ou climatique. La détérioration continue conduit à une diminution du potentiel biologique de la terre, la dégradation des conditions de vie et une augmentation des ambiances désertiques ».

Lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) tenue à Rio en 1992, la décision d'élaborer une Convention de Lutte contre la Désertification (CLD) a été prise. Cette convention a été adoptée à Paris le 17 juin 1994 et ratifiée en 1996 par plus de 50 pays. Elle est entrée en vigueur en décembre 1996. L'article 1 de cette convention définit la désertification comme : « 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 ».

C'est ainsi qu'en 1994, Mainguet déclare que « la dégradation des terres est donc plus le résultat de pressions dues à l'homme, et majorées par la sécheresse, qu'à la sécheresse elle-même ». Il appuie sa déclaration par la définition suivante : « La désertification, révélée par la sécheresse, est due aux activités humaines lorsque la capacité de charge des terres est dépassée ; elle précède les mécanismes naturels exacerbés ou induits par l'homme ; elle se manifeste par une détérioration de la végétation et des sols et aboutit, à l'échelle humaine de temps, à une diminution ou à une destruction irréversible du potentiel biologique des terres ou de leur capacité à supporter les populations qui y vivent ».

Jagdish C. Katyal et Paul L.G. Vlek (2000) proposent la définition suivante : « la désertification est un état de dégradation des sols induit par l'homme et qui apparaît dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, où il aboutit à un déclin persistant de la productivité économique (>15% du potentiel) du biote utile, en relation avec l'usage qui est fait des sols ou avec un système de production. Les variations climatiques intensifient le déclin de la productivité dont les gestions tendant à une remise en état peuvent le réduire ».

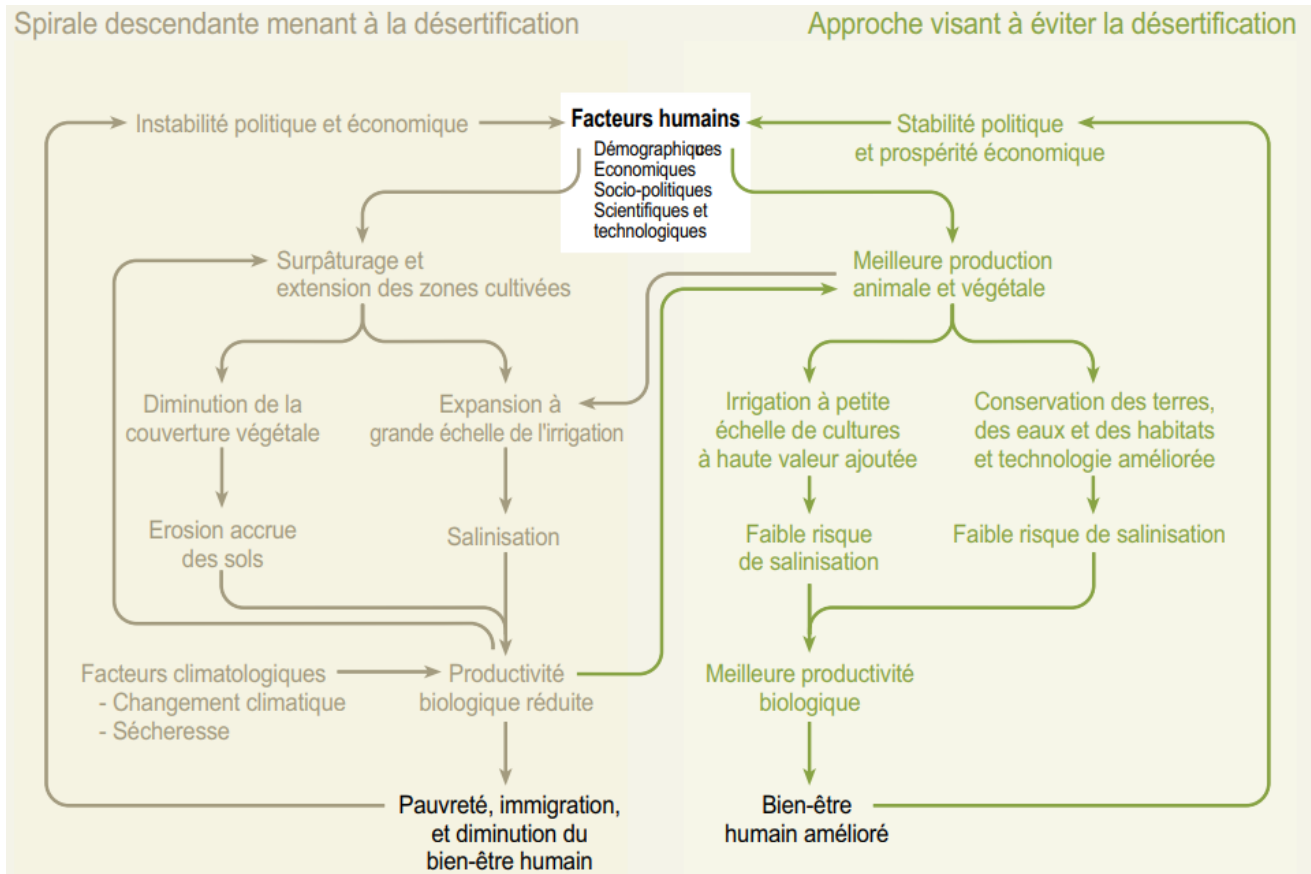
En 2003, dans le cadre de la cinquième Table Ronde Parlementaire dans le contexte de la mise en œuvre de la Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification (UNCCD), le professeur Uwe Holtz déclare que : « Contrairement à ce qu'on pourrait croire, le terme de "désertification" ne s'applique pas qu'aux zones hyperarides (déserts). Il s'emploie plutôt pour faire référence à un processus résultant de facteurs anthropocentriques et naturels, comme la surexploitation des terres, l'excès de pâturage (« surpâturage »), l'agriculture mécanisée, les mauvaises méthodes d'irrigation, les coupes de bois illégales et excessives, les feux de brousse et de forêt ainsi que la déforestation découlant de l'accroissement de la population, à quoi s'ajoute une série de facteurs climatiques (aridité durant toute l'année, précipitations particulièrement inégales, sécheresse récurrente, etc.) qui exercent également une influence sur le processus de dégradation des sols ».

I-1-2- Différence entre « Dégradation des terres » et « Désertification »

La désertification est souvent confondue à la dégradation des terres. Cette confusion est faite parfois à tort ou à raison. La dégradation des terres peut être définie comme la réduction, voire la disparition des services fournis par les écosystèmes. Ces services peuvent être de nature à fournir de la nourriture et de l'eau, ou à réguler le climat, les inondations et les maladies. Se trouvent aussi menacer les services culturels tels que les bénéfices spirituels, récréatifs et culturels, ou encore les services de soutien qui maintiennent des conditions favorables à la vie sur Terre, tels que le cycle des éléments nutritifs. Lorsqu'un certain seuil est atteint, la terre perd sa productivité et sa résilience, elle se désertifie (Loireau, et al., 2007). Le processus de désertification varie d'une zone géographique à l'autre (Geist & Lambin, 2004). Cela s'explique par le fait que les conditions bioclimatiques diffèrent en fonction de la zone géographique.

L'étendue et les conséquences de la désertification varient donc considérablement dans le temps et dans l'espace. Cette variation est tributaire du degré d'aridité et de la pression que les gens exercent sur les ressources des écosystèmes. En zones sèches, notamment au Maroc, les écosystèmes sont très vulnérables à cause de la sécheresse et de l'irrégularité des précipitations. Lorsque la capacité de récupération de ces écosystèmes est endommagée et qu'ils ne parviennent plus à fournir les services qui les incombent même une fois la pression disparue alors une spirale descendante de dégradation des sols peut survenir donnant lieu au phénomène de désertification.

Une description schématique des chemins menant à la désertification est présentée sur la figure suivante :



(Source : MEA, 2005)

Figure 2 : Description schématique des chemins menant à la désertification

En substance, La désertification est une forme aiguë de la dégradation des terres et de la perte des services écosystémiques (MEA, 2005). Elle est le résultat d'une incapacité prolongée à équilibrer l'offre et la demande en biens et services écosystémiques. Constituant un des principaux obstacles à la satisfaction des besoins humains fondamentaux dans les zones sèches, la désertification s'impose comme l'un des défis environnementaux majeurs et préoccupants de nos jours.

I-1-3- Causes et conséquences de la désertification

I-1-3-1- Aridité du climat et pressions anthropiques : causes de la désertification

Selon le HCEFLCD, les facteurs qui favorisent le déclenchement et l'accentuation de la désertification résident dans l'aridité du climat qui concerne près de 93 % du territoire national. Néanmoins, par le passé, les terres parvenaient à se régénérer même après de longs périodes de sécheresse (HCEFLCD, 2001). Actuellement, on assiste à une augmentation de la pression sur les écosystèmes due aux facteurs humains qui s'ajoute à cette aridité du climat. La combinaison de ces deux (2) facteurs (anthropique et climatique) accentue l'aridité du sol en en diminuant sa capacité à stocker de l'eau et à la rendre disponible pour la végétation, réduit le couvert végétal et modifie les paysages, affectant la productivité des systèmes de production et les conditions de vie des populations (Loireau, et al., 2007).

Les facteurs humains comprennent des facteurs indirects, tels que les facteurs socio-économiques et politiques, la pression démographique et le commerce international, ainsi que des facteurs directs, comme les modèles et pratiques d'utilisation des sols (MEA, 2005). Certaines politiques en matière de propriété des terres encouragent les paysans à surexploiter les ressources foncières. En effet, les pratiques et les politiques en matière de foncier peuvent être d'importants facteurs de désertification. Lorsque les fermiers ou les bergers perdent le contrôle des terres qu'ils exploitent ou le sentiment de sécurité à long terme que cette exploitation leur procure, leurs motivations à conserver des pratiques durables sur le plan environnemental disparaissent. Des problèmes de pénurie d'eau de surface, d'épuisement de la nappe phréatique, d'érosion des sols et de salinisation sont autant de facteurs de désertification qui résultent de profonds manquements au niveau politiques et institutionnels.

Les ressources naturelles s'appauvrissent donc rapidement du fait de la surexploitation et des modèles de gestion non appropriés des terres qui n'arrivent plus à répondre à la croissance démographique et à la mondialisation.

Ainsi, Cornet (2002) identifie trois (3) types de causes de la désertification à savoir :

- Les causes immédiates que sont : le surpâturage, la mise en culture inappropriée et les prélèvements excessifs ;

- Les causes sous-jacentes à savoir : l'accroissement de la pression humaine, l'inadaptation des techniques et des modes de gestion, la sécheresse et accidents climatiques et la fragilité des écosystèmes ;
- Et les causes fondamentales : la croissance démographique, l'inadaptation du contrôle de l'accès aux ressources, la crise économique, la pauvreté, le cadre institutionnel et le choix de développement.

I-1-3-2- Perte des biens et services écosystémiques et dégradation : conséquences de la désertification

La principale conséquence de la désertification, concerne la diminution progressive de la productivité des terres ayant pour corollaire une pression démesurée sur les zones non affectées ou légèrement menacées par ce fléau, induisant elle-même à son tour le risque de désertification de ces zones non encore touchées (Benguerai, 2011).

Les conséquences de la désertification sont de trois (3) types à savoir :

- Les conséquences environnementales dont la première est la dégradation du couvert végétal et la perte de biodiversité. Ce qui accentue l'aridité du climat et baisse la productivité des sols. De plus, les sols non couverts sont exposés à l'action de l'érosion (hydrique et éolienne) qui transporte les grains de sable, conduisant à l'ensablement notamment des cours d'eaux et réduisant ainsi leur disponibilité.
- Les conséquences socio-économiques de la désertification qui se caractérisent par la diminution de la capacité de stockage du carbone dans les sols et la réduction des biens et services forestiers (bois, plantes médicinales, produits forestiers non ligneux), l'augmentation de la pauvreté et l'insécurité alimentaire.
- Les conséquences socio-politiques de la désertification qui sont notamment liées aux migrations humaines, aux réfugiés climatiques et aux conflits armés, ce qui accroît la pauvreté et l'instabilité politique. En effet, sécheresses et diminution de la productivité des terres sont des facteurs prédominants responsables des déplacements de populations des zones sèches vers d'autres régions (MEA, 2005).

I-1-4- Indicateurs de la désertification

I-1-4-1- Définition d'un indicateur

Le terme "indicateur" provient du verbe latin "indicare" qui signifie révéler, faire savoir, estimer ou mettre un prix (Hammond, et al., 1995). Ainsi un **indicateur** est un paramètre, ou une valeur calculée à partir d'un ensemble de paramètres, qui fournit des informations sur un phénomène ou sur son état. L'indicateur a une signification dépassant celle directement liée à la valeur paramétrique. Un indicateur est conçu pour un certain objectif, et au profit d'un certain groupe d'utilisateurs. Il reflète une certaine situation et aide à la décision par rapport à cette situation.

Les indicateurs ont deux principales fonctions :

- réduire le nombre de mesures et de paramètres normalement nécessaires pour rendre compte d'une situation avec exactitude ;
- faciliter les échanges systématiques et périodiques d'informations à destination des utilisateurs.

Un indicateur est la mesure d'un objectif à atteindre, d'une ressource mobilisée, d'un effet obtenu, d'un élément de qualité ou d'une variable du contexte. L'indicateur produit une information synthétique quantifiée permettant d'apprécier les divers aspects d'une opération, d'un projet, d'un programme ou d'une stratégie de développement. Il permet d'obtenir des comparaisons synchroniques ou diachroniques.

Un bon indicateur doit pour répondre aux besoins de l'utilisateur présenter un certain nombre de caractéristiques :

- Il doit être fiable (non ambigu) autrement-dit un « bon » indicateur doit décrire sans ambiguïté une réalité de manière permanente et continue car il mesure des évolutions comme, par exemple, l'amélioration (ou non) des conditions de vie des populations. Il doit permettre d'évaluer à la fois un état à un moment donné et sa variation dans le temps.
- Il doit être utile : en effet, un « bon » indicateur doit être simple, compréhensible et être exprimé en des termes auxquels l'utilisateur est habitué et qu'il accepte comme reflétant fidèlement le problème. Les utilisateurs ne sont pas forcément des scientifiques. Ils peuvent être de plusieurs types: décideurs, organisations non gouvernementales (ONG),

organisations professionnelles agricoles, etc. Un indicateur est d'autant plus utile que les résultats qu'il offre sont généralisables et permettent d'élaborer des prévisions.

- Il doit être pertinent : c'est-à-dire qu'un « bon » indicateur doit être approprié par rapport à la question initiale et apporter des éléments de réponse à l'objectif ou au questionnement initial clairement défini.
- Il doit être spécifique : Un « bon » indicateur sert à caractériser, mesurer, et/ou suivre un état ou un processus dans un contexte déterminé et pour un objectif précis.
- Il doit être sensible : c'est-à-dire que la réponse du milieu à une perturbation doit être observable. Il est donc essentiel qu'un indicateur soit suffisamment sensible pour mettre en évidence des phénomènes de dégradation tout en restant observable sur le long terme. Il doit donc à la fois être suffisamment sensible pour mettre en évidence un changement, à une échelle de temps cohérente avec les possibilités pratiques de mesures, mais pas trop sensible, ou fugace, auquel cas on ne pourrait plus le suivre (s'il disparaît et ne réapparaît qu'épisodiquement). La sensibilité au pas de temps d'une année paraît par exemple souhaitable.
- Un « bon » indicateur doit comporter une valeur seuil ou un repère (situation « standard ») qui permet d'élaborer des tendances. Les données qui le composent doivent être régulièrement mises à jour. Elles doivent être accessibles à un rapport « coût/bénéfices » raisonnable.
- Dans le cadre du suivi de la désertification, les « bons » indicateurs devraient être utilisables dans toutes les régions désertifiées ou présentant un risque de désertification.

Un « bon » indicateur doit donc cumuler ces différentes caractéristiques.

I-1-4-2- Types d'indicateur

Selon le Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification du Haut-Commissariat (HCEFLCD, 2013), les indicateurs peuvent être regroupés en indicateurs d'état, en indicateurs de pression et en indicateurs de réponse.

La démarche qui a permis de parvenir à une classification des indicateurs de suivi de la désertification s'articule autour des trois principales étapes suivantes :

- Étape d'inventaire : Il s'agit de procéder à une analyse de la documentation disponible, en vue d'effectuer un inventaire aussi exhaustif que possible des indicateurs utilisés par différentes sources. Sur cette base, le tableau ci-dessous regroupant les indicateurs de la désertification les plus utilisés, a été construit.
- Étape de hiérarchisation des indicateurs : En vue de faciliter la sélection des indicateurs qui renseignent sur les facteurs de désertification et sur les paramètres qui traduisent leurs effets et impacts. Les indicateurs ont été classés par : facteurs, paramètres et données. Par ailleurs, pour faciliter ce processus de classification, des informations additionnelles ont été apportées sur les sources potentielles des renseignements et les outils pour leur mesure.
- Étape du choix des indicateurs à retenir : En termes de facteurs, les indicateurs de la désertification doivent pouvoir mettre en exergue les causes de la désertification (à la fois naturelles et anthropiques) et les effets/impacts de la désertification sur les milieux biologiques (végétation et faune), physiques (sols et eau) et socio-économiques (changements de pratiques, pauvreté...). Ces grands types d'indicateurs biologiques, physiques et socio-économiques doivent permettre de rendre compte de l'état du milieu, mais également du degré du processus de dégradation par l'établissement de seuils.

Ainsi, la liste des indicateurs à retenir pour le suivi de la désertification est la suivante :

Tableau 1 : Liste des indicateurs potentiels sélectionnés comme set optimum à envisager dans les programmes de suivi de la désertification

Approche	Facteurs	Catégories	Paramètres	Indicateurs désertification	Données	Source/méthode/ outils mesure
		Climat	Précipitations	Indice d'aridité	Moyennes mensuelles des précipitations	Station météo / World clim
			Températures		Températures moyennes annuelles	
		Eau	Eaux souterraines	Évolution du niveau piézométrique des puits et forages	Profondeur de la nappe et/ou des puits et forages	Statistiques Agence des Bassins et enquêtes

Approche	Facteurs	Catégories	Paramètres	Indicateurs désertification	Données	Source/méthode/ outils mesure
INDICATEURS D'ÉTATS	Physique			Évolution du nombre de puits et forages	Nombres de puits et forages par unité d'espace	Statistiques et enquête
			Eaux de surface	Évolution de la superficie des corps d'eau de surface	Superficie des corps d'eau de surface	Imagerie satellitaire
		Sols	Salinité	Évolution des efflorescences salines	Superficie des efflorescences salines	Imagerie satellitaire, Analyse de sol
			Érosion	Évolution des surfaces affectées par les dépôts sableux	Superficies occupées par les dépôts sableux	Imagerie satellitaire
				Évolution des surfaces affectées par l'érosion hydrique	Superficies affectées par l'érosion hydrique	Imagerie satellitaire Vérité terrain
	Biologique	Végétation	Occupation des sols	Évolution de l'occupation des sols au pic de production	Superficie des différentes classes d'occupation des sols	Imagerie satellitaire Vérité terrain
			Couvert végétal	Taux de défrichement	Superficies défrichées	Imagerie satellitaire Statistiques MAPM Enquêtes
				Évolution de la surface du couvert végétal pérenne	Superficie occupée par la végétation pérenne	Indices de végétation (NDVI, SAVI, EVI)
			Production	Évolution de la phytomasse totale aérienne (kg MS/ha)	Phytomasse totale aérienne (kg MS/ha)	Mesures de terrain et imagerie satellitaire Analyse de régression

Approche	Facteurs	Catégories	Paramètres	Indicateurs désertification	Données	Source/méthode/ outils mesure
INDICATEURS DE PRESSION		Socio-économiques	Élevage	Évolution du coefficient de surpâturage	Charges animales, réelle et d'équilibre	- Statistiques et enquêtes - Carte des faciès pastoraux et leur phytomasse
				Proportion du bilan fourrager couverte par les aliments de supplémentation	Part (%) de la supplémentation dans le bilan fourrager	Enquête socioéconomique
				Taux d'accroissement de la part du revenu affecté à l'alimentation du cheptel	Part (%) du revenu affecté à l'alimentation du cheptel	Enquête socioéconomique
				Proportion du cheptel exogène transhumant par camion par an	% du cheptel exogène transhumant par camion par an	Enquête socioéconomique Statistiques MI
				Taux de sédentarisation des éleveurs	Nombres de familles d'éleveurs sédentarisés	Enquête socioéconomique ; Statistiques MI
			Agriculture	Taux d'utilisation des intrants de synthèse	% agriculteurs utilisant des intrants de synthèse	Statistiques et enquêtes ménages
			Tourisme de masse	Taux de fréquentation par le tourisme de masse	Statistiques et enquêtes	Nombre de nuitées

Approche	Facteurs	Catégories	Paramètres	Indicateurs désertification	Données	Source/méthode/ outils mesure
		Social	Démographie	Taux d'extension du bâti dans les zones à vocation agricole et écosystèmes pastoraux et forestiers	Image satellitaire et enquête	
			Alimentation	Évolution de la quantité de bois-énergie prélevée par ménage, par an	Enquête socioéconomique	
INDICATEURS DE RETOUR		Il s'agit des indicateurs qui servent à suivre l'efficacité des différentes mesures mises en place pour lutter contre le phénomène				

Source: HCEFLCD, 2013

I-1-5- Moyens de lutte contre la désertification

La lutte contre la désertification passe nécessairement par l'analyse des facteurs qui peuvent conduire aux processus de désertification. Il faut pouvoir en mesurer l'ampleur, la dynamique et la vitesse d'où l'importance des systèmes d'observation, de suivi et d'évaluation qui constituent la première étape pour la compréhension des relations entre l'homme et les ressources disponibles (El Wahidi, et al., 2011). La préservation de l'environnement et la lutte contre la désertification passent aussi par une approche pluridisciplinaire combinant des savoirs et des compétences relatives à la biophysique, à la socio-économie, à la modélisation environnementale (géographie, écologie du paysage et aménagement du territoire), à l'informatique, aux statistiques et aux mathématique (Loireau, et al., 2007).

La lutte contre la dégradation des terres intègre une stratégie globale de résolution des problèmes environnementaux et de développement durable. Cette stratégie est répartie en quatre (4) grandes catégories à savoir :

- Les méthodes correctives qui visent à arrêter un phénomène, et à réparer les dégradations subies. Elles regroupent : les techniques de fixation des dunes, de conservation des eaux, de protection des nappes phréatiques, les techniques antiérosives et les reboisements.

- Les méthodes pour une utilisation raisonnée permettant de mieux exploiter les ressources, d'en accroître la productivité et de favoriser leur régénération. Il s'agit d'opter pour de nouvelles techniques moins consommatrice notamment en eau pour l'agriculture et plus respectueux de l'environnement notamment le respect des mises en défens et de la charge maximale en ce qui concerne le pâturage et l'utilisation de la biomasse et des sols.
- Les modèles de gestion intégrée des ressources. Ils impliquent la résolution des conflits, la création de lieux de négociation et de décision, l'établissement de règles de gestion participative et de sécurisation de l'accès aux ressources.
- La dernière catégorie rassemble les mécanismes institutionnels et politiques propices au développement économique et à la préservation des ressources naturelles. Parmi ceux-ci s'inscrit : l'établissement de loi et de règlements, la création d'emplois pour proposer d'autres alternatives et diversifier les revenus, le développement d'infrastructures et le renforcement des capacités.

Cependant, la viabilité des actions entreprises pour lutter contre la dégradation des terres est souvent conditionnée par l'accroissement et la diversification des sources de revenus permettant une élévation du niveau de vie des populations. Ainsi, la désertification peut être évitée en s'orientant vers des moyens de subsistance alternatifs qui ne dépendent pas de l'exploitation traditionnelle de la terre, qui sont moins exigeants, et qui fournissent des revenus durables. Il s'agit par exemple de l'aquaculture en région sèche pour la production de poisson, de crustacés et de composés industriels générés par des micro-algues, de l'agriculture hors sol ou encore du tourisme.

La lutte contre la désertification se base de plus en plus sur les nouvelles technologies et outils d'évaluation et de suivi qu'offrent la Télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

 La télédétection : La télédétection apporte une aide incommensurable dans la lutte contre la désertification. Associées à des études et mesures de terrain, de multiples informations (de l'échelle locale à celle globale) sont fournies par les satellites permettant de comprendre les mécanismes de la désertification, de la suivre, de définir des plans de lutte faisant le bilan des actions entreprises pour la combattre. La télédétection peut être utilisée pour :

- La prévision météorologique et le suivi d'événements climatiques : suivi des précipitations et surveillance des températures à travers les images satellitaires qui fournissent les données alimentant les modèles de prévision à court, moyen et long terme.
- Surveiller et comprendre les phénomènes éoliens : les images satellitaires permettent d'observer les formations sableuses des régions sèches et de les cartographier. Ces images permettent d'identifier, de repérer et de mesurer l'ampleur des vents ou des tempêtes de sables qui sont des manifestations de l'érosion éolienne typique de ces régions ; ce qui est très difficile à faire depuis le sol (CSFD, 2017).
- Suivre les variations des températures de surface des zones de cultures irriguées : cartographier l'évapotranspiration et calculer ainsi la consommation d'eau précise à un instant donné dans une zone déterminée, à l'aide de la télédétection en lien avec des mesures de micro-météorologie de terrain. Ce sont là des informations cruciales pour une bonne gestion des ressources en eau.
- Suivre l'humidité des sols à l'échelle continentale : prévenir les sécheresses à l'aide des données globales recueillies par satellites (ex : satellite SMOS depuis 2009).
- Repérer des ressources en eau souterraines (les systèmes aquifères) à partir des structures géologiques. Grâce à certaines images radar (pour lequel le sable sec est « transparent »), la détection des anciens lits de rivières enfouis sous les sables permet de mieux connaître l'histoire de ces paysages et de localiser des nappes d'eau superficielle et, ainsi, de guider l'implantation des ouvrages de captage (CSFD, 2017).
- Surveiller le développement et l'extension du couvert végétal : La mesure et le suivi d'indices de végétation tels que NDVI (indice de végétation par différence normalisée) permettent de cartographier et d'apprécier l'état de la végétation de façon régulière dans le temps.

 Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) : la vocation principale d'un SIG reste celle d'outil d'aide à la décision (Najjar, 2015). Ainsi, les SIG facilitent les analyses qui nécessitent à la fois des données statistiques et cartographiques et permettent le traitement de volumes importants de données. Les SIG servent aussi à la mise à jour rapide de cartes élaborées à partir

de sources multiples dont la télédétection. Ils améliorent la précision des analyses et diminuent à long terme, les délais de réalisation des études (Nonguierma, 2005). Aussi, les SIG sont des outils extraordinaires pour mobiliser en un temps record et de façon efficace, l'ensemble des informations relatives à un territoire. Ils peuvent être des instruments précieux au sein d'une politique de suivi et de gestion d'un espace. La possibilité de la mise à jour de la base de données donne un aspect dynamique aux produits, plus particulièrement les cartes ce qui permet aux techniciens de suivre pas à pas l'exécution des programmes sur le terrain et de mesurer l'évolution de certains paramètres. Sur un support visuel, les erreurs constatées sont mentionnées et des corrections sont apportées directement. Donc, il y a ici intégration de la variable temps aux variables spatiales ou qualitatives (Waziri, 1993).

I-2-Ecosystèmes à arganiers ou Arganeraie

I-2-1- Systématique et répartition de l'arganier

L'arganier appartient à l'ordre des Ebénales, à la famille des Sapotacées et est le seul représentant du genre *Argania*. Il était connu sous le nom de *Sideroxylon spinosum*. Ce nom a été donné par Linné en 1737. Puis l'arganier a été nommé *Argania sideroxylon* par Rømer et Schultes (Nouaim & Chaussod, 2007 ; Kechairi, 2009) avant que l'on adopte en 1911 le nom donné par Linné, *Argania Spinosa* (L.) Skeels.

L'arganier est une espèce endémique du sud-ouest du Maroc et de la région de Tindouf en Algérie (Radi, 2003). Au Maroc, il couvre actuellement une superficie variant entre 800 000 et 1 000 000 hectares (ha) selon les auteurs. Son aire naturelle s'étend depuis la région de Safi au nord jusqu'à la frange saharienne aux environs de l'Oued Noun au sud et de la côte atlantique à l'ouest jusqu'au massif de Sirroua à l'est (Nouaim, 2005). Aussi, l'arganier a été introduit au début des années 30 au moment du lancement des travaux de reboisement des rives de l'Oued Cherrate, à 38 km au Sud-ouest de Rabat (El Mousadik & Petit, 1996), où il couvre environ 4 ha. De plus, les taux de réussite des plantations d'arganiers sont satisfaisants dans certaines provinces du centre du Maroc : El Jadida, Settat et Safi (Nouaim & Chaussod, 2011).

L'une des plus récentes cartographies de l'aire de représentation naturelle de l'arganeraie est présentée ci-après.

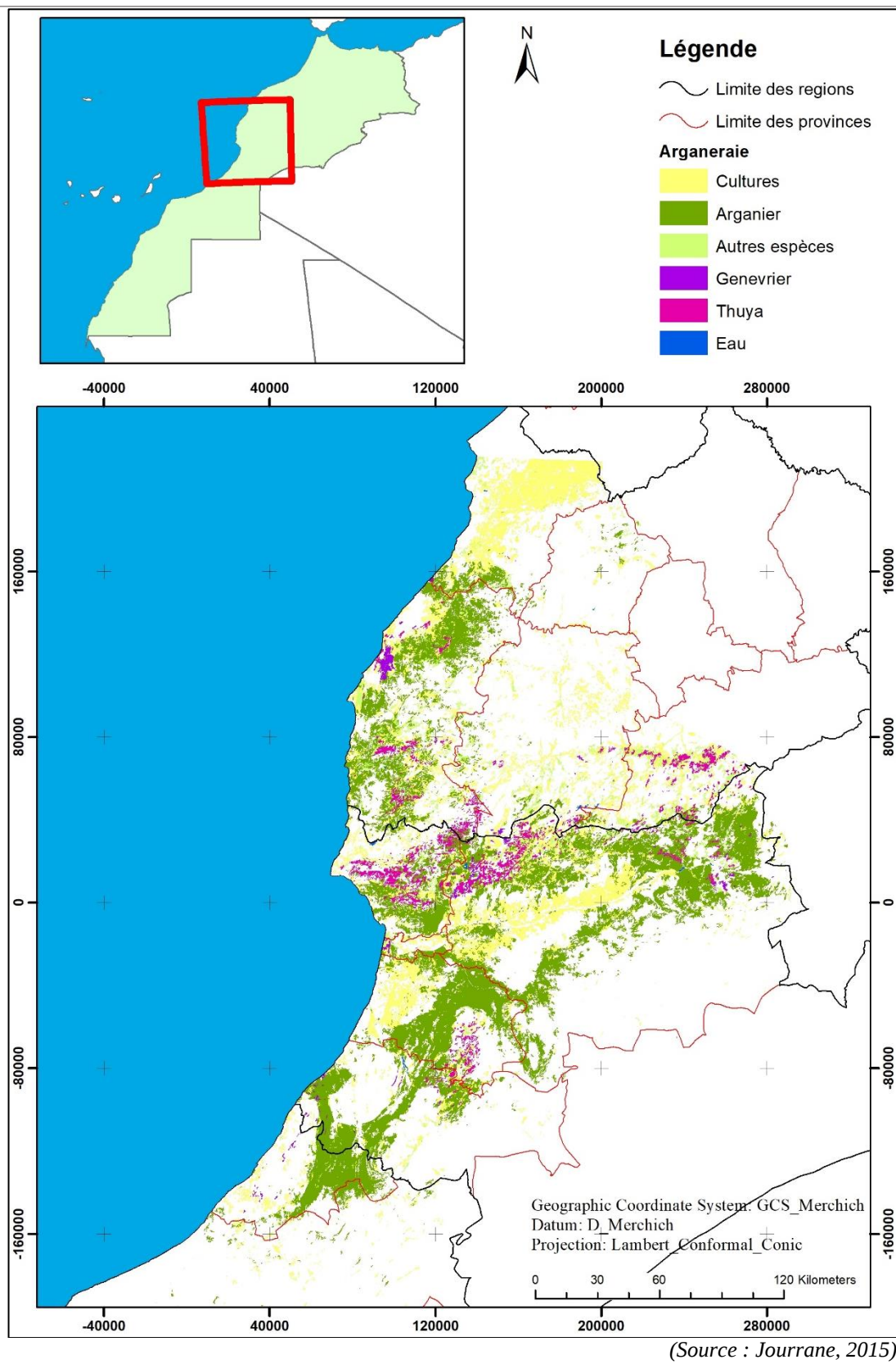


Figure 3 : Aire de répartition de l'arganeraie

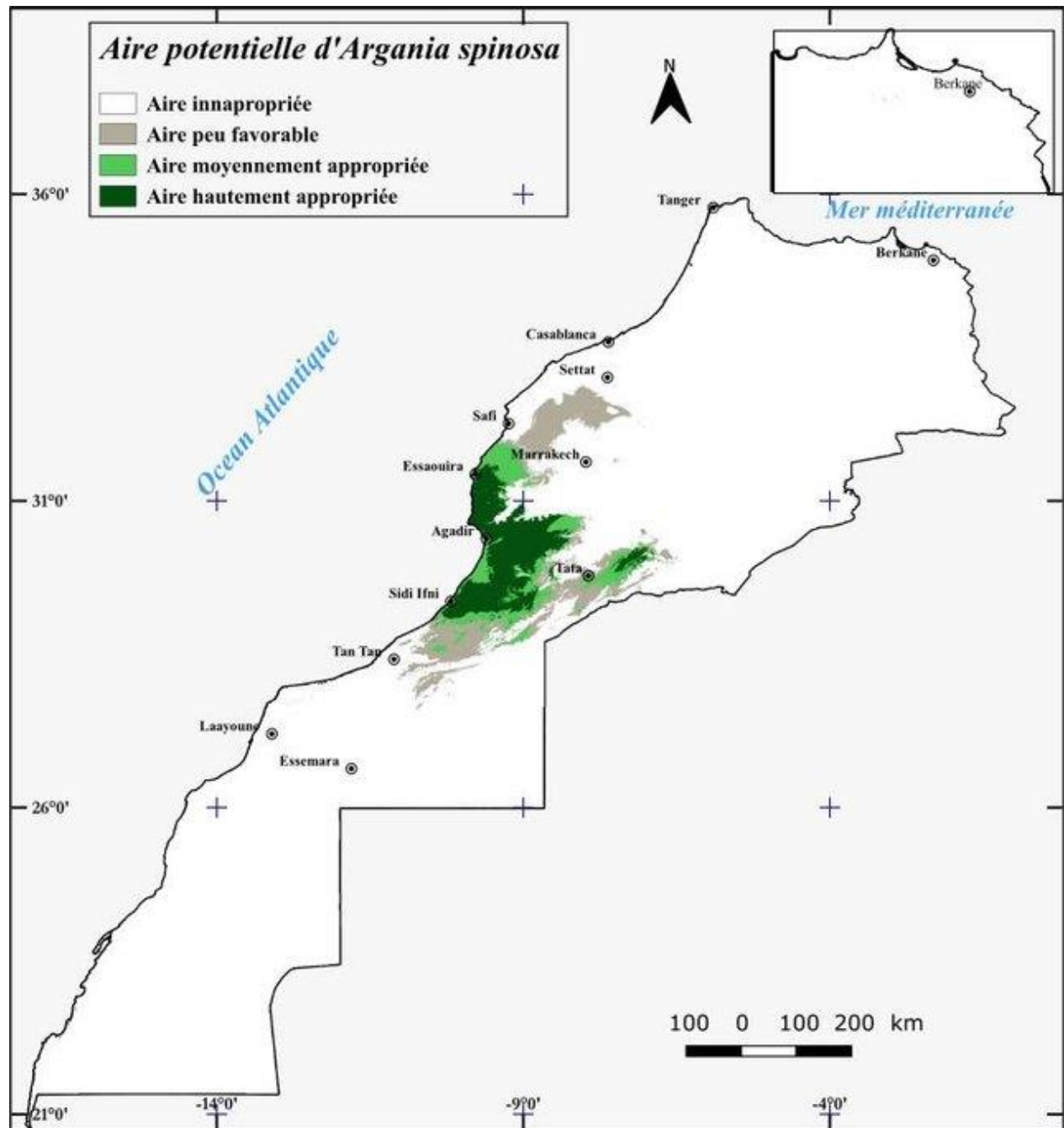
Deux grandes formations d'arganier sont à distinguer :

- L'arganeraie de plaine qui se retrouve notamment dans la vallée du Souss. Elle se trouve soit en mélange avec des terrains de cultures, soit le long du littoral où l'arganier forme des groupements végétaux à Euphorbes cactoïdes (*Euphorbia echinus*, *E. regis-jubae*, *E. beaumeriana*), à *Senecio anteuphorbium* et à Chénopodiacées (Tarrier & Benzyane, 2003 ; 2007).
- L'arganeraie de montagne qui organise quant à elle des formations plus variées, sous bioclimat semi-aride chaud et tempéré, le long des versant du Haut Atlas et des montagnes de l'Anti-Atlas d'Aït-Baha à Tafraoute (Tarrier & Benzyane, 2003 ; 2007).

En raison de la forte pressions agro-sylvo-pastorales et de l'intensification agricole, l'arganeraie de plaine est fortement dégradée, présentant une strate arborescente le plus souvent réduite à des individus torturés, voire au ras des souches (Van Den Eynde, 2006). Le sous-bois est très réduit et la régénération naturelle est quasi inexistante. Cette dégradation intensive de l'arganeraie de plaine entraîne de gros problèmes d'érosion.

L'arganeraie de montagne organise quant à elle des formations plus variées et présente un sous-bois plus pourvu qui peut augmenter en fonction notamment de l'éloignement anthropique. En effet, la topographie difficile met parfois certains sites à l'abri d'une pression excessive et permet ainsi le développement d'un cortège floristique remarquable. Néanmoins, la biodiversité de la région est aujourd'hui fortement menacée par l'intensification de la pression humaine et pastoral (Msanda, et al., 2005). En effet, la pression pastoral menace l'arganeraie de montagne en causant le tassement des sols et leur perte par érosion hydrique (Tarrier & Benzyane, 2003).

D'une manière générale, l'Arganier se développe mieux (à 50-70%) en plaine (pentes de 9 à 15%) ; sur des sols profonds de 30 à 70 cm développés sur calcaire dolomitique, des expositions fraîches (nord et nord-ouest), une altitude comprise entre 500 et 700 m et un couvert végétal dégagé (Demoulin, 2008). L'arganier disparaît à des altitudes supérieures à 1 500 m (Tarrier & Benzyane, 2003). Ainsi, l'aire potentielle de l'arganeraie serait plus étendue au Sud-ouest du Maroc qu'il n'y paraît. Cette aire potentielle est présentée dans la figure ci-après :



(Source : Moukrim, 2018)

Figure 4 : Aire potentielle de répartition de l'arganeraie

I-2-2- Aspect général de l'arganier

L'arbre du Souss présente des formes très variées selon sa localisation et son stade de développement (Radi, 2003).

Arbre épineux dont la taille à l'âge adulte varie entre 8 et 10 mètre de haut (Jaccard, 1926 ; Emberger, 1938 ; Wagret, 1962). L'Arganier peut vivre entre 100 et 200 ans (Wagret, 1962). Sa cime est large, étalée, dense et ronde. Son tronc est court, tourmenté et parfois multiple. Son bois est dur, jaunâtre, lourd, sans aubier et donne de ce fait un excellent charbon. Sa densité varie de 0,9 à 1 g/cm³ (Boudy, 1950). Ses racines sont profondes lui permettant ainsi de s'approvisionner en eaux en profondeur dans les zones semi-aride et aride.

Les feuilles d'Arganier sont alternes, lancéolées ou spatulées, plus ou moins pétiolées avec une nervure médiane très nette et des nervures latérales très fines et ramifiées (Emberger, 1938 ; Boudy, 1950). Ce sont des feuilles sub-persistantes, vert-sombre à la face supérieure et claires en dessous.

Les fleurs, blanches à jaune verdâtre hermaphrodites, gamopétales à tube très court et réunies en glomérules, sont assez discrètes.

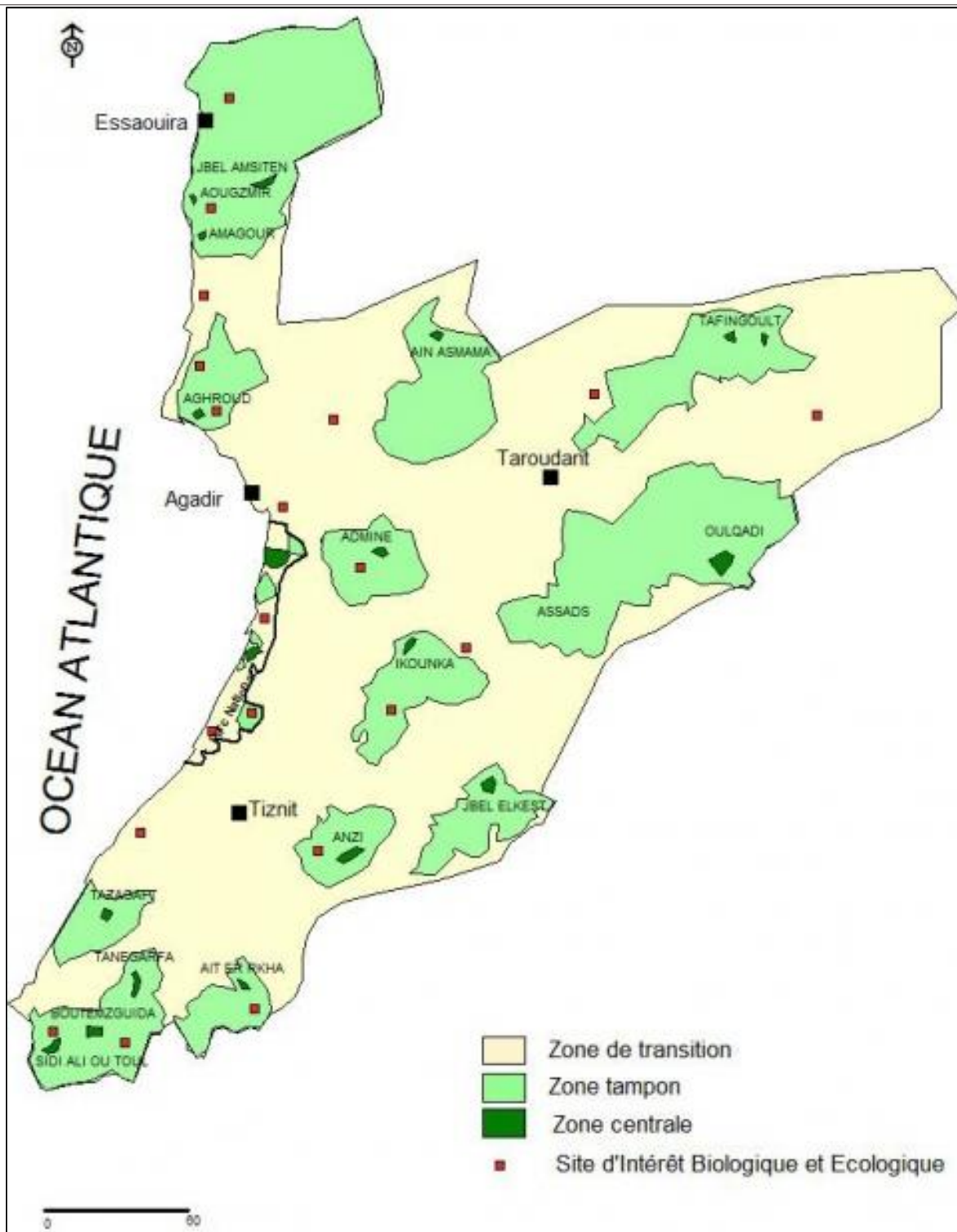
Le fruit, appelé "noix d'argan" (ou affiache ou argane) est une baie verte de taille et de forme variable renfermant une graine composée (M'hirit, et al., 1998). L'argane est qualifié aussi de fausse drupe ovale. Il est fusiforme de 30 mm de long environ, jaune-brun à maturité. D'une manière générale, les fruits de l'arganier ressemblent à ceux d'une olive, mais sont plus gros et plus ronds et contiennent une noix très dure abritant deux ou trois « amandons » à partir desquels sera extraite l'huile d'Argane.

I-2-3- Evolution du couvert végétal et impact anthropique dans l'arganeraie

L'Arganier a été coupé sur des milliers d'hectares au début du XX^e siècle, pour la production de combustible (De Ponteves, et al., 1990). Cependant, en 1925, l'arganeraie est placée dans le domaine privé de l'Etat et seules les populations locales ont le droit de jouissance. Puis, l'arganeraie

a été déclarée en 1998 par l'UNESCO : première Réserve de Biosphère du Maroc avec 3 unités spatiales distinctes, à savoir : les zones centrales, tampons et de transition.

- La zone A ou zones centrales s'étend sur 17.000 ha. Elle regroupe divers sites d'intérêt biologique et écologique ou paysager strictement protégées. Seules les activités de recherche, d'observation et de surveillance y sont autorisées.
- La zone B est qualifiée de zones tampons. Elle s'étend sur près de 560.000 ha et constitue un « périmètre de sécurité » pour réduire au maximum les influences anthropiques susceptibles de compromettre la fonction écologique des zones centrales.
- Le reste de la réserve est classé zone C ou zones de transition. Toutes les activités sont tolérées dans cette zone à condition de conserver le patrimoine biologique pour les générations futures.



Source : Réseau d'Associations de la Réserve de la Biosphère de l'Arganeraie (RARBA), 2006

Figure 5 : Répartition spatiale des zones de la RBA

Lors de son institution la Réserve de Biosphère de l'Arganeraie (RBA) s'étendait sur une superficie de 2,5 millions d'hectares environ et recouvrait les provinces et préfectures d'Agadir Ida Outanane, Inzeguane Aït Melloul, Chtouka Aït Baha, Taroudant, Tiznit et Essaouira. La superficie boisée de la RBA était alors estimée à environ 1 175 000 ha, avec l'arganier qui occupait 821 800 ha (70%) ; les formations de Thuya 262.000 ha (22%) et de Génévrier pour le reste (M'hirit, et al., 1998). Actuellement, d'après le Haut-commissariat aux Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD, 2013), la zone de l'arganeraie s'étend sur une superficie potentielle de 3 437 004 ha et recouvre les provinces de : Tiznit, Chtouka-Ait Baha, Inezegane-Ait Melloul, Agadir-Ida ou Tanana, Essaouira, Taroudant Sud, Chichaoua et Marrakech (Figure 13).

Au Maroc, on s'accorde généralement sur le fait que l'arganeraie recouvre une superficie d'environ 800 000 ha (Msanda, et al., 2005). Cette aire s'étend de la région de Safi au nord jusqu'à la frange saharienne aux environs de l'Oued Noun dans la province de Guelmin au sud et de la côte atlantique à l'ouest jusqu'au massif de Sirroua à Taroudant à l'est (Nouaim, 2005). D'après l'Inventaire Forestier Nationale de 1994, l'arganeraie recouvrait une superficie totale de 868 034 ha (Tableau 2). Ainsi, globalement, la superficie de l'arganeraie varie d'une étude à l'autre mais reste toujours comprise entre 800 000 et 1 000 000 ha.

Tableau 2 : Répartition des superficies des peuplements d'arganier par province

Provinces	Cercles	Superficie (ha)
Safi	Abda	48
	Safi	303
Essaouira	Essaouira	30 223
	Tamanar	101 448
Agadir	Biougra	158 513
	Inezegane	62 246
Taroudant	Ighrem	64 670
	Oulad Teima	77 116
	Taroudant	217 585
	Taliouine	8 620
Tiznit	Ifni	30 387
	Tafraoute	21 801
	Anezi	47 691
	Akhsass	4 784
	Tiznit	36 715
Marrakech	Imi-N- Tanoute	5 884
Total		868 034

(Source : IFN, 1994)

Depuis plusieurs décennies, l'arganeraie marocain est soumis à une importante pression liée à la croissance démographique, à l'extension des cultures, au prélèvement abusif du bois et au surpâturage (Achour, et al., 2011). Couplée au bioclimat semi-aride à aride du sud-ouest marocain, cette pression anthropique est souvent la cause de la désertification qui conduit à une régression dramatique et souvent irréversible de l'arganeraie (Msanda, et al., 2005). La régénération naturelle de l'arganier est inexistante dans la quasi-totalité de l'arganeraie (Bellefontaine, 2010). Cet état de fait est causé par un pâturage excessif tout au long de l'année (M'hirit, et al., 1998 ; Nouaim, 2005 ; Yann et Lambin, 2011). En effet, les capacités productives de l'arganeraie ont été largement dépassées. On évalue à 450 millions d'unités fourragères les besoins réels du cheptel alors que la production pastorale de l'arganeraie n'est que de 166 millions d'unités fourragères (Naggar & Mhirit, 2006). Il faudrait donc trois RBA pour subvenir aux besoins du cheptel. De plus, l'aridité du climat exacerbe la pression pastorale sur les ressources existantes qui s'amenuisent (M'hirit, et al., 1998 ; Nouaim, 2005 ; Stour & Agoumi, 2008). Malheureusement, la situation n'ira pas en s'améliorant selon les projections du GIEC (IPCC, 2018). Ainsi, l'aridité du climat risque d'influencer de plus en plus la perte de densité au cours du siècle à venir.

De plus, il s'est avéré que la production fruitière de l'arganier varie de 20 à 100 kg par arbre en fonction de l'âge et de la densité avec une moyenne de 40 kg par arbre et par an (Faouzi & Martin, 2014). La régénération étant quasi inexistante (Bellefontaine, 2010), la majorité du peuplement d'arganier serait constituée de vieux arbres. Ainsi, la production fruitière est passée de 150 kg d'amandes à 30 kg par arbre (Bouzemouri, 2007). Par ailleurs, d'après cette étude (Bouzemouri, 2007), l'arganeraie perd environ 600 ha de sa superficie par an. Une étude plus récente (Jourrane, 2015) a aussi relevé la diminution de la superficie de l'arganeraie en indiquant que l'arganeraie a perdu 5 % de sa superficie entre 1987 et 2014, soit 1 911 ha de superficie perdue par an. La situation semble donc s'empirer. 87 % de cette superficie perdue aurait été transformée en terrains non boisés ou en parcours et 11 % aurait été convertie en terres agricoles. L'aridification de climat, le surpâturage et l'extension des terrains de culture qui ne cessent d'augmenter sont les causes de cette diminution et du changement de vocation des terres dans la zone de l'arganeraie (Jourrane, 2015 ; Jourrane, et al., 2015).

Cependant, l'ampleur de la dégradation n'est pas identique dans toute l'arganeraie. Sous de fortes pressions agro-pastorales et à cause de l'intensification de l'agriculture, l'arganeraie de plaine est fortement dégradée (Faouzi, et al., 2015 ; Van Den Eynde, 2006). A Taroudant par exemple, la superficie de l'arganeraie a diminué de 44,5% entre 1970 et 2007 (Yann & Lambin, 2011). Cette régression s'est faite à raison de 9 % et 5 % respectivement au profit des terres agricoles et des zones urbaines. Le reste de la proportion d'arganeraie perdue (86%) aurait été converti en cultures sous Arganiers. De plus, on note une diminution de la densité des arbres dans la plaine du Souss (Zugmeyer, 2006) pour permettre la mise en culture sous arganiers. De l'autre côté, l'arganeraie de montagne présente un couvert arboré plus dense et un sous-bois plus pourvu qui peut augmenter en fonction notamment de l'éloignement anthropique et de la raideur du relief (Sinsin, 2016). La pression pastorale est la principale cause de la dégradation de l'arganeraie de montagne (Tarrier & Benzyane, 2003). Cependant, la fructification est abondante en plaine (notamment dans les parcelles-privées) alors qu'elle est réduite dans la forêt domaniale (Demoulin, 2008).

Notons néanmoins que grâce aux efforts conjugués de l'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'arganier (ANDZOA), du Haut-commissariat aux Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) et de la Fédération Nationale des Ayant-Droits Usagers de l'Arganeraie (FNADUA) au programme de réhabilitation de l'arganeraie, les terres réhabilitées sont passées de 13 027 ha en 2012 à un cumul de 101 487 ha en 2017. Aussi, entre 2000 et 2007, 1 294 « nouveaux » ha d'arganiers ont été reboisés dans le cadre du « Projet Arganier » et le « Plan Maroc Vert » prévoit la réhabilitation de 200 000 ha dans l'arganeraie pour une production en huile d'argane de 10 000 tonnes/an à l'horizon 2020, contre 4 000 tonnes actuellement (Jadaoui, 2012).

Malheureusement, 32% de la superficie actuelle des terres adaptées aux développements de l'arganier, ne le seront plus d'ici 2050 (Moukrim, et al., 2019). Heureusement, des études ont montrées que la reforestation d'arganiers est possible au nord du Maroc (Afilal, et al., 2015). Cela pourrait être une piste vers la préservation de l'espèce et aussi contribuer au développement durable de ces régions au nord du Maroc.

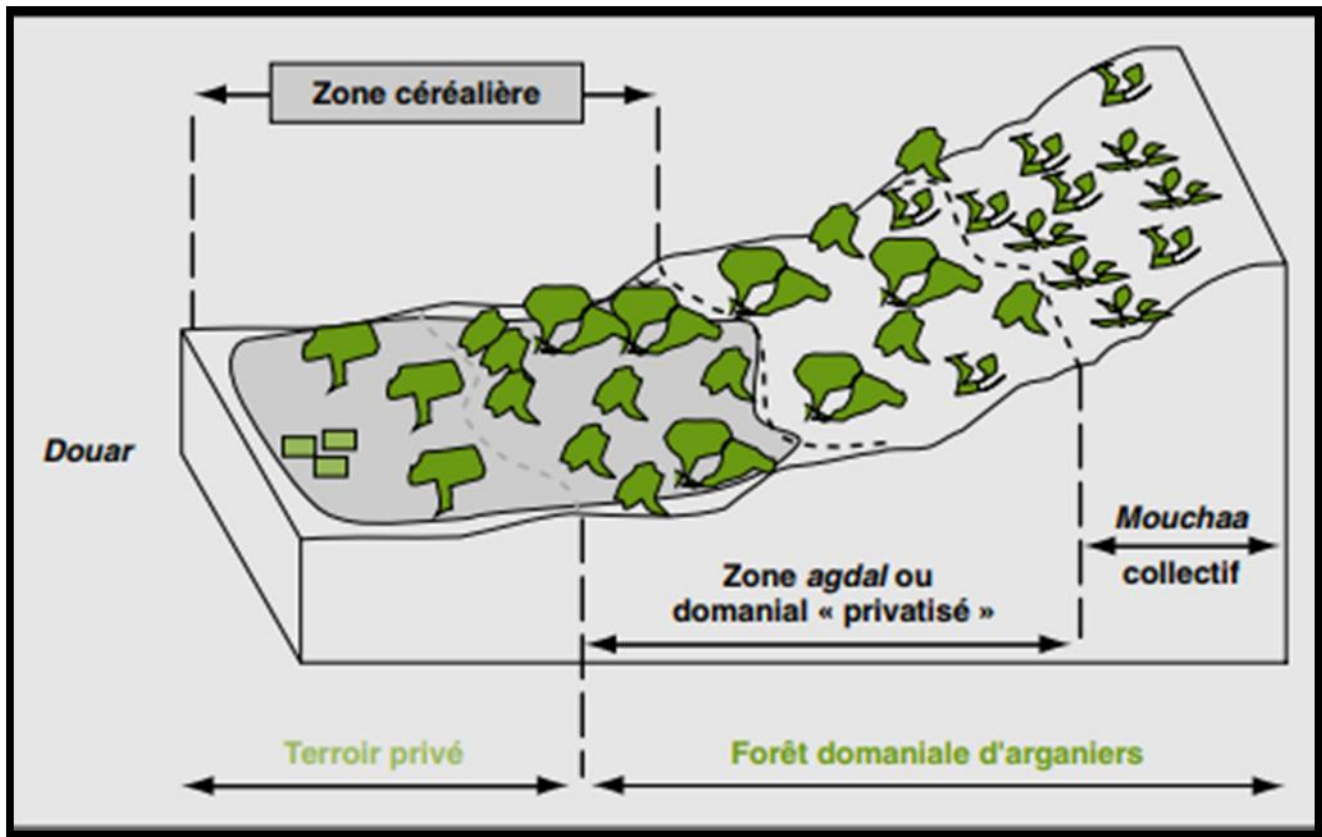
I-2-4- Mode de gestion et d'exploitation

D'une manière générale, on distingue selon le mode de gestion, deux types d'espaces au niveau de l'arganeraie : les espaces privés et les forêts d'arganiers ayant un statut domanial (Bourbouze & El Aïch, 2005).

- Les espaces privés sont généralement cultivés et bien délimités. Ils se situent à proximité du douar, à l'aval ou sur des replats, sur un sol relativement plus riche et à relief plus doux.
- Les forêts domaniales d'arganiers, quant à elles, relèvent de deux types distincts : l'agdal et le mouchaa.

Les agdals sont des espaces domaniaux à caractère forestière. Les animaux sont libres d'y paître. Les agdals servent aussi, mais à moindre mesure, de source de bois de feu. Le problème que pose souvent la gestion de cet espace domanial est que les paysans hésitent à investir en énergie et en moyens techniques pour préserver un espace qui ne leur appartient pas statutairement.

Les mouchaa, quant à eux, englobent toutes les forêts à arganier en mélange avec le thuya, les arganeraies pures désignées collectives par la population. Cet espace, se trouvant loin des agglomérations rurales ou sur terrains accidentés, est le plus dégradés en raison d'une législation assez souple (El Wahidi, et al., 2011).



(Source : Bourbouze & El Aïch, 2005)

Figure 6 : Modèle de l'organisation de l'espace dans l'arganeraie

L'arganeraie peut être divisée en sept (7) types d'espace différent en fonction du mode d'exploitation (Bourbouze & El Aïch, 2005). Ainsi, on différencie :

- Les melk cultivés où la récolte est individuelle et où la mise en valeur se fait par la céréaliculture principalement. C'est une propriété individuelle.
- Les melk cultivés sous arganier. La mise en valeur se fait via la céréaliculture et l'arganier. Ils sont utilisés pour le pâturage individuel sous les chaumes ou jachères. Le pâturage peut devenir collectif une fois la moisson terminée.
- Les agdals comme énoncé plus haut sont domaniaux. Les agdals cultivés sont valorisés par les céréales et l'arganier. La récolte y est individuelle.
- Les agdals non cultivés sont valorisés par l'arganier et le pâturage y est collectif.

- Les mouchaa aussi comme vu précédemment sont domaniaux et valorisé par l'arganier mais sont sujets à une collecte libre des noix et un pâturage excessif.
- La forêt domaniale de l'arganeraie, interdites au pâturage et où les coupes illégales sont fréquentes.
- Et Enfin les points d'eau qui sont collectifs et caractérisés par des concentrations importantes d'animaux. Ils sont ouverts uniquement aux ayants droit et sont souvent sources de conflits.

I-2-5- Augmentation de l'intérêt pour l'huile d'argan et implications

I-2-5-1- Situation actuelle

L'huile d'argan possède de nombreuses vertus culinaires, cosmétiques et médicinales (M'hirit, et al., 1998 ; Charrouf, 1998 ; Moukal, 2004) mise en lumière surtout dans les années 1990 (Faouzi & Martin, 2014). Cette reconnaissance a entraîné une augmentation de la demande et une ascension commerciale considérable dans la région. En effet, selon le ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, les exportations d'huile d'argan ont augmenté de 36 tonnes en 2002 à 343 tonnes en 2009-2010 puis à 1 387 tonnes en 2016 et l'exportation de cette huile vers l'Europe a généré près de 298 million de dirham en 2016 contre 935 000 dirhams en 2002. Ces chiffres ne sont que ceux déclarés à l'Établissement Autonome de Contrôle et de Coordination des Exportations (EACCE). La production annuelle totale de l'huile d'argan s'avère être bien plus élevée. Elle varierait entre 2 500 et 4 000 tonnes (Nouaim, 2005) et générerait en moyenne 18 millions d'euros par an (El Fasskaoui, 2009). Le prix des fruits et des amandes d'argan a, quant à lui, presque doublé entre 1998 et 2007 (Faouzi & Martin, 2014). En effet, ce prix est passé d'environ 0,7 dirhams par kg en 2000 (Guyon, 2008) à 2 dirhams par kg en 2010 sachant qu'il faut en moyenne 25 et 35 kg de fruits pour produire 1 litre d'huile (Chakib, 2013).

Face à cette flambée des prix, les fraude et les produits usurpés se sont mis à inonder le marché. C'est ainsi qu'en 2008, l'Association Marocaine des Indications Géographiques pour l'Huile d'Argan (AMIGHA) a été créée. Elle vise à valoriser et protéger le savoir-faire et les intérêts des producteurs à travers la mise en place de l'Indication Géographique Protégée (IGP). L'IGP a pour rôle d'identifier et d'attester de l'origine du produit. Cela permet également de réduire

l'exploitation anarchique de l'arganeraie en attribuant l'IGP a quelques exploitants respectueux des modes de gestion durable (Romagny & Boujrouf, 2010).

L'augmentation de la valeur de l'huile s'est traduite aussi par une multiplication rapide du nombre de coopératives de production d'huile d'argan. En effet, selon l'Office de Développement de la Coopération (ODECO), le nombre de coopératives est passé de 2 en 1998 (Jadaoui, 2012) à 156 en 2013 (Chakib, 2013).

I-2-5-2- Implications selon différents auteurs

Durant la seconde moitié du XX^e siècle, il a été prouvé scientifiquement que l'huile d'argan possède de nombreuses vertus culinaires, cosmétiques et médicinales (Faouzi & Martin, 2014). C'est également au cours de la même période que l'on a constaté que la régénération naturelle de l'arganier était inexistante dans la quasi-totalité de l'arganeraie (Bellefontaine, 2010). De nombreux auteurs sont donc d'avis que l'augmentation de la valeur des produits de l'argan (fruits, amandes, huile d'argan) sur le marché est l'une des causes de la dégradation de l'arganeraie (Simenel, et al., 2009 ; Lybbert, et al., 2011). En effet, Lybbert et al. (2010 et 2011) ont tenté de mettre en lumière ce lien de cause à effet en soulignant le fait que les techniques de récolte sont devenues plus agressives et que la collecte des fruits s'est intensifiée (Lybbert, et al., 2010). Néanmoins, ils reconnaissent que l'augmentation du prix de l'huile d'argan a permis d'améliorer les conditions de vie de la population locale qui a vu son revenu augmenté significativement (Lybbert, et al., 2010). C'est dans ce courant que s'insère Charrouf (2007) lorsqu'il affirme que l'arganier est un « levier du développement humain ». Cependant, Aziz et al (2011) indiquent que l'augmentation du prix de l'huile d'argan sur le marché a eu des incidences négatives sur le comportement des paysans et par la suite sur la biodiversité locale. Néanmoins, ils nuancent en soulignant l'amélioration des pratiques et du savoir-faire de la population locale qui s'est mis à protéger les jeunes pousses d'arganiers contre les troupeaux (Aziz, et al., 2011 ; Elkandoussi & Omari, 2011).

Pour Jadaoui (2012), l'augmentation du prix de l'huile d'argan n'est pas une cause directe de la dégradation de l'arganeraie mais plutôt une conséquence du fait que les acteurs intermédiaires de la « filière argane » s'accaparent une proportion importante des revenus. Ainsi, bien que le prix de

l'huile a augmenté, les retombées pour la population locale sont restées insuffisantes (Maria, 2010 ; Faouzi & Martin, 2014). Cela réduit l'engouement de la population locale dans les politiques de protection et de préservation de l'arganeraie qui les impliquent (Bencheikroun & Buttoud, 1989).

Certains auteurs comme Maria (2010) s'inquiètent du fait que le savoir-local n'est pas suffisamment pris en considération bien que des efforts ont été fait dans ce sens et pire encore, que la population locale soit dépossédée de son produit (l'arganier) et évincée du processus décisionnel. Elle rappelle que la patrimonialisation de l'arganier doit intégrer les connaissances et le savoir-faire locale pour la gestion durable des ressources forestières (Maria, 2010). L'approche participative, pour être effective, doit donc intégrer tous les acteurs (Pinton & Grenand, 2007). Pour compléter, Jadaoui (2012) affirme que le développement durable de l'arganier ne peut se faire qu'en valorisant les savoir-faire locaux et en labélisant son produit « phare (l'huile d'argane) », reconnue comme produit IGP. Malheureusement, les politiques derrière l'IGP sont bien trop souvent tournées vers des enjeux économiques qui privilégient les acteurs internationaux et le marché extérieur au détriment des intérêts de la population locale et du développement durable (Raimbeau, 2009).

I-2-6- Changement dans les habitudes de la population et dans les modes de gestion

L'arganeraie a été façonnée par des pratiques pastorales, agricoles et arboricoles ancestrales (Maria, 2010). Aujourd'hui encore, ces pratiques ancestrales subsistent suivant une structure socio-spatiale héritées d'un passé tribal telle que définie par certains auteurs (Gellner, 1969 ; Ben Salem, 1982). Cette organisation tribale conditionne les conformations actuelles de l'arganeraie. Ces conformations regroupent : les systèmes agroforestiers complexes [Arboriculture fruitière (surtout les Oliviers et les amandiers avec quelques pieds d'Arganiers)] ; les Arganiers à usage privatisé (appelés communément Melk) ; les Cultures sous forêt d'Arganiers (ou Agdals cultivés) ; les Arganiers non cultivés mise en défens et la forêt domaniale d'arganiers à usage collectif (Bourbouze et El Aïch, 2005 ; Moctar, 2009). On distingue au niveau de ces deux dernières conformations, les Agdals non cultivés et les Mouchaa. Les Mouchaa, contrairement aux Agdals,

ne sont jamais mis en défens. Ils englobent toutes les forêts à arganier en mélange avec le thuya et les arganeraies pures se trouvant loin des agglomérations rurales ou sur des terrains accidentés (Bourbouze et El Aïch, 2005). Outre une forme de conformité, l'Agdal fait également référence à un mode de gestion qui consiste à mettre en défens temporairement (et de façon périodique) un espace dans la forêt d'arganiers pour protéger et redynamiser l'écosystème (Faouzi, 2011).

Dans le cas général, le droit de jouissance accordé à la population locale entraîne la surexploitation des ressources en ce sens que l'accès libre et la forte demande augmentent la pression sur les écosystèmes, conduisant ainsi à l'épuisement et à la dégradation de ces écosystèmes (Feeny, et al., 1990). Cependant, dans le cas de la forêt domaniale d'arganiers, la situation semble contraire puisqu'avec l'avènement de l'approche participative (Beuret, 2006) les ressources forestières étaient, tant bien que mal, gérées durablement (Maria, 2010). Mais avec l'essor de la « filière argane », les institutions traditionnelles, participatives et autonomes rassemblant les habitants d'un même village pour la gestion des conflits et des ressources cèdent, de plus en plus, leurs places aux associations villageoises de développement local, orientées principalement vers la mise en place d'activités lucratives sous le label des projets de développement privilégiant ainsi l'aspect économique au caractère social des institutions traditionnelles comme l'explique Daniel Thieba (1992). Cette nouvelle dynamique a rendu illusoire les démarches participatives (Blanc-Pamard & Faurous, 2004), quand bien même les différents projets associatifs locaux, régionaux et internationaux, prônent un développement durable (Maria, 2010).

Ainsi, dans le souci d'améliorer les méthodes d'exploitation afin d'accroître le revenu, on est passé d'une exploitation totalement traditionnel et artisanal à une production semi-mécanisée, plus rentable et mieux adaptée aux normes et aux exigences internationales (Chakib, 2013). Néanmoins, le concassage est resté manuel dans la plupart des systèmes de production (Chakib, 2013). Par contre, afin d'augmenter leur marge bénéficiaire certains acteurs économiques (sous couvert de leur certification IGP) ont acquis et utilise des machines à concasser au détriment de la main d'œuvre locale qui se retrouve au chômage (Chakib, 2013). Pour pallier cela, les projets de développement se sont mis à intégrer dans leurs objectifs le volet concernant la valorisation des savoir-faire traditionnels locaux (Maria, 2010).

Par ailleurs, les acteurs de la filière deviennent de plus en plus nombreux à cause de la flambée des prix de l'huile d'argan. Depuis la création de la RBA en 1998, l'intégration de ces différents acteurs se fait suivant une approche patrimoniale qui est définie comme une forme de gestion des ressources naturelles basée sur « un état d'esprit permettant au plus grand nombre de titulaires d'un patrimoine d'avoir à cœur le souci du long terme, de prendre conscience des multiples interdépendances entre les acteurs, et de se rencontrer pour décider en commun des mesures qui permettront, au coût le plus juste, de conserver ou d'augmenter ce patrimoine tout en tirant la plus grande quantité possible d'avantages. » (Revéret & Webster, 2002). Cette gestion patrimoniale donne lieu à des dynamiques de conservation, de protection et de valorisation et reste indissociable des pratiques traditionnelles et de l'organisation tribale qui conditionnaient les modes de gestion de l'arganeraie (Maria, 2010).

D'un autre côté, une part de plus en plus importante de la population semble préférer l'élevage des ovins (qui se prêtent mieux à l'élevage intensif ou semi-intensif) à celui des caprins (El Wahidi, et al., 2014). Ces changements dans la structure et le type d'élevage favorisent la concentration des pressions sur les parcours se trouvant à proximité des exploitations agricoles et sur les agdals (El Wahidi, et al., 2014). A long terme, cette situation pourrait d'un côté, accroître la pression sur l'arganeraie de plaine dont la pérennité est déjà fortement menacée et d'un autre côté réduirait la dégradation de l'arganeraie de montagne. Mais pour l'instant, l'élevage de caprin reste dominant et concerne 65% des 1,5 million de têtes de cheptel recensées dans la zone de l'arganeraie (Faouzi & Martin, 2014).

Par contre, force est de constater que l'intensité des coupes sur l'arganier a diminué durant la dernière décennie (Aziz, et al., 2011). Cela est attribuable à l'augmentation de la consommation de gaz, à la disponibilité de bois et charbon d'autres essences (comme l'olivier et l'oranger), à la préférence pour les matériaux de construction modernes et aux gains liés au marché de l'huile d'argan (Yann & Lambin, 2011). Ce gain pousse de plus en plus de familles (anciennement agriculteurs ou éleveurs) à vendre de l'huile d'argan au marché local (Souk) (Simenel, et al., 2009) se transformant ainsi en commerçants.

D'une manière générale, la gestion de l'arganeraie se fait suivant un modèle agro-sylvo-pastorale basé sur : la production fourragère (et ligneuse), la production fruitière et la production de cultures annuelles (Tarrier & Benzyane, 2003). Malgré les différentes mutations sociopolitique et économique qu'a connu la région ces dernières décennies, le mode de gestion de l'arganeraie est resté en grande partie traditionnel (Simenel, et al., 2009 ; Maria, 2010). Cela peut être expliqué par le fait que les programmes financés par l'Initiative Nationale pour le Développement Humain (INDH) ont fortement maintenu la stabilité et le contrôle en fournissant de modeste support aux femmes rurales de sorte à ne pas éroder les fondements de la société rurale traditionnelle (Perry, et al., 2019). Cependant, les techniques d'extraction de l'huile d'argan ont évolué vers une exploitation plus mécanisée (Chakib, 2013). Aussi, le savoir relatif à l'exploitation de l'arganier et aux méthodes de conservation s'est considérablement amélioré (Aziz, et al., 2011).

I-3-Ecosystèmes dunaires d'Errachidia

I-3-1- Formations dunaires

20% des régions arides à hyperarides du monde sont couvertes par des dunes (Pye & Tsoar, 1990 ; Hoekstra & Shachak, 1999). Une dune est un amas de sables formée par l'accumulation de cette dernière sous l'impulsion du vent avec le concours de plusieurs autres facteurs du milieu. La disponibilité de particules grossières (sables) dans la zone d'étude est un facteur déterminant pour la formation des dunes (Wasson & Hyde, 1983). La nature de la roche mère conditionne cette disponibilité en ce sens que les roches s'érodent et se désagrègent pour donner naissance aux particules qui constituent les dunes (De Wever & Duranthon, 2015). L'altitude joue également un rôle déterminant dans la formation des dunes. Les particules de sable transportées au ras du sol par saltation par le vent, s'accumulent quand la compétence du vent chute ou dès qu'ils rencontrent une surface surélevée. A Errachidia, les dunes concentrent leur maximum de superficie entre 500 et 1000 m d'altitude. Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et s'accumuler sur le versant opposé.

Les formations dunaires sont également conditionnées par l'action d'autres facteurs climatiques dont les principaux sont en plus du vent : la température et les précipitations (Ayoub, 1998 ; Breckle, et al., 2008 ; Wang, et al., 2008 ; Guan, et al., 2016).

Les températures élevées augmentent l'évaporation, rendant les particules du sol moins compactes et donc plus facilement transportables par le vent (Breckle, et al., 2008). De plus, l'évaporation augmente également la salinité du sol qui est l'une des principales causes de la dégradation des terres en Afrique (FAO, 2016 ; Panagos, et al., 2017 ; Guedegbe, et al., 2018). En effet, la salinité, couplée à l'évapotranspiration influencent négativement la croissance de la végétation. Sachant que la végétation intervient dans la stabilisation des dunes (Durán & Herrmann, 2006), lorsque la température diminue, l'évapotranspiration et la salinité du sol aussi diminue ce qui tend à favoriser la croissance de la végétation et par conséquent, à diminuer l'expansion des dunes.

La croissance de la végétation est également conditionnée par la variation des précipitations (Malo & Nicholson, 1990 ; Hess, et al., 1996 ; Kawabata, et al., 2001). Les précipitations agissent donc indirectement sur la dynamique des dunes en favorisant l'augmentation ou la diminution de la végétation. En effet, la végétation joue un rôle important dans la fixation et la mobilité des dunes (Lancaster & Baas, 1998 ; Durán & Herrmann, 2006). Elle réduit le transport du sable en diminuant la vitesse du vent. La végétation protège le sol de l'érosion et retient les particules de sable. Ce rôle de stabilisateur des dunes dépend de la hauteur, de la rugosité et de la densité de la formation végétale (Wolfe & Nickling, 1993).

Bien que les facteurs anthropiques constituent la principale cause de la dégradation des sols dans de nombreuses régions (Ayoub, 1998 ; Girma, 2001 ; Laki, 2009), les zones urbaines ne sont souvent pas liées à la désertification (Barbero-Sierra, et al., 2013). Cependant, s'il est bien planifié, conduit et réglementé, l'urbanisation peut réduire la pression anthropique sur les milieux désertiques (Portnov & Safriel, 2004). En effet, les activités anthropiques respectueuses de l'environnement et la croissance démographique peut favoriser la réduction de la désertification et de ces conséquences notamment en Afrique (Darkoh, 1994).

I-3-2- Type de dunes

Il existe de nombreux types de dunes variant en fonction de l'aire de répartition (côtière, saharienne, etc...), de la taille, de la superficie, de l'âge et de la dynamique. Les formes dunaires que l'on rencontre dans la province d'Errachidia sont :

- Les Nebkhas : Elles se trouvent principalement dans la région du Jorf-Bouia et se caractérisent par une couverture végétale faible ou clairsemée.
- Les dunes en demi-lune : c'est la forme la plus commune aussi appelées dunes transversales ou barkhane. Ces dunes sont formées par les vents qui soufflent tout le temps dans la même direction. Une barkhane est une forme d'accumulation sableuse instable, mobile et sans cesse remodelées par le vent induisant le plus d'ensablement vu sa capacité de déplacement rapide qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an (Alali & Benmohammadi, 2013).
- Les dunes linéaires ; ce sont des dunes plus longues que larges dont les crêtes droites ou légèrement sinueuses peuvent atteindre jusqu'à 400 kilomètres de long, 600 mètres de large et 40 mètres de haut. Elles sont rarement isolées, habituellement disposées parallèlement, séparées par des kilomètres de sable, du gravier ou des couloirs rocheux. Certaines dunes linéaires s'unissent, en formant des Y. Ces formations sont typiques des régions subissant des vents soufflant dans deux directions.
- Les dunes en étoile ou Ghourds ; elles sont pyramidales, avec au moins trois côtés qui partent de leur sommet. Elles se forment dans les régions connaissant des vents multidirectionnels. Elles peuvent atteindre 500 mètres de hauteur.
- Les dunes en parabole ; elles sont en forme de U et caractérisent les déserts côtiers. La plus longue dune en parabole connue mesure 12 kilomètres. Ce type de dune se forme quand, aux extrémités d'une formation sableuse, commence à apparaître de la végétation qui en arrête la progression, tandis que la partie centrale continue à avancer. Elles se forment quand le vent ne souffle que dans une seule direction dominante.

Tous ces types de dunes peuvent exister sous trois formes : simple, composée et complexe. Les dunes simples sont des collines avec un nombre minimal de côtés escarpés qui en définissent la typologie géométrique. Les dunes composées sont des dunes plus grandes, surmontées de

dunes similaires plus petites. Les dunes complexes sont, elles, formées de plusieurs types de dunes différents (Wikipedia, 2020).

Les dunes à Errachidia sont complexes et composés principalement de dunes en demi-lune, linéaire et en étoile (voir photos ci-dessous).



Nebkhas avec Alfa situé à Jorf-Bouia.



*Dunes en étoile ou dunes pyramidales ou
Ghourds de Mergouza*



Barkhanes de Mergouza



Dunes linéaires de Mergouza



Erg Chebbi à Merzouga

« Source : (https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipPsLiM2HSI1n8Thp-HJq2_CSBeJFY0lbOo0edpx=w2560-h1440-pd) »

Figure 7 : Type de dunes à Errachidia

I-3-3- Problèmes liés aux écosystèmes dunaires

Dans les zones hyperarides (tel que Errachidia), la désertification cause principalement des problèmes d'ensablement qui se manifestent par l'extension des paysages désertiques tels que : les regs, les hamadas et les dunes (Le Houérou, 1979). Les formations lithologiques de la province d'Errachidia, qui sont principalement de type schisto-gréseuses, sont très sensibles à l'érosion

hydrique et éolienne. De plus, les formations du quaternaire, notamment de l'âge holocène, ont cédé la place à des dépôts alluviaux importants, de texture sablo-limoneuse qui constituent un énorme stock de matériel potentiellement mobilisable par les courants éoliens. Par ailleurs, les dépôts fluviatiles des oueds, à dominance sablo-limoneuse, sont remaniés par le vent et contribuent également à l'ensablement qui menace la quasi-totalité des palmeraies (Alali & Benmohammadi, 2013).

L'ensablement menace également les infrastructures, les habitations, les terrains de cultures et les points d'eau (HCEFLCD, 2001 ; Dong, et al., 2004). La superficie touchée par ce phénomène s'évalue à 250 000 ha dans la province d'Errachidia (HCEFLCD, 2001).

Par ailleurs, la marginalisation, le sous-équipement, le manque d'investissement pour la fixation des dunes, l'enclavement, l'exclusion et le tourisme sont autant de problèmes qui amplifient le phénomène de l'ensablement menaçant la durabilité des Oasis à Errachidia (Aït Hamza & El Faskaoui, 2010).

Chapitre II : Évaluation de la vulnérabilité à la désertification

II-1- Introduction

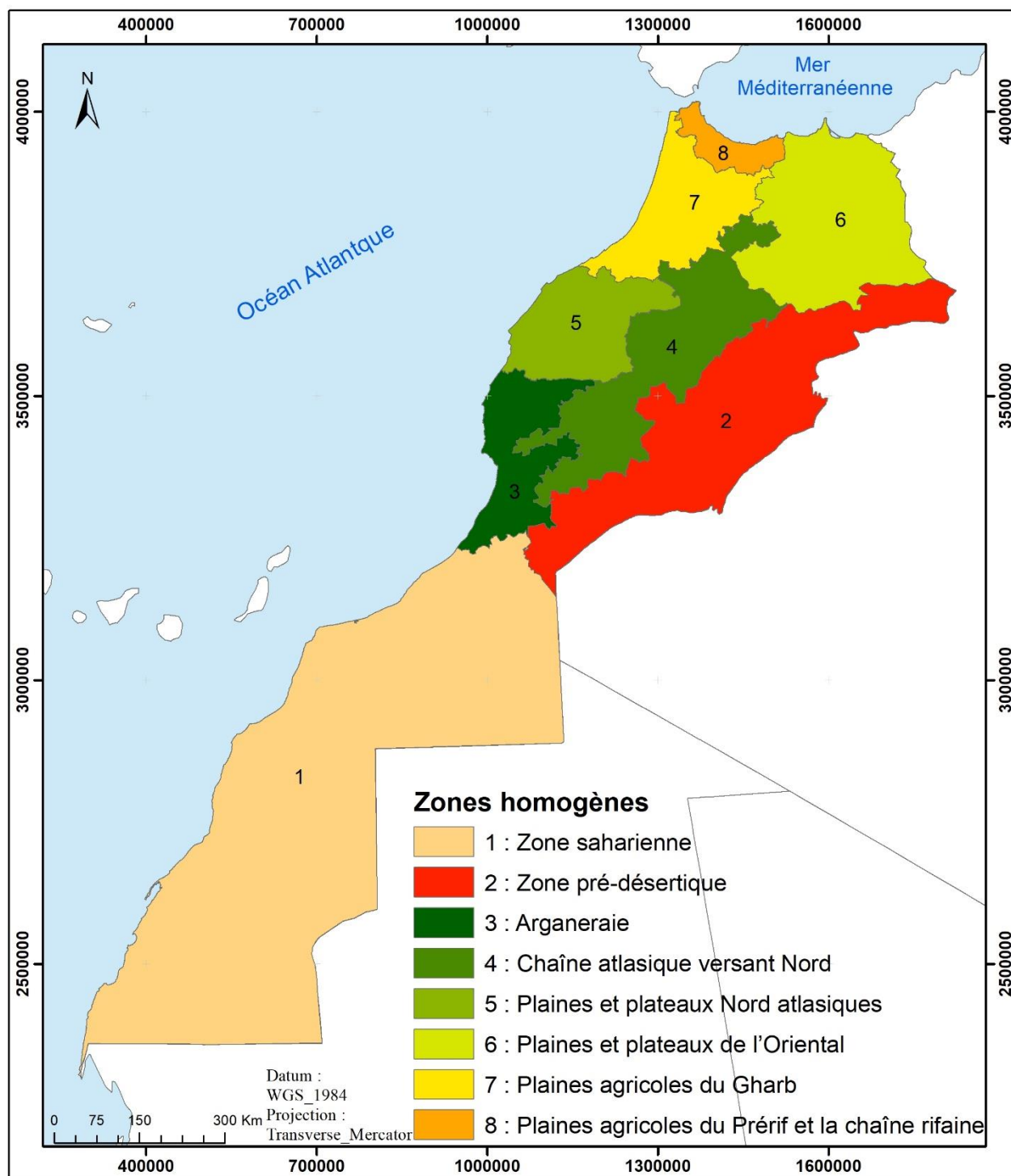
Au fil des années, de nombreuses méthodes d'évaluation de la dégradation des terres ont été développées. L'un des plus connus à ce jour est le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Ce modèle a été développé par Wischmeier et Smith et fournit une estimation quantitative de l'érosion des sols basée sur les facteurs suivants: climat, propriétés des sols, topographie, état de la végétation et activités anthropiques. Bien que ce modèle intègre de nombreux facteurs, son application reste limitée et ne peut donc pas être utilisée comme telle dans tous les pays (Cormary & Masson, 1964). Dans plusieurs régions du monde, l'évaluation de la désertification se fait généralement en utilisant des images satellites pour évaluer des indices tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de sécheresse standardisé multivarié (MSDI), l'indice de chaleur latente par différence normalisée (NDLI) et la surface terrestre (Xu, et al., 2009 ; Lamchin, et al., 2016 ; Yuei-An, et al., 2019). Cependant, ces indices n'intègrent pas les facteurs anthropiques dans leur évaluation.

D'un autre côté, de nombreux modèles se sont succédés et se sont complétés ces dernières années afin de proposer une méthode d'évaluation efficace de la dégradation des terres. Ces modèles sont principalement EFEDA, ERMES, ModMED, ARCHAEOEMEDS, MEDALUS et MODULUS et sont de préférence utilisés pour évaluer la dégradation des terres à petite échelle (régionale) (Engelen, 2001). Dans la région méditerranéenne, la méthode d'évaluation de la désertification la plus utilisée est le modèle MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) qui est une approche intégrant des facteurs liés aux caractéristiques du sol, au climat et à l'état du couvert végétal (Kosmas, et al., 1999). Il a été appliqué en Égypte (Bakr, et al., 2012), en Iran (Taghipourjavi, et al., 2016), en Algérie (Bouhata & Kalla, 2014), et même au Maroc (Lahloui, et al., 2017 ; Lamqadem, et al., 2018). Cependant, l'inconvénient majeur de ce modèle reste le fait que les facteurs considérés sont combinés avec un poids estimé identique alors que le degré de leur impact sur l'environnement n'est pas le même. De plus, les données sont difficiles à collecter lorsque nous travaillons à grande échelle (Labbaci, 2010).

Ainsi, bien que de nombreuses méthodes d'évaluation de la dégradation des terres aient été développées au fil des ans, une approche globale et commune de l'évaluation de la désertification n'est pas encore disponible. De plus, il y a un manque de données sur la désertification et d'indicateurs pour analyser et suivre le phénomène dans le temps et l'espace au Maroc. Par conséquent, cette étude vise à simplifier et à remédier à certains des inconvénients des anciens modèles en proposant une méthode d'analyse complète et efficace qui rendrait possible et plus facile l'évaluation de la vulnérabilité à la désertification dans une zone à grande échelle.

II-2- Zone d'étude

Cette étude concerne l'ensemble des régions du Maroc. Elles ont été classées en huit zones homogènes catégorisées en 2013 dans le Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification (PANLCD) par le Haut-Commissariat à l'eau et aux forêts et à la lutte contre la désertification (HCEFLCD, 2013). L'approche adoptée pour délimiter ces zones homogènes est dite différenciée. Elle consiste à caractériser les grands écosystèmes en des unités « homogènes » du point de vue écologique, socioéconomique et type de problématique de désertification en vue d'assurer l'intégration des actions au niveau de ces écosystèmes, et afin de permettre un suivi régulier à travers un minimum d'indicateurs spécifiques et pertinents. Cette caractérisation est basée sur le recueil de l'information à partir de la documentation existante, appuyée et complétée par des travaux de cartographie et des investigations de terrain à l'échelle régionale et provinciale à travers des ateliers régionaux organisés dans les zones homogènes préalablement définies sur la base de cartes thématiques. Ces cartes thématiques sont : la carte climatologique, la carte du sol, la carte topographique et la carte d'utilisation des sols. La combinaison de ces cartes, suivi par d'autres investigations sur le terrain ont permis d'identifier les huit zones biogéographiques homogènes présentées dans la Figure 8.



(Source : HCEFLCD, 2013)

Figure 8 : Carte des zones homogènes du Maroc

Les caractéristiques de chaque zone sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3: Caractéristiques des zones homogènes

Numéro	Nom des zones	Superficie (ha)	Bioclimat	Territoires	Type d'utilisation des sols
1	Zone saharienne	32 153 008	Hyper-aride	Wad Eddahad, Boujdour, Smara, Laayoune, Assa-Zag, Tan-Tan, et Guelmim Sud.	Elevage extensif
2	Zone pré-désertique	11 000 193	Hyper-aride à aride	Guelmin Nord, Tata, Errachidia South, Figuig South, Ouarzazate Sud, et Zagora	Elevage extensif et sylvo-pastoralisme
3	Arganeraie	3 437 004	Semi-aride	Tiznit, Chtouka-Ait Baha, Inezgane-Ait Melloul, Agadir-Ida or Tanana, Essaouira Taroudant Sud, Chichaoua, et Marrakech	Parcours, forêts sylvo-pastoralisme et agriculture intensive par endroit
4	Chaîne atlasique versant Nord	6 657 131	Semi-aride à aride	Azilal, Khenifra, Ifrane, Sefrou, Taroudant Nord, Beni Mellal, Ouarzazate Nord et Errachidia North	Agriculture intensive
5	Plaines et plateaux Nord atlasiques	3 921 628	Semi-aride à aride	Benguerir, Settat, Safi, El Jadida, Khouribga, et El Kelaâ Sraghna	Agriculture intensive
6	Plaines et plateaux de l'Oriental	7 062 472	Semi-aride à aride	Oujda-Angad, Nador, Taza, Boulemane, Figuig Nord, Berkane, Taourirt, Jerada et Alhoceima Est	Elevage extensif
7	Plaines agricoles du Gharb	3 707 159	Semi-aride à subhumide	Casablanca, Benslimane, Mohammedia, Skhirate-Temara, Rabat, Sale, Kenitra, Khemisset, Sidi Kacem, Meknes, El Hajeb, Fez, Taounate, Larache, et Tangier	Agriculture intensive
8	Plaines agricoles du Prérif et la chaîne rifaine	1 142 306	Subhumide à humide	Tetouan, Chefchaouen, Alhoceima Ouest, et Tangier-Fahs	Forêts, Arboriculture et sylvo-pastoralisme

(Source : HCEFLCD, 2013)

II-3- Indicateurs et sources de données

La lutte contre la désertification implique nécessairement l'identification et l'analyse des facteurs de causalité appelés indicateurs (Kosmas, et al., 1999 ; Jauffret, 2001 ; Sommer, et al., 2001). Ces indicateurs sont liés à des facteurs anthropiques tels que : la surexploitation des terres, le surpâturage, l'agriculture mécanisée, les mauvaises méthodes d'irrigation, l'exploitation forestière, les incendies de forêt et la déforestation ; associés à plusieurs facteurs climatiques tels que : l'aridité tout au long de l'année, l'irrégularité des précipitations, la récurrence de la sécheresse (Holtz, 2003 ; Sivakumar, 2007 ; Xu, et al., 2009 ; Lamchin, et al., 2016).

Ainsi, et comme précisé dans le premier chapitre (I-1-4-) les indicateurs de la désertification sont de deux types : les indicateurs d'état qui caractérisent l'environnement physique et les indicateurs de pression liés aux activités humaines. Les indicateurs d'état considérés dans cette étude sont la température, les précipitations, le relief, le type de sol et la couverture végétale. Les indicateurs de pression dans cette étude incluent les terres cultivées, le taux de charge animal et la densité de population. Les indicateurs d'état considérés ont déjà été intégrés lors de la caractérisation des zones homogènes. Par conséquent, seuls les indicateurs de pression et la couverture végétale sont évalués dans cette étude.

Le choix de ces indicateurs s'est fait en considérant certains aspects. Ces aspects ainsi que la source des données sont présentés ci-dessous :

- La température et les précipitations reflètent le climat d'une région. Les températures élevées et des précipitations faibles sont les principales causes naturelles de la sécheresse et de la désertification (Gavinet, et al., 2019). De plus, le déficit pluviométrique aggravé par des irrégularités inter-saisonnières peuvent affecter l'activité agricole et la stabilité des écosystèmes.
- Le relief est un facteur d'aggravation des phénomènes d'érosion notamment hydrique accentuant ainsi le risque de désertification (Bastiaansen & Carter, 2019).
- Le type de sol lié à la diversité des substrats, des climats, de la végétation et du relief, influence fortement la disponibilité en eau. L'aridité du climat et le relief accidenté ne favorisent pas une pédogenèse très évoluée (Rodríguez-Caballero, et al., 2019). Ainsi, au Maroc, les sols fertiles, profonds et stables se limitent aux plaines et plateaux atlantiques et aux plaines d'accumulation

Alors que les sols peu évolués, squelettiques, lessivés ou fortement érodés se localisent surtout dans le Rif et le Haut Atlas. Ces sols se retrouvent sur des roches peu cohérentes, ou appauvris en surface ou sur des substrats durs ne permettant qu'une pédogenèse très lente, comme dans le Moyen Atlas (HCEFLCD, 2013).

- Le couvert végétal fait partie des indicateurs d'état biologique. Il fait référence ici aux superficies occupées par les forêts et les matorrals. Plus une zone a un couvert végétal élevé, moins elle est exposée au phénomène de la désertification. En effet, la végétation joue un rôle important dans le processus de lutte contre la désertification.
 - Elle adoucit le microclimat,
 - Protège le sol contre l'érosion,
 - Réduit le ruissèlement,
 - Protège contre l'envasement des barrages,
 - Favorise l'infiltration de l'eau,
 - Protège les nappes phréatiques...
- La mise en culture est un indicateur de pression économique. La végétation naturelle est souvent défrichée au profit d'une agriculture itinérante à base de céréaliculture et de maraichage surtout. Cette exploitation excessive des sols cause la perte de fertilité, augmente la salinité des sols et appauvrit la nappe phréatique.

La superficie du couvert végétal et celle des terres de cultures ont été estimées à partir de la carte d'occupation des sols.

- La charge animale est aussi un indicateur de pression économique indiquant l'effet de l'élevage. Lorsque la charge animale dépasse la capacité de production des terres on parle de surpâturage. Le bétail agit sur la végétation par prélèvement et par piétinement. A travers ces actions, le surpâturage empêche la régénération naturelle. Les données sur le taux de charge animale ont été collectées sur le site Internet du Ministre Marocain de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) et concernent l'année 2014.
- La densité de la population est un indicateur de pression sociale. Elle ne cesse de croître à cause de la croissance démographique qui influe directement sur l'augmentation des facteurs de dégradation tels que : le défrichement, le surpâturage et l'exploitation abusive des ressources

naturelles (Weber & Sciubba, 2019). Les données sur le nombre d'habitants par km² par région ont été collectées auprès du Haut-Commissariat au Plan du Maroc (HCP).

II-4- Approche méthodologique

II-4-1- Méthode de cartographie de l'occupation du sol

L'analyse de la désertification à travers des indicateurs implique l'évaluation de l'étendue et de la dynamique du phénomène. Par conséquent, l'évaluation des ressources naturelles disponibles est la première étape vers la compréhension du phénomène de la désertification (El Wahidi, et al., 2011). Cette évaluation de l'état actuelle des ressources naturelles sur la base d'indicateurs a permis de définir le degré de vulnérabilité à la désertification.

Ainsi, afin d'évaluer les ressources naturelles disponibles, l'occupation du sol des huit zones homogènes a été cartographiée à l'aide de l'algorithme de classification du maximum de vraisemblance sur les images satellites Landsat 8 de 30 m de résolution (ramenée à 15 m par la fusion panchromatique) et téléchargées en 2016.

Les classes identifiées pour la classification supervisée ont été sélectionnées en tenant compte de l'objectif qui est de déterminer le taux de couverture forestière et la superficie des terres cultivées. 7 classes d'occupation du sol ont pu être identifiées suite à une étude bibliographique posée et en tenant compte de leur importance en termes de superficie et de la facilité à les discerner. Ces classes sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Classes d'occupation du sol choisies pour l'analyse de vulnérabilité

Classes	Description
Agglomération	Cette classe rassemble tout ce qui est bâtiments, construction et équipements.
Arboriculture	Il s'agit des surfaces cultivées avec des arbres fruitiers par-dessus.
Cultures	Il s'agit des surfaces mise en culture au moment de prise de vue des images satellitaires.
Corps d'eau	Cette classe est constituée par : les lacs, les Dayas, les eaux des barrages, les Oueds et les courts d'eau.
Forêts	Les espaces couvertes par une végétation ligneuse haute et dense (Toutes les strates de végétation sont présentes à priori).
Matorral	Les espaces couvertes par une végétation ligneuse naturelle dégradée peu dense.
Parcours et sol nu	Les espaces occupées par une végétation naturelle basse de couverture variable (inclus les terrains très faiblement couverts ou labourés)

II-4-2- Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la désertification

La méthode utilisée dans cette étude pour évaluer l'impact des indicateurs sélectionnés est la somme pondérée. Cette méthode est une méthode d'analyse multicritère qui peut être définie comme une méthode combinant plusieurs critères, de types différents, afin d'obtenir un résultat indiquant la solution la plus ou la moins adaptée à un problème (Balzarini, et al., 2011). En d'autres termes, les méthodes d'analyse multicritère conduisent à la sélection d'une ou plusieurs solutions optimales parmi un ensemble de solutions.

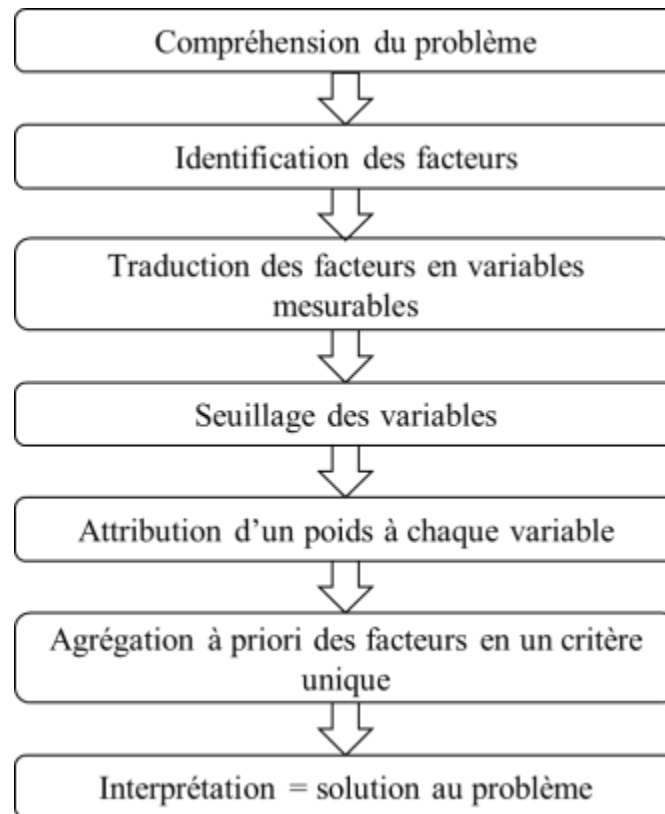


Figure 9 : Méthode d'analyse multicritère

Premièrement, la méthode d'analyse multicritère par somme pondérée nécessite la parfaite compréhension du phénomène de la désertification. Pour résoudre ce problème, certains indicateurs ont dû être identifiés. Ces indicateurs sont ensuite convertis en variables mesurables. Ces variables sont classées selon des valeurs seuils, qui définissent le degré de vulnérabilité des zones. Ces valeurs seuils présentées ci-dessous ont été sélectionnées de manière subjective en fonction des connaissances sur les zones d'étude (Elqaidi, 2016 ; Sinsin, 2016). Ensuite, pour chacun des

indicateurs, trois classes de vulnérabilité allant d'un à trois ont été proposées en fonction des valeurs seuils définies. Ces classes sont :

- 1- **Peu vulnérable** : Dans ces zones, la forêt et le matorral occupent plus de 40% de la zone homogène considérée. En effet, plus la zone forestière est grande, plus son effet sur l'écologie (relation entre climat, sol et eau) est important et plus le nombre de personnes qui en jouissent est important (Vallauri, et al., 2008). La superficie occupée par les terres cultivées représente moins de 20% de la superficie totale. La densité de population et le taux de charge animal ne dépassent pas respectivement 40 habitants par km² et 1 Unité Petit Bétail (UPB) / ha.
- 2- **Modérément vulnérable** : les zones sont caractérisées par des valeurs moyennes pour chaque indicateur évalué. La couverture forestière et les terres cultivées représentent entre 20 et 40% de la superficie totale. La densité de population se situe entre 40 et 80 habitants au km² et le taux de charge animal est compris entre 1 et 1,5 UPB / ha.
- 3- **Très vulnérable** : cela signifie que la forêt et le matorral couvrent moins de 20% de la zone homogène considérée. En effet, lorsque la couverture ligneuse (forêt et matorral) est faible, il devient plus vital de la conserver et de la protéger pour éviter sa disparition. Dans les zones très vulnérables, la végétation subit une pression importante, due à des terres cultivées dont l'étendue dépassent 40% de la superficie de ladite zone, à une forte demande anthropique induite par une densité de population élevée dépassant 80 habitants au km² et à un taux de charge animal excessif (> 1,5 UPB / ha).

Sur la base de ces classes, la vulnérabilité globale de chaque zone homogène a été évaluée en combinant les degrés de vulnérabilité vis-à-vis de chaque indicateur.

D'une part, la combinaison a été faite en considérant que le degré d'impact des indicateurs est le même. Ainsi, la vulnérabilité globale a été calculée par la formule suivante :

$$V = \sum_{i=1}^i Vi/n$$

- V : représente la vulnérabilité résultant de l'agrégation ;

- V_i : est la valeur de la vulnérabilité vis-à-vis de l'indicateur i dans la zone homogène considérée ;
- n : est le nombre d'indicateurs.

D'autre part, la combinaison des indicateurs s'est fait en fonction du degré de pondération (poids) spécifique à chaque indicateur. Ce poids a été calculé conformément à la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) ou méthode d'aide multicritère à la décision de Saaty (Saaty, 2008) qui se base sur l'utilisation de l'échelle de Saaty présentée dans le Tableau 5.

L'application de la méthode AHP a nécessité la génération de la matrice de comparaison présentée dans le Tableau 6 et exprimant l'importance de chaque indicateur par rapport à l'autre. Les degrés d'importance de la matrice de comparaison ont été choisis sur avis d'experts² et en fonction des connaissances sur les zones d'étude parce qu'il n'existait pas de valeurs de pondération communes pour chaque indicateur de la désertification à l'échelle national.

Donc, à partir de la matrice de comparaison, le poids a été calculé en :

- Additionnant tous les éléments d'une même colonne de la matrice de comparaison ;
- Puis en normalisant la matrice : chaque entrée de la matrice est divisée par le total de sa colonne. La normalisation de la matrice permet alors des comparaisons significatives entre les éléments ;
- Enfin, tous les éléments d'une même ligne de la matrice normalisée sont additionnés et ensuite, divisé par le nombre d'entrées qu'elle comporte.

Tableau 5 : Echelle de Saaty

Importance d'un critère par rapport à un autre	Note	Inverse
Extrêmement importance	9	1/9
Très fort à extrême	8	1/8
Très fortement important	7	1/7
Fort à très fort	6	1/6
Fortement important	5	1/5

² Pr. Dr. Mohamed Qarro : Expert, Docteur en Sciences Naturelles / Ecologie Méditerranéenne (en 1985 à l'Université d'Aix Marseille III, Faculté de saint Jérôme. France). Professeur à l'École nationale d'ingénieurs forestiers, Maroc.

Pr. Dr Mohamed Sabir : Expert, Docteur en conservation des sols et de l'eau (en 1994 à l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II. Rabat, Maroc). Professeur à l'École nationale d'ingénieurs forestiers, Maroc.

Modérément à fort	4	1/4
Modérément important	3	1/3
Également à modérément	2	1/2
Même importance	1	1

(Source : Saaty, 2008)

Tableau 6 : Matrice de comparaison des facteurs de vulnérabilité

Critères	Terrains de culture	Densité population (h/km ²)	Charge animale (UPB/ha)	Forêt + Matorral
Terrains de culture	1	4	3	9
Densité population (h/km ²)	1/4	1	1/3	5
Charge animale (UPB/ha)	1/3	3	1	3
Forêt + Matorral	1/9	1/5	1/3	1

Une fois le poids calculé, l'indice de vulnérabilité global de chaque zone a pu être déterminé en utilisant la formule suivante :

$$V = \sum_{i=1}^i W_i * F_i$$

- V : représente la vulnérabilité résultant de l'agrégation ;
- W_i : est le poids donné à l'indicateur ;
- F_i : représente la valeur de l'indicateur i dans la zone homogène considérée.

Enfin, la carte de vulnérabilité globale obtenue avec la méthode d'évaluation sans pondération a été comparée à celle avec pondération.

II-5- Résultats et Discussion

II-5-1- Etat actuel des occupations du sol

La carte d'occupation du sol élaborée dans le cadre de cette étude et présentée dans la Figure 10 ci-dessous montrent que :

- La zone 1 ou zone saharienne recouvre 32 153 008 ha. L'agglomération y occupe 309 089 ha, soit les 1%. L'arboriculture et les terrains de culture quant à eux représentent respectivement 0,5 % et 0,8 %. La végétation naturelle est de type matorral et occupe 137 614 ha, soit 0,4 % de la superficie totale. La classe eau et la classe forêt sont absentes. 97,3 % de la superficie totale sont occupés par les parcours et du sol nu. C'est la zone où la proportion de sol nu est la plus élevée. La zone saharienne est une zone désertique essentiellement composée de dunes de sable et de sol peu évolué, d'où la proportion élevée de sol nu. La présence des peuplements d'Acacia à l'état épars ne sont pas lisibles avec la résolution de 15 m utilisée.
- La zone 2 ou zone pré-désertique couvre une superficie totale de 11 000 193 ha et se caractérise aussi par l'absence de forêt dense étant donné que le climat est présaharien. Cependant, le matorral couvre 202 315 ha, soit les 1,8 %. L'agglomération, l'arboriculture et les terrains de culture occupent respectivement 4,4 %, 0,4 % et 2,1 % de la superficie totale. Par ailleurs, la classe eau représente 0,9 % de la zone. Comme dans la zone saharienne, la zone pré-désertique est principalement couverte de parcours et de sol nu sur 9 952 821 ha, soit 90,5 % de la superficie totale.
- La zone 3 dite zone de l'arganeraie couvre 3 437 004 ha. Tous les types d'occupation du sol, identifiées y sont représentées. L'eau recouvre 8 570 ha soit 0,2 %, l'agglomération occupe 138 966 ha soit 4 %, l'arboriculture et les terrains de culture recouvrent respectivement 11,7% et 5,8 % de la superficie totale. La proportion de végétation naturelle (Forêt et matorral) est importante dans la zone de l'arganeraie. En effet, le matorral couvre 1 223 691 ha et la forêt couvre 572 546 ha soit respectivement 35,6 % et 16,7 %. Les parcours et sol nu occupent 892 749 ha soit 26 % de la superficie totale.
- La zone 4 qui représente la chaîne atlasique versant nord est caractérisé par la couverture forestière la plus importante avec un pourcentage de 33,1% correspondant à une superficie de 2 201 113 ha ; suivi par le matorral qui couvre une superficie de 1 806 990 ha soit 27 %. Les parcours et sol nu viennent en troisième position avec une superficie de 1 791 331 ha soit 26,9 % de la superficie totale. En outre, les terrains de culture couvrent une superficie de 727 704 ha soit 10,9 % et l'arboriculture couvre 56 529 soit 0,84 %. Par ailleurs,

l'agglomération occupe 50 007 ha, soit 0,8 % de la superficie totale. La classe eau est la moins répandue dans cette zone, elle couvre une superficie de 23 488 soit 0,4 %.

- La zone de plaine et plateaux Nord atlasiques ou zone 5 s'étend sur 3 921 628 ha. L'eau y couvre 16 278 ha soit 0,4 % de la superficie totale et l'agglomération occupe 243 210 ha soit 6,2 %. Par ailleurs, l'arboriculture occupe 182 423 ha soit 4,7 % et les terrains de culture occupe 1 072 280 ha soit 27,3 %. La forêt et la matorral représentent respectivement 6,6 % et 33,6 %. Enfin, les parcours et sol nu recouvrent 830 168 ha soit 21,2 % de la superficie totale.
- Les parcours et sol nu représentent la classe la plus répandue dans la zone 6 correspondant aux Plaines et plateaux de l'Oriental. Ils occupent 4 113 063 ha soit 58,2 % de la superficie totale. Le matorral vient en deuxième position en couvrant une superficie de 1 598 377 ha soit 22,6 % de la superficie totale. Les terrains de culture et l'arboriculture couvrent respectivement une superficie de 513 770 ha et 522 881 ha soit 7,3% et 7,4 % de la superficie totale, tandis que la forêt ne couvre que 169 617 ha soit 2,4 % de la superficie totale de cette zone. La classe eau et les agglomérations occupent respectivement 5 018 ha et 139 746 ha soit 0,1 et 2 % de la superficie totale.
- La zone 7 nommée plaines agricoles du Gharb est une zone d'agriculture par excellence, les terrains de culture y occupent une superficie très importante, elle est de l'ordre de 1 954 175 ha soit 52,7 % de la superficie totale de cette zone. Le matorral vient en deuxième position avec une superficie de 921 646 ha soit 24,9 % de la superficie totale. Par ailleurs, la forêt et l'arboriculture couvrent respectivement 324 640 ha (8,8 %) et 388 955 (10,5%). En outre, les parcours et sol nu couvrent une superficie de 676 034 ha soit 1,8 % de la superficie totale de cette zone. Enfin, la classe d'eau et les agglomérations couvrent respectivement une superficie de 16 897 ha (0,5 %) et 33 242 ha (0,9%).
- Dans la zone 8 appelée plaines agricoles du préif et chaîne rifaine aussi agricole, l'arboriculture et les terrains de culture couvrent respectivement une superficie de 431 375 ha et 48 608 ha, soit 37,8 % et 4,3 % de la superficie totale. Les parcours et sol nu occupent une superficie de 432 535 ha, ce qui représente 37,9 % de la superficie totale de cette zone. La forêt occupe une superficie de 165 523 ha soit 14,5 % de la superficie totale. Le matorral quant à lui couvre 47 419 ha et soit 4,2 % de la superficie totale. La classe eau et les

agglomérations, s'étendent respectivement sur une superficie de 1 096 ha et 15 748 ha soit 0,1% et 1,4%.

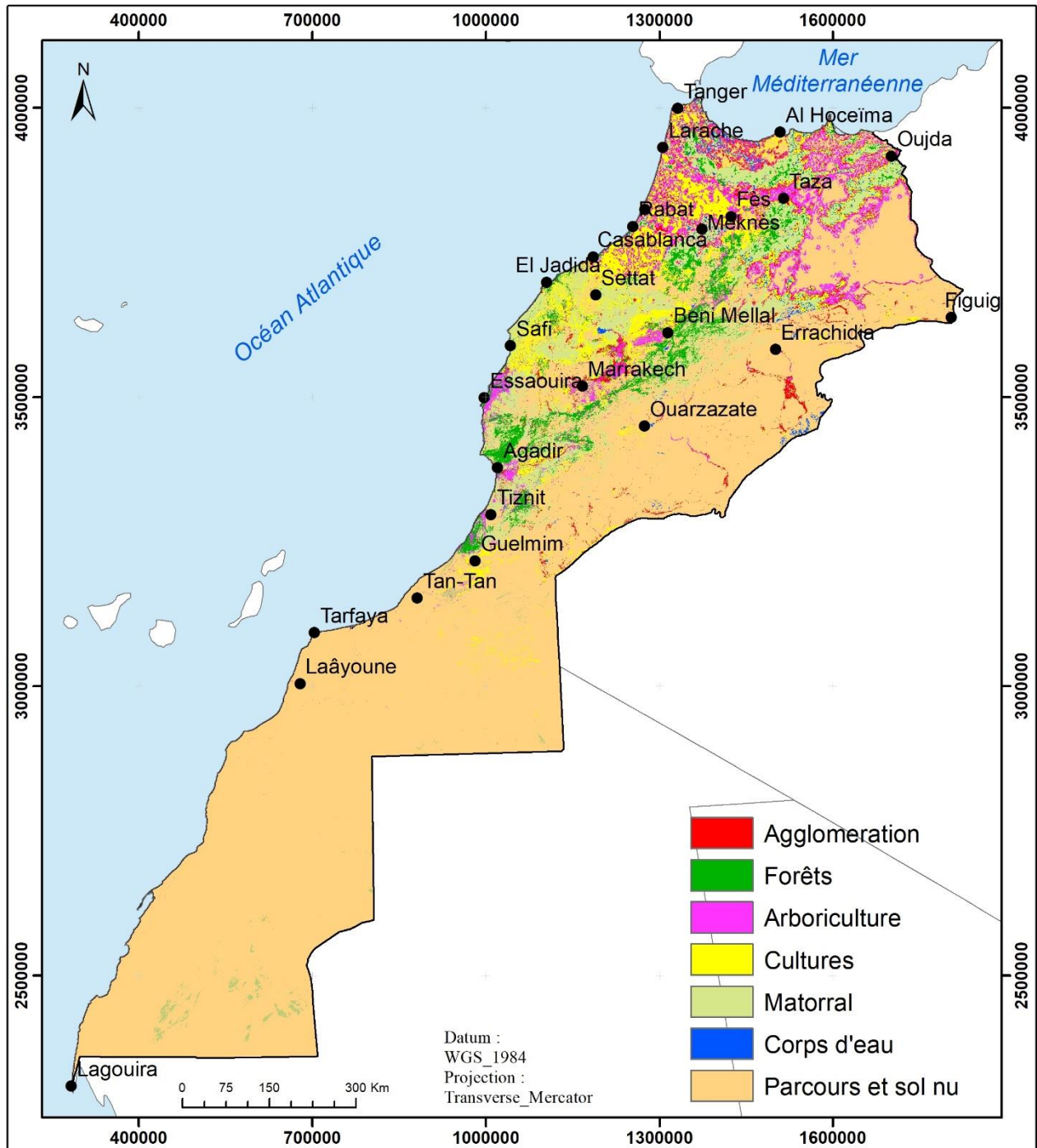


Figure 10 : Carte d'occupation du sol du Maroc

L'évaluation de l'état actuel de l'utilisation des terres dans cette étude montre que la couverture végétale ligneuse totale a diminué ces dernières années. Entre 2010 et 2012, le taux de couverture végétale ligneuse a diminué de 0,9% par an selon le rapport national (FAO, 2014). La proportion réelle de la superficie couverte par les forêts et matorral dans la superficie totale du Maroc est évaluée dans cette étude à 15,6%, ce qui correspond à 1,7% de diminution par an entre 2019 et 2012. La dégradation est donc plus importante avec le temps. Les forêts ont fortement régressé, laissant la place au matorral.

Tableau 7 : Occupation des forêts et matorral du Maroc

Années	1990*	2000*	2005*	2010*	2012*	2019
Forêts (ha)	5175383	5169046	5537200	5795200	5686700	3830084
Autres formations ligneuses (ha)	6061026	6099366	6789900	7047900	6934100	7255000
Superficie totale de la végétation (ha)	11236409	11268412	12327100	12843100	12620800	11085084
Superficie totale de la végétation (%)	15.8%	15.9%	17.3%	18.1%	17.8%	15.6%

*Source : (FAO, 2014)

II-5-2- Evaluation de la vulnérabilité vis-à-vis de chaque indicateur

Une fois que le taux de couverture végétale et le taux de recouvrement des terrains de culture ont été déterminés, les données concernant les autres indicateurs ont été collectées et sont présentées dans le Tableau 8. Sur la base de ces données, la vulnérabilité de chaque zone en fonction de chaque indicateur est présentée ci-dessous :

- La zone saharienne ou zone 1 est très vulnérable vis-à-vis du couvert végétal. Cela s'explique par le fait que la zone saharienne est exempte de grandes formations forestières. Il y a néanmoins quelques pieds d'Acacia. Cette zone est peu vulnérable vis-à-vis des 3 autres critères à savoir les terrains de culture, la densité de la population et la charge animale. Ces 3 critères ont des valeurs faibles compte tenu de l'étendue de la zone.
- La zone pré-désertique ou zone 2 a également un couvert végétal très faible. Elle est donc très vulnérable vis-à-vis de cet indicateur. Pour les 3 autres critères, la zone pré-désertique est peu vulnérable parce que les valeurs pour ces 3 critères y sont aussi faibles.

- La zone de l'arganeraie ou zone 3 est peu vulnérable vis-à-vis du couvert végétal car les formations forestières couvrent une superficie relativement importante de la zone et ne risquent donc pas de disparaître du jour au lendemain. La zone est peu vulnérable en termes de terrains de culture mais elle est très vulnérable en termes de densité de la population. En effet, la zone de l'arganeraie est très habitée ce qui augmente la vulnérabilité à la désertification du fait du risque de rupture de l'équilibre homme - environnement. La zone de l'arganeraie est moyennement vulnérable vis-à-vis de la charge animale.
- La zone 4 ou de chaîne atlasique versant Nord en raison de son relief accidenté et de ses pentes abruptes, subit peu de défrichement de masse. Elle est donc peu vulnérable en termes de terrains de culture. Cependant, le bétail y est relativement important de même que la population qui va avec. Cette zone est donc moyennement vulnérable pour ces deux derniers.
- La zone 5 ou de plaines et plateaux Nord atlasiques est peu vulnérable pour le couvert végétal car la forêt et le matorral couvrent une superficie relativement importante de la zone. La zone est moyennement vulnérable par rapport aux terrains de culture. Elle est très vulnérable en termes de densité de la population et moyennement vulnérable vis-à-vis de la charge animale.
- La zone 6 ou de plaines et plateaux de l'Oriental est peu vulnérable face à tous les facteurs sauf pour le couvert végétal vis-à-vis duquel elle est moyennement vulnérable. Cela s'explique par le fait que la région de l'Oriental est semi-aride à aride en grande partie.
- La zone 7 ou de plaines agricoles du Gharb, comme son nom l'indique, est caractérisée par de vastes étendues de terrains de culture et de parcours pour le cheptel. Sa vulnérabilité est donc très élevée vis-à-vis de ces facteurs. Elle est moyenne en terme de couvert végétal car ce dernier est assez étendu malgré la densité de la population et les terrains de culture.
- La zone 8 ou de plaines agricoles du pré-rif et la chaîne rifaine étant aussi agricole mais beaucoup plus pastoral, elle est très vulnérable en terme de charge animal et de densité de la population mais peu vulnérable en ce qui concerne les terrains de cultures. Par ailleurs, les formations arborées y sont peu représentées car remplacées par les parcours principalement.

Tableau 8 : Valeur des différents indicateurs par zone homogène

Indicateurs	Zone saharienne	Zone pré-désertique	Arganeraie	Chaîne atlasique versant Nord	Plaines et plateaux Nord atlasiques	Plaines et plateaux de l'Oriental	Plaines agricoles du Gharb	Plaines agricoles du Prérif et la chaîne rifaine
Forêts and matorral (%)	0.40	1.80	52.30	60.20	40.20	25	37.70	18.70
Terrains de cultures (%)	0.80	2.10	5.80	10.90	27.30	7.30	52.70	4.30
Densité de la population (hab/km ²)	2.6	10.8	117.4	52.2	112.2	35.1	356.4	121.2
Charge animal (UPB/ha)	0.006	0.094	1.369	1.212	1.401	0.750	2.439	2.116

II-5-3- Evaluation de la vulnérabilité globale

D'une part, la vulnérabilité globale a été déterminée en calculant la vulnérabilité moyenne pour chaque zone sur la base de la vulnérabilité à chaque indicateur (Figure 11). D'autre part, la vulnérabilité globale a été déterminée en pondérant la vulnérabilité à chaque indicateur (Figure 12). Le poids de chaque indicateur calculé selon la méthode d'aide à la décision multicritère de Saaty est présenté dans le Tableau 9. Ce tableau montre que les terres cultivées et la charge animal ont les poids les plus élevés dans la caractérisation de la vulnérabilité à la désertification. En effet, les activités agricoles et le surpâturage sont les principales causes de dégradation des sols (Hillel & Rosenzweig, 2005 ; Bado & Bationo, 2018). La densité de population étant une cause indirecte de la désertification, son poids est inférieur à celui des terres cultivées et du taux de charge. Le couvert forestier et matorral n'est pas une cause de désertification mais sa dégradation l'est. Cette dégradation est principalement due aux activités humaines. Par conséquent, son poids sur la

vulnérabilité à la désertification est inférieur à celui des autres indicateurs. Cependant, selon la matrice de comparaison, le couvert forestier et matorral est extrêmement important par rapport à d'autres indicateurs (9 sur l'échelle de Saaty) car la désertification est une réduction irréversible du couvert végétal (Le Houérou, 1990).

Tableau 9 : Poids des différents indicateurs

Critères	Forêt + Matorral	Terrains de culture	Densité population (h/km ²)	Charge animale (UPB/ha)
Poids	0,054	0,555	0,155	0,227

La vulnérabilité globale évaluée par les deux méthodes a révélé que la zone saharienne et pré-désertique (zones 1 et 2) sont les zones les moins vulnérables car la densité de population et le taux de couverture végétale et agricole y sont faibles. La zone de l'arganeraie (zone 3), la chaîne atlasique versant Nord (zone 4) et les plaines agricoles du préif et la chaîne rifaine (zone 8) sont moyennement vulnérables. La vulnérabilité des Plaines et plateaux de l'Oriental (zone 6) est faible au niveau de la Figure 11, mais est moyenne avec la pondération (Figure 12). Les plaines et plateaux de l'Atlas du Nord (zone 5) sont moyennement vulnérables dans le premier cas (Figure 11), mais sont très vulnérables avec la pondération Figure 12. Enfin, les plaines agricoles du Gharb (zone 7) sont restées très vulnérables, peu importe la méthode utilisée (avec ou sans pondération).

L'évaluation de la vulnérabilité à la désertification, tout en combinant la vulnérabilité à divers indicateurs, a permis d'identifier les plaines agricoles du Gharb comme la zone la plus vulnérable du Maroc. Cette vulnérabilité est principalement due à la densité de population, qui est la plus élevée parmi les zones homogènes (356,4 habitants par km²). En effet, d'après plusieurs auteurs, la croissance démographique est le principal défi de la lutte contre la désertification au Maroc (Dregne, 1977 ; Mainguet, 1994 ; Katyal & Vlek, 2000). Cette croissance génère une augmentation de la demande et par conséquent, elle augmente la pression sur les écosystèmes. Il existe plusieurs types de pressions, à savoir la mécanisation agricole, l'occupation des terres forestières, l'urbanisation, le surpâturage, le défrichage, l'exploitation forestière et la récolte des produits forestiers (Benbrahim, et al., 2004 ; HCEFLCD, 2013). Ainsi, comme l'ont montré Nguyena et al.

(2016), les zones très vulnérables sont celles où se développent les activités socio-économiques, provoquant la destruction des forêts naturelles (Nguyena, et al., 2016).

La vulnérabilité de la Chaîne atlasique versant Nord (zone 4) est causée à la fois par la pression pastorale et l'érosion hydrique due au terrain accidenté et aux pentes abruptes (HCEFLCD, 2013 ; Elqaidi, 2016). Dans les Plaines agricoles du préif et la chaîne rifaine (Zone 8), la vulnérabilité est principalement due à l'érosion hydrique favorisée par un réseau hydrographique dense (El Garouani, et al., 2003 ; Tahiri, et al., 2017). La zone de l'arganeraie est un écosystème très sensible et vulnérable (M'hirit, et al., 1998 Tarrier & Benzyane, 2003 Nouaim, 2005 ; Naggar & Mhirit, 2006 ; Bellefontaine, 2010 ; Achour, et al., 2011). Sa dégradation est causée par la forte pression exercée d'une part, par la croissance démographique de la population locale qui surexploite l'arganier, étend les terrains de culture, et engendre le surpâturage (Achour, et al., 2011) ; et d'autre part, par les investisseurs étrangers qui surexploitent la terre par une agriculture intensive (Yann & Lambin, 2011). De plus, des nomades venant du sud et parfois de l'est, envahissent la forêt d'arganiers causant des dommages importants à l'écosystème (Naggar & Mhirit, 2006).

La méthode de la somme pondérée a montré que les Plaines et plateaux de l'Oriental (zone 6) sont aussi moyennement vulnérables comme les trois zones homogènes précédentes. Cela semble plus logique car la partie orientale du Maroc est soumise à une forte pression pastorale en raison du taux de charge animale, de la pauvreté des sols, de l'érosion éolienne et de la sécheresse (Maatougui, et al., 2011). Benbrahim et al. (2004) a également souligné ce surpâturage dans les plaines et les plateaux de l'Oriental.

La méthode de la somme pondérée a identifié les Plaines et plateaux Nord atlasiques comme très vulnérables. Nous avons mené une étude diachronique à El kelaa (une province de la région) pour évaluer la dynamique d'évolution des utilisations des terres (Sinsin, 2016). Cette étude a montré que les agglomérations se sont fortement étendues au cours des 28 dernières années (1 353,6 ha/an). De plus, les terres cultivées occupent une surface relativement grande dans les Plaines et plateaux Nord atlasiques. Par conséquent, la vulnérabilité évaluée par la méthode de la somme pondérée est plus proche de la réalité observée sur le terrain.

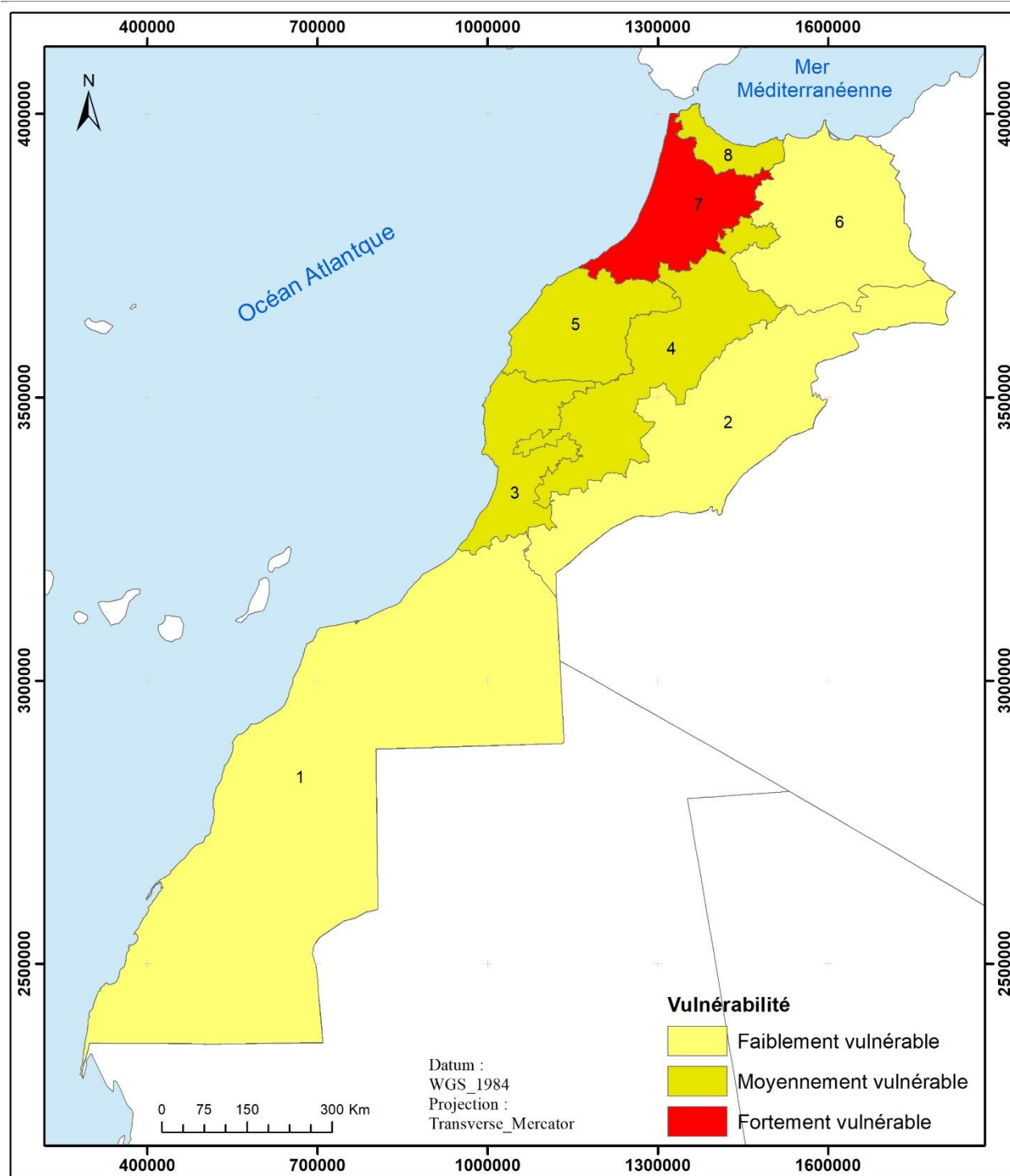


Figure 11 : Vulnérabilité des zones homogènes sans pondération des indicateurs

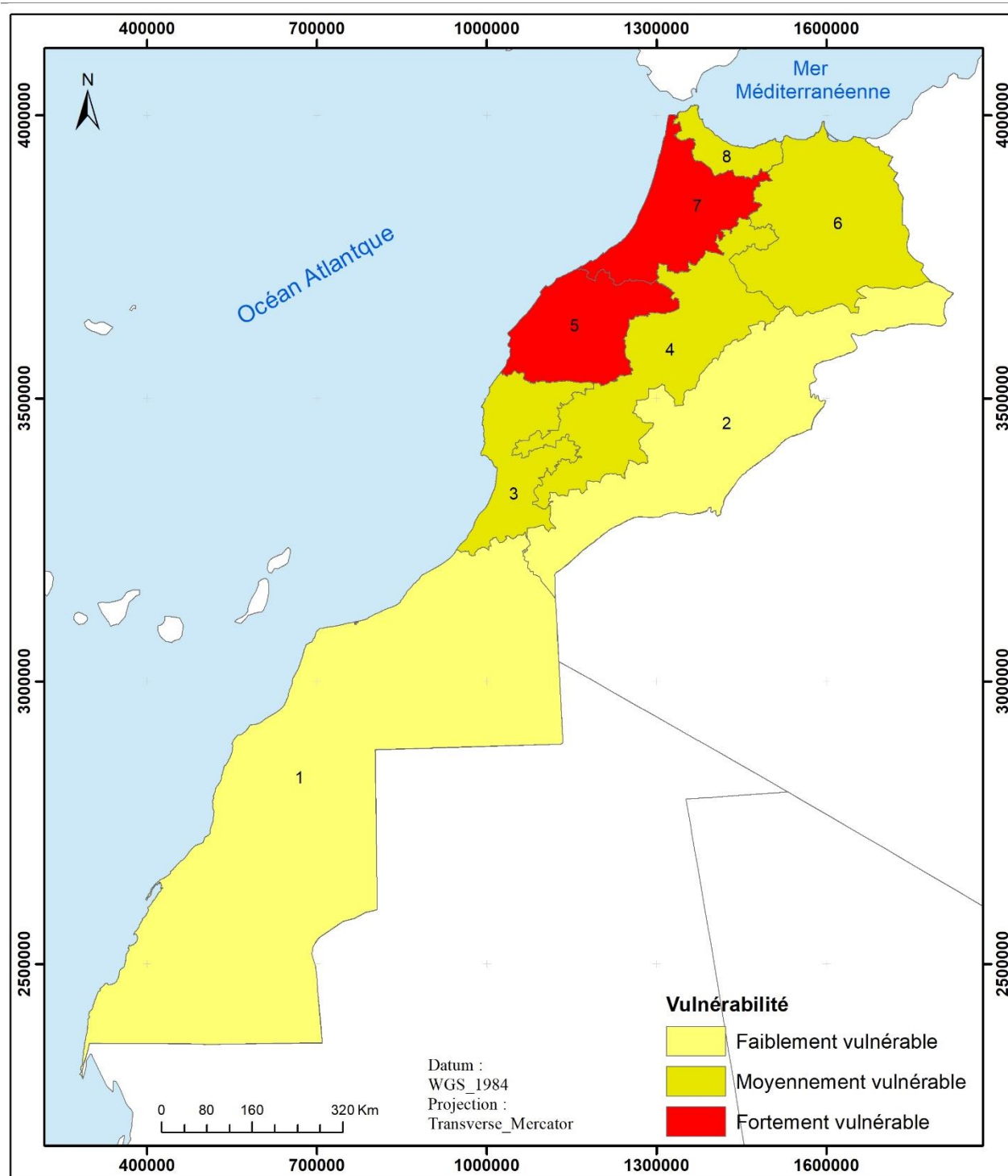


Figure 12 : Vulnérabilité des zones homogènes avec pondération des indicateurs

II-6- Conclusion

D'une manière générale, la méthode de la somme pondérée utilisée pour déterminer la vulnérabilité à la désertification des zones dans cette étude combine la méthode d'analyse multicritère avec la caractérisation préliminaire des zones homogènes et implique des facteurs édaphiques, climatiques et anthropiques. Nguyena et Liou (2019) ont récemment mené une telle évaluation mais leur étude concerne le monde entier et ils n'ont pas utilisé la méthode d'analyse multicritère pour pondérer les indicateurs. Au Maroc, la méthode d'analyse multicritère a été testée avec succès dans d'autres études, notamment pour l'analyse de la vulnérabilité au changement climatique dans la forêt de Maamora (Belghazi & Mounir, 2016). Cependant, cette méthode n'a jamais été utilisée pour évaluer la vulnérabilité à grande échelle et dans des zones écologiquement hétérogènes (comme un pays par exemple).

Néanmoins, la méthode de la somme pondérée utilisée pour évaluer la vulnérabilité à la désertification dans cette étude présente un problème de subjectivité. En effet, les valeurs seuils définies pour catégoriser les différentes zones nécessitent l'avis d'experts connaissant parfaitement la zone d'étude. Au Maroc, il n'y a pas de valeurs seuils prédéfinies et validées à l'échelle nationale pour les différents indicateurs considérés. Par conséquent, les seuils définis dans cette étude pourraient servir de base à de futurs travaux, qui pourraient se concentrer sur la recherche de solutions adaptées au contexte spécifique de chaque zone homogène. De plus, seuls quatre indicateurs ont été évalués dans cette étude en raison de la difficulté à trouver des données officielles pour évaluer leurs seuils. De plus, la méthode nécessite des connaissances dans plusieurs domaines. Il s'agit d'une approche multidisciplinaire combinant des connaissances et des compétences liées à la biophysique, la socio-économie, l'environnement (géographie, écologie, paysage et aménagement du territoire), l'informatique, les statistiques et les mathématiques.

Chapitre III : Analyse des dynamiques spatio-temporelles

III-1- Analyse comparative de la dynamique spatio-temporelle dans les écosystèmes d'arganiers suivant le gradient de pente, Sud-Ouest Marocain

III-1-1- Introduction

Le Maroc, avec 93% de son territoire sous climat aride ou semi-aride (FAO, 2017), souffre du phénomène de désertification qui affecte toutes ses régions (Sinsin, 2018). Cela justifie en grande partie l'utilité de suivre et de modéliser l'évolution de ce phénomène afin de solutionner les problèmes liés à la dégradation des terres dont est victime la population locale surtout dans les écosystèmes très vulnérables tels que l'arganeraie. En effet, la population locale de cette région estimée à plus de deux millions d'habitants dont 60% en milieu rural (d'après le recensement de 2014), dépend essentiellement des produits fournis par ces écosystèmes que sont : les amandes des graines d'arganiers pour la production d'huile qui est utilisée dans le cosmétique et possède de nombreuses vertus thérapeutiques (Charrouf, 1998 ; Moukal, 2004) ; les feuilles, la pulpe et le tourteau (résidu de l'extraction de l'huile) qui sont utilisés comme fourrage pour le bétail (Elbaz, 2016) ; le bois qui fournit un excellent charbon (Bencheikroun & Buttoud, 1989) ; enfin, les racines bien développées et profondes, qui protègent le sol contre l'érosion.

Ainsi, l'arganier est utilisé dans de nombreux domaines qui vont de la médecine à l'alimentation en passant par le cosmétique (Charrouf, 1998 ; M'hirit, et al., 1998 ; Moukal, 2004). Cela a tendance à accentuer les pressions sur l'arganeraie dont le rendement semble s'amenuiser au fil du temps (Bouzemouri, 2007). D'après une étude faite en 2007, l'arganeraie perd en moyenne environ 600 ha par an (Bouzemouri, 2007). Une étude plus récente a relevé que l'arganeraie a perdu 5 % de sa superficie entre 1987 et 2014, soit 1 911 ha par an (Jourrane, 2015). Cette dégradation est due principalement aux activités humaines (expansion des cultures, coupe excessive et surpâturage) qui sont les principales causes de la désertification surtout lorsque le climat tend vers l'aride.

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que l'étendue de la dégradation n'est pas identique dans tout l'écosystème de l'arganier (Tarrier & Benzyane, 2003 ; Tarrier & Delacre, 2007 ; Demoulin, 2008). Cela nous a poussé à conduire cette étude comparative de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol entre l'arganeraie de plaine (ou plateau) et celle de montagne, à Essaouira où le bioclimat est principalement semi-aride et à Tiznit où le bioclimat est aride voire désertique.

III-1-2- Zones d'étude

D'après le Haut-commissariat aux Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD), la zone de l'arganeraie s'étend sur 3 437 004 ha et touche les provinces de : Tiznit, Chtouka-Ait Baha, Inezgane-Ait Melloul, Agadir-Ida ou Tanana, Essaouira, Taroudant Sud, Chichaoua et Marrakech (HCEFLCD, 2013). La province de Essaouira et de Tiznit représentant respectivement la limite nord et sud de la zone de l'arganeraie, ont été choisies pour étudier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol.

1- les écosystèmes d'arganiers

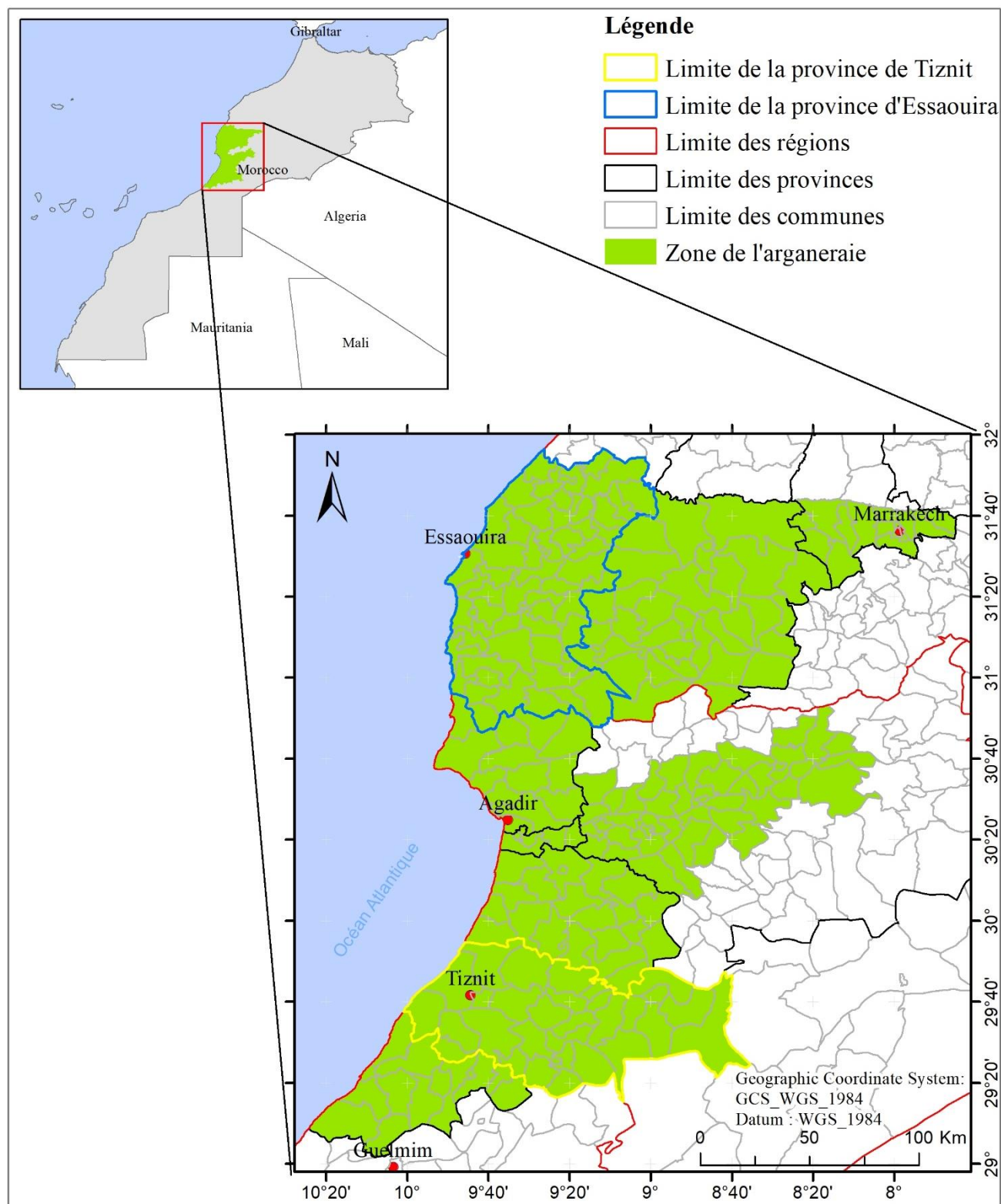


Figure 13 : Situation géographique de la zone de l'arganeraie³

³ Source : (HCEFLCD, 2013)

III-1-2-1- Etat de référence du milieu biophysique et humain de la province d'Essaouira

La province d'Essaouira occupe une superficie totale estimée à 649 126 ha. Elle est localisée dans la région de Marrakech-Safi et est limitée au Nord par la province de Safi, au Sud par la province d'Agadir, à l'Est par la province de Chichaoua et à l'Ouest par l'Océan atlantique. La province est composée de 57 communes, dont 5 communes urbaines (ou municipalités) et 52 communes rurales rattachées à 10 caïdats, eux-mêmes rattachés à 2 cercles : Essaouira et Tamanar.

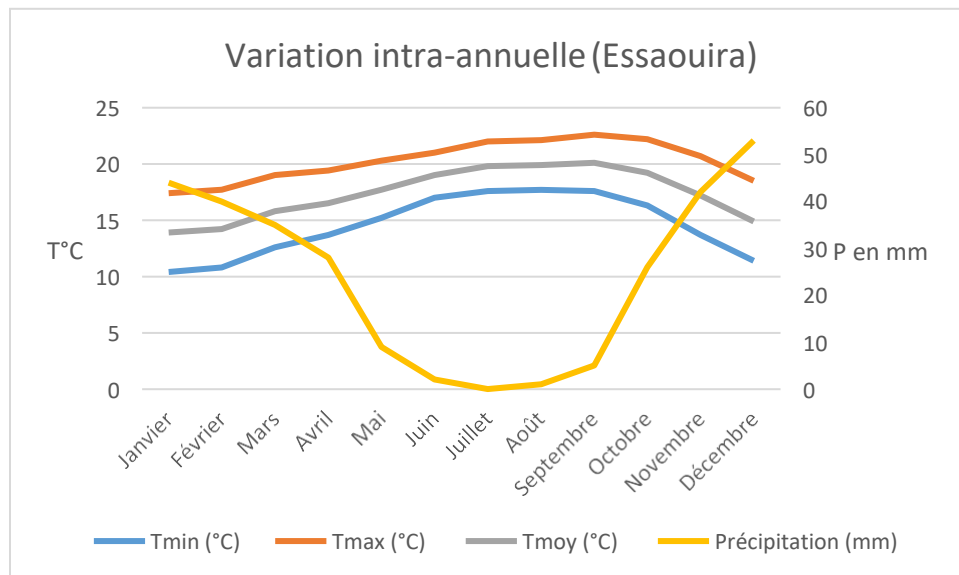
[illegible]

Thèse de Tudal E.M. SINSIN, 2021

➤ Milieu biophysique de la province d'Essaouira

- Le climat

La province d'Essaouira est sous un bioclimat principalement semi-aride. Les précipitations sont faibles tout au long de l'année. Selon la classification de Köppen-Geiger (Peel, et al., 2007), le climat est de type BSk. Il s'agit donc d'une zone subdésertique, caractérisée par une saison sèche s'étalant sur la plus grande partie de l'année et une saison humide avec de faibles précipitations. La température moyenne annuelle à Essaouira oscille autour de 17,35 °C. La moyenne des précipitations annuelles avoisine les 285 mm. Ces précipitations sont très irrégulières et ne dépassent pas les 300 mm/an.



(Source : Climate-Data.org⁴)

Figure 15 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Essaouira

Au cours de l'année, la température moyenne varie de 6,2 °C à Essaouira entre le mois le plus chaud (Septembre) et le mois le plus froid (Janvier). En effet, en Janvier les températures peuvent descendre jusqu'à 10 °C et monter à plus de 23 °C durant le mois de septembre. Les précipitations maximales tombent en décembre soient 53 mm de pluies.

⁴ Les données de Climate-Data.org proviennent de milliers de stations météorologiques du monde entier. Ces données météorologiques ont été recueillies entre 1982 et 2012.

- Le relief, le sol et la roche mère

La province présente une grande diversité sur le plan géologique. En effet, à l'Ouest, les formations qui prédominent sont les formations récentes de dunes, grès dunaires et calcaires coquillers. Le centre est dominé par des formations calcaires et marno-calcaires du Cénomaniens et du Turonien. Dans les bordures Nord et Sud affleurent les marnes de Crétacé inférieur, les marnes et marno-calcaires du secondaire et tertiaire et enfin, les calcaires du Jurassique et les formations du Permian. Cette diversité justifie la présence des différents types de relief qui s'alternent et se succèdent : dépressions, plateaux, relief en cuesta, vallées encaissées (ONEM, 1996).

De façon général, le relief est accidenté dans son ensemble et se présente sous trois (3) principaux types à savoir : les plateaux, les collines et un massif dunaire situé à l'est de la ville et le long de la côte. Le relief de la province d'Essaouira se compose donc d'une série de plateaux étagés. Ces plateaux sont orientés parallèlement au littoral suivant une direction méridienne (Wikipédia).

Le sol est essentiellement calcimagnésique et isohumique le long du littoral. Dans les dépressions et les plaines, on retrouve des sols peu évolués d'apport ; par contre au niveau des zones à fortes pentes ce sont les sols peu évolués d'érosion qui dominent (Figure 18).

1- les écosystèmes d'arganiers

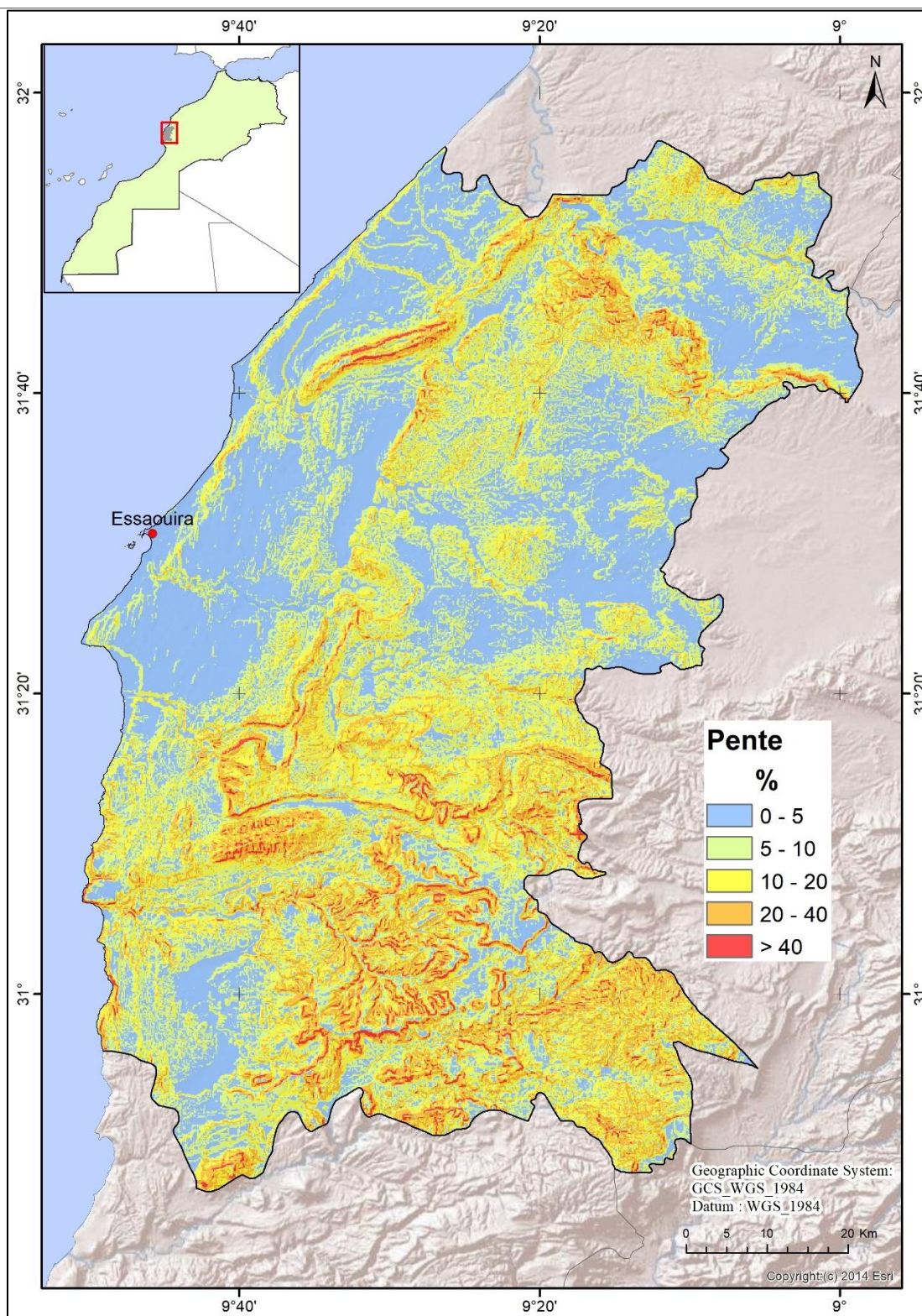


Figure 16 : Carte des pentes de la province d'Essaouira⁵

⁵ Source des données : Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'ASTER Global Digital Elevation Map (30 m résolution)

1- les écosystèmes d'arganiers

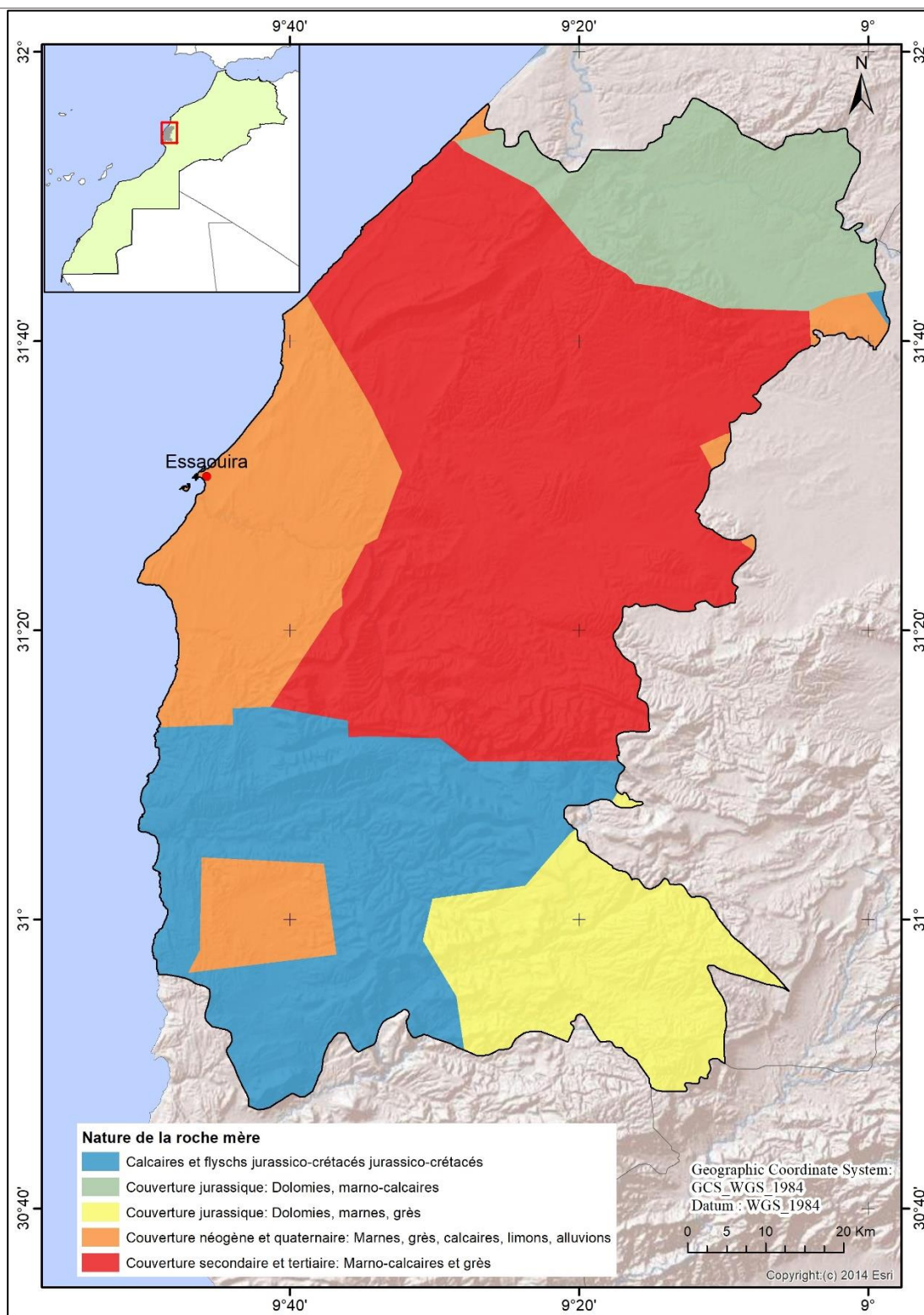


Figure 17 : Carte géologique de la province d'Essaouira⁶

⁶ Source des données : FAO

1- les écosystèmes d'arganiers

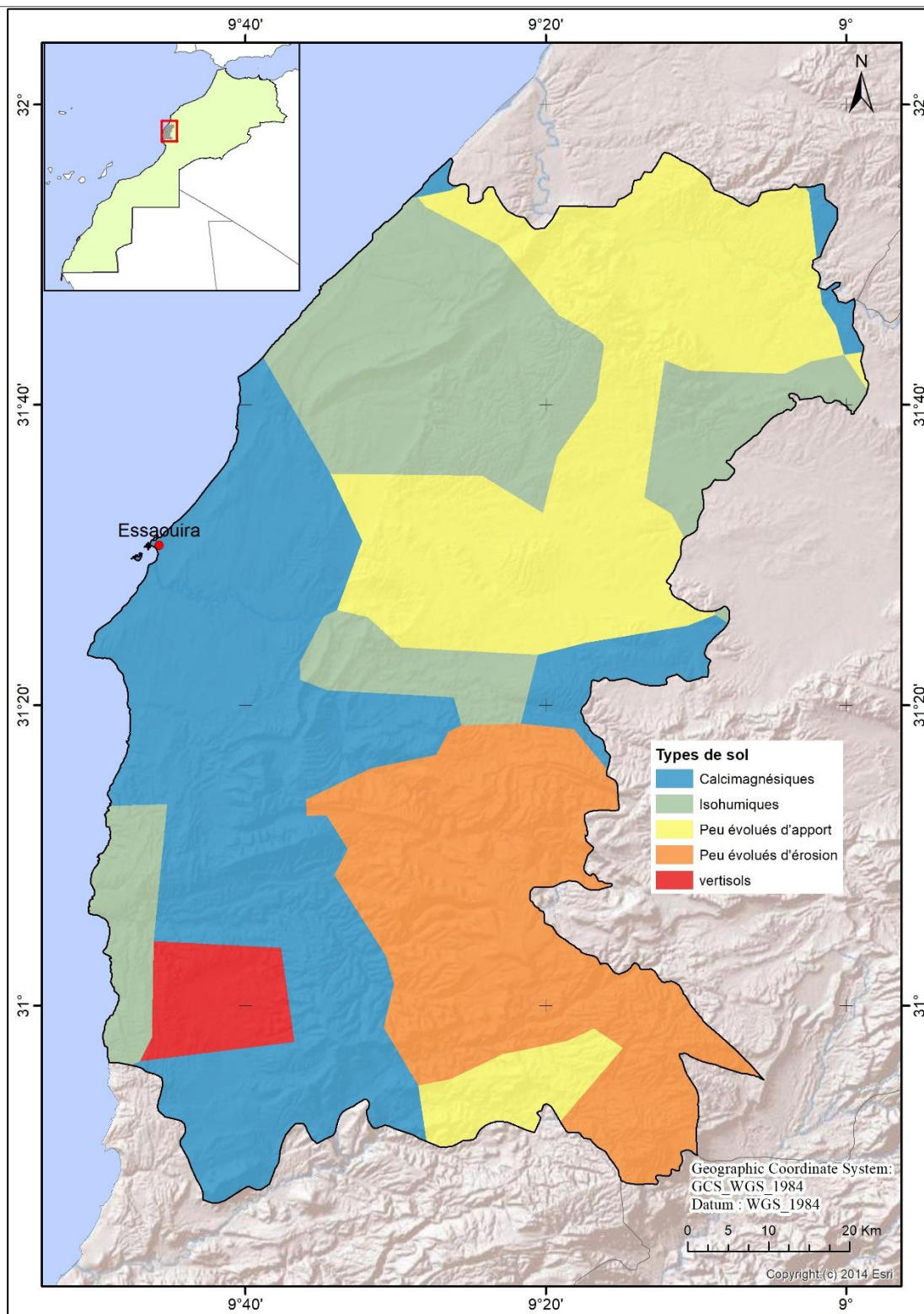


Figure 18 : Carte des types de sol de la province d'Essaouira⁷

⁷ Source des données : FAO

- Les ressources en eau

La province d'Essaouira est relativement bien pourvue en eau. En effet, d'après le Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, en 2012, 87 % de la population de la province d'Essaouira avaient accès à l'eau potable, et 98 % étaient raccordés au réseau d'assainissement.

Les eaux de surface

Le principal cours d'eau de la province d'Essaouira est représenté par l'Oued Ksob auxquels s'ajoutent quelques autres oueds. Le débit moyen de l'Oued Ksob est estimé à 1,44 m³/s. il prend sa source au niveau du Haut Atlas occidental et constitue le principal collecteur d'eau de la province. Les eaux de l'oued Ksob sont utilisées pour alimenter la population en eau potable et irriguer les terres agricoles⁸.

Pour garantir un stockage des eaux de crues et un approvisionnement continu en eau, la province dispose de lacs collinaires : Châaba Zouiker, Arbâa Takoucht, Châaba Harmoukia et de quelques barrages au nombre des quels⁹ :

- Le barrage Imin El Had construit en 1988 dans la commune de Tidzi, sert à l'irrigation de 300 ha et l'abreuvement du cheptel. Son bassin versant occupe une superficie de 16,4 Km².
- Le barrage de El Masmar se trouve dans la commune de Talmest. Il a été mis en service en 1989. L'aire du bassin versant est de 6,15 Km². Il fait office de recharge naturelle en eau et sert à l'irrigation et l'abreuvement du cheptel.
- Le barrage Igouzoulane mis en service en 2004. Il se localise dans la commune de Targante. Le bassin versant de ce barrage s'étend sur une aire de 403 km² et son débit annuel moyen est de 0,54 m³/s. il est destiné à l'alimentation en eau potable de Tamanar et à l'irrigation.
- Le barrage Talmest terminé en 2007 et construit sur l'oued Tensift.
- Le barrage Zerrar situé à 30 km d'Essaouira, a été achevé en 2013. Il est destiné à protéger la zone urbaine contre les inondations. Ce barrage devrait fournir d'ici 2030 de l'eau potable et irriguer 1 500 ha.

⁸ Monographie générale de la région de Marrakech-Safi, Ministère de l'Intérieur.

⁹ ABHT, 2005

Les eaux souterraines

Les principales sources souterraines viennent des nappes du Villafranchien et du Turonien qui se trouvent dans le bassin d'Essaouira. Les systèmes aquifères sont liés aux formations plio-quaternaires de la frange côtière et du Crétacé (ONEM, 1996). Le potentiel de ce bassin est évalué à 31 Mm³. En dehors du bassin d'Essaouira-Meskala, on retrouve les eaux du plateau d'Akermoud et bas Tensift qui circulent dans les calcaires marneux du Crétacé inférieur et du Jurassique, d'un potentiel évalué à 9 Mm³. La nappe phréatique de la province d'Essaouira présente un caractère discontinu avec des productivités relativement appréciables pour l'alimentation en eau de la province malgré la faible pluviométrie qui ne dépasse pas 260 à 300 mm par an (ElBerkaoui, 2012).

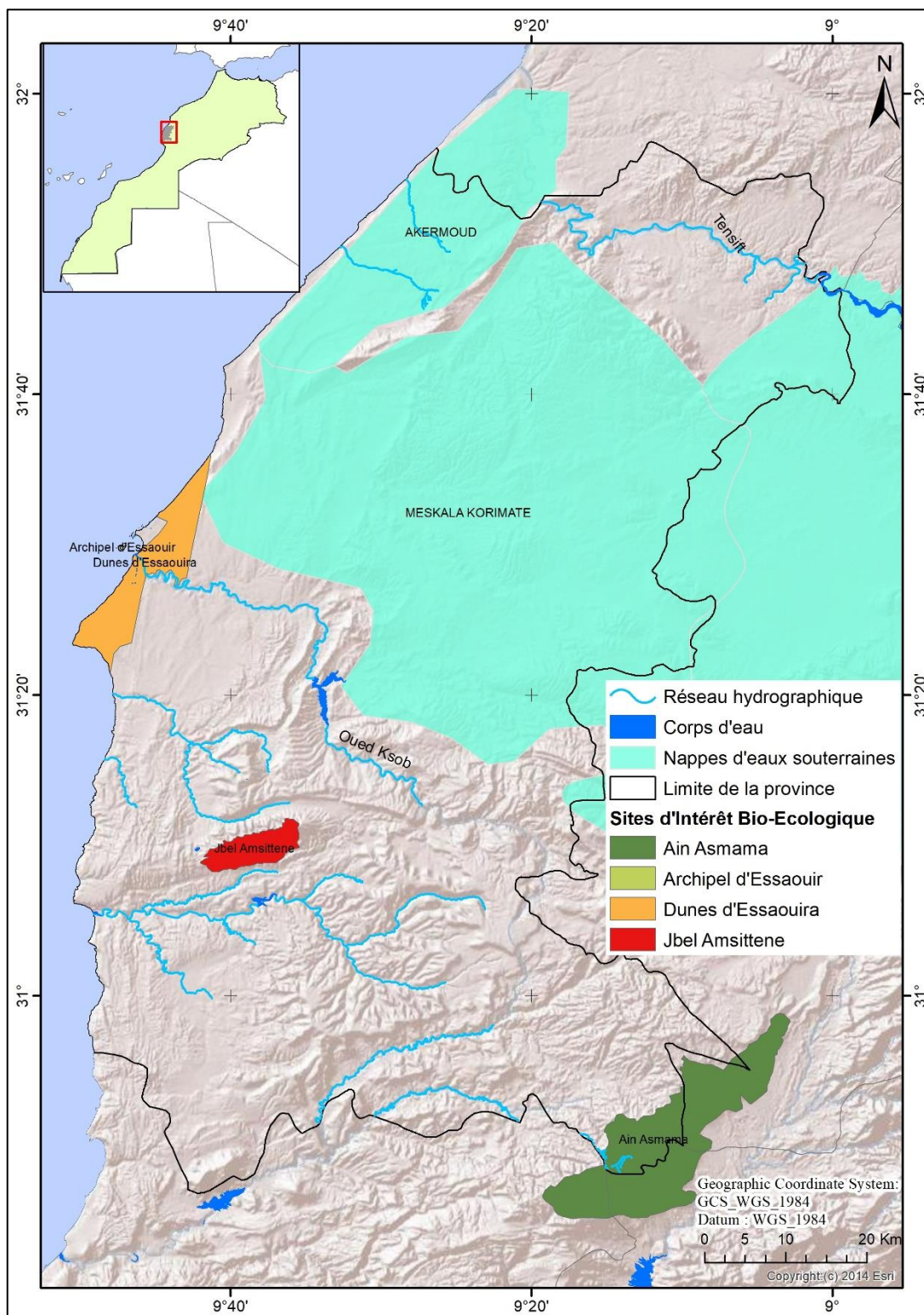


Figure 19 : Carte des points d'eau et SIBE de la province d'Essaouira¹⁰

¹⁰ Source des données : Centre d'Echange d'Information sur la Biodiversité du Maroc

- Le domaine forestier

La province d'Essaouira est parmi les provinces les plus boisées du Royaume ; son domaine forestier est dominé par l'arganier, le thuya, et le genévrier rouge et occupait en 2017 une superficie de 237 416 ha d'après la carte d'occupation du sol réalisée dans cette étude (Figure 23 page 86). On retrouve également d'autres espèces telles que le chêne vert et le caroubier. Ces formations forestières confèrent à la province d'Essaouira une biodiversité et un potentiel cynégétique exceptionnels. Avantagée par la présence du littoral sur toute la partie ouest, et de l'îlot de Mogador au large de la ville, la province constitue le lieu privilégié de nutrition et reproduction de plusieurs espèces notamment d'oiseaux.

D'une manière générale, on admet que la province d'Essaouira comprend 2 étages de végétation principaux, à savoir :

- Le Thermoméditerranéen ;
- L'Inframéditerranéen.

Le Thermoméditerranéen est caractérisé par un climat semi-aride continentale avec une pluviométrie faible (environ 250 mm par an) combinée à des températures élevées. Cet étage occupe la grande partie de la province d'Essaouira et est représenté par l'arganier.

L'Inframéditerranéen est sujet à un climat plus océanique à pluviométrie moyenne annuelle supérieur à 350 mm et des températures moyennes maximales moins élevées. Cet étage se retrouve le long de la frange côtière autour d'Essaouira où il est représenté par le Thuya et le Genévrier rouge.

Par ailleurs, on estime à partir de la Figure 19 (page 81) que la superficie des zones humides est égale à 11 744 ha et la superficie totale des airs protégés est égale à 9 000 ha.

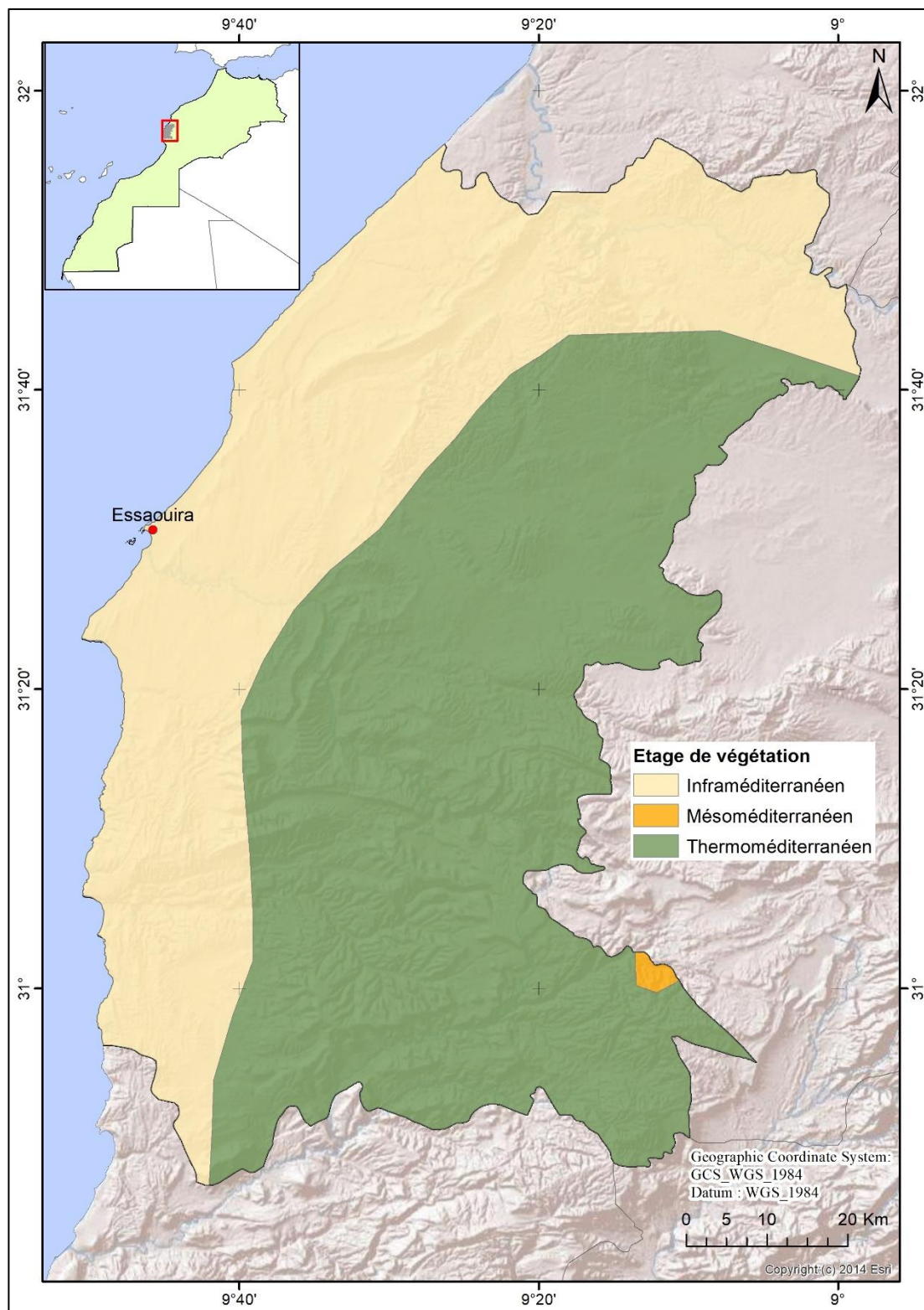


Figure 20 : Carte des étages de végétation¹¹

¹¹ Source : Emberger, 1955

1- les écosystèmes d'arganiers

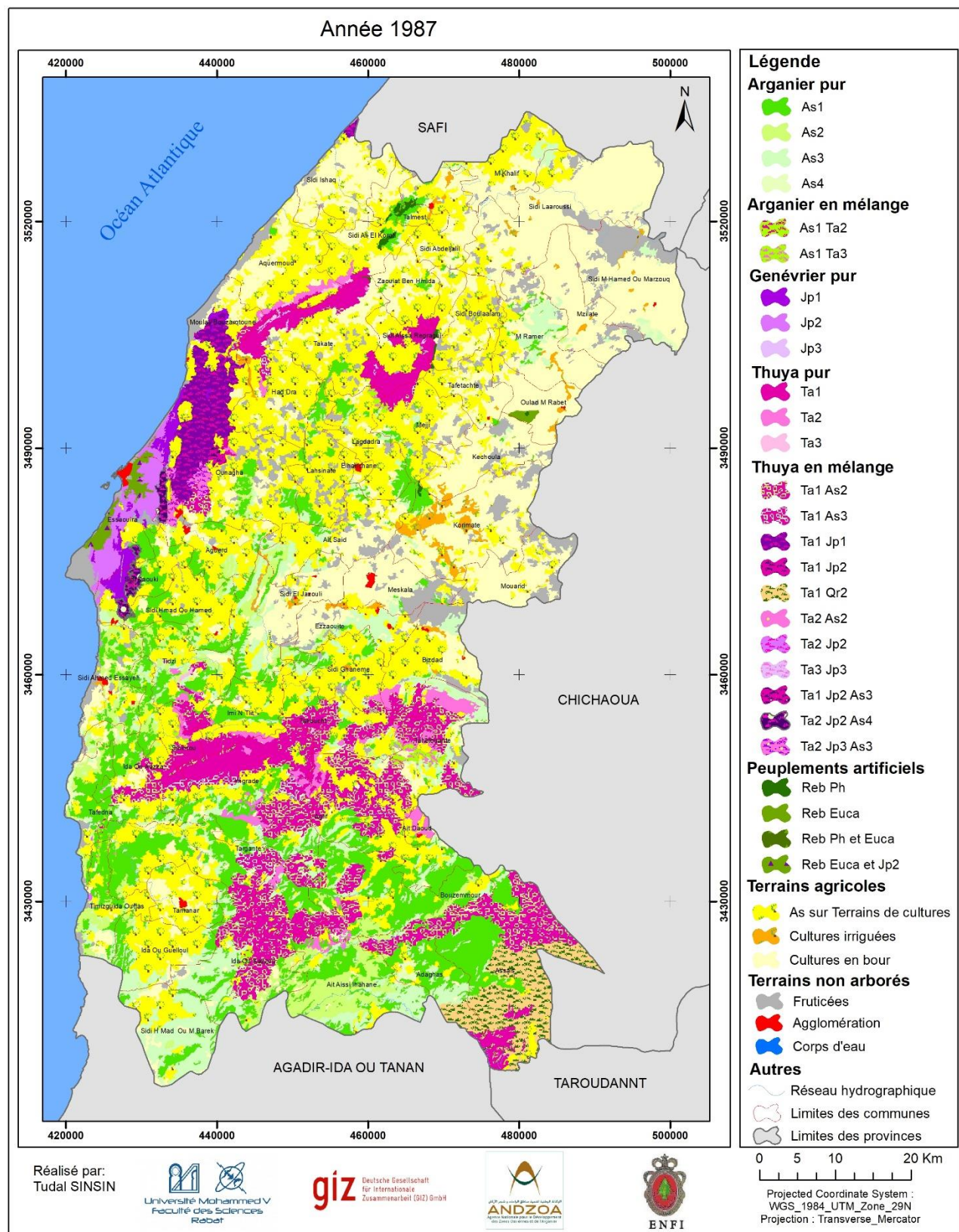


Figure 21 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 1987

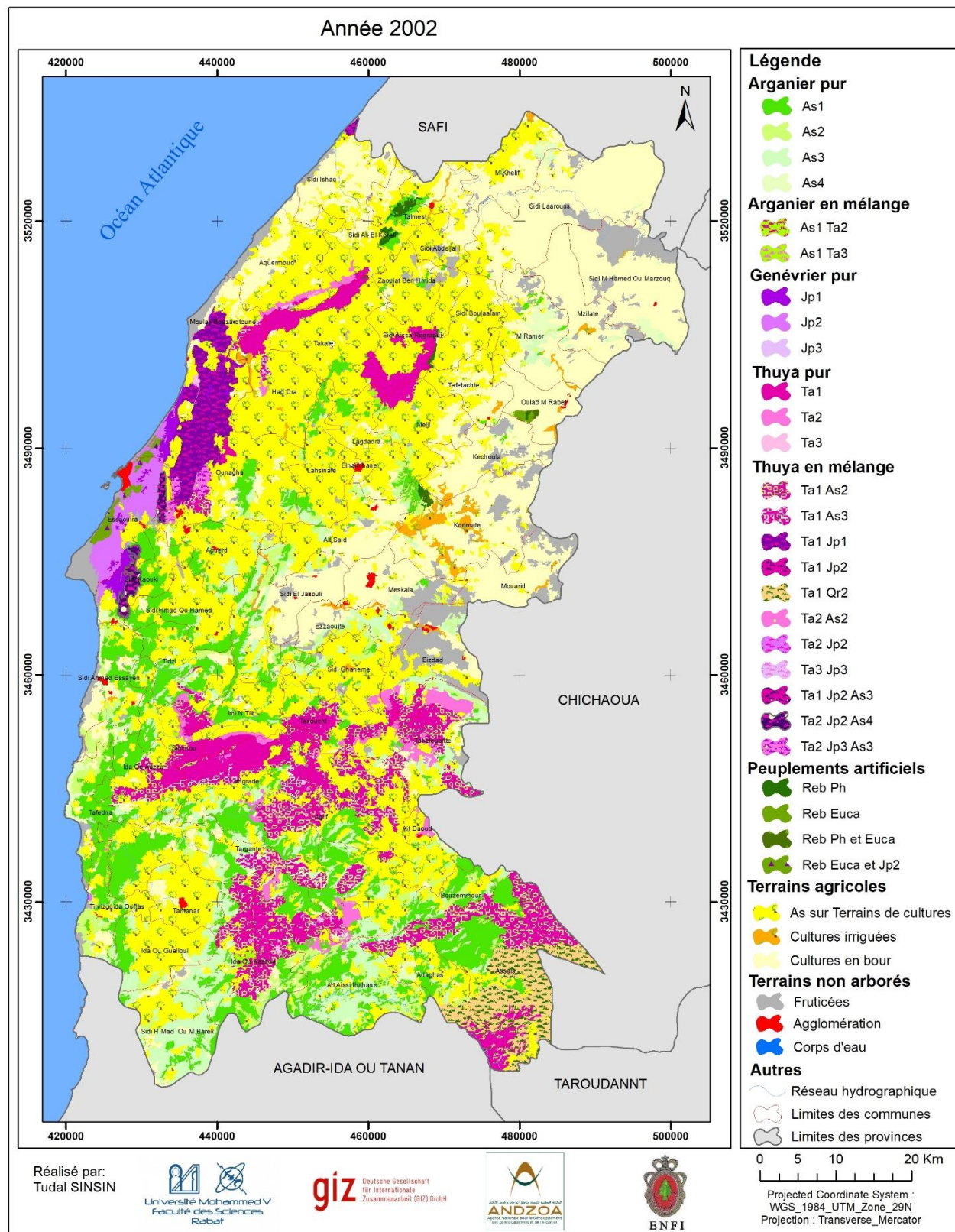


Figure 22 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 2002

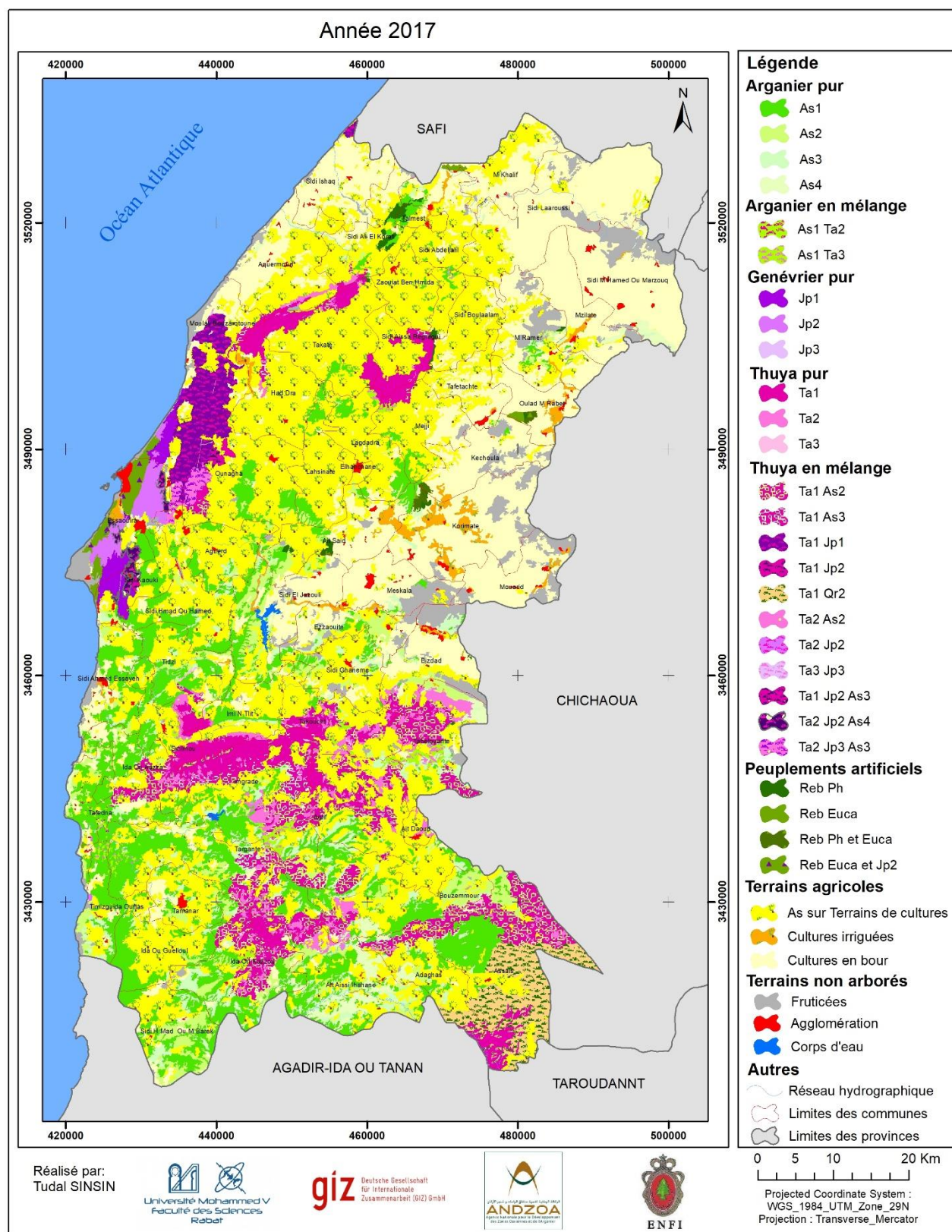


Figure 23 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Essaouira en 2017

➤ Milieu socio-économique de la province d'Essaouira

- La population

D'après le recensement de 2014, la population d'Essaouira était de 450 527 habitants dont 106 515 urbains et 344 012 ruraux. La population urbaine est concentrée au niveau de la ville d'Essaouira où résident 77 966 habitants. La population rurale quant à elle est très dispersée. La langue la plus parlée à Essaouira est le tamazight et d'une manière générale, la population d'Essaouira est répartie inégalement entre la frange côtière (Akermoud, bas Tensift, Ksob) et la montagne (Jbel Hadid et Kourati). La province possède la croissance démographique la plus faible de tout le sud-ouest marocain (El Wahidi et al., 2014). Le taux d'accroissement annuel de la population rurale était négatif entre 1994 et 2004 (- 0,02 %). Cela peut être expliqué par l'exode rural des jeunes vers la ville ou d'autres régions du royaume. Entre 2004 et 2014, cet exode était encore plus prononcé. En effet, même si la population totale de la province a légèrement augmenté, la population rurale a diminué de 7 251 habitants (HCP, 2014).

- L'agriculture et l'élevage

La province d'Essaouira peut être séparée en deux zones agricoles distinctes : une zone de plaine et plateau au nord qui s'étend sur plus de la moitié de la superficie agricole, avec une dominance de la céréaliculture, l'oléiculture, l'élevage (bovins et ovins), et une zone montagneuse de Haha plus au sud, avec une dominance de l'arganier, du caroubier, de l'apiculture et de l'élevage de caprins.

La campagne agricole 2014-2015, a indiqué que la principale production végétale demeure céréalière avec principalement l'orge, le maïs, le blé tendre et le blé dur. L'arboriculture vient en deuxième position avec une prédominance de l'arganier, de l'olivier, de l'amandier et la vigne.

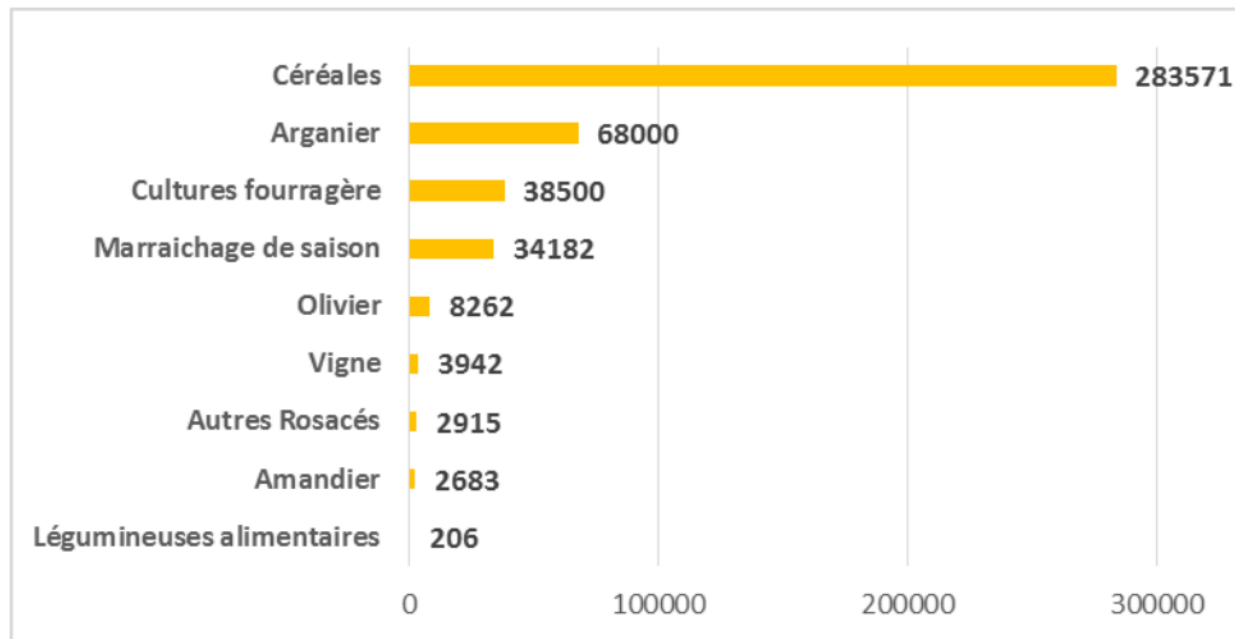


Figure 24 : Répartition des productions agricoles au titre de la campagne agricole 2014-2015

- La pêche

La province d'Essaouira est bordée par 152 km de côtes qui lui confère un grand potentiel pour la pêche. La côte est exploitée principalement au niveau du port d'Essaouira. En effet, la production halieutique est assurée à hauteur de 75% par la pêche côtière. La pêche artisanale couvre elle, environ 25% tandis que le reste de la production (1%) dévolu principalement aux activités littorales¹². Les captures de la pêche côtière et artisanale du port d'Essaouira en 2019 sont évaluées à 10 883 tonnes¹³.

- L'artisanat

Le secteur de l'artisanat revêt un caractère très important dans la province d'Essaouira. En effet, selon la monographie de 2016, le secteur de l'artisanat emploie environ 31% de la population active de la province d'Essaouira, soit 14000 artisans qui travaillent dans la menuiserie, la Marqueterie,

¹² Monographie de la province d'Essaouira, 2016. Chambre de commerce, d'industrie et de services, de Marrakech Safi - annexe Essaouira

¹³ Département de la pêche maritime /mer en chiffres 2019

la Vannerie, la Bijouterie, le Tissage et l'Artisanat de Service¹⁴. L'artisanat constitue un grand atout au développement du secteur du tourisme et du commerce au niveau régional, national et international. On ne recense pas moins de 25 coopératives artisanales dans la province d'Essaouira¹⁵.

- Le tourisme

Essaouira dispose d'un potentiel touristique élevé avec ses nombreux atouts notamment naturels, historiques et culturels. Sur le plan historique et culturel, la province d'Essaouira est reconnue pour sa médina, inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 2001, son port et ses remparts. De plus, Essaouira est le lieu où s'organisent des événements culturels et artistiques tels que le festival Gnaoua, le printemps musical des Alizés ou le festival des Andalousies Atlantiques. Ces événements attirent de nombreux touristes. En outre, l'îlot de Mogador, l'huile d'argan et l'artisanat spécifique d'Essaouira sont autant de facteurs qui attirent les visiteurs. Ces derniers sont de plus en plus nombreux à visiter la ville avec un nombre des nuitées multiplié par 3 entre 2001 et 2013. En 2008, plus de 165 000 touristes ont été enregistré dans la ville d'Essaouira. En 2013, ce nombre de touristes s'est élevé à près de 180 000 touristes¹⁶.

- Les ressources minières

En 1985, a débutée la mise en exploitation du gisement de gaz à condensât de Toukimt qui a été suivie par la mise en exploitation du gisement de Meskala en 1987¹⁷. En effet, depuis quelques années, la zone de Meskala dans la province d'Essaouira fait l'objet de plusieurs campagnes de recherche afin de déterminer les potentialités de cette zone en hydrocarbures. En 2014, des travaux de forage du puits d'exploration pétrolière de Tamanar ont été lancés dans la commune d'Ida Ou Guelloul, relevant de la province d'Essaouira. Il existe d'autres substances non métalliques utiles, telles que les pierres ornementales et semi-précieuses qui ont un intérêt économique. Parmi les plus importantes, il y a lieu de citer les gisements de sables noirs de Sidi Kaouki. Notons aussi la

¹⁴ Monographie de la province d'Essaouira, 2016. Chambre de commerce, d'industrie et de services, de Marrakech Safi - annexe Essaouira

¹⁵ Direction Provinciale de l'Artisanat d'Essaouira (2015)

¹⁶ Centre Régional d'Investissement de Marrakech-Safi

¹⁷ ONHYM-Office Nationale des Hydrocarbures et des Mines

présence de la carrière d'Oued ksob située au sein du nouveau périmètre urbain d'Essaouira. On y extrait du tout-venant : sables, graviers et galets.

III-1-2-2- Etat de référence du milieu biophysique et humain de la province de Tiznit

La province de Tiznit appartient à la région de Souss-Massa. Elle est délimitée au Nord par les provinces de Chtouka-Aït Baha et Taroudant, à l'Est par la province de Tata, au Sud par les provinces de Tata et Sidi Ifni, et à l'Ouest par l'océan Atlantique. La province de Tiznit est composée de 25 communes, dont 2 communes urbaines à savoir : Tiznit (le chef-lieu) et Tafraout et 23 communes rurales rattachées à 10 caïdats, eux-mêmes rattachés à 3 cercles : Tafraout, Anezi et Tiznit.

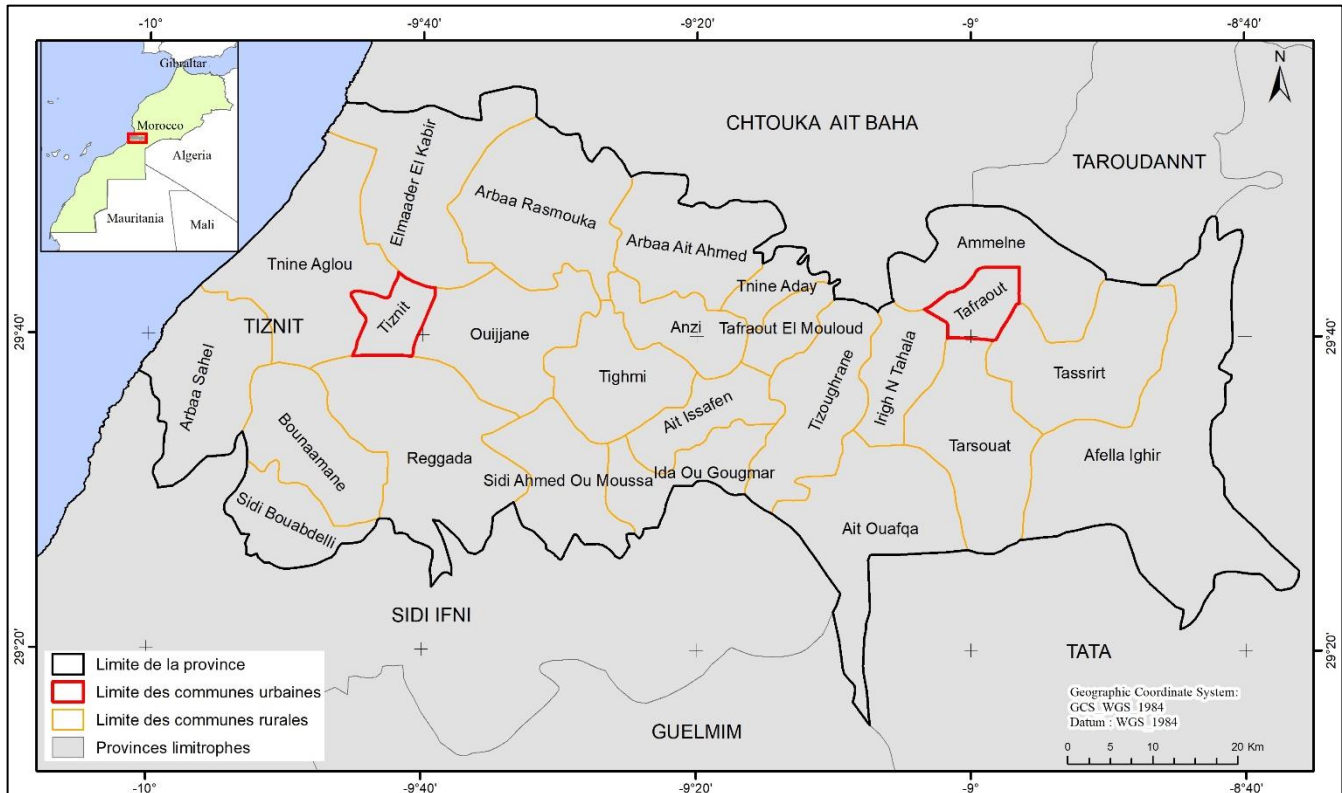
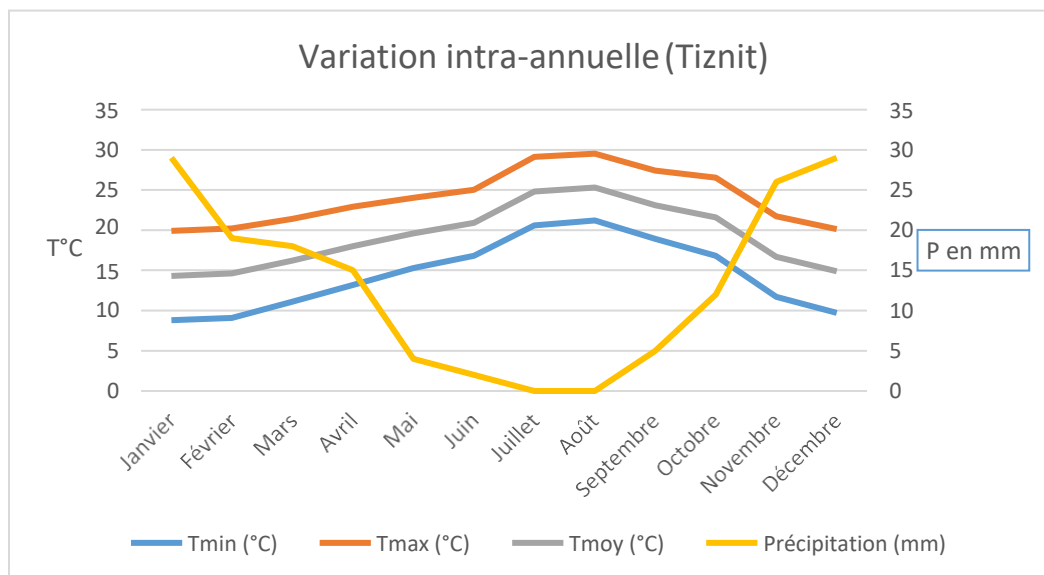


Figure 25 : Situation géographique et administrative de la province de Tiznit

➤ Milieu biophysique de la province de Tiznit

- Le climat

La province de Tiznit est caractérisée par un climat aride. Elle s'étend sur une superficie totale d'environ 502 339 ha. Les précipitations y sont très faibles. Il tombe en moyenne 159 mm par an et la température moyenne est plus ou moins égale à 19,2 °C en fonction des années. Selon la classification de Köppen-Geiger (Peel, et al., 2007), le climat est de type BWh. Il s'agit d'un climat désertique sec et chaud caractérisé par une sécheresse et une aridité permanente qui dure toute l'année et une rareté des pluies.



(Source : Climate-Data.org¹⁸)

Figure 26 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Tiznit

A Tiznit, le maximum de précipitations s'observe en janvier ou décembre. Au cours de ces mois, il tombe en moyenne 29 mm de pluies par mois. En Août, la température va au-delà des 25 °C. C'est le mois le plus chaud de l'année à Tiznit. En Janvier, les températures peuvent descendre jusqu'au environ de 14 °C.

¹⁸ Les données de Climate-Data.org proviennent de milliers de stations météorologiques du monde entier. Ces données météorologiques ont été recueillies entre 1982 et 2012.

- Le relief, le sol et la roche mère

Le relief est caractérisé par une vaste plaine située autour de la ville de Tiznit, appelé communément Azaghar. La plaine est limitée au Nord par les Oueds Massa et au Sud par Adoudou¹⁹. L'altitude ne dépasse pas les 400 m au niveau de cette plaine. Elle n'est que le prolongement de la plaine du Souss. Elle présente à l'ouest, des dépôts de sables dunaires meubles et consolidés. Au sud, la plaine est dominée par le plateau de Lakhssas. Plus au Sud et à l'Est de la province, au niveau des cercles d'Anezi et de Tafraout, se dresse la chaîne de montagne de l'Anti-Atlas occidental.

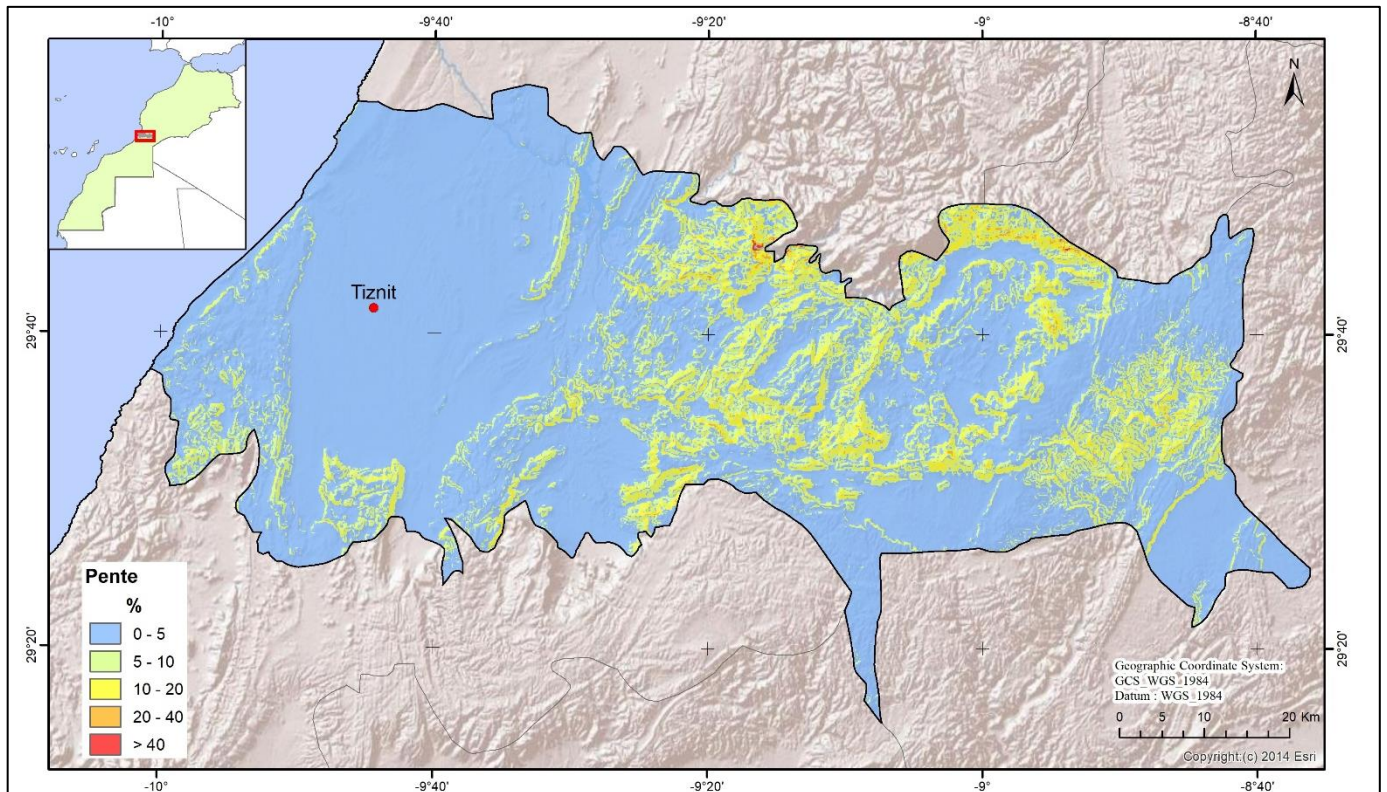


Figure 27 : Carte des pentes de la province de Tiznit²⁰

¹⁹ Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur

²⁰ Source des données : Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'ASTER Global Digital Elevation Map (30 m résolution)

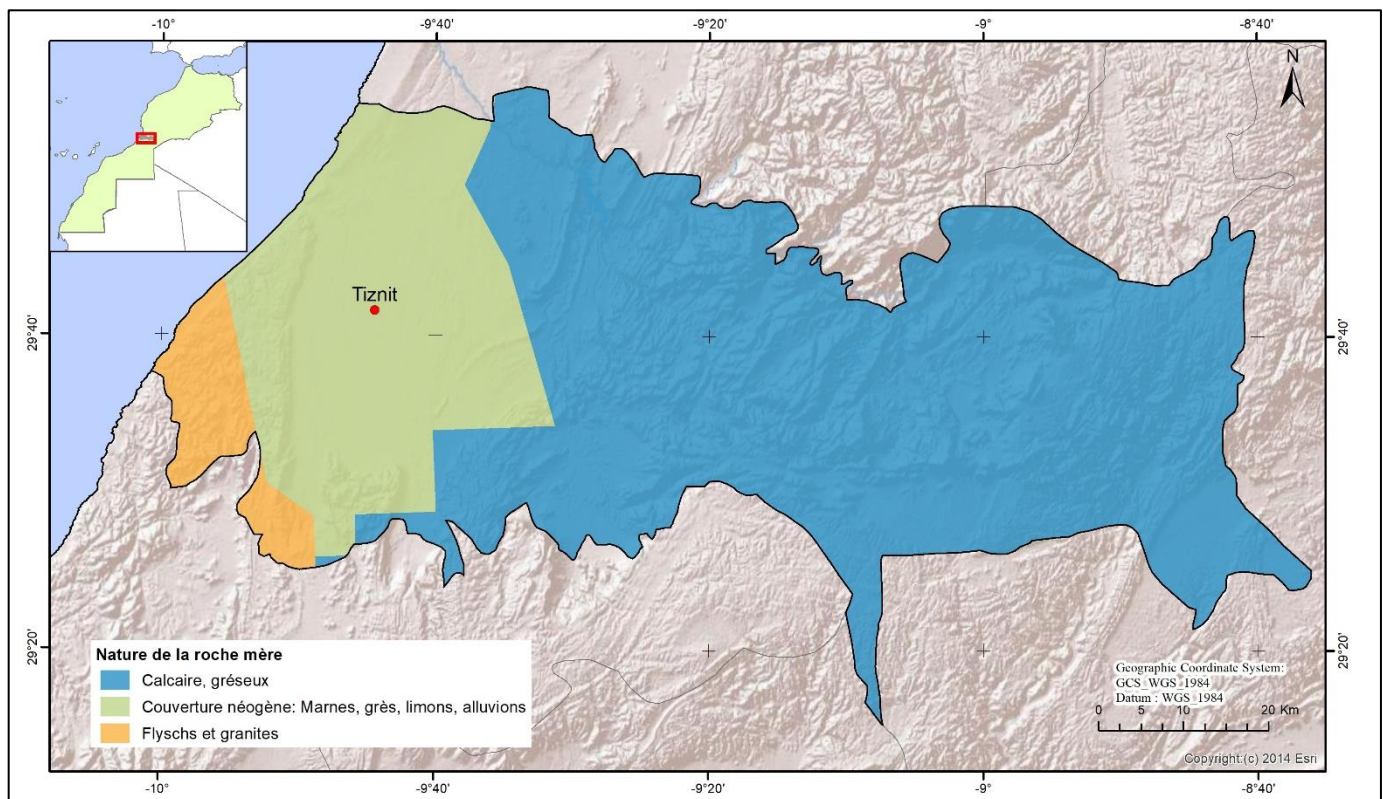


Figure 28 : Carte géologique de la province de Tiznit²¹

²¹ Source des données : FAO

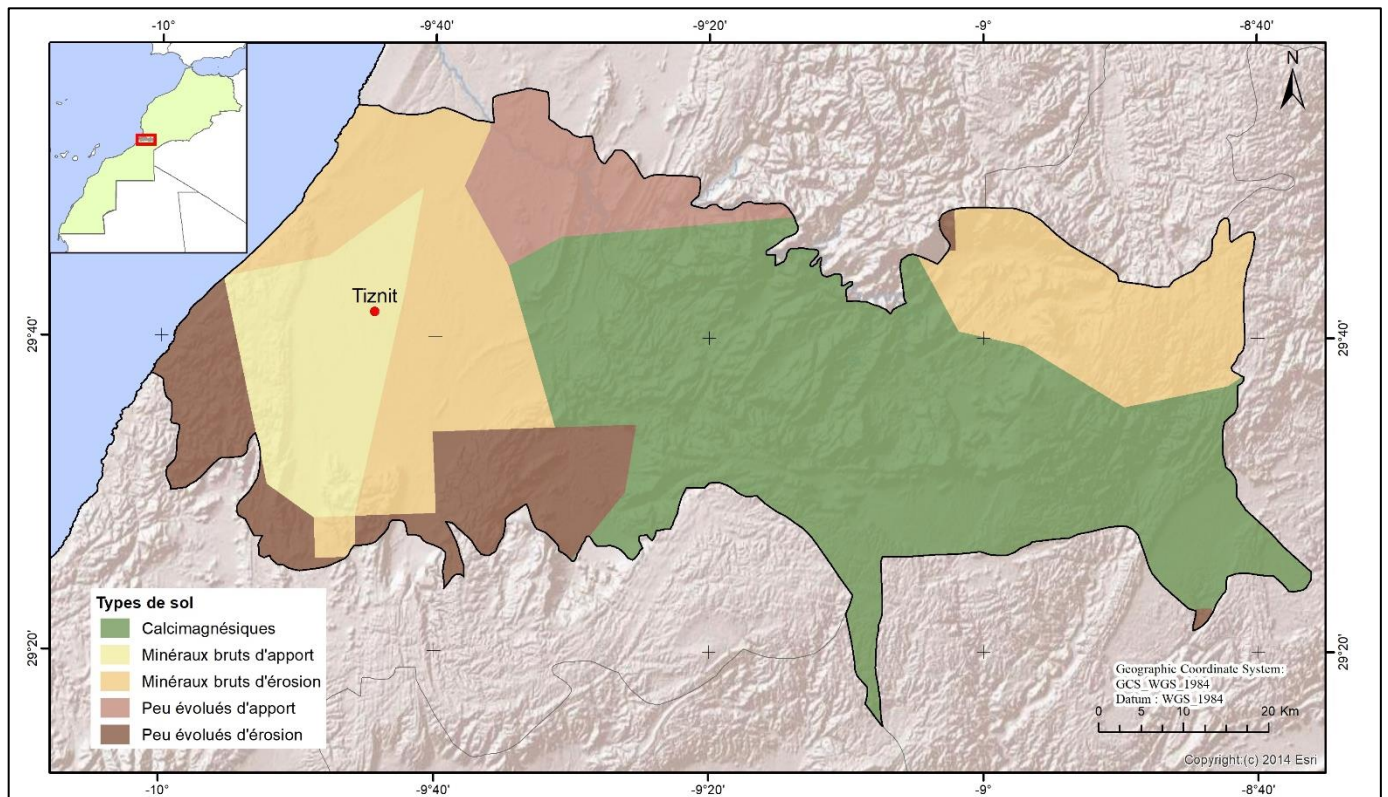


Figure 29 : Carte des types de sol de la province de Tiznit²²

- Les ressources en eau

La zone de montagne de la province de Tiznit ne dispose pas d'eau souterraine du fait de la présence de la boutonnière de Kerdous qui est constituée d'un socle schisto-granitique d'âge paléoprotérozoïque surmonté par une couverture d'âge néoprotérozoïque. Cela empêche la formation de nappes généralisées en montagne. Néanmoins, au niveau de la plaine, on retrouve de petites nappes généralisées mais leur productivité reste faible à cause de la rareté des précipitations. La province dispose aussi pour son approvisionnement en eau du barrage Youssef Ben Tachfin et de deux barrages collinaires²³. Le barrage Youssef Ben Tachfin est construit sur l'oued Massa et inauguré en 1972 dans le but irriguer la plaine des Chtouka. Les principaux cours d'eau qui traversent la province sont : l'Oued Massa, Assaka, Ait Ouihi, Tahala, et Tamanant.

²² Source des données : FAO

²³ Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur

- Le domaine forestier

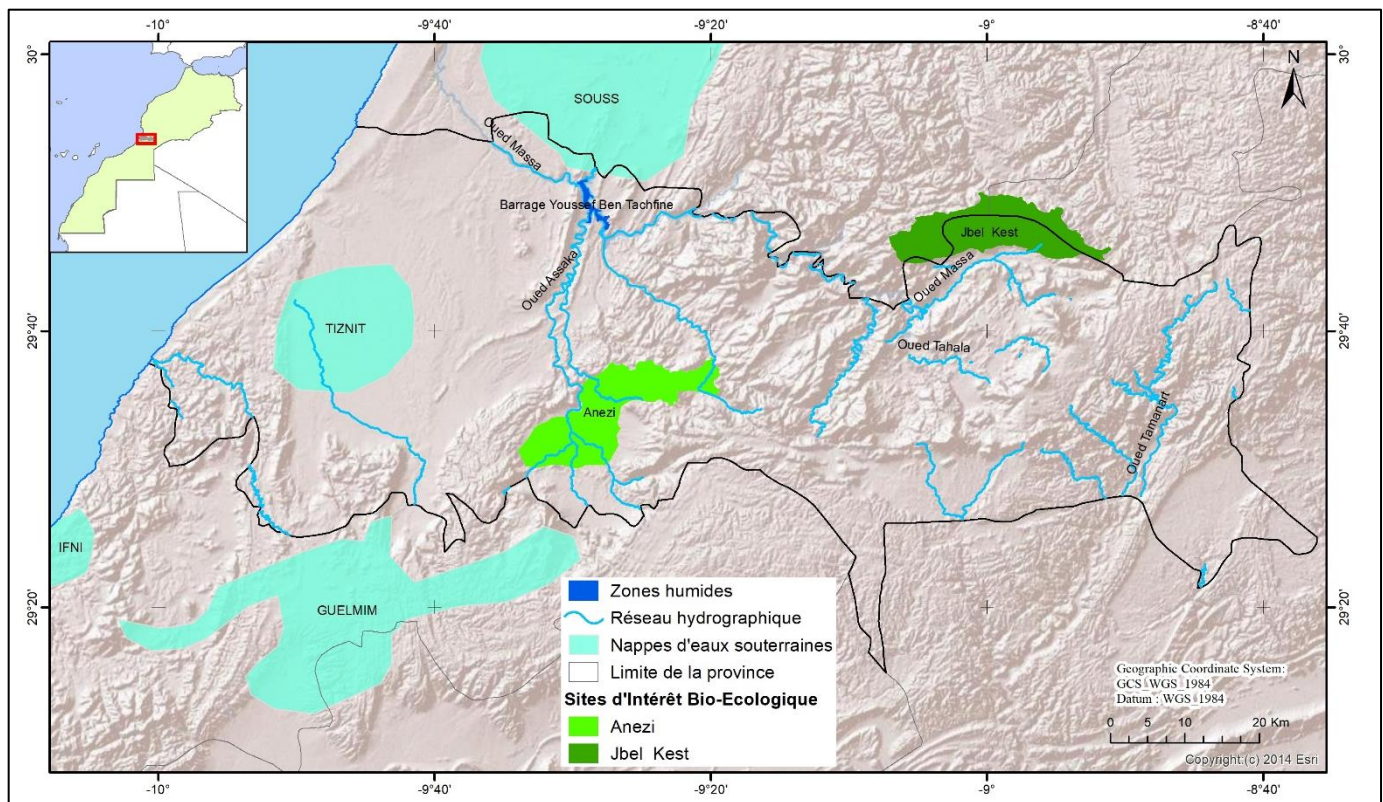
Les forêts naturelles de la province de Tiznit se composent à 94% d'Arganiers qui s'étendaient sur 164 434 ha en 2017 d'après la carte d'occupation du sol réalisée dans cette étude (Figure 33 page 99). Ces forêts naturelles sont concentrées surtout au niveau des cercles d'Anezi et Sidi Ifni. L'arganier se retrouve en mélange avec des essences secondaires telles que les Euphorbes, le Lentisque, le *Retama* et les Cistes. Le reste des formations forestières est à base de ces essences secondaires et est excepté de pieds d'arganiers. Il forme un matorral qui est également composé par endroit de reboisement de plantes fourragères (*Atriplex*) surtout dans la partie nord-ouest de la province.

Les forêts de Tiznit présentent une grande richesse faunistique de par la présence de la Gazèle cuvier, du Mouflon à manchettes et d'autres gibiers à plumes. Au niveau du barrage Youssef Ben Tachfin se retrouvent diverses espèces de poissons dont le Black-bass, la carpe chinoise et le Barbeau. Les forêts offrent également à la population locale du bois de feu, de l'argan pour la production d'huile, des espaces de parcours et des plantes fourragères pour le bétail²⁴.

En outre, la province présente deux sites d'intérêt biologique et écologique que sont :

- Le SIBE D'Anezi à 26 Km au Nord-Est de la ville de Tiznit
- Le SIBE Ait Er Kha à 38,5 Km au Sud-Est de la ville de Tiznit

¹² Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur



²⁵ Source des données : Centre d'Echange d'Information sur la Biodiversité du Maroc

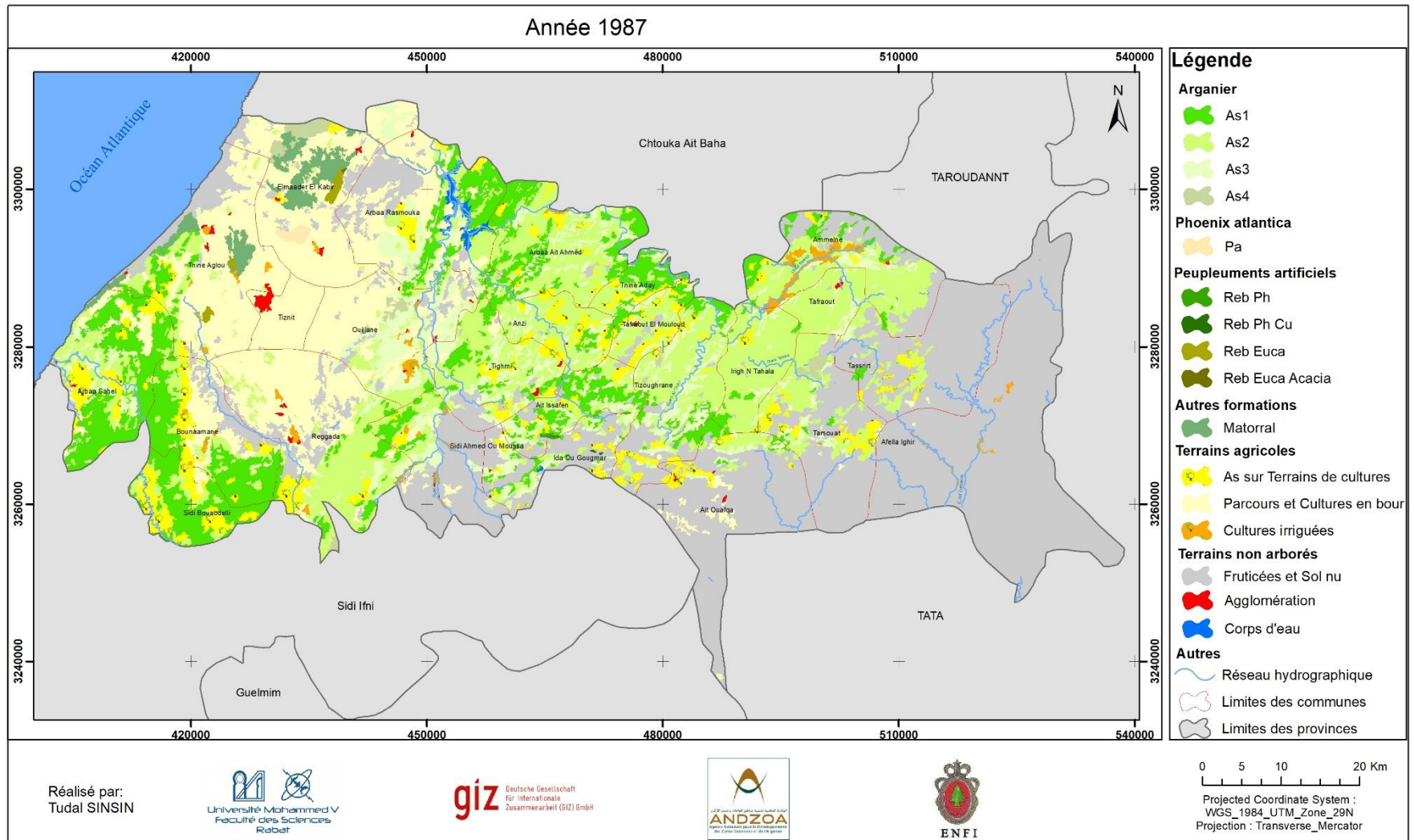


Figure 31 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 1987

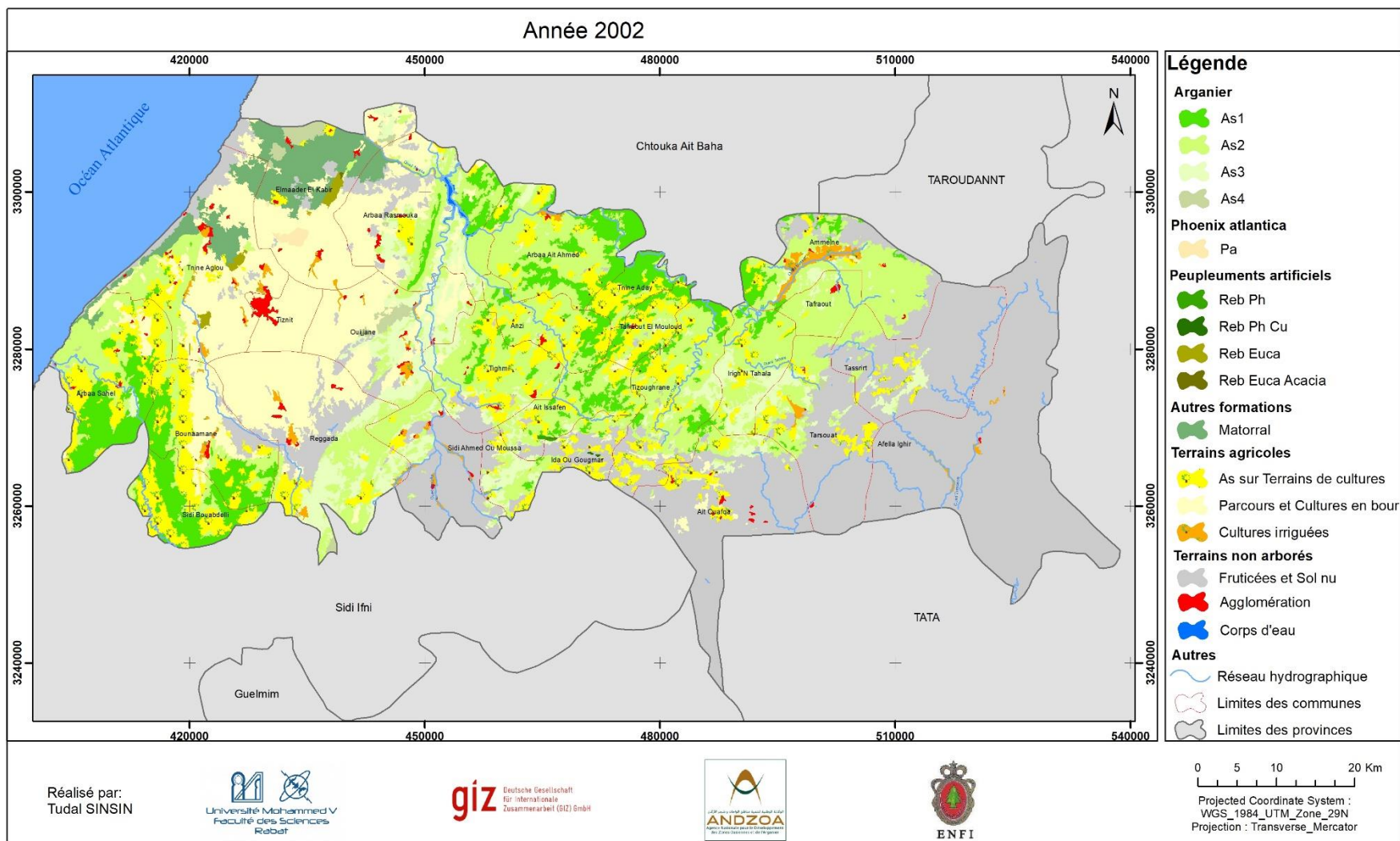


Figure 32 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 2002

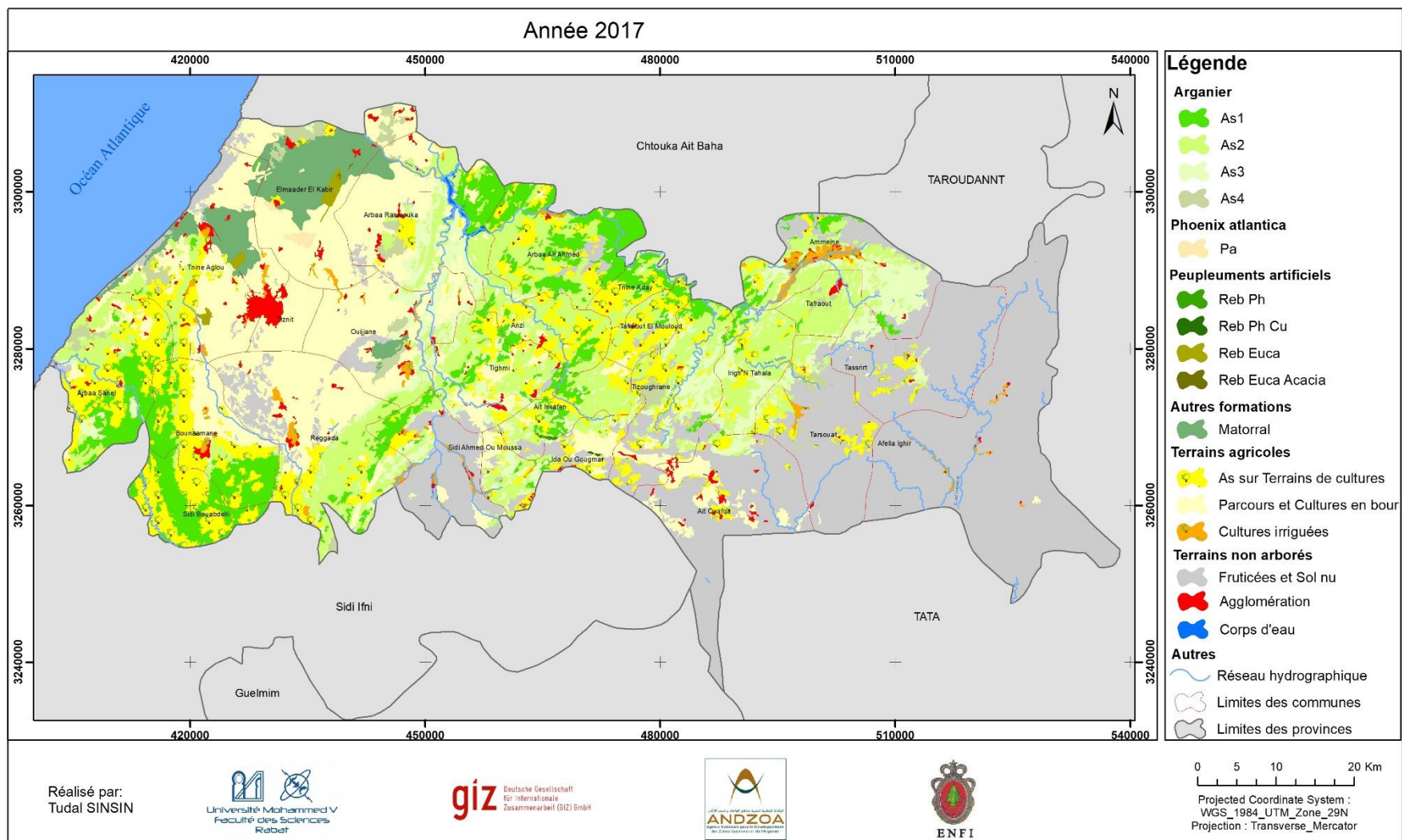


Figure 33 : Cartes d'occupation du sol de la province de Tiznit en 2017

➤ **Milieu socio-économique de la province de Tiznit**

- **La population**

La population de Tiznit est en majorité Berbère. La langue la plus parlée dans la région est le Tachelhit. Le recensement de 2014 a relevé 207 367 habitants dans la province dont 81 044 vivants en milieu urbain et le reste étant des ruraux. La ville de Tiznit (chef-lieu) regroupe à elle seule 36 % de la population totale de la province. La population de la province est à 35,9 % analphabète soient 22,1 % des urbains et 44,6 % des ruraux. L'exode rural est très prononcée dans la région. Entre 2004 et 2014, la population globale de la province s'est réduite de 7 560 habitants et 30 239 individus se sont déplacés du milieu rural vers le milieu urbain ou vers d'autres provinces. Tiznit est caractérisée par son climat particulièrement aride et son manque de ressources en eau pour le développement de l'agriculture. Cela induit notamment une forte migration de sa population surtout rurale vers les provinces avoisinantes.

- **L'agriculture et l'élevage**

L'agriculture est la principale activité de la province. Elle concerne près de 75% de la population et est essentiellement de type bour avec l'orge comme principale spéculation. Ainsi, la céréaliculture occupe 90 % des terres cultivées. En termes d'arboriculture, on note principalement la culture de l'amandier en montagne, de l'olivier, de l'arganier et le développement du palmier dattier au niveau des oasis. En plus de ces arbres fruitiers, on retrouve environ 11 000 ha de terrain cultivé avec des cactus dont la plus grande superficie se trouve dans la commune d'Arbaa Sahel (2 000 ha). L'agriculture irriguée est faiblement étendue et reste localisée autour des points d'eau et au fond des vallées. La province de Tiznit est aussi caractérisée par la bonne qualité de sa menthe²⁶.

L'élevage à Tiznit concerne principalement les ovins, les caprins et les bovins avec une légère prédominance des ovins. L'élevage de camelins et d'équidés est aussi pratiqué dans la province. La province de Tiznit dispose de quatre centres de collecte du lait à savoir²⁷ :

²⁶ Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur

²⁷ ONEE, 2016

- Le centre de collecte du lait de Tiznit.
- Deux centres de collecte du lait à Aït Oumribt.
- Le centre de collecte du lait d'ouijjan.

En ce qui concerne l'aviculture, en moyenne 9000 tonnes de viande blanche et 7200000 d'œufs sont produit annuellement dans la province de Tiznit. La province compte environ 4 582 ruches pour une production qui peut atteindre 14 tonnes de miel par an²⁸.

- La pêche

La province de Tiznit dispose depuis 1989 d'un port au niveau de la ville de Sidi Ifni. Ce port présente un grand intérêt social et économique pour la région. La pêche vient compléter l'agriculture et l'élevage qui ont du mal à se développer normalement en raison du manque de ressource en eau. La province est aussi équipée de trois (3) principaux points de débarquement : celui de Sidi Boulfadil, d'Aglou et de Grizime. Ces points de débarquement favorisent la dynamisation de l'économie en constituant des lieux de vente et de stockage de poissons et de matériels²⁹.

- L'artisanat

La présence de l'or et d'autres minéraux précieux couplée à un savoir-faire spécifique à la province de Tiznit permet à cette dernière de se doter d'une orfèvrerie et d'une argenterie riches et authentiques. En dehors de la bijouterie, les artisans excellent dans la poterie, la cordonnerie, la tannerie et la tapisserie. On dénombre plus de 1500 artisans dans la province. Ils sont organisés en 8 coopératives et 17 associations professionnelles voir plus³⁰.

La province dispose aussi d'un centre de formation professionnelle dont le but est d'initier les apprenants à la bijouterie. Cela est un moyen de préserver le savoir-faire local et de valoriser l'artisanat dans la province.

²⁸ Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur

²⁹ Idem

³⁰ Idem

- Le tourisme

Le potentiel touristique de Tiznit est très élevé notamment grâce à la présence dans la province d'une diversité de paysage naturel qui vont de l'océan aux montagnes en passant par la plaine, les oasis et les vallées. Cette diversité paysagère offre la possibilité de pratiquer différents types d'activités dont le tourisme balnéaire et de montagne. De plus, historiquement Tiznit a hérité de sites touristiques impressionnant à savoir : Les remparts de l'ancienne ville de Tiznit, la forteresse d'Ouijjane, les Ruines d'Illigh etc... La religion occupe une grande place dans la province et joue un rôle essentiel dans le tourisme. En effet, les Moussem organisés dans certaines localités de la province à certaine période de l'année attirent aussi de nombreuses personnes³¹.

- Les ressources minières

La diversité des formations géologiques confère à la province de Tiznit une richesse minéralogique importante. On retrouve entre autres l'or, le cuivre et le talc. Les deux premières ressources sont exploitées par la société Akka Gold Mining (AGM) et le talc est commercialisé par la société Ouisselsat-Mines³².

En termes de roche ornementale, la province de Tiznit dispose d'un gisement important de marbre localisé à Lakhssas, Aglou et Ait Ahmed.

Tableau 10 : Gisement de marbre dans la province de Tiznit

Localisation	Type de gisement
Lakhssas	Calcaires blancs, marmorisés rosâtres et verdâtres
Aglou	Calcaires noirs du cambrien inférieur
Aït Ahmed	Marbres verts

(Source : ONEE, 2016)

³¹ Monographie de la province de Tiznit, Ministère de l'Intérieur.

³² Idem

III-1-4- Résultats

III-1-4-1- Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol

A partir des cartes d'occupation du sol, les superficies par classe ont été déterminées et sont présentées dans les figures suivantes.

- Analyse de l'évolution de l'occupation du sol à Essaouira

Au cours des 30 dernières années les agglomérations n'ont pas cessé de s'étendre avec un rythme plus prononcé au cours de la dernière quinzaine d'années.

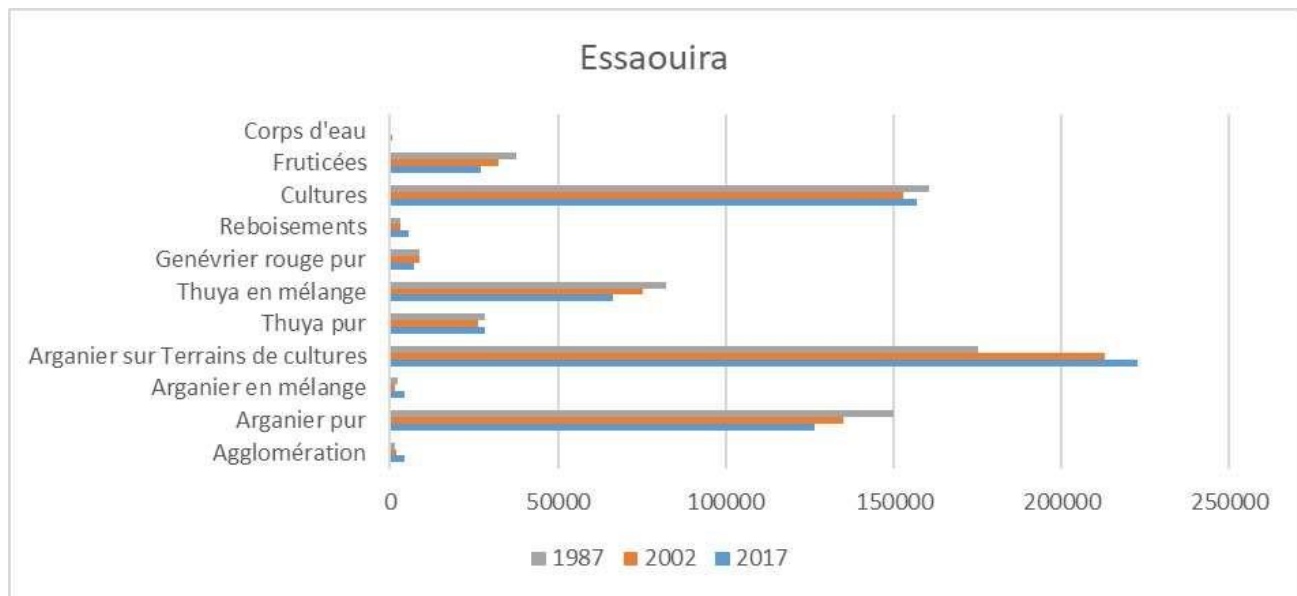


Figure 35 : Evolution de l'occupation du sol à Essaouira

En effet, la population de la province d'Essaouira est passée d'environ 318 070 habitants en 1994 à 447 279 habitants en 2004 puis à 450 527 habitants en 2014 (HCP), soit une augmentation de 7 178 habitants par an entre 1994 et 2004 et de 325 habitants par an entre 2004 et 2014. Il est à noter que le taux d'accroissement annuel de la population était relativement faible notamment en milieu rural (surtout entre 2004 et 2014). Cela peut être expliqué par l'exode rural des jeunes vers les villes ou d'autres régions du Maroc. Cette augmentation de la population couplée au regain d'intérêt porté à l'argan et à ses dérivés au cours des dernières années a conduit à la surexploitation de l'arganeraie. Cela a eu pour conséquence, l'augmentation de la superficie occupée par les

cultures sous arganier au détriment des formations forestières naturelles d'arganiers qui sont passée de 152 303 ha en 1987 à 136 325 ha en 2002, soit une perte d'environ 1065 ha/an. En effet, plus de 87% de la régression des formations forestières naturelles d'arganiers s'est fait au profit des cultures sous arganier. Cependant, grâce aux efforts conjugués de l'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'arganier (ANDZOA), du Haut-commissariat aux Eaux et forêts, de la Fédération nationale des ayant-droits usagers de l'arganeraie (FNADUA) et bien d'autres acteurs, force est de constater que le taux de régression des formations forestières d'arganiers est passé de 10% entre 1987 et 2002 à 4% entre 2002 et 2017, soit une perte d'environ 376 ha/an. Par ailleurs, l'arganiculture (ou arganier sur terrains de culture) a continué à s'étendre en passant de 175 113 ha en 1987 à 212 939 ha en 2002 puis à 222 649 ha en 2017. Cette progression s'est fait également au détriment des terrains de cultures qui ont diminué sur 3 426 ha en 30 ans. Cela témoigne d'une augmentation de la conversion des terrains de culture en arganiculture ces dernières années.

D'un autre côté, les reboisements ont connu une nette augmentation de leur superficie notamment les reboisements de Pins et d'Eucalyptus qui se sont étendus sur 2 147 ha supplémentaires en 30 ans. En outre, les fruticées ont régressé sur 10 483 ha au profit des autres classes. En ce qui concerne les corps d'eau, ils étaient représentés avant 2002 par le barrage Imin El Had et celui d'El Masmar dont la superficie du bassin versant n'occupe que respectivement 16,4 Km² et 6,15 Km². Cependant, par la suite, des barrages de plus grande envergure ont vu le jour. Il s'agit du barrage Igouzoulane qui a été mis en service en 2004 ; du barrage Talmest en 2007 et du barrage Zerrar en 2013.

- Analyse de l'évolution de l'occupation du sol à Tiznit

La principale remarque à Tiznit en terme de changement est la réduction quasi continue de la forêt d'arganiers qui a perdu près de 40 098 ha de sa superficie en 30 ans, soit 1 336 ha/an.

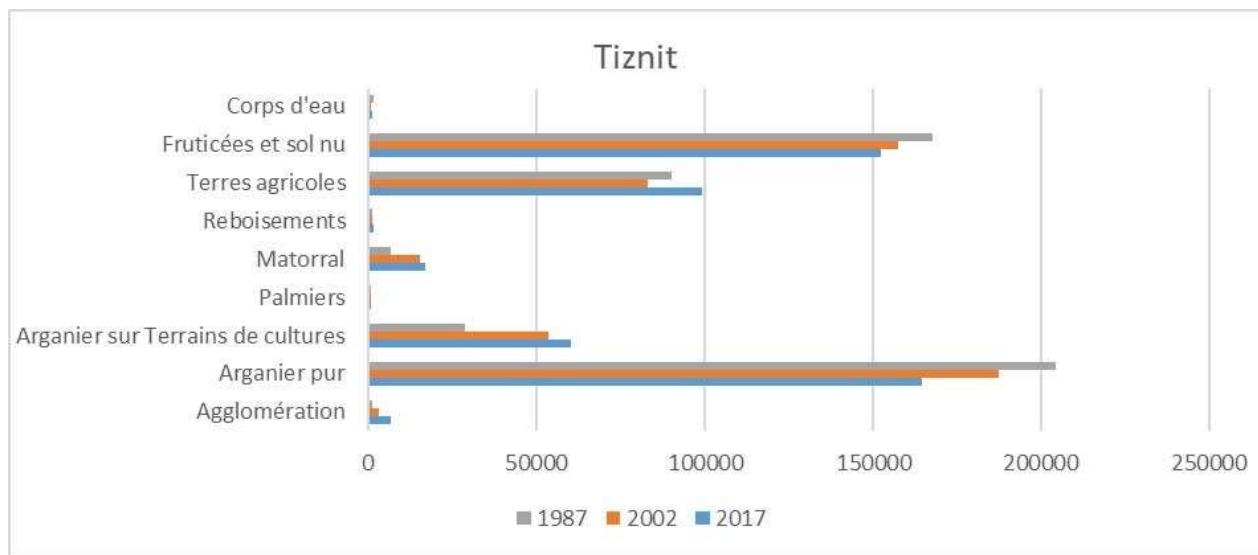


Figure 36 : Evolution de l'occupation du sol à Tiznit

Le taux de régression était de 8% entre 1987 et 2002, soit une perte d'environ 1 140 ha/an. Ce taux est passé à 12% de 2002 à 2017, soit 1 533 ha/an de perdu. Ainsi, contrairement à Essaouira où on note une diminution du taux de régression de la forêt d'arganiers; à Tiznit la situation semble s'aggraver. Cette régression s'est faite à 51% au profit des terrains de culture sous arganier qui ont augmenté sur 31 395 ha entre 1987 et 2017. Le matorral a par contre augmenté sur 10 261 ha entre 1987 et 2017 principalement grâce aux campagnes de végétalisation des terrains de parcours avec des plantes fourragères (*Atriplex*) conduites notamment dans le cadre du Plan Maroc Vert. En effet, la province de Tiznit est caractérisée par un élevage extensif très important avec de nombreux transhumants qui arrivent du Sud à la recherche de vert-pâturage. Ces parcours ont été indissociables des cultures en bour compte tenu de la faible résolution des images utilisées pour la classification. Quoi qu'il en soit, les terrains agricoles qui représentent ici, les terres arables, les cultures maraîchères et céréalières, les cultures de palmier dattier au niveau des oasis, les prairies et les pâturages permanents, ont dans un premier temps, régressé de 7 408 ha entre 1987 et 2002, puis, ils ont progressé sur 16 359 ha entre 2002 et 2017 pour répondre à la demande croissante provenant surtout des grandes villes du Maroc où sont exportées la grande partie des fruits exotiques (banane, papaye, figue, etc...) cultivées à Tiznit. Aussi, bien que la population globale de la province s'est réduite de 7 560 habitants de 2004 à 2014 à cause de l'exode rurale, les zones

urbaines m'ont pas cessé de s'étendre. Ainsi, les agglomérations se sont étendues sur 5 497 ha en 30 ans. Par ailleurs, la superficie des corps d'eau s'est réduite de 878 ha entre 1987 et 2002 fort probablement à cause du fait que la province de Tiznit ne dispose que de petites nappes généralisées de faible productivité uniquement dans la zone de plaine et parce que le climat est désertique sec et chaud caractérisé par une sécheresse et une aridité permanente qui dure toute l'année avec une rareté des pluies. Cependant, entre 2002 et 2017, la superficie des corps d'eau a augmenté de 300 ha grâce à l'aménagement du barrage Youssef Ben Tachfin au cours de la dernière décennie.

III-1-4-2- Analyse comparative entre l'évolution du couvert végétale dans l'écosystème à Arganier suivant le gradient de pente

Les Figure 37 et Figure 39 présentent la dynamique de changement respectivement à Essaouira et à Tiznit. Ce changement se traduit par une régression ou une progression des formations végétales dominées par l'arganier. On considère comme une « régression » les formations d'arganiers qui ont laissé place à une autre occupation du sol. Une « progression » quant à elle correspond aux occupations qui ont été nouvellement colonisée par l'arganier.

Les Figure 38 et Figure 40 présentent les fluctuations en terme de densité à l'intérieur des peuplements d'arganiers respectivement à Essaouira et à Tiznit.. Ces fluctuations traduisent soit une diminution de la densité des arbres, soit une augmentation. Elles ont été calculées par classe de pentes à partir des matrices de changement.

- Sous bioclimat semi-aride

A Essaouira qui est principalement sous bioclimat semi-aride, on remarque que la régression de l'arganier s'est faite sur en moyenne 15% de sa superficie au niveau des pentes inférieures à 10% entre 1987 et 2002 (Figure 37). Cette régression tend à diminuer au fur et à mesure que la pente augmente. Par contre, la progression de l'arganier tend à augmenter avec la pente entre 1987 et 2002 laissant penser qu'au cours de cette première période, l'arganier se développait plus au niveau des zones à forte pente. Cependant, force est de constater qu'au niveau des zones à faible pente, la proportion de zones où l'arganier a régressé est largement au-dessus de celle où l'arganier a

progressé. On en déduit donc que la dégradation de l'arganeraie était plus importante au niveau des plaines et plateaux (ou les pentes sont faibles) qu'en montagne (où les pentes sont fortes).

De 2002 à 2017, la régression de l'arganier tend également à diminuer avec l'augmentation de la pente passant de 17% au niveau des zones de pentes inférieures à 5% à 9% au niveau des zones de pentes supérieures à 40%. La proportion de zone où l'arganier a progressé, a également diminué avec l'augmentation de la pente passant de 16% au niveau des zones de pentes inférieures à 5% à 5% au niveau des zones de pentes supérieures à 40%. Cela pourrait s'expliquer par une augmentation de la pression sur l'écosystème à arganier de montagne. De plus, l'écart entre la proportion de zones où l'arganier a régressé et celle où elle a progressé a augmenté avec la pente. Cela indique que la dégradation de l'arganier est de plus en plus prononcée en terme de proportion dans les zones où les pentes sont fortes.

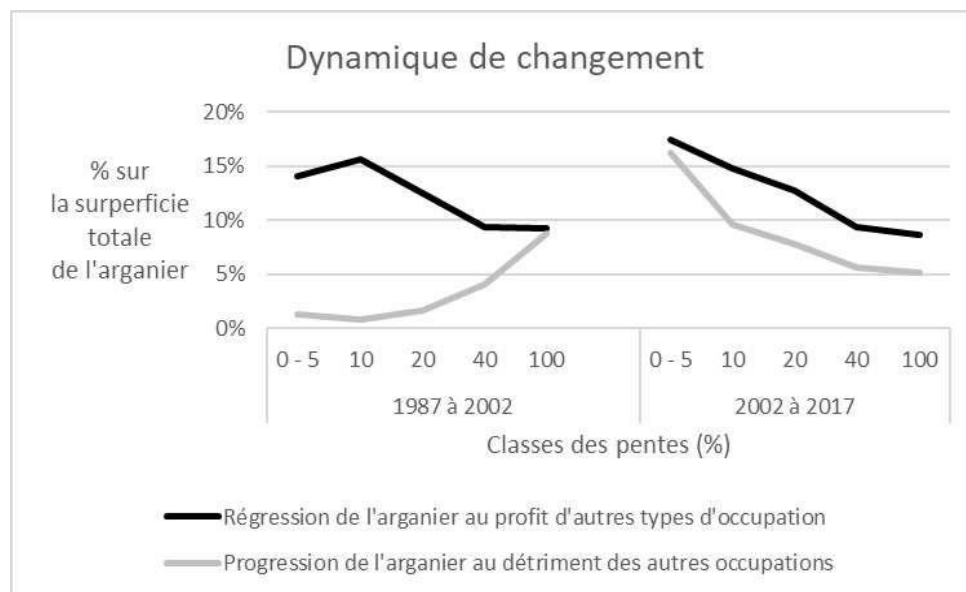


Figure 37 : Dynamique de changement de l'arganeraie en fonction des pentes à Essaouira

A l'intérieur des peuplements d'arganiers, la proportion de l'arganeraie ayant perdu en densité tend à augmenter avec l'augmentation de la pente passant de 14% au niveau des pentes inférieures à 5% à 18% au niveau des pentes supérieures à 40% entre 1987 et 2002 (Figure 38). Cette augmentation est plus importante entre 2002 et 2017 où l'arganier perd en densité sur 3% de sa superficie au niveau des pentes inférieures à 5% et sur 20% de sa superficie au niveau des pentes supérieures à

40%. On constate aussi que la perte de densité a diminué au fil du temps au niveau des zones à faible pente par contre au niveau des zones à forte pente, l'arganier perd de plus en plus en densité. D'un autre côté, la proportion de zone où la densité de l'arganier a augmenté, a énormément progressé au niveau des zones de pente supérieur à 40% entre 1987 et 2002. Par contre entre 2002 et 2017, cette proportion a diminué au niveau des zones où la pente est supérieure à 10% passant de 28% à 16% ; alors qu'elle a augmenté au niveau des zones de pente inférieure à 10% passant de 23% à 28%. Par ailleurs, entre 2002 et 2017 contrairement à la première période (1987 à 2002), la superficie des zones où la densité de l'arganier a augmenté est plus grande que la superficie des zones où la densité de l'arganier a diminué notamment au niveau des zones de faible pente. Cela traduit donc une certaine densification de l'arganeraie dans les zones où les pentes sont faibles à Essaouira ces dernières années.

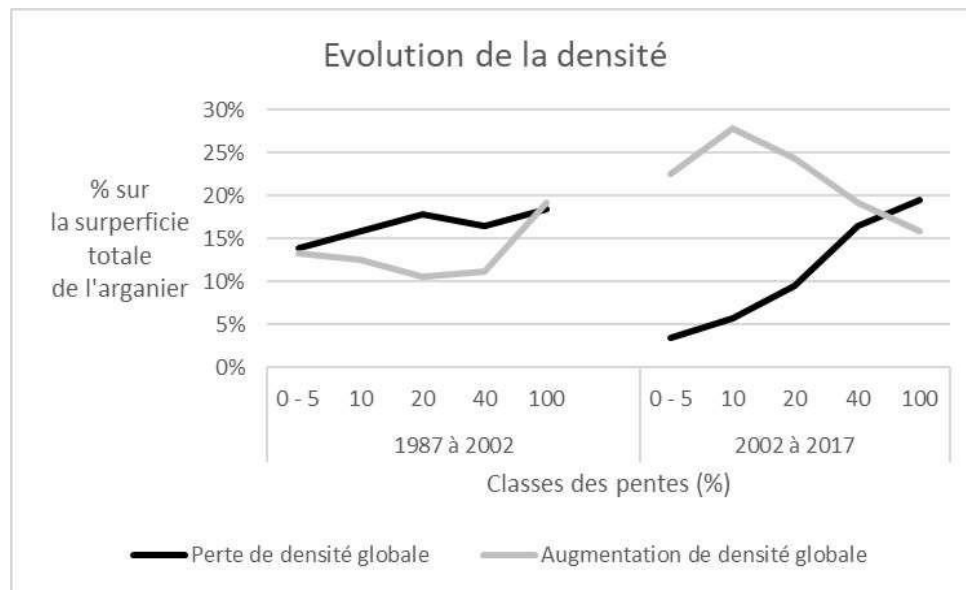


Figure 38 : Evolution de la densité dans l'arganeraie en fonction des pentes à Essaouira

- Sous bioclimat désertique

A Tiznit, les zones où les pentes sont supérieures à 40% sont quasiment nul. C'est la raison pour laquelle elles ne sont pas représentées dans les figures.

Entre 1987 et 2002, la régression de l'arganier était plus prononcée que la progression au niveau des zones de pentes inférieures à 5% (Figure 39). Cette régression passe de 19% à 4% au niveau des zones de pentes inférieures à 20%. Elle passe à 16% au niveau des zones de pentes supérieures à 20%. Par contre, l'arganier a progressé au niveau des zones de pentes supérieures à 5% passant de 6% à 16%. Dans ces zones, la progression est supérieure à la régression. Cela signifie que l'arganier subissait une dégradation plus importante au niveau des zones où la pente est inférieure à 5% probablement à cause des activités agricoles. Cette dégradation était aussi prononcée au niveau des zones difficile d'accès où la pente est supérieure à 20%. Cela pourrait s'expliquer par l'aridité du climat. Cependant, au niveau de ces zones à forte pente, la progression de l'arganeraie était tout aussi prononcée témoignant du fait que la nature jouait son rôle de régulation.

Entre 2002 et 2017, la situation s'est avérée différente. En effet, on constate que la progression de l'arganier ne dépasse pas 1% et que la proportion de zone où l'arganier a régressé, augmente avec la pente bien qu'elle a légèrement diminué au niveau des zones de pentes inférieures à 10%. Ainsi, alors que la situation tend à s'arranger en zone de plaine, l'arganier se dégrade de plus en plus dans les zones de fortes pentes et la nature ne semble plus pouvoir y faire grande chose.

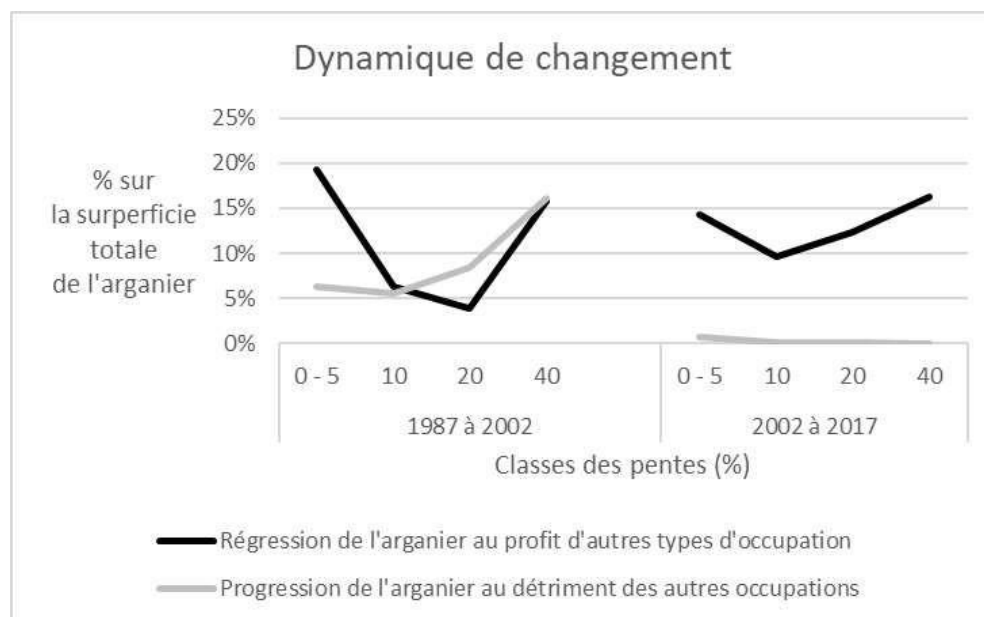


Figure 39 : Dynamique de changement de l'arganeraie en fonction des pentes à Tiznit

A l'intérieur des peuplements d'arganiers, la proportion de l'arganeraie ayant gagné en densité tend à augmenter avec l'augmentation de la pente passant de 12% au niveau des zones de pentes inférieures à 5% à 36% au niveau des zones de pentes supérieures à 40% entre 1987 et 2002 (Figure 40). Ce gain était moins important que la proportion de l'arganeraie ayant perdu en densité au niveau des zones de pentes inférieures à 5%. Par contre, au niveau des zones de pentes plus élevés, la superficie où la densité de l'arganier a augmenté était plus élevée que celle où la densité a diminué.

Entre 2002 et 2017, la situation est inverse ; autrement dit, la superficie où la densité de l'arganier a augmenté est restée inférieure à celle où la densité a diminué peu importe la pente. Cela traduit bien l'augmentation de la pression sur l'arganeraie au fil du temps. Par ailleurs, la proportion de l'arganeraie ayant perdu en densité tend à augmenter au niveau des zones à faible pente alors qu'elle tend à diminuer au niveau des zones à forte pente. Cela voudrait dire que sous climat désertique à Tiznit, l'arganier des zones planes se dégrade fortement surtout ces dernières années par contre en zone de fortes pentes, la pression est moins importante probablement en raison du relief accidenté et de la réduction de la démographie.

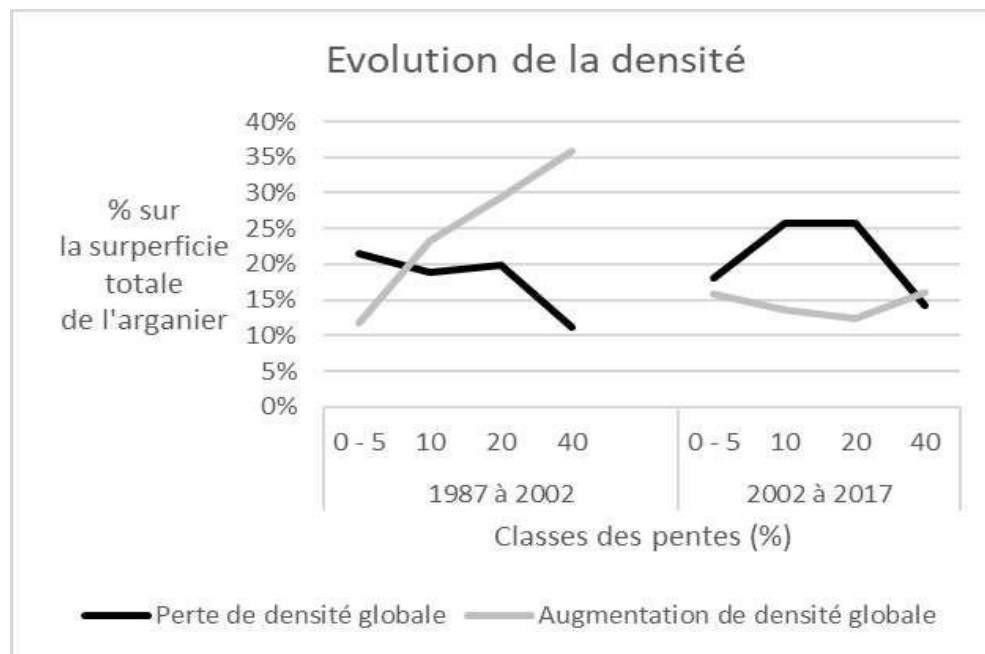


Figure 40 : Evolution de la densité dans l'arganeraie en fonction des pentes à Tiznit

III-1-5- Discussion

Cette étude confirme les résultats des travaux de Bouzemouri (2007) et Jourrane (2015) qui avait constaté une réduction de la superficie occupée par l'arganeraie du sud-ouest Marocain. Cette dégradation tend à augmenter avec le temps. En effet, l'arganeraie marocain est soumis à une importante pression liée à la croissance démographique, à l'extension des cultures, au prélèvement abusif des produits forestiers et au surpâturage (Achour, et al., 2011). Cette pression anthropique couplée à l'aridité du climat, est souvent la cause de la désertification qui conduit à une dégradation souvent irréversible de l'arganeraie (Msanda, et al., 2005).

Sous bioclimat semi-aride à Essaouira comme sous bioclimat désertique à Tiznit, il s'est avéré que la dégradation de l'arganeraie est plus importante en plaine et plateau qu'en montagne. Cela confirme les constats de certains auteurs (Van Den Eynde, 2006 ; Faouzi, et al., 2015). Cette dégradation est également constatée en Algérie dans l'arganeraie de la plaine de Telagh sous bioclimat semi-aride (El Zerey, 2014). Elle est causée principalement par la pression anthropique, en particulier les activités agricoles. Rappelons qu'à Taroudant, par exemple (dans la plaine du Souss), la superficie de la forêt d'arganiers a diminué de 44,5% entre 1970 et 2007, dont 86% auraient été convertis en terres cultivées sous arganiers (Yann & Lambin, 2011). De plus, selon Zugmeyer (2006), il y a une diminution de la densité d'arganiers dans la plaine du Souss pour permettre la culture sous arganiers (Zugmeyer, 2006). Cette perte de densité a été également constatée entre 1952 et 1986 lors de la typologie des arganeraies infra-méditerranéennes dans le Souss (El Aboudi, 1990)

Cependant, ces dernières années, bien que la dégradation de l'arganier reste plus importante en plaine et plateau qu'en montagne, elle est de plus en plus prononcée en terme de proportion dans les zones de montagne. En effet, l'arganeraie de montagne subit une forte pression pastorale limitant sa régénération (Tarrier & Benzyane, 2003 ; Geist & Lambin, 2004 ; Bellefontaine, 2010). Cette étude a donc révélé que la perte de densité au sein des peuplements d'arganiers est plus importante en montagne qu'en plaine. Cela contredit les travaux de Aziz, et al. (2011) qui ont constaté que l'intensité des coupes sur l'arganier a diminué durant la dernière décennie. Si cela est le cas en plaine, en montagne, les coupes semblent avoir augmenté. Comme l'atteste Demoulin

(2008), la densité des peuplements d'arganiers est plus abondante en plaine que dans la forêt domaniale (en montagne). Cela s'explique aussi par le fait que des études ont montré que les reboisements de plants d'arganier réussissent mieux (à 50-70%) en plaine (pentes de 9 à 15%) ; sur des sols profonds de 30 à 70 cm développés sur calcaire dolomitique, des expositions fraîches (nord et nord-ouest), une altitude comprise entre 500 et 700 m et un couvert végétal dégagé (Belghazi, et al., 2011). Cela explique donc pourquoi nous avons constaté au niveau des zones de pente inférieure à 10%, une augmentation de la proportion de zone où la densité de l'arganier s'est accru.

Sous bioclimat désertique, la situation semble plus grave avec une progression de l'arganeraie quasi nulle et une régression de plus en plus importante même en zone de montagne. En effet, d'après Bellefontaine (2010), actuellement, la régénération naturelle de l'arganier est quasi inexistante. De plus, les températures élevées accentuent le déficit hydrique de l'arganier (Peltier, et al., 1990 ; El Aboudi, et al., 1991). Une étude menée sur les réponses morphologiques de la croissance de l'arganier de Tindouf (Algérie) et d'Agadir (Maroc), dans des conditions de stress hydrique, a révélé que l'arganier de Tindouf présente une meilleure résistance (Bezzalla, et al., 2018). De ce fait, les auteurs préconisent l'utilisation de semences d'arganiers d'Algérie pour le reboisement dans des conditions de sécheresse. Cela pourrait constituer une piste vers la régénération de l'arganeraie à Tiznit.

D'un autre côté, contrairement à Essaouira, la perte de densité au sein des peuplements d'arganiers est moins importante en montagne qu'en plaine. Cela peut être imputable à la démographie qui est deux fois plus importante à Essaouira qu'à Tiznit avec 76% de la population vivant en zone rurale à Essaouira contre 61% à Tiznit d'après le recensement de 2014. De plus, le taux de croissance entre 2004 et 2014 à Essaouira est de 1% alors que qu'il est de - 4% à Tiznit.

III-1-3- Approche méthodologique

Dans un premier temps l'occupation du sol des différentes zones d'étude (Essaouira et Tiznit) a été cartographiée en se servant de différents types d'images satellitaires. Dans un second temps, la dynamique de cette occupation a été analysée dans l'espace et dans le temps.

Le but de la cartographie de l'occupation du sol était d'apprécier l'état et l'étendue de la végétation et son évolution tout au long des 30 dernières années. Cette période de 30 ans a été choisie en fonction de la disponibilité des images et compte tenu du fait que, selon l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), une série de données minimale de 30 ans est nécessaire pour analyser des tendances évolutives de facteurs écologiques. Afin d'analyser les variations à l'intérieur de cette période de 30 ans, cette dernière a été scindée en deux. Ainsi, l'occupation du sol a été cartographiée pour les trois dates suivantes : 1987, 2002 et 2017. Des images satellitaires recouvrant les zones d'étude en 1987, 2002 et 2017 ont donc été téléchargées sur le site internet earthexplorer.usgs.gov pour les mois situés entre Juin et septembre de chaque date, de sorte à obtenir les images les plus claires (sans nuage) et à minimiser les biais que pourraient engendrer les espèces non pérennes. Les images satellitaires de 1987 proviennent du capteur Landsat 5 TM (Thematic Mapper), celles de 2002 du capteur Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) et celle de 2017 du capteur Landsat 8 OLI (Operational Land Imager). Ces images ont une résolution de 30 m. Cette résolution a été ramenée à 15 m pour les images landsat 7 et 8 en utilisant la technique de fusion des bandes avec la bande panchromatique.

Bien que, les images sont fournies par USGS (United State Geological Survey, 2017) avec un premier niveau de traitement radiométrique, atmosphérique et géométrique, elles présentent certaines distorsions qu'il est préférable de corriger. Ainsi, une fois les images téléchargées, elles ont subi une correction radiométrique et atmosphérique. La correction radiométrique a permis d'améliorer la luminance apparente et la réflectance des images. Les effets atmosphériques quant à eux ont été corrigés à l'aide de l'algorithme QUAC (QUick Atmospheric Correction). Ensuite, une mosaïque des images a été réalisée pour recouvrir toute l'étendue des zones d'étude, puis les zones d'étude ont été extraites puis cartographiées suivant les classes d'occupation du sol identifiées.

L'algorithme utilisé pour la classification est le SVM (Support Vector Machine) qui est une méthode de classification supervisée dérivée de la théorie de l'apprentissage statistique. Il consiste à attribuer des classes à des surfaces de décision appelées régions d'intérêt ou ROI qui maximisent la marge entre les classes. Le ROI est caractérisé par un hyperplan optimal qui possède une réflectance spécifique. Les points de données les plus proches de l'hyperplan sont appelés vecteurs de support. Les vecteurs de support sont les éléments critiques de l'ensemble d'apprentissage qui est pris en compte lors de la classification des images. Une fois la classification terminée, la matrice de confusion a été générée et a permis de calculer la précision globale et l'indice de Kappa qui ont donné tous les deux des valeurs supérieures à 0,8 (voir annexe 9) ; nous permettant ainsi de valider la classification (Landis & Koch, 1977).

Cependant, aussi efficace que la classification par SVM fut, elle n'a pas permis de différencier convenablement les différentes classes de densité au niveau de la végétation. Pour pallier cela, plusieurs indices de végétation ont été testés. A la suite de quoi, l'indice de végétation OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index) a été choisi pour avoir donné de meilleurs résultats vis-à-vis de la réalité « terrain » comparé au NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et au SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). L'OSAVI est basé sur l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI), qui est similaire au NDVI, mais il supprime les effets des pixels du sol. OSAVI utilise une valeur standard de 0,16 pour le facteur de réglage d'arrière-plan du couvert. Il a été prouvé par Rondeaux (1996) que cette valeur offre une variation au sol supérieure à celle de SAVI pour une faible couverture végétale, tout en démontrant une sensibilité accrue à la couverture végétale supérieure à 50% (Rondeaux, et al., 1996). Cet indice est adapté aux zones de végétation relativement clairsemée où le sol est visible à travers la canopée comme cela est le cas dans nos zones d'étude. La formule de calcul de l'OSAVI est la suivante :

$$OSAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0.16}$$

Ensuite, une centaine de points de contrôle a été générée aléatoirement par classe d'occupation du sol et des prospections sur le terrain ont été effectuées sur une période allant de 2018 à 2019 sous forme de campagnes de vérification de ces points de contrôles. Ces prospections ont concerné toute

l'étendue des zones d'étude. Cela a donné lieu à un troisième niveau de correction des cartes d'occupation du sol.

Enfin, l'évolution du couvert végétal à arganier dans la plaine et plateau a été comparée à celle dans la montagne sous bioclimat semi-aride à Essaouira d'une part, et sous bioclimat désertique à Tiznit d'autre part. Pour ce faire, l'étendue du couvert végétal a été représentée par classe de pente. Ces pentes ont été générées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) fourni par USGS et de 30 m résolution. Les zones où les pentes sont faibles sont considérées comme étant des zones de plaines (ou plateaux) et les zones à forte pente ont été assimilées aux zones de montagne. Ensuite, la dynamique spatio-temporelle au niveau des classes de pentes les plus basses a été comparé à celle au niveau des classes de pentes les plus fortes. A cet effet, les matrices de changement ont été représentées par classe de pentes.

L'étude préliminaire qui a commencé par une recherche bibliographique approfondie couplée à des prospections sur le terrain et à l'interprétation visuelle des images satellitaires et aériennes a permis d'identifier les différentes classes d'occupation du sol présente au niveau des zones d'étude. Ces classes ont été choisies en tenant compte des objectifs et de leur importance en termes de superficie et de la facilité à les discerner. Les classes qui ont été identifiées sont :

- Les **Forêts naturelles** : Il s'agit de terrains occupés par une formation végétale ligneuse. Dans cette classe, on retrouve essentiellement les essences forestières telles que : l'arganier (*Argania spinosa* ou As), le thuya (*Tetraclinis articulata* ou Ta), le chêne vert (*Quercus rotundifolia* ou Qr), le genévrier rouge (*Juniperus phoenicea* ou Jp), et le palmier (*Phoenix atlantica* ou Pa). En termes de densité, dès lors que le couvert de l'essence arborée principale est supérieur à 50% de la superficie totale, elle appartient à la classe « dense ou 1 » ; entre 25 et 50% c'est la classe « moyenne ou 2 », entre 5 et 25 % la densité est dite « faible ou 3 » et lorsque la densité est < 5% il s'agit de la classe « très claire ou 4 ».
- Les **reboisements** : Il s'agit surtout des peuplements artificiels de Pins et Eucalyptus. En effet, compte tenu de la résolution des images utilisées et de l'échelle de travail (toute la province), les peuplements artificiels à base de Thuya et d'Arganiers n'ont pas pu être différenciés des formations naturelles à base de la même espèce.

- Le **Matorral** : c'est une zone occupée par une formation végétale basse ou élevée, d'espace dominée par des buissons et des broussailles d'Essences secondaires (ES) en milieu de type méditerranéen.
- Les **Cultures en bour** : correspondent aux surfaces sèches cultivées apparaissant au moment de prise de vue des images satellitaires.
- Les **Cultures irriguées** : il s'agit des surfaces irriguées cultivées avec des arbres fruitiers tels que l'olivier, l'amandier et le palmier en mélange avec des cultures basses (céréales, luzerne et cultures maraîchères).
- L'**Arganier sur les terrains de cultures ou cultures sous Arganier** : il s'agit d'une forme d'arboriculture ou d'agroforesterie au niveau de laquelle on retrouve l'arganier sur des terrains de cultures.
- Les **Fruticées** correspondent aux espaces occupée par une végétation très basse de densité variable où dominant des arbustes, des arbrisseaux et des sous-arbrisseaux. Cette classe peut être assimilable au parcours ou au sol nu compte tenu de la résolution des images utilisées.
- Les **Agglomérations** : Cette classe rassemble tout ce qui est bâtiments, agglomération et équipements.
- Les **Corps d'eau** : Cette classe est constituée par : les lacs ; les Dayas ; les eaux des barrages ; les Oueds ou toutes formes de retenue d'eau.



As1 à Essaouira



*Jp1 + Ta1 + As2 Autres feuillus à
Essaouira*



Ta1 + Qr2 à Essaouira



Tapis de ES à Essaouira



*As sur Terrains de culture à
Essaouira*



*Culture irriguée du Palmier en
mélange avec l'olivier à Tiznit*



Reb de Euca1 à Essaouira



Reb de Ph1 à Essaouira



Reb de Ta2 + Ph2 à Essaouira



Pa3 à Tiznit



As2 + Euphorbes à Tiznit



As4 à Tiznit

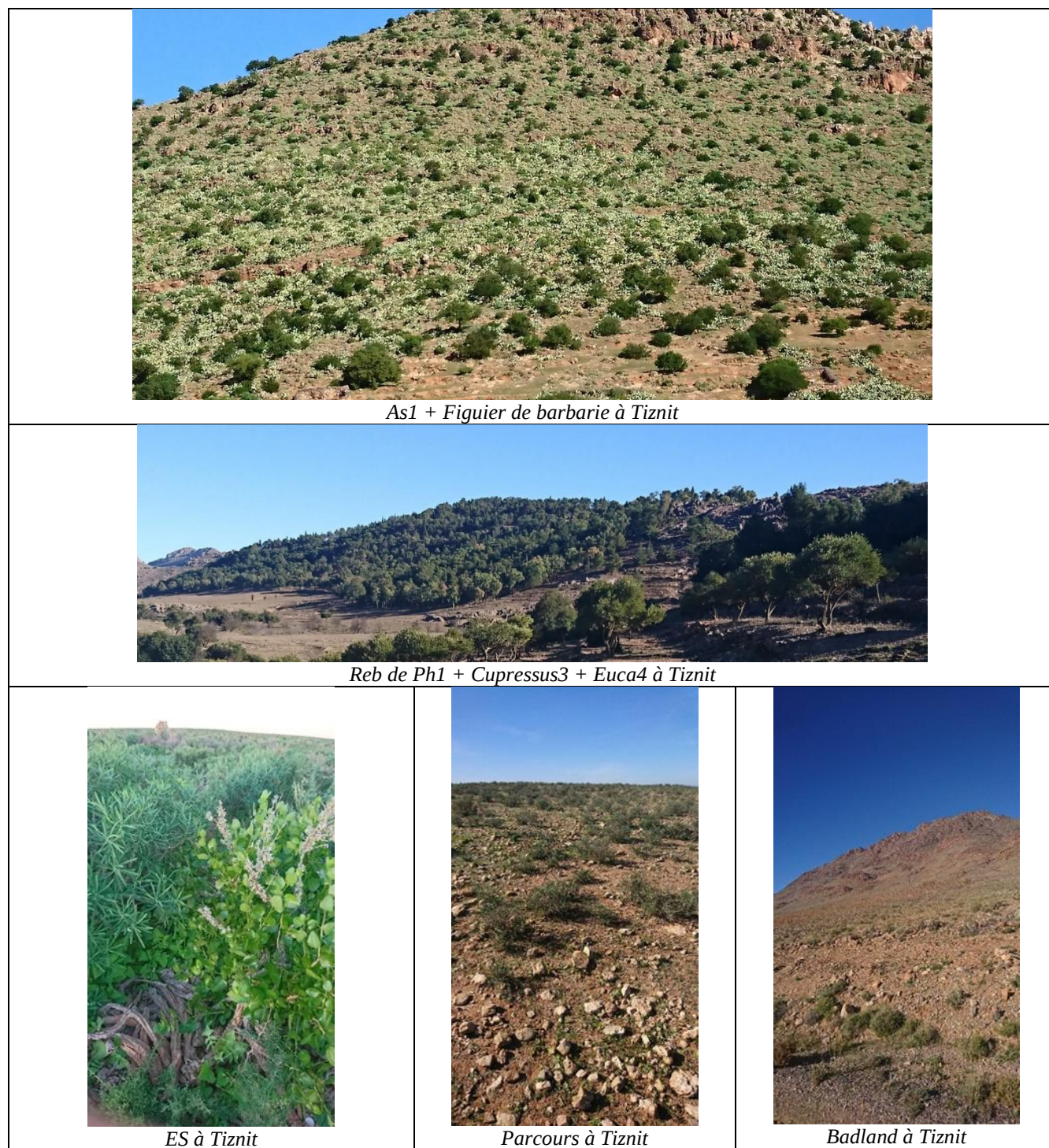


Figure 34 : Types de formations végétales à Essaouira et Tiznit

III-1-6- Conclusion

D'une manière générale, la régression de l'arganier diminuait avec l'augmentation de la pente à cause de la difficulté d'accès du terrain. Cela permettait à l'écosystème naturel de progresser dans les zones à forte pente. Cependant, ces dernières années, l'arganeraie qui ne cesse de se dégrader à cause de l'aridité du climat et de la pression anthropique (M'hirit, et al., 1998 ; Tarrier & Benzyane, 2003 ; Nouaim, 2005 ; Naggar & Mhirit, 2006 ; Achour, et al., 2011) n'arrive plus à se régénérer naturellement (Bellefontaine, 2010) même si les plantations artificielles donnent des résultats optimistes surtout en plaine (Belghazi, et al., 2011). Le rythme de dégradation varie d'une région à l'autre. Ainsi, à Tiznit (où l'arganier se retrouve sous bioclimat désertique et principalement sur la plaine), la situation semble s'aggraver alors qu'à Essaouira, le rythme de dégradation a beaucoup diminué avec le temps. Cela témoigne entre autre du fait que l'arganeraie dans les zones à forte pente est mieux conservé en terme d'écosystème forestier naturel. Néanmoins, la dégradation de l'arganeraie est de plus en plus poussée même en montagne avec une perte de densité constatée dans l'ensemble (Aouragh, et al., 2012). Si rien n'est fait, l'arganier se subsistera plus que sur les terrains de cultures en tant qu'arbre fruitier.

III-2- Modélisation de la dynamique spatio-temporelle des dunes de sable et analyse de l'influence des facteurs écologiques sur cette dynamique dans la province d'Errachidia, Sud-Est Marocain

III-2-1- Introduction

Dans la plupart des régions du monde, la désertification est causée principalement par des activités anthropiques telles que la croissance démographique, l'expansion des terres cultivées, le surpâturage, la déforestation et la surexploitation des ressources naturelles (Ayoub, 1998 ; Girma, 2001 ; Laki, 2009). Cependant, certaines études sur les zones hyperarides (dites désertiques) indiquent que la désertification est causée principalement par des facteurs climatiques tels que l'augmentation de la température, la diminution des précipitations et la vitesse du vent (Wang et al. 2005, 2006, 2008, 2009). Dans ce cas, les facteurs humains ne feraient qu'exacerber le phénomène.

Il est donc clair que le processus de désertification varie selon la zone géographique et le bioclimat (Geist & Lambin, 2004). Cette variabilité dépendrait de l'aridité du climat et de la pression anthropique sur les écosystèmes naturels. Néanmoins, il serait hâtif de s'appuyer uniquement sur des études menées dans quelques zones géographiques du monde pour conclure que dans toutes les zones hyperarides, la désertification est principalement causée par des facteurs climatiques, tandis que dans les zones moins arides, elle serait principalement causée par les activités humaines.

Les études qui pourraient expliquer la dynamique du phénomène de désertification et ses causes dans les zones hyperarides restent donc divisées et peu nombreuses. Au Maroc, notamment dans la province d'Errachidia, ce type d'études est inexistant alors que la désertification y affecte directement environ 250 000 ha (HCEFLCD, 2001). Ce phénomène, qui se traduit par l'expansion de paysages désertiques tels que Regs, Hamadas et Dunes, provoque des problèmes d'ensablement qui menacent les habitations, les terres cultivées et les plans d'eau de la province (HCEFLCD, 2001 ; Dong, et al., 2004).

La première étape de la lutte contre l'ensablement et la désertification est la compréhension de ces phénomènes. Cela implique de mesurer l'étendue et la dynamique du processus de désertification,

d'identifier ses causes, et de surveiller et d'évaluer ses conséquences (El Wahidi et al., 2011). Ainsi, afin de vérifier les hypothèses de cette étude, plusieurs données satellitaires, des observations climatiques et des données sur la croissance de la population ont été utilisés pour cartographier et analyser la dynamique des dunes de sable dans la province d'Errachidia au cours des 32 dernières années (de 1987 à 2019). Cette dynamique a été exprimée par l'expansion et la contraction des dunes de sable ; autrement dit par la superficie totale des dunes de sable ayant subi un changement d'occupation du sol entre ces deux dates.

L'objectif principal étant donc de modéliser l'évolution de la superficie occupée par les dunes de sable dans la province d'Errachidia puis d'essayer d'en comprendre les causes. Le modèle utilisé est le modèle Saisonnier Autorégressif Intégré à Moyenne Mobile (SARIMA). Il a permis de prévoir la dynamique des dunes de sable au cours des 50 prochaines années via une analyse de la série chronologique des superficies des dunes de sable. La modélisation et la prévision des phénomènes naturels à l'aide du modèle SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving-Average) est une méthode récente. Des modèles dérivés ont été développés dans le monde entier pour prédire le comportement de nombreux phénomènes, y compris climatiques. Pour citer quelques exemples, le modèle SARIMA a été utilisé pour modéliser et prévoir la fréquence des précipitations (Kaur & Rakshit, 2019 ; Adams & Bamanga, 2020). Il a également été démontré que le modèle SARIMA est plus fiable que les autres techniques statistiques actuelles et permet des prévisions interprétables et fiables de la température et des précipitations tout en tenant compte du changement climatique (Lai & Dzombak, 2020). Le modèle SARIMA est capable de capturer la dynamique des données de séries chronologiques et de produire des prévisions raisonnables (Kumar, 2020). Cependant, ce modèle présente deux faiblesses majeures. Il ne cadre bien qu'avec les données gaussiennes et nécessite une structure de corrélation de données linéaire (Silva, 2020).

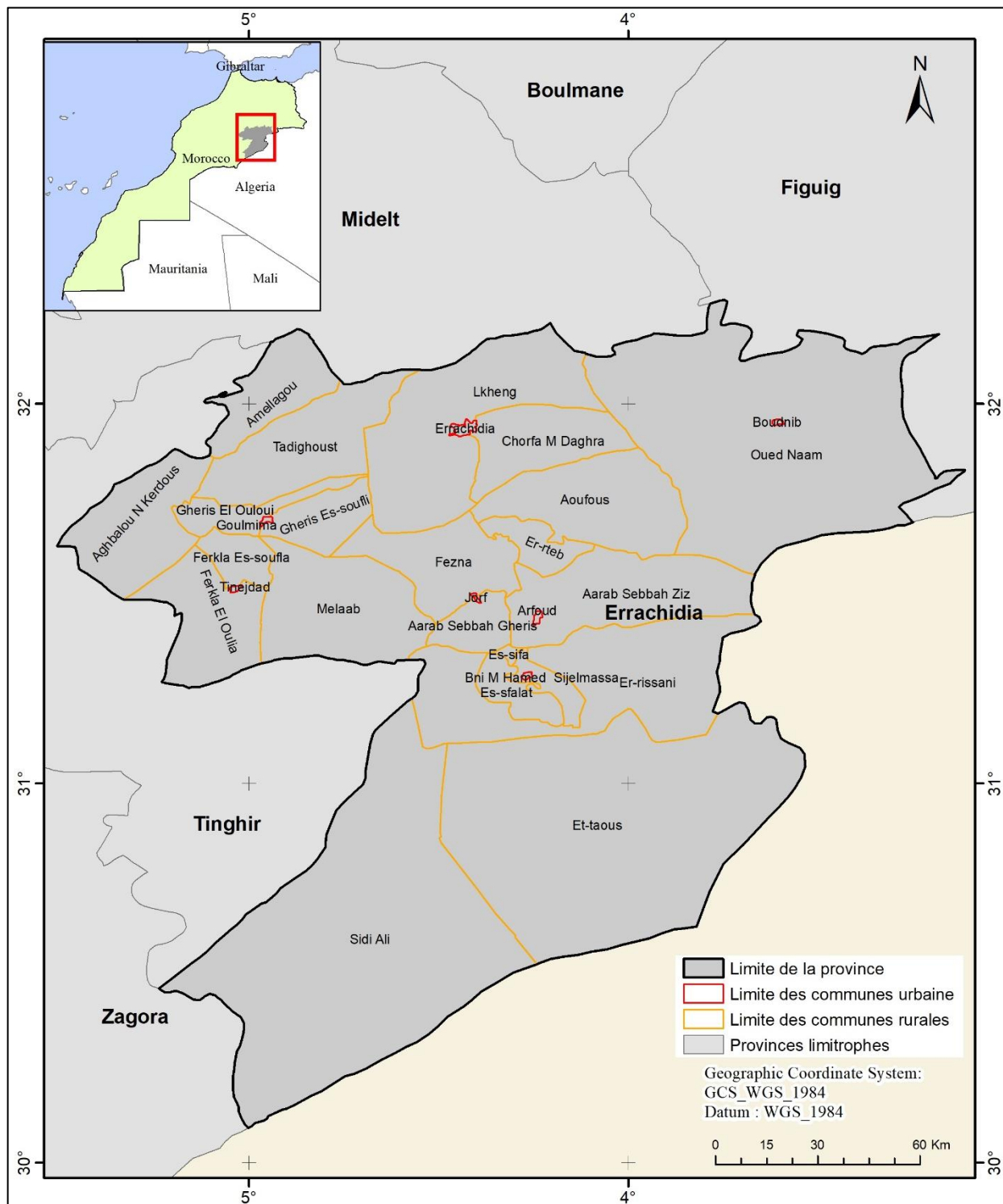
D'autres modèles ont été appliqués dans d'autres études pour surveiller et prédire la dynamique spatio-temporelle des dunes de sable. On peut citer, par exemple, les modèles d'apprentissage en profondeur tels que: Generative Adversarial Network (GAN) ou Convolutional neural network (CNN). Le GAN fonctionne moins bien sur les petites étendues de dunes tandis que le CNN est inefficace pour simuler les dunes de sable et son erreur est élevée (Kochanski, et al., 2019).

D'autre part, la dynamique des dunes de sable peut être modélisée avec succès en utilisant l'énergie éolienne et le couvert végétal (Hugenholtz & Wolfe, 2005). Quoi qu'il en soit, le modèle SARIMA est particulièrement adapté à l'analyse des relations et corrélations intrinsèques dans les données saisonnières de séries chronologiques stochastiques (Brownlee, 2018).

Par ailleurs, sachant que les causes de la désertification peuvent être physiques, biologiques ou humaines, il s'agira de tester la corrélation entre les facteurs climatiques et humains et la dynamique des dunes de sable pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes dunaires. De ce fait, les facteurs causaux potentiels de la désertification ont été évalués dans l'espace et le temps en effectuant des analyses statistiques pour améliorer d'avantage la compréhension de la dynamique des dunes de sable.

III-2-2- Zone d'étude

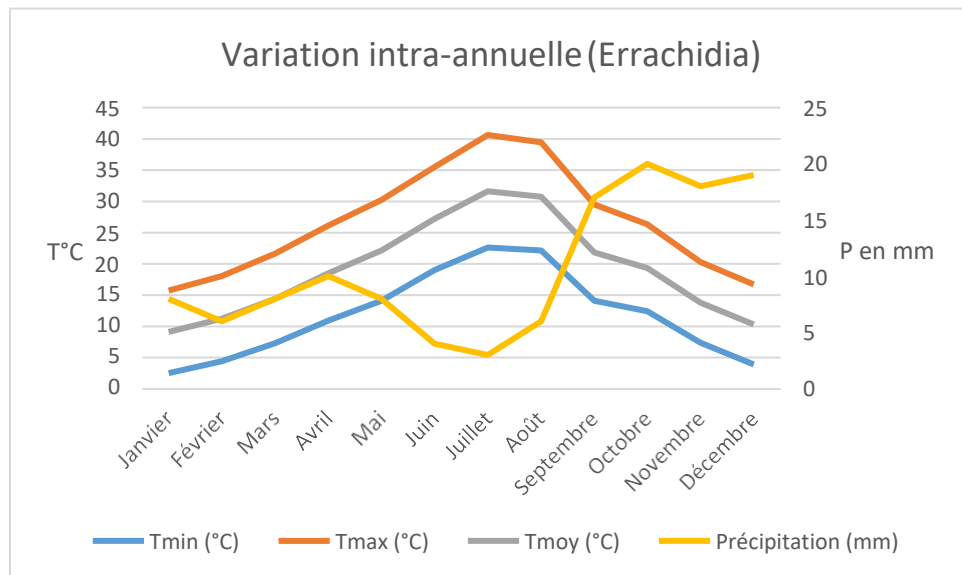
La province d'Errachidia est située dans la région de Drâa-Tafilalet à l'Est du Maroc. Elle est limitée au Nord par la province de Midelt, au Nord-est par la province de Figuig, au Sud et au Sud-est par l'Algérie, et à l'Ouest par les provinces de Tinghir et de Zagoura. La province d'Errachidia compte 21 communes rurales et 7 communes urbaines que sont : Errachidia (le chef-lieu de la province), Arfoud, Boudnib, Goulmima, Jorf, Moulay Ali Chérif et Tinejdad. Ces 28 communes sont réparties en 13 caïdats rattachés à 4 cercles : le cercle d'Arfoud, d'Er-Rissani, d'Errachidia et de Goulmima.



➤ Milieu biophysique de la province d'Errachidia

- Le climat

D'après la carte climatique de Köppen-Geiger (Peel, et al., 2007), le climat à Errachidia est de type BWh. Autrement dit, le climat est désertique avec des précipitations faibles tout au long de l'année. Ainsi, la moyenne des précipitations annuelles reste plus ou moins égale à 127 mm et la température moyenne annuelle à Errachidia avoisine les 19,2°C. Cependant, les températures sont extrêmes surtout en Juillet où elles avoisinent les 40,6°C. En outre, d'octobre à décembre, il tombe le maximum de pluies. Ce maximum varie entre 18 et 20 mm de pluies par mois.



(Source : Climate-Data.org³³)

Figure 42 : Variation intra-annuelle des températures et des précipitations à Errachidia

- Le relief, le sol et la roche mère

D'après la monographie de la province d'Errachidia, le relief dans la province d'Errachidia se présente sous différentes formes à savoir :

³³ Les données de Climate-Data.org proviennent de milliers de stations météorologiques du monde entier. Ces données météorologiques ont été recueillies entre 1982 et 2012.

- La chaîne du Haut Atlas au nord où habite 5,5 % de la population de la province. Elle se compose d'une succession de crêtes et de couloirs dont les formations calcaires proviennent du Jurassique et du Crétacé.
- Le domaine des Hamadas occupe 37 % de la superficie de la province et concentre 36,3 % de la population totale de la province. Il se caractérise par des plateaux composés de couches sédimentaires horizontales ou ondulées. La hamada de Meski et de Kem kem, qui est située plus à l'ouest est la plus ancienne suivie par la Hamada de Boudnib et la Hamada de Guir à l'Est. Les vallonnements des oueds Ziz, Guir et Gheris séparent les différentes Hamadas.
- Le domaine recouvrant une partie de l'Anti Atlas qui est constitué essentiellement des roches primaires (schistes, grès, calcaires et roches volcaniques).
- La plaine de Tafilalet qui est une dépression façonnée entre le massif de l'Anti Atlas et les Hamadas. Elle recouvre 57% de la superficie de la province dont 5 communes urbaines et constitue le lieu de résidence de la plus grande partie de la population (58,1 %).

La plupart des sols de la province d'Errachidia sont peu évolués. Cependant, on retrouve des sols plus évolués au niveau des oasis où le microclimat humide et la végétation permettent la formation de sols avec des horizons différenciés.

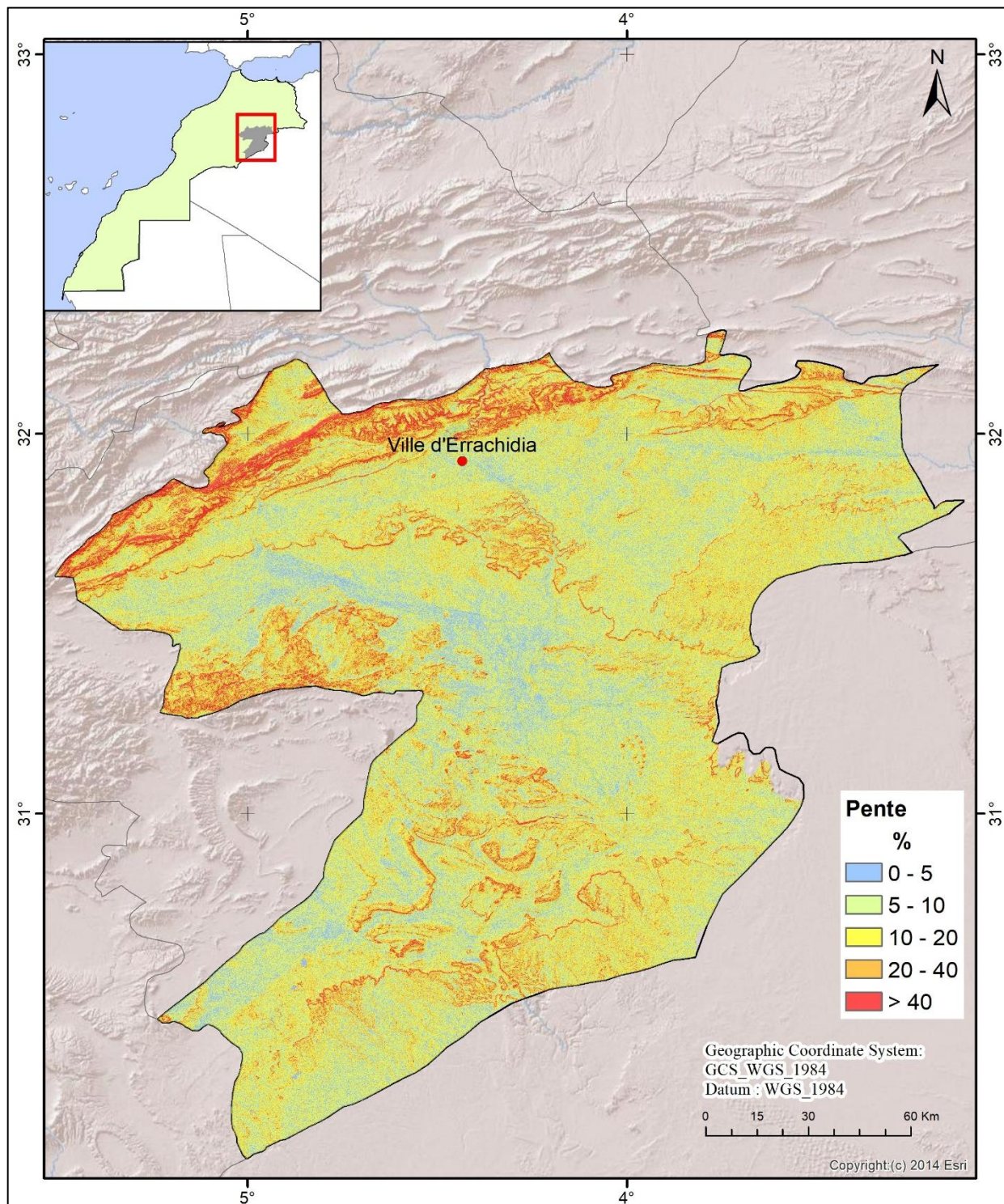
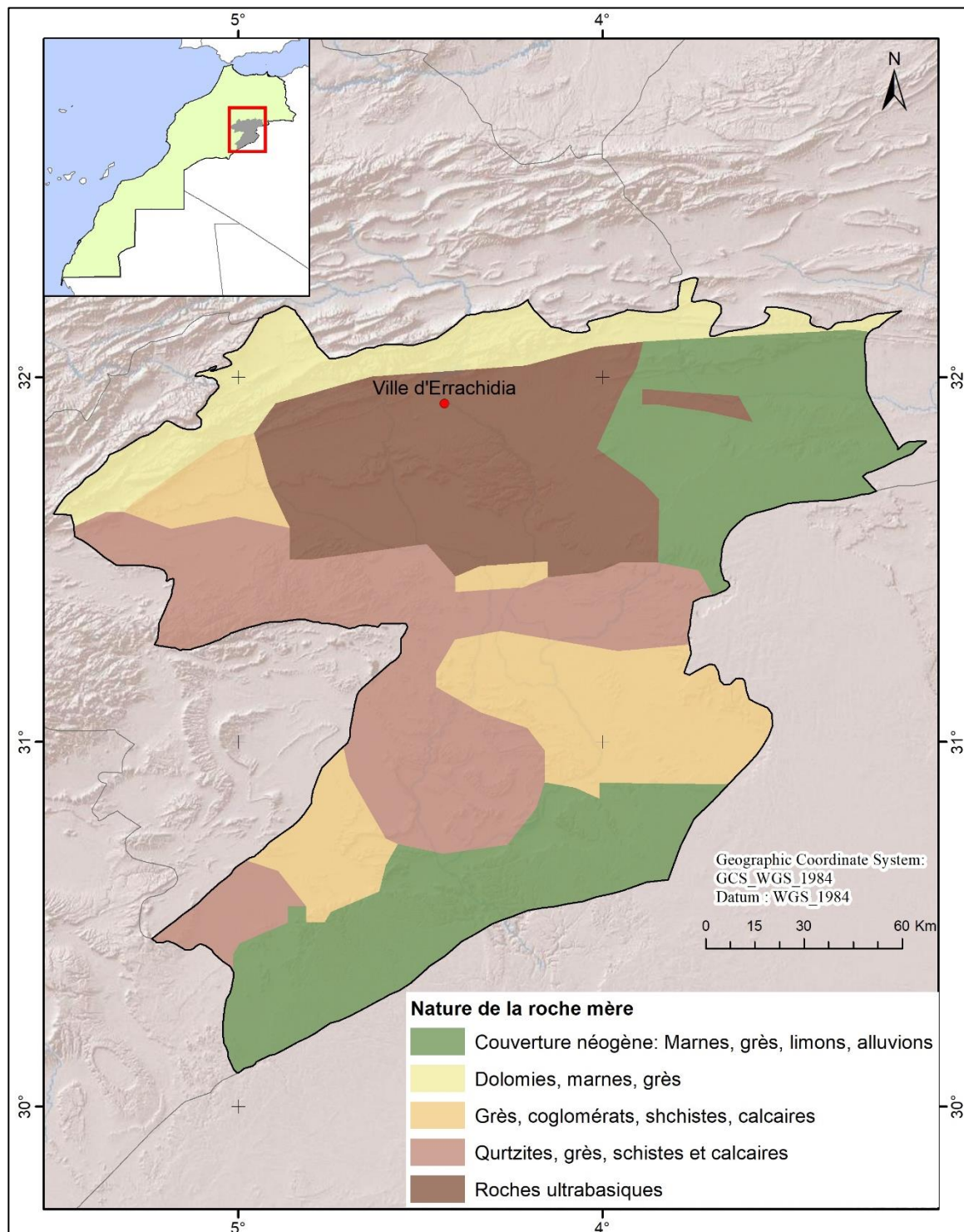


Figure 43 : Carte des pentes de la province d'Errachidia³⁴

³⁴ Source des données : Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'ASTER Global Digital Elevation Map (30 m résolution)



³⁵ Source des données : FAO

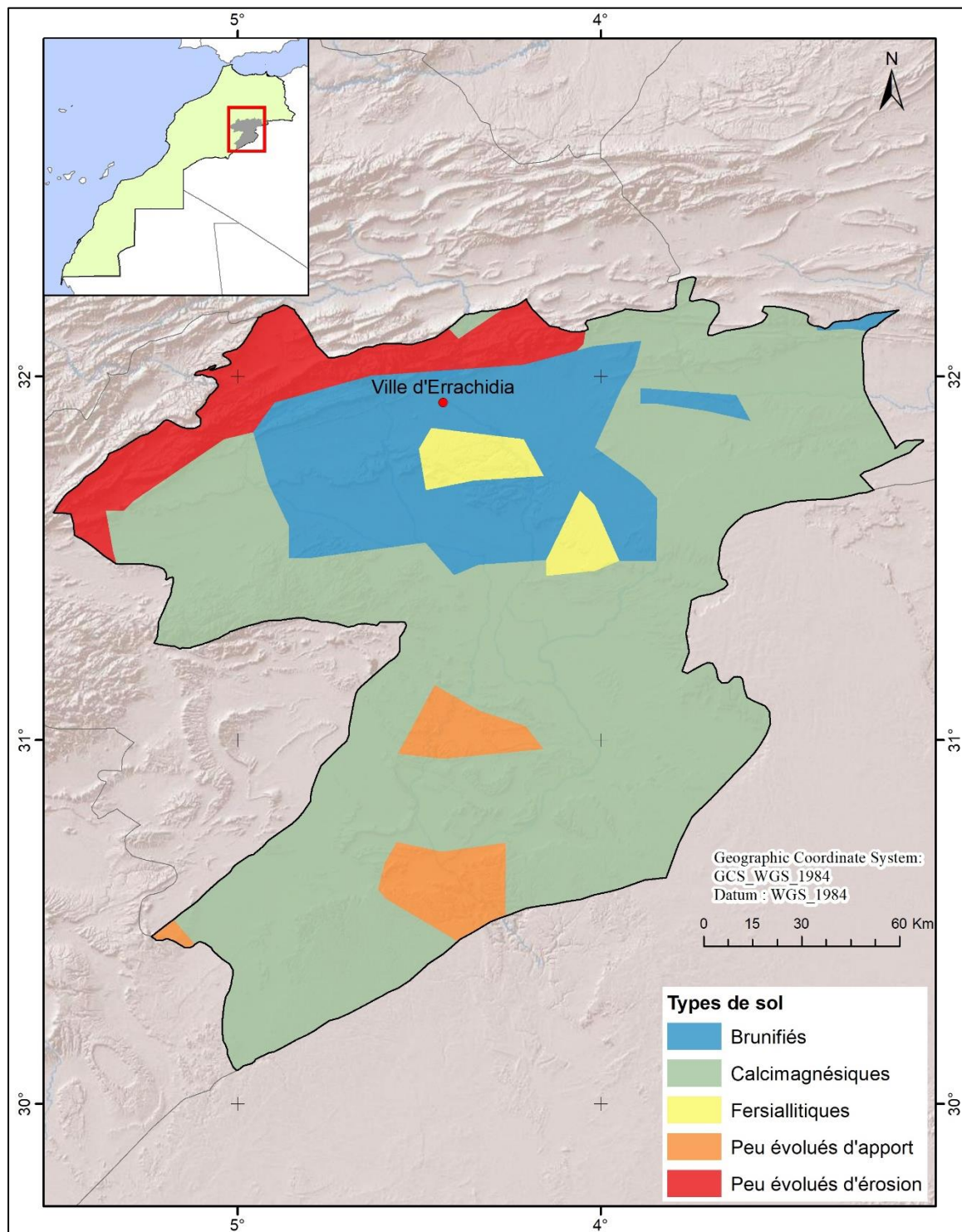


Figure 45 : Carte des types de sol de la province d'Errachidia³⁶

³⁶ Source des données : FAO

- Les ressources en eau

Les eaux de la province d'Errachidia proviennent des chaînes de montagne du Haut Atlas et des eaux souterraines réparties dans plusieurs bassins hydrogéologiques³⁷.



Les eaux de surface

La province d'Errachidia dispose d'un réseau hydrographique relativement dense composé des Oueds Gheris, Tarda, Ziz et Aoufous qui prennent leur naissance dans le Haut Atlas et de l'oued el Maider qui a pour origine l'Anti Atlas. Ces oueds présentant une hydrologie irrégulière, alimentent les oasis de la province et permettent le développement de la biodiversité dans la zone. De plus, en amont de l'oued Ziz se trouve le Barrage Hassan Addakhil, construit en 1965, constitue un grand réservoir d'eau et une protection contre d'éventuelles inondations. Les apports moyens sont de 104 Mm³/an, soit un débit de 3,3 m³/s. Le barrage offre un abri naturel pour les oiseaux migrateurs et une opportunité pour le tourisme de vision et pour la pêche sportive.



Les eaux souterraines

La province d'Errachidia renferme un système aquifère composé de :

- Les nappes quaternaires : Errachidia, Tinjdad, Goulmima, Boudnib-Bouanan et Tafilalet (Erfoud, Rissani, Fezna-Jorf) ;
- La nappe du Bassin Crétacé (Infra-Cénomanién, Turonien et Sénonien) ;
- La nappe de l'Anti Atlas ;
- La nappe du Haut Atlas.

Ces nappes alimentent la province via un système de mobilisation appelé : les Khéttaras³⁸. L'eau de ces khéttaras servent d'eau potable, d'eau domestique et d'eau pour l'irrigation.

³⁷ Monographie de la province d'Errachidia, Ministère de l'Intérieur.

³⁸ La khattara est une galerie drainante amenant par gravité l'eau de la nappe phréatique à la surface du sol à des fins d'irrigation et d'eau potable. Cette technique traditionnelle d'irrigation fut introduite par les agriculteurs du Tafilalet au cours du XII^{ème} siècle.

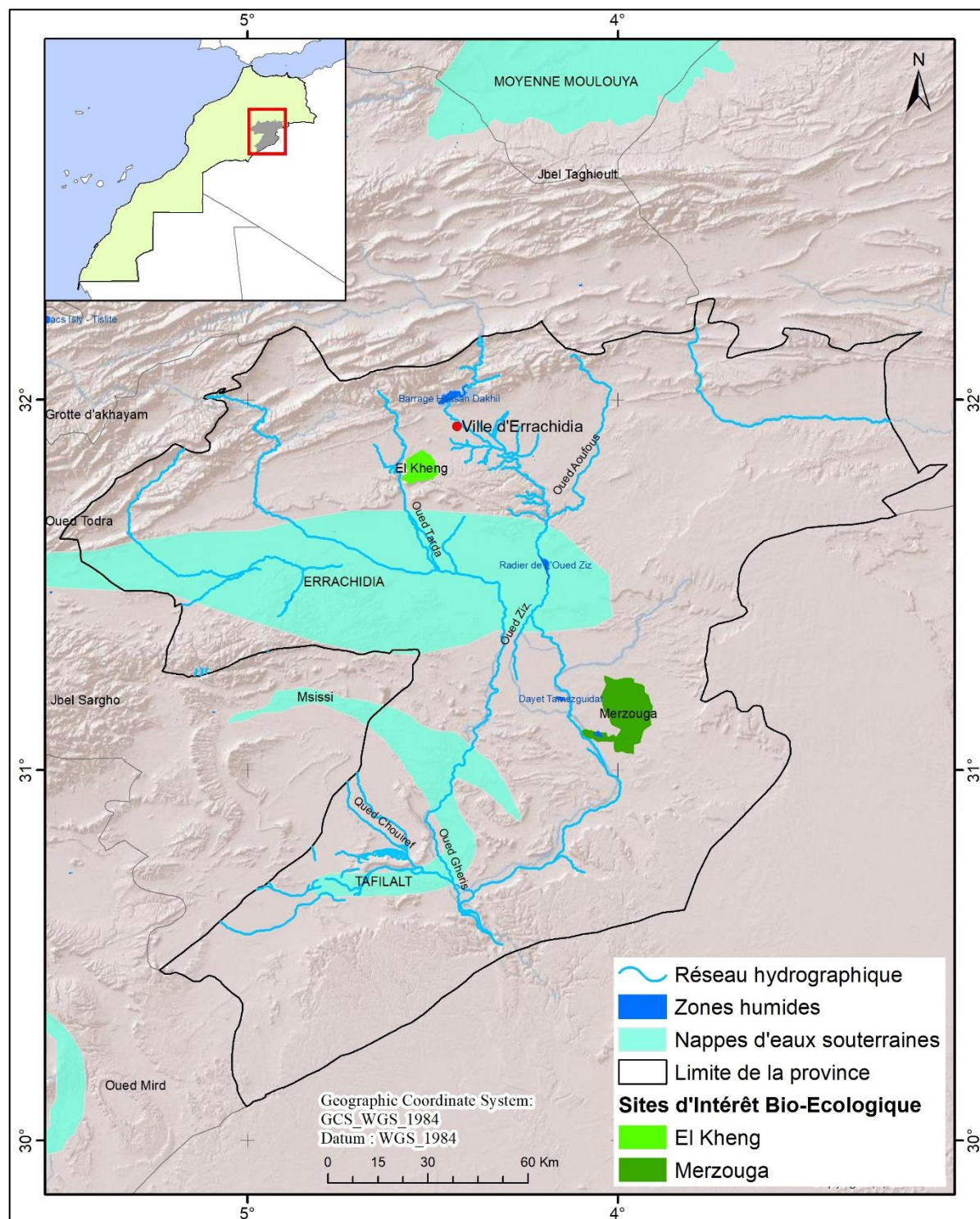


Figure 46 : Carte des zones humides et SIBE de la province d'Errachidia³⁹

³⁹ Source des données : Centre d'Echange d'Information sur la Biodiversité du Maroc

- Le domaine forestier

Du fait des conditions climatiques sévères, du surpâturage, des défrichements et des incendies, le domaine forestier de la province d'Errachidia est très vulnérable. La superficie du couvert végétal est évaluée en 2017 à 180 260 ha (Figure 49 page 135).

La province est divisée en une zone montagneuse et une zone présaharienne⁴⁰.

La zone montagneuse est caractérisée au niveau faunistique par la présence du Mouflon à manchettes, du Lièvre, du Perdrix gamba, du Hérisson, du Faucon, de l'Epervier, de la Tourterelle... Au niveau floristique on distingue la présence du Chêne vert sur 13 458 ha en mélange avec d'autres essences arbustives et herbacées (Beberis, Espanica, Thymus, etc) et arborées : le genévrier (présent sur 30.225 ha et le cèdre (sur 700 ha) avec lesquelles il se forme des peuplements pré-forestiers et pré-steppiques notamment dans les forêts d'ait Seghrouchene, Ait yahya, Ait Abdi et Amouguer⁴¹.

La zone présaharienne quant à elle est caractérisé par un faune à base de Lièvre, d'Outarde houbra, de Renard... Les formations forestières qu'on retrouve au niveau de cette zone sont essentiellement des steppes à Alfa par endroit et de peuplements d'Acacia sur 29 534 ha et le tamaris le long des cours d'eau⁴².

En termes de réserve naturelle, on note la présence du parc national du haut Atlas oriental qui s'étend sur une superficie de 50 000 ha, dont les 2/3 se trouvent dans la province d'Errachidia (Cercle d'Imilchil, Commune d'Amouger, d'Ait Yahya, d'Outerbat et d'Imilchil). On note aussi la présence de la réserve biologique à Gazelle créée depuis 1990 dans un but de protection de la Gazelle Dorcas. Elle s'étend sur une superficie de 1 000 ha⁴³.

⁴⁰ <http://www.errachidia.ma/Agriculture.htm>

⁴¹ Idem

⁴² Idem

⁴³ Idem

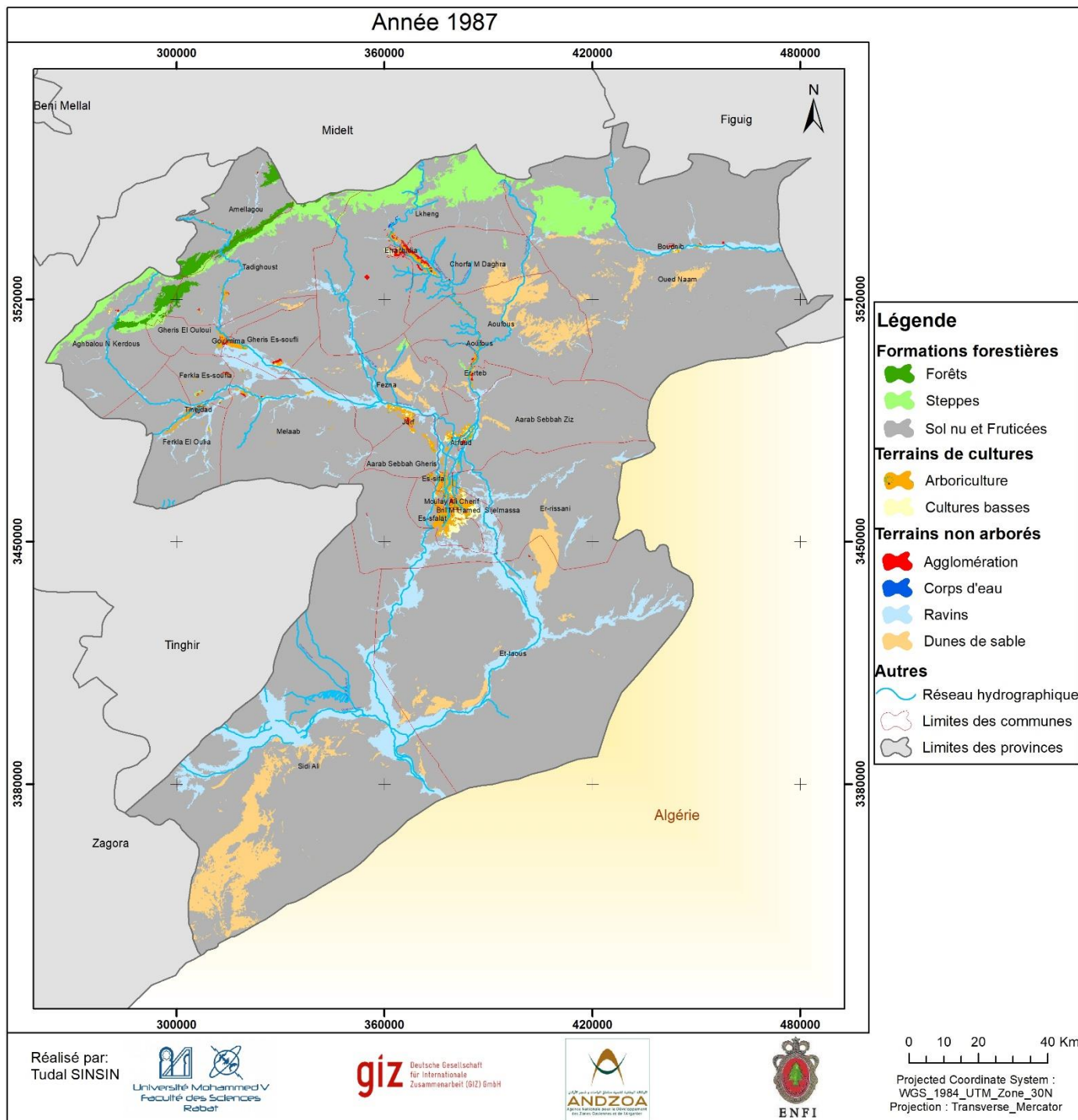


Figure 47 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 1987

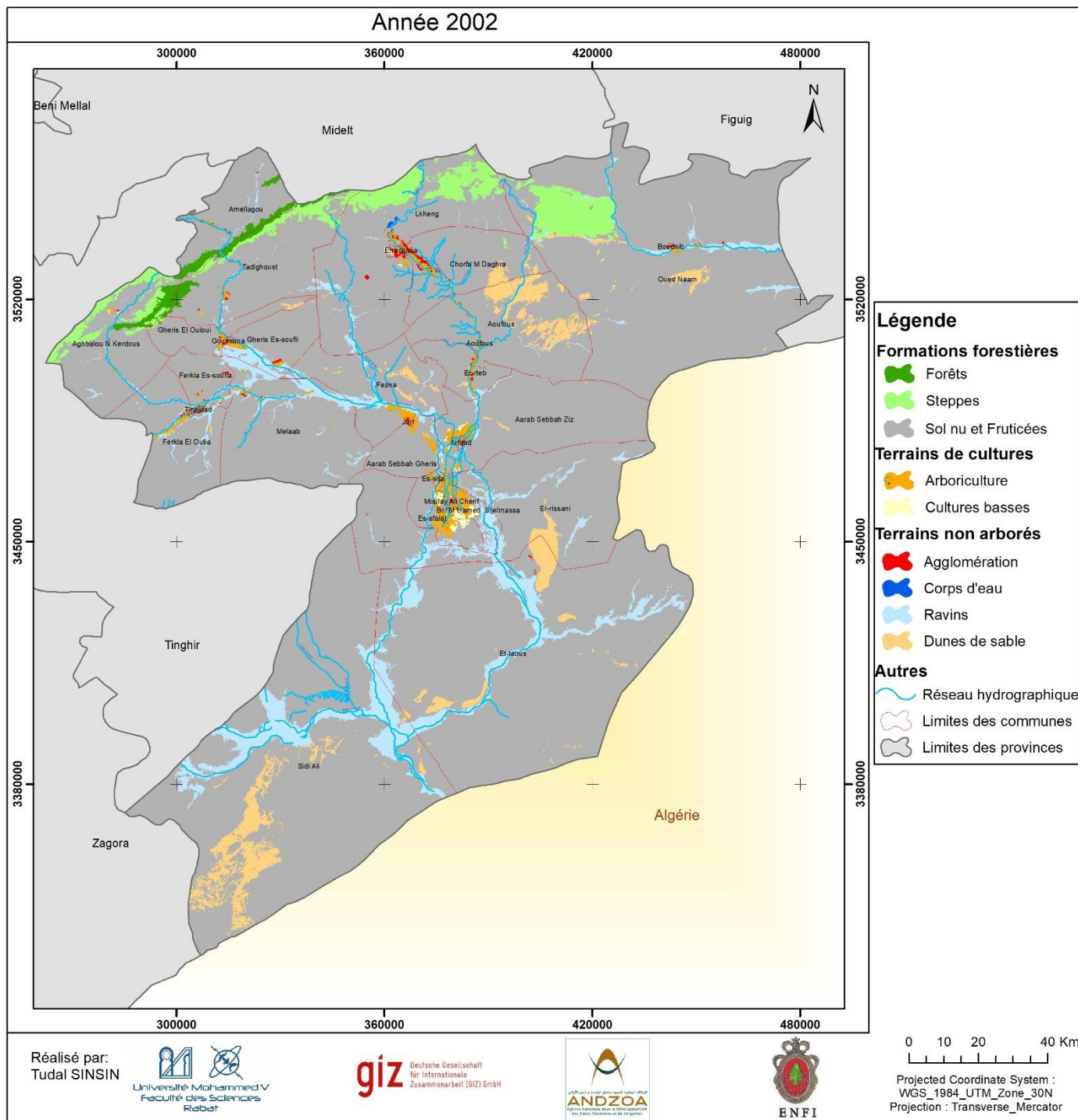


Figure 48 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 2002

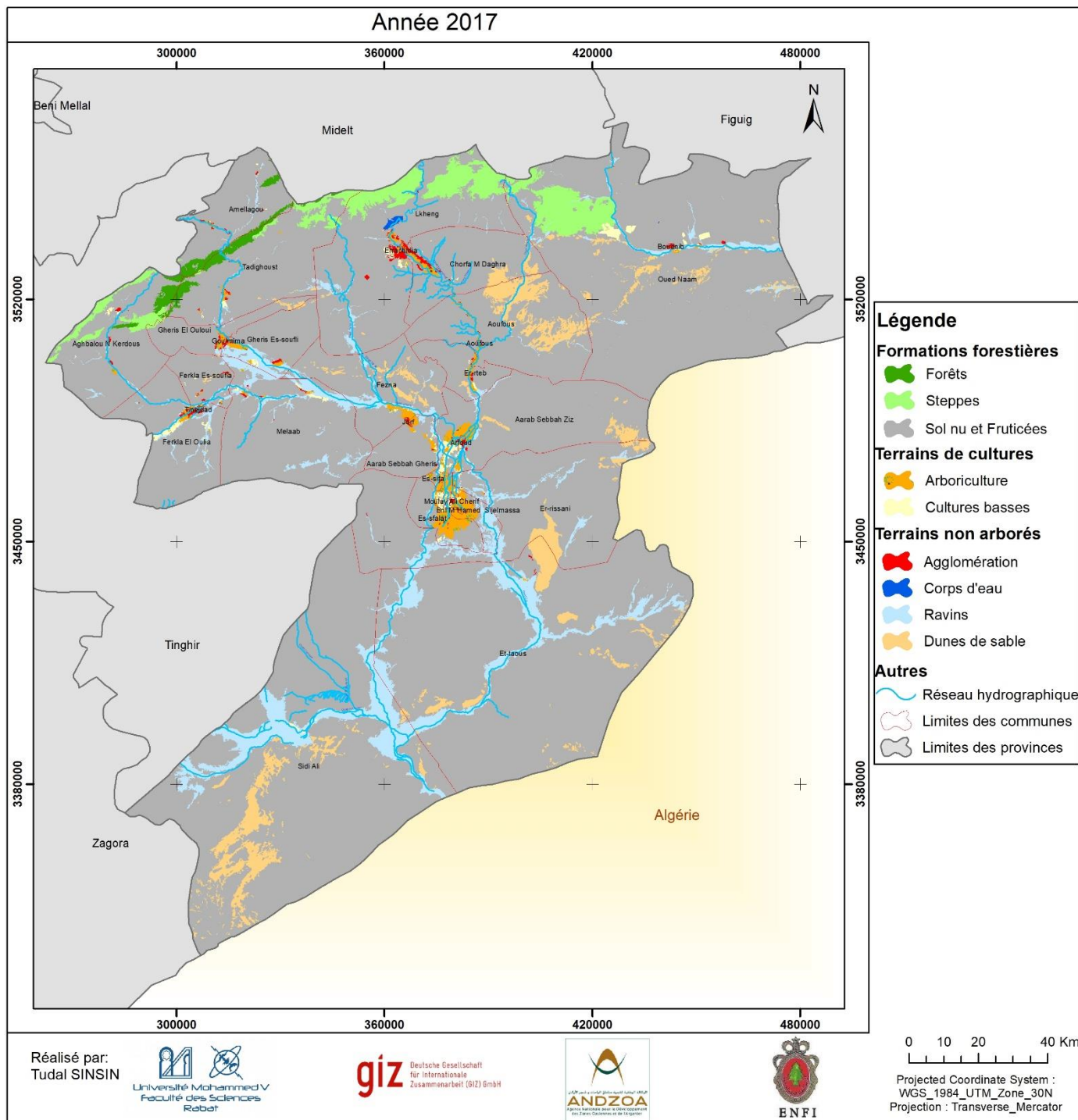


Figure 49 : Cartes d'occupation du sol de la province d'Errachidia en 2017

➤ Milieu socio-économique de la province d'Errachidia

- La population

Errachidia est la province la plus habitée de la région de Drâa-Tafilalet. Déjà en 1994, 20,3% de la population régionale vivait à Errachidia soient 376 414 habitants. Selon le recensement de 2004, la population était passée à 392 963 habitants et le rapport de cette population sur la population régionale a légèrement diminué (19%). Cette augmentation couplée à la diminution constatée au niveau régional témoigne du phénomène d'exode rurale qui avait pris de l'ampleur dans la province augmentant ainsi le taux de chômage en milieu urbain qui atteint 13,7 % contre 2,9 % seulement dans le rural. Le recensement de 2014 a révélé que la province abrite 418 451 habitants soit 25,59% de la population régionale. La proportion de personne en milieu rural est d'environ 54 % de la démographie totale contre 58 % en 2004.

- L'agriculture et l'élevage

D'après la monographie de la province d'Errachidia, 60 % de la population d'Errachidia travaillent dans le secteur agricole. Celui-ci représente 90 % de l'activité économique de la province. Cette activité agricole est concentrée le long des Oueds constituant ainsi les différentes oasis caractéristiques de la région. Les principales espèces cultivées sont le palmier dattier, l'olivier, les céréales, la luzerne, les cultures maraîchères et le henné.

En zone de montagne, on retrouve principalement : les rosacées fruitières (pommes, poires et coings) et les cultures basses (céréales, luzerne et cultures maraîchères) associé à l'élevage bovin et ovin extensif.

Au niveau des vallées et des plaines se cultivent le palmier, l'olivier et les cultures sous-jacentes (céréales, luzerne, légumineuses et maraîchage).

L'élevage occupe une place importante dans la province avec un troupeau de près de 196 839 têtes. Ce troupeau est constitué à 55% d'Ovins, 35,7% de Caprins, 6,9% de Bovins et de Camelins.

La province est aussi caractérisée par la production du miel d'abeille jaune saharienne (*Apis mellifica saharensis*) avec près de 3500 ruches. Il s'agit d'une espèce très rustique et possédant d'énormes qualités d'adaptation⁴⁴.

- La pêche

Au bord des rives de l'Oued sidi Hamza et Assif Melloul ou des lacs d'altitude Isli et Tislite et du barrage Hassan Ed-dakhil, il se pratique la pêche sportive. En effet, au lac Isli on peut retrouver la Truite fario endémique de l'atlas, au lac Tislite on trouve en plus de la Truite, le Brochet. Quant aux autres espèces, le Black-bass, la Perche et le Barbeau ; elles existent au barrage Hassan Addakhil⁴⁵.

- L'artisanat

Les principales branches de l'artisanat au niveau de la province d'Errachidia⁴⁶ sont :

- Le tissage traditionnel : Les produits fabriqués varient du tellis au Hambel en passant par la djellaba, le burnous, la Handira, le Hayek ;
- La Bijouterie : (elle se localise essentiellement dans la ville de Rissani) ;
- La menuiserie et la boissellerie ;
- La vannerie ;
- Les produits à base végétale : dont essentiellement de feuilles de palmiers (panier, sac, couffin, sous plat) ;
- Les pierres fossilisées : c'est une activité artistique caractéristique des villes d'Erfoud et de Rissani, qui sont situées près des gisements et carrières des pierres fossilisées ;
- La poterie : on distingue celle destinée aux multiples usages de la vie quotidienne et celle qui a trait à un procédé décoratif.

⁴⁴ Monographie de la province d'Errachidia, Ministère de l'Intérieur.

⁴⁵ <http://www.errachidia.ma/Agriculture.htm>

⁴⁶ JICA, 2012

- Le tourisme

La province d'Errachidia possède un grand potentiel touristique tant sur le plan naturel que culturel et historique⁴⁷. En effet, la province dispose d'un panel de sites historiques que sont les vestiges de Sijilmassa, le mausolee My Ali Cherif, les Kasbahs et Ksours, les gravures rupestres, les carrières des fossiles et les gorges.

Par ailleurs, la présence du désert au sud de la province et des oasis dans la province favorise l'écotourisme en attirant des touristes nationaux et internationaux. Ces derniers sont surtout attirés par les dunes féeriques de Merzouga et la palmeraie verdoyante des vallées longeant le parcours des oueds Ziz, Ghris, Guir et constituant la grande oasis de Tafilalet. De plus la présence du parc national du haut Atlas et de la réserve biologique à Gazelle peut être aussi un atout pour le tourisme.

En outre, la province attire aussi de nombreux réalisateurs. Elle est reconnue notamment pour les films comme : Momie (1ère, 2ème, 3ème partie), the four fheathers, Dragon du sahara ...

- Les ressources minières

La province recèle de substances métallifères (Pb-Zn-Ba-Fluorine-Cuivre-Mn-Pyrophyllite-Fe) ainsi que de métaux précieux, de roches ornementales et de marbre fossilifère ; le tout réparti entre le Haut Atlas et l'Anti Atlas (Belhouari, 2018).

III-2-3- Sources de données

Les images satellites Landsat fournies par la United States Geological Survey (USGS) ont été téléchargées pour couvrir la période d'étude (de 1987 à 2019). Les images satellite de 1987 à 2000 proviennent du capteur Landsat 5 TM (Thematic Mapper), celles de 2001 à 2012 proviennent du capteur Landsat 7 ETM + (Enhanced Thematic Mapper) et celles de 2013 à 2019 proviennent du capteur Landsat 8 OLI (Operational Land Imager). Ces images ont une résolution de 30 m et ont été prises entre juin et juillet (période durant laquelle les images sont les plus claires et sans nuages grâce à la lumière du soleil). Les mêmes images satellites ont été utilisées pour évaluer la couverture végétale.

⁴⁷ Monographie de la province d'Errachidia, Ministère de l'Intérieur

Les facteurs écologiques utilisés sont extraits de différentes sources :

- Les données CHIRTSmax (Climate Hazards Center Infrared Temperature with Stations) ont été utilisées pour avoir les températures maximales (Tmax) moyennes. Ces données maillées sur la température ont une haute résolution (0,05 °) et fournissent une bonne estimation de Tmax (corrélation $\approx 0,8$) qui est un facteur important pour les analyses climatiques extrêmes, les études sur les changements climatiques et la prévention des risques naturels (Funk, et al., 2019).
- Les données CHIRPS (Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations) à haute résolution (0,05 °) ont été utilisées pour les précipitations moyennes de la zone d'étude (Funk, et al., 2015).
- Nous avons utilisé les données CCMP V2.0 (Cross-Calibrated Multi-Platform Version 2.0) pour évaluer l'impact du vent dans la zone d'étude (Atlas, et al., 2011). L'ensemble de données CCMP combine des vents micro-ondes intersatellites et des observations instrumentales utilisant la méthode d'analyse variationnelle (VAM) pour produire des images à haute résolution (0,25 °). Le CCMP fournit des données maillées sur les vents de surface mesurés par anémomètre (pour la vitesse du vent en mètre par seconde) et la girouette pour la direction (vent U et V) à une hauteur standard à 10 m au-dessus du sol avec une grande précision ($\pm 0,8$ m/s).
- La couverture végétale a été évaluée en appliquant l'indice de végétation ajusté au sol optimisé (OSAVI) sur les images satellites. OSAVI (Optimized Soil adjusted vegetation Index) convient aux zones à végétation relativement clairsemée (couvert végétal <50%) et où le sol est visible à travers la canopée (Rondeaux, et al., 1996), comme c'est le cas dans la province d'Errachidia. La formule de calcul de l'OSAVI est la même que celle utilisée dans l'étude précédente :

$$\text{OSAVI} = (b4 - b3) / (b4 + b3 + 0.16)$$

Dans cette formule, b3 et b4 correspondent respectivement aux bandes du rouge et du proche infrarouge des images satellites Landsat utilisées.

- Le facteur humain évalué est le taux de croissance démographique annuelle à défaut d'avoir le taux de tourisme par commune de la province d'Errachidia, qui aurait été un facteur plus

intéressant du fait que les dunes attirent de nombreux touristes dans la province. Le taux de croissance démographique annuelle est récupéré pour chaque commune de la province d'Errachidia auprès du Haut-Commissariat au Plan (HCP) du Maroc. Il n'existe que des données démographiques pour 2004 et 2014. Les autres facteurs humains telle que l'agriculture, l'élevage ou l'urbanisation n'ont pas été évalué ici car toutes ces activités sont menées dans des zones relativement éloignées des formations dunaires.

III-2-4- Approche méthodologique

Dans cette étude, nous avons évalué la dynamique des dunes de sable en utilisant la technique de télédétection et le SIG sur les données de 1987 à 2019. Cette période de 32 ans a été choisie en fonction de la disponibilité d'images satellite de qualité et selon les recommandations du GIEC (IPCC, 2018), qui suggère une période minimale de 30 ans pour étudier l'évolution de facteurs liés au climat.

La couverture des dunes de sable a été déterminée en appliquant l'Indice de Voile Sableux (IVS) sur les images satellites téléchargées. Cet indice a été développé à partir de l'indice construit (Abdellaoui & Rougab, 1997). L'IVS augmente les valeurs de pixels correspondant à la "couverture sableuse" et réduit les valeurs des autres pixels sans les supprimer. Cet indice a été testé avec succès en Algérie (Abdellaoui & Marmi, 2010) où les conditions climatiques sont proches de celles à Errachidia. L'IVS est calculée par la formule suivante :

$$IVS = (b1 + u * b2 + v * b3) / (1 + b1) .$$

Dans cette formule : b1, b2, b3 désignent respectivement les canaux Bleu, Rouge et proche Infrarouge. Les constantes u et v ont été fixées à 1,5 et 2,5 respectivement (Abdellaoui & Marmi, 2010).

Les cartes montrant l'étendue des dunes par an de 1987 à 2019 à Errachidia ont pu alors être produites. Les superficies des dunes de sable extraites de ces cartes constituent une série chronologique, qui a ensuite été modélisé en Python (langage de programmation) en utilisant le modèle Saisonnier Autorégressif Intégré à Moyenne Mobile (SARIMA). SARIMA (Seasonal

Autoregressive Integrated Moving-Average) modélise l'étape suivante de la série chronologique en fonction linéaire des observations différenciées, des erreurs, des observations saisonnières différenciées et des erreurs saisonnières aux pas de temps antérieurs. SARIMA convient aux séries chronologiques uni-variées avec des tendances et des composantes saisonnières. Il combine à la fois l'autorégression (AR) en tant que « p » et la moyenne mobile (MA) en tant que « q » ainsi qu'une étape de prétraitement de différenciation de séquence pour rendre la séquence stationnaire, appelée intégration noté « d » (Brownlee, 2018). « p » fait référence au nombre de retards sur y (axe des ordonnées) à utiliser comme prédicteurs ; et « q » fait référence au nombre d'erreurs de prévision décalées qui devraient entrer dans le modèle ARIMA (Autoregressive Integrated Moving-Average) (Prabhakaran, 2019). Ces paramètres (p, d, q) sont les paramètres du modèle ARIMA. SARIMA combine le modèle ARIMA avec la capacité d'effectuer la même autorégression noté P, la différenciation noté D et la moyenne mobile noté « Q » modélisées au niveau saisonnier. La notation globale du modèle est SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) m où « m » est le nombre de pas de temps pour chaque saison.

La valeur des paramètres du modèle a été déterminée en plusieurs étapes. Ces étapes sont vérifiables en implémentant l'algorithme écrit en Python et fourni en annexe.

Premièrement, l'ordre de différenciation (d) dans le modèle SARIMA a été fixé à 0 car nous avons constaté que la série est déjà stationnaire en utilisant le test ADF (Augmented Dickey Fuller).

Pour connaître la valeur de « p », nous avons inspecté la courbe d'autocorrélation partielle (PACF) de la série chronologique. Nous avons observé que le décalage d'autocorrélation partielle pour 1 est assez significatif au seuil de 0.05. Par conséquent, nous avons fixé « p » à 1.

Comme pour 'p', nous avons inspecté la courbe d'autocorrélation (ACF) de la série chronologique pour déterminer la valeur de « q ». Nous avons observé que le décalage d'autocorrélation est assez significatif au seuil de 0.05. Par conséquent, nous avons fixé « q » à 1.

Les autres paramètres ont été choisis en utilisant en Python le critère d'information Akaike (AIC) qui permet de mesurer la qualité du modèle statistique. Ainsi, pour les valeurs de (p, d, p) = (1, 0,

1), il s'est avéré que les valeurs de $(P, D, Q) = (1, 1, 1)$ ont donné l'AIC minimum, ce qui signifie que ces valeurs donnent la meilleure précision.

Enfin, en analysant la courbe de variation de la série chronologique des superficies des dunes de sable, nous avons pu détecter une périodicité de 6 ans, qui peut être utilisée pour observer la répétition des phénomènes influençant la dynamique des dunes de sable. C'est également cette valeur qui a donné le résultat le plus significatif. Ces 6 années ont donc été utilisées comme nombre de pas de temps pour chaque saison (m) dans le modèle SARIMA.

Cependant, la mise en œuvre de SARIMA (1, 0, 1) (1, 1, 1) 6 a donné des résultats non significatifs ($P\text{-value} > 0,05$) pour toutes les valeurs choisies pour les paramètres. Ainsi, nous avons augmenté d'un niveau l'ordre des paramètres (p, d, q) comme suggéré par Prabhakaran (2019) en cas de séries sous-différenciées. Ensuite, nous avons implémenté SARIMA (2, 1, 2) (1, 1, 1) 6. Nous avons noté que ces valeurs pour les paramètres (p, d, q) donnaient des résultats très significatifs ($P\text{-value} < 0,01$) à l'exception des valeurs de « P » et « Q ». Par conséquent, nous reconstruisons le modèle en leur attribuant la valeur 0. Ainsi, tous les paramètres de SARIMA (2, 1, 2) (0, 1, 0) 6 étaient statistiquement très significatifs ($P\text{-value} < 0,01$), ce qui suggère ce paramétrage du modèle comme étant le meilleur pour modéliser et prédire la dynamique des dunes de sable.

Enfin, afin de comprendre l'influence des facteurs naturels et humains sur la dynamique des dunes de sable dans la zone d'étude, nous avons suivi plusieurs étapes successives.

Premièrement, nous avons évalué pour chaque période de 6 ans (1989-1995; 1995-2001; 2001-2007; 2007-2013 et 2013-2019) la valeur moyenne (présentée en annexe) de la température maximale, des précipitations, des vents dominants et de la dynamique de la végétation dans chaque commune de la province d'Errachidia où les dunes de sable ont été représentées en utilisant les données maillées décrites dans la partie « source de données ». Cette inter-période de 6 ans a été choisies en fonction de la valeur de « m » choisi dans le modèle SARIMA. Ensuite, la corrélation entre chaque facteur et la dynamique des dunes de sable a été testée en utilisant la corrélation de Spearman. Ce type de corrélation a été choisi suite au résultat du test de normalité de Kolmogorov-smirnov et celui de Shapiro-wilk, qui a révélé que les variables ne suivent pas la distribution normale au seuil de 0,05.

Concernant le facteur humain, la corrélation de Spearman entre les taux de croissance annuelle de la population avec la dynamique annuelle des dunes de sable entre 2004 et 2014 a été testée.

III-2-5- Résultats

III-2-5-1-Répartition spatio-temporelle des dunes à Errachidia

Les dunes de sable sont présentes dans 17 des 21 communes rurales de la province d'Errachidia (Figure 50). Les communes d'Oued Naam et Sidi Ali ont la plus grande superficie occupée par les dunes (superficie > 50 000 ha) tandis que la commune de Melaab a la plus petite étendue (superficie <100 ha) quelle que soit l'année. Les communes d'Oued Naam et de Sidi Ali connaissent la plus grande expansion et contraction des dunes de la province. A noter cependant qu'entre 1995, 2001 et 2007, la commune de Fezna a connu une contraction des dunes relativement élevée par rapport aux autres périodes. On remarque également que pendant ces périodes à Fezna, la température est relativement plus élevée, les précipitations sont plus faibles et le vent est plus fort.

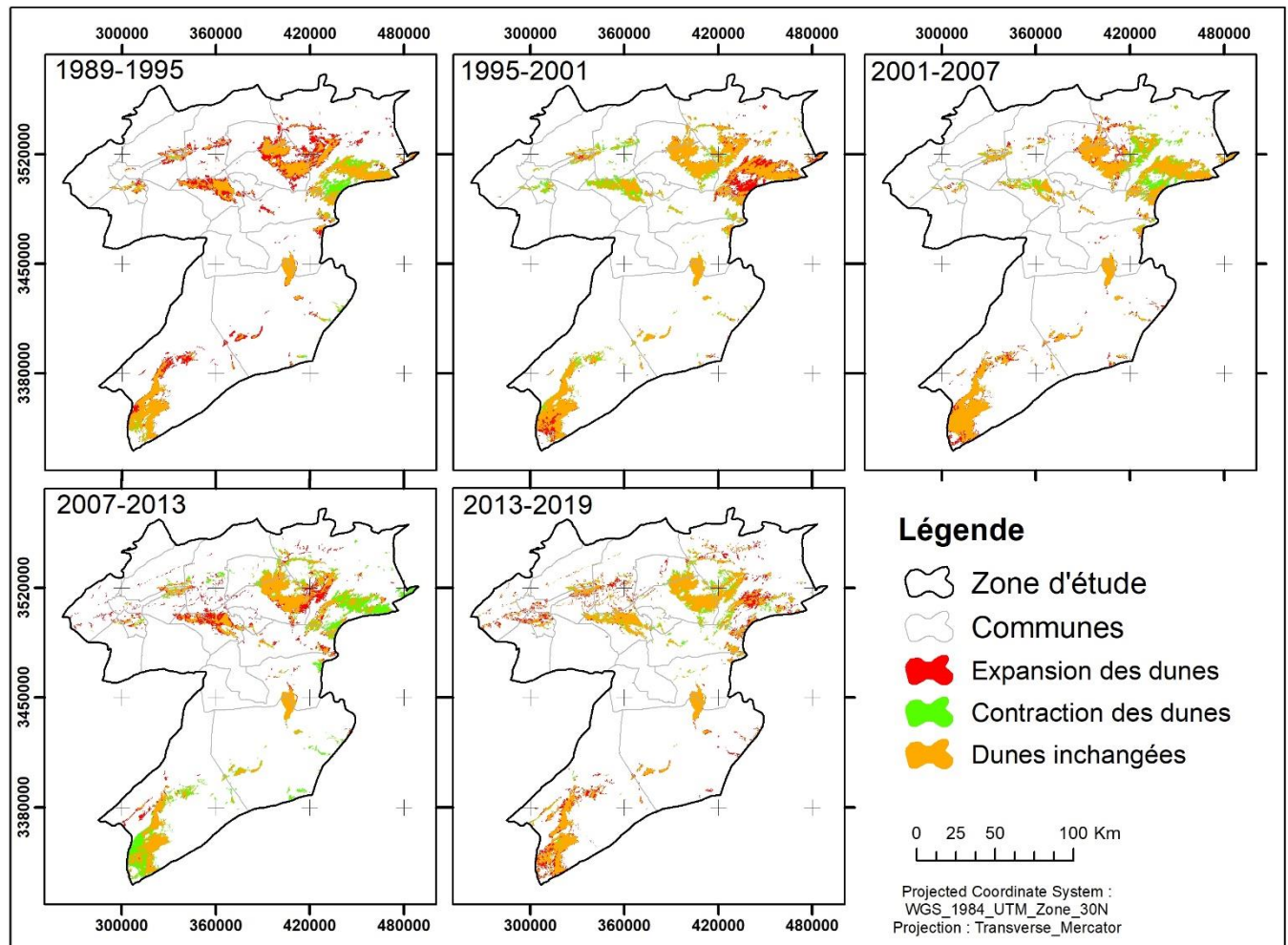


Figure 50: Contraction et expansion des dunes en termes de distributions spatiales et temporelles par période dans la province d'Errachidia de 1989 à 2019

La Figure 51 présente la superficie totale des dunes de sable de 1987 à 2019. Cette superficie a une tendance linéaire générale à l'augmentation. En effet, la superficie des dunes de sable est passée de 247 744 ha en 1987 à 263 280 ha en 2019, ce qui correspond à une augmentation de 0,2% par an. L'expansion maximale des dunes de sable a été observée entre 1990 et 1992, où la superficie des dunes de sable a augmenté de 55 841 ha par an. Cette période est également caractérisée par une diminution des précipitations et une augmentation de la vitesse du vent (Figure 52). La plus petite surface couverte par des dunes de sable a été observée en 2012 au cours de laquelle les précipitations moyennes annuelles étaient relativement les plus élevées.

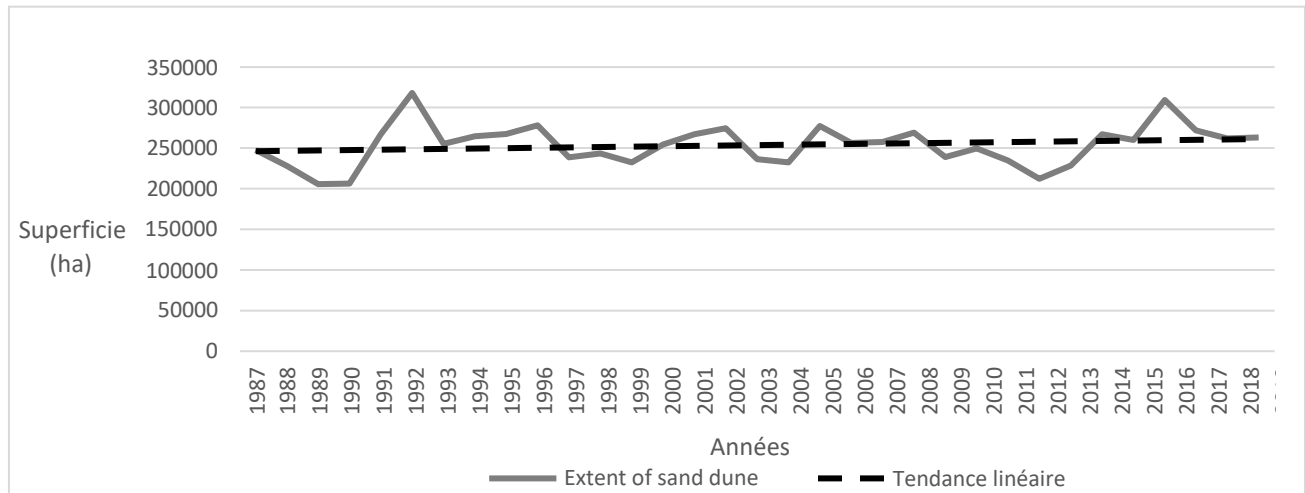


Figure 51 : Dynamique des dunes de sable de 1987 à 2019

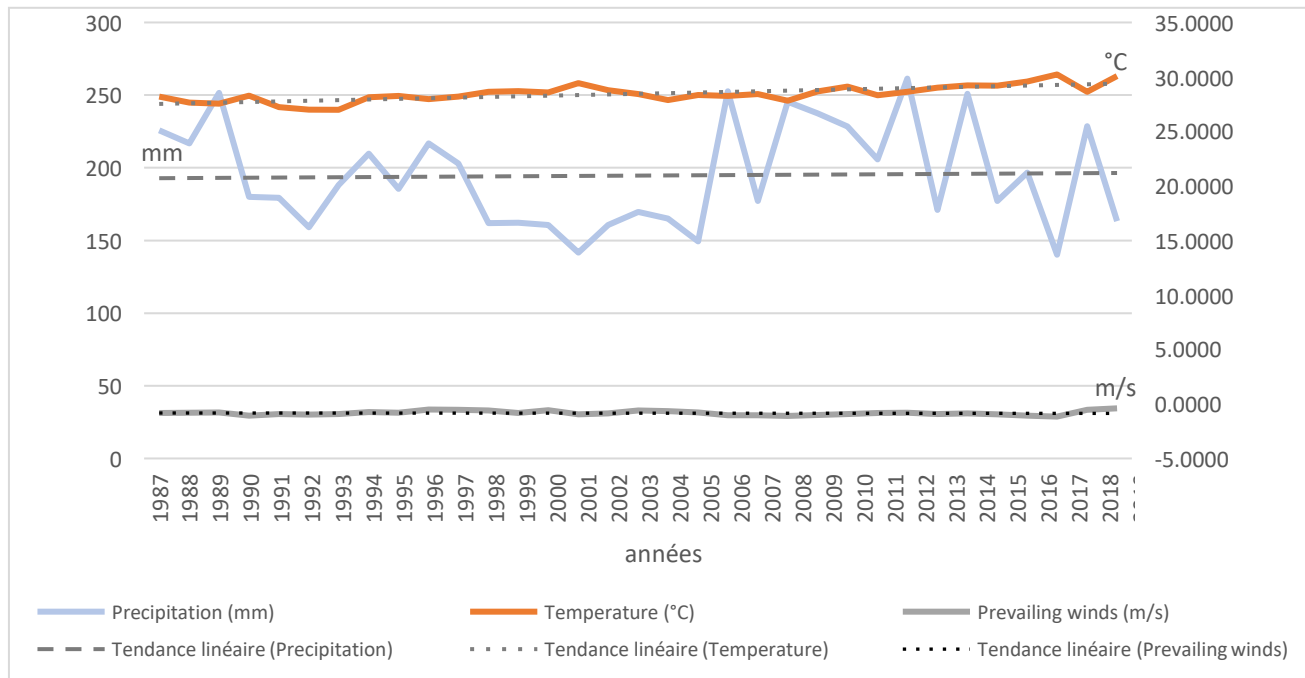


Figure 52 : Evolution des facteurs climatiques de 1987 à 2019

L'implémentation du modèle SARIMA (2, 1, 2) (0, 1, 0) 6 ayant donné le résultat le plus significatif, a permis d'évaluer la dynamique des dunes de sable au cours des 50 prochaines années

avec une erreur moyenne absolue en pourcentage de nos prévisions égale à 7,68%. Cette évaluation a montré dans la Figure 53 que les dunes de sable continueront de s'étendre en termes de superficie, ce qui augmentera les problèmes d'ensablement dans la province d'Errachidia si rien n'est fait. La superficie occupée par les dunes de sable sera de 485 315 ha en 2069, ce qui correspond à une augmentation de 1,7% par rapport à la superficie actuelle des dunes.

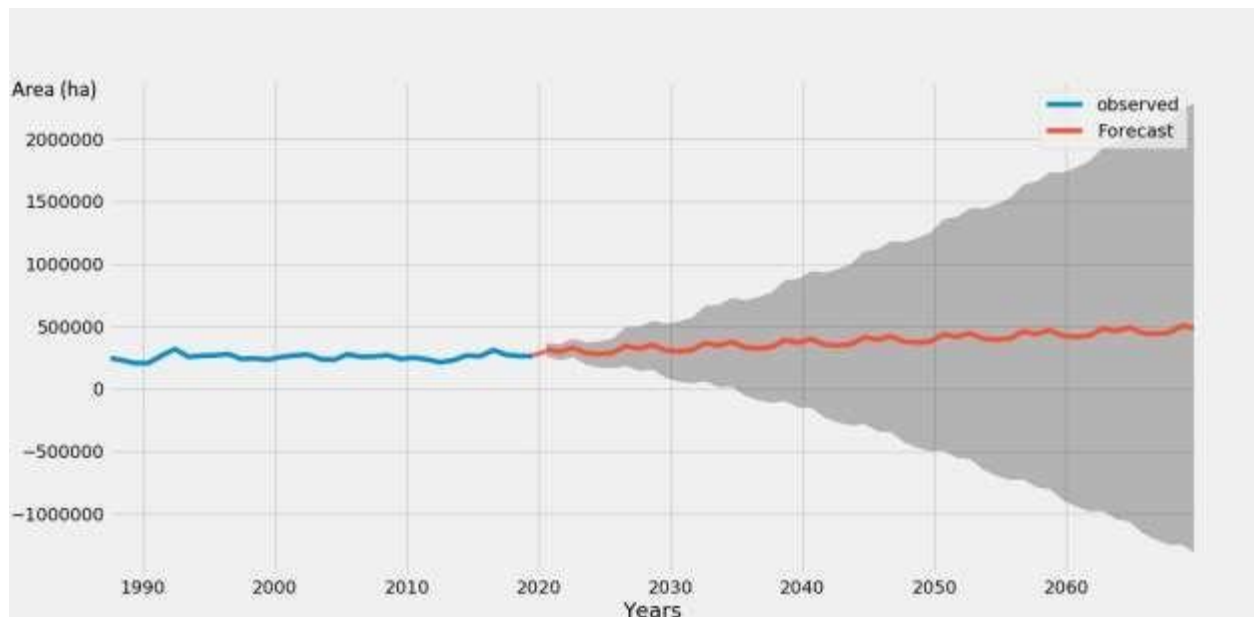


Figure 53 : Résultat de la prévision de la série chronologique sur l'étendue des dunes de sable de 2019 à 2069

III-2-5-2-Influence des facteurs naturels et humains sur la dynamique des dunes de sable

Compte tenu du fait que la température, les précipitations et le vent, sont les premiers facteurs naturels du milieu (Ayoub, 1998 ; Breckle, et al., 2008 ; Wang, et al., 2008 ; Guan, et al., 2016) ils ont été choisis pour analyser l'impact sur la dynamique des dunes de sable à chaque période définie. Cette analyse s'est fait en calculant la moyenne de chacun de ces facteurs pour chacune de cinq périodes de 6 ans qui séparent 1989 de 2019. Ensuite, l'évolution de ces moyennes par période a été corrélée à la dynamique des dunes de sable à l'échelle de toute les communes.

- **Température**

L'évolution de la température entre 1989 et 2019 dans la province d'Errachidia se présente comme suit : en moyenne, la température maximale était de 27,6°C entre 1989 et 1995. Elle a augmenté de 0,9°C entre 1995 et 2001 ; puis est resté approximativement inchangé entre 2001 et 2013 pour ensuite augmenter à nouveau entre 2013 et 2019 passant à 29,4°C. Ainsi, la tendance générale de la température entre 1989 et 2019 est progressive témoignant donc du changement climatique.

L'analyse de la corrélation a révélé qu'il n'y avait pas de corrélation significative entre la température et la dynamique des dunes de sable sauf au cours de la période allant de 2001 à 2007 où il y avait une corrélation significative entre la température et l'expansion des dunes. Cette corrélation est de 0.515. Notons que la période de 2001 à 2007 est celle où les précipitations sont les plus basses.

Du fait que la température ne présente pas une corrélation significative sur toutes les périodes de l'étude, on peut affirmer qu'elle n'est pas le principal facteur qui influence la dynamique des dunes de sable. Néanmoins, on a noté que la température a un effet très significatif sur le vent tout au long de la période d'étude. La valeur du coefficient de cette corrélation varie de -0.89 à -0.81.

- **Précipitation**

La moyenne des précipitations annuelles a décru continuellement durant les trois premières périodes de l'étude passant de 193,4 mm entre 1989 et 1995 ; à 176 mm entre 1995 et 2001 ; et à 173,8 mm entre 2001 et 2007. Ensuite, cette moyenne est passée à 218,2 mm entre 2007 et 2013 avant de descendre à 189,8 mm entre 2013 et 2019.

L'analyse de la corrélation a révélé que les précipitations ont une corrélation significative à très significative avec la dynamique des dunes de sable au niveau de toutes les périodes de l'étude sauf entre 1995 et 2001. Cela suppose que les précipitations conditionnent énormément la dynamique des dunes de sable mais, ne permettent pas à elles seules d'expliquer cette dynamique. Par ailleurs, la corrélation entre les précipitations et la dynamique des dunes est négative et varie entre -0.54 et -0.41. Notons également que les précipitations présentent une forte corrélation avec la dynamique de la végétation surtout entre 2001 et 2019.

- Vent

La moyenne des vents dominants fournie par CCMP et résultant de la rencontre entre les vents U (vent zonal) et V (Vent méridional) dans la zone d'étude, présente une tendance générale à l'augmentation de 1989 à 2001. Cependant, au cours des périodes qui suivent, cette moyenne tend à diminuer.

L'analyse de la corrélation a révélé que le vent a une corrélation significative à très significative avec la dynamique des dunes de sable au cours des premières périodes (1989 à 2013). La valeur du coefficient de corrélation varie entre 0.52 et 0.65. Par contre, cette corrélation n'est pas significative au cours de la dernière période fort probablement à cause de la diminution de la moyenne des vents dominants constatée. Ainsi, en dépit de l'influence empirique que le vent peut avoir sur le déplacement des dunes de sable dont les directions changent dans le temps, le vent à lui seul ne permet pas d'expliquer raisonnablement la dynamique de la désertification tout au long de la période d'étude.

- Végétation

La dynamique de la végétation est exprimée par la superficie totale du couvert végétal ayant subi un changement d'occupation du sol au cours d'une période donnée. Elle est calculée en additionnant la superficie sur laquelle la végétation a régressé à la superficie où la végétation a progresser. Le couvert végétal a diminué entre 1989 et 1995, puis elle a augmenté entre 1995 et 2007 pour ensuite diminuer à nouveau entre 2007 et 2013 et augmenter entre 2013 et 2019 (Figure 54).

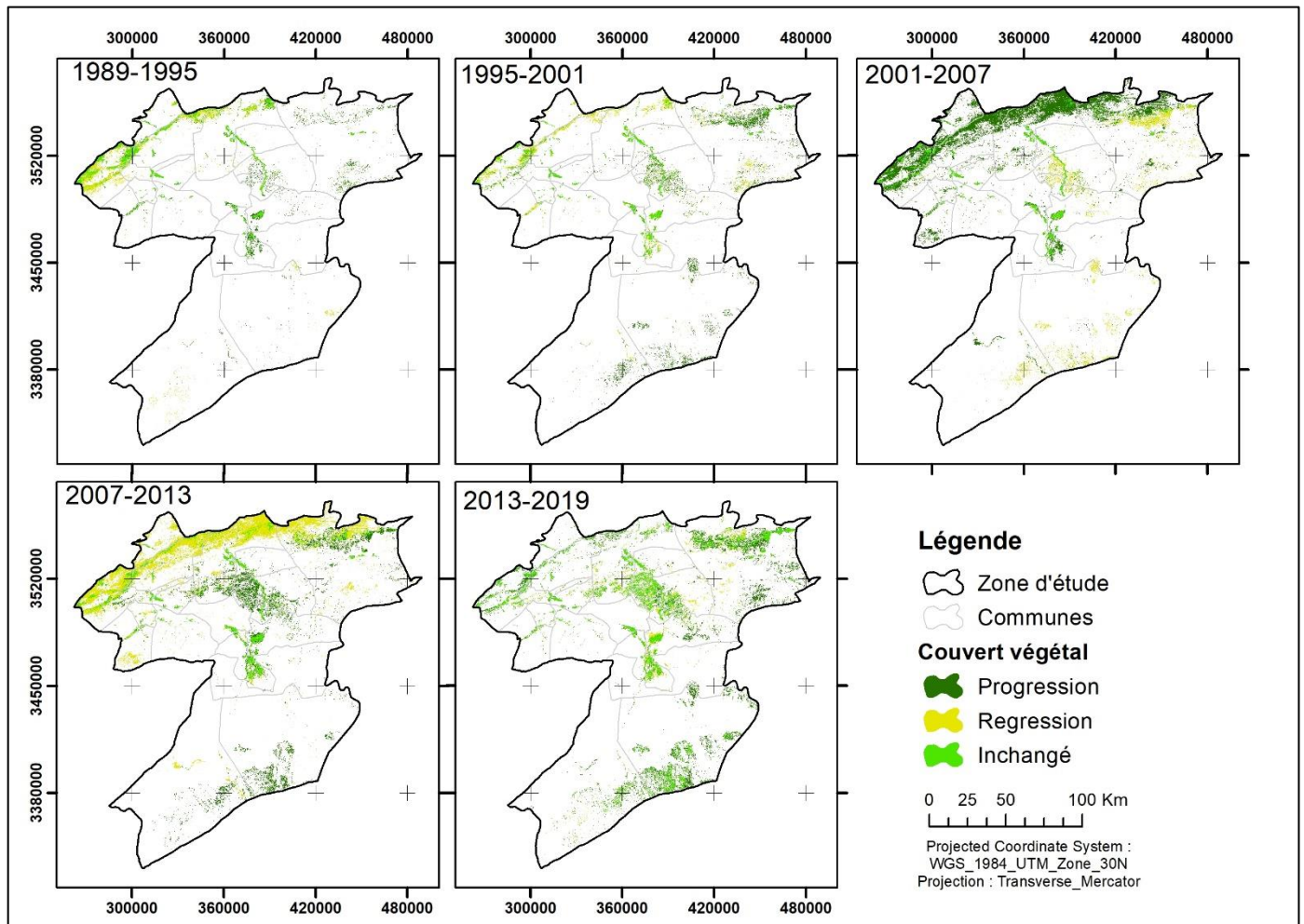


Figure 54 : Carte de changement du couvert végétale par période dans la province d'Errachidia de 1989 à 2019

L'analyse de la corrélation a révélé qu'il y a une corrélation très significative entre la dynamique de la végétation et la dynamique des dunes de sable au cours des dernières périodes (2001-2019). Cette corrélation varie de 0.58 à 0.68. Cependant, au cours des premières périodes (1989-2001), la corrélation n'est pas significative entre la dynamique de la végétation et la dynamique des dunes de sable. L'évolution de la végétation ne peut donc pas être considérée comme le principal facteur influençant la dynamique des dunes de sables.

- Facteur humain

Le coefficient de corrélation entre le taux de croissance annuel de la population et la dynamique des dunes de sable est négatif et vaut en valeur absolue 0.348. Cependant, le test de corrélation a révélé que la croissance démographique n'est pas significativement corrélée avec la dynamique des dunes de sable.

III-2-6- Discussion

Comme de nombreux auteurs, nous avons noté que le vent a une grande influence sur la dynamique des dunes de sable (Tsoar, 2005 ; Wang, et al., 2006 ; Guan, et al., 2016). Cet effet du vent peut être augmenté ou diminué par d'autres facteurs tels que la température. Les températures extrêmes sont fortement liées à la désertification (Darkoh, 1998) et à l'expansion des dunes de sable (Clarke & Rendell, 2011). En effet, des températures élevées peuvent augmenter la vitesse du vent en diminuant la densité de l'air. Ils augmentent également l'évaporation (Evan, et al., 2015 ; Hao, et al., 2016), ce qui rend les particules de sol moins compactes et donc plus faciles à transporter par le vent (Breckle, et al., 2008). Cela explique la forte corrélation très significative constatée entre la température et le vent.

Comme nous l'avons noté avec l'analyse de corrélation, les précipitations influencent également fortement sur la dynamique des dunes (Yizhaq, et al., 2013). Elles agissent indirectement sur la dynamique des dunes de sable en favorisant les changements dans le couvert végétal (Malo & Nicholson, 1990 ; Hess, et al., 1996 ; Kawabata, et al., 2001), qui participe à la fixation des dunes de sable (Lancaster & Baas, 1998 ; Durán & Herrmann, 2006). La végétation limite le transport du sable par le vent, protège le sol contre l'érosion et retient les particules de sable. Son rôle de stabilisateur des dunes de sable dépend de la hauteur, de la rugosité et de la densité de la biomasse végétale (Wolfe & Nickling, 1993). Selon de nombreux auteurs, la végétation est significativement corrélée à la dynamique des dunes de sable (Ash & Wasson, 1983 ; Thomas, et al., 2005) en particulier ces dernières années avec la multiplication des campagnes de reboisement pour la fixation des dunes de sable et l'installation de brise-vent entreprises par HCEFLCD dans la province d'Errachidia. Pour cette raison, les activités humaines ne peuvent pas être sous-estimées.

Les activités humaines sont la principale cause de la désertification dans de nombreuses régions du monde (Ayoub, 1998 ; Girma, 2001 ; Laki, 2009). Cependant, les zones urbaines ne sont pas souvent liées à la désertification dans les zones hyperarides (Barbero-Sierra, et al., 2013). Cela explique l'absence de corrélation significative entre la croissance de la population et la dynamique des dunes de sable. Néanmoins, les activités humaines peuvent influencer négativement ou positivement la dynamique des dunes de sable. Si elles sont bien planifiées, menées et réglementées, elles peuvent contribuer à réduire l'ensablement dans les zones désertiques (Darkoh, 1994 ; Portnov & Safriel, 2004).

III-2-7- Conclusion

Cette étude a montré que le phénomène de désertification tend à augmenter avec la température due au changement climatique (IPCC, 2018). À Errachidia, ce phénomène s'exprime par l'expansion des dunes de sable. Le résultat du test de corrélation de Spearman réalisé dans cette étude prouve que la dynamique des dunes de sable est influencée par des facteurs naturels et humains, qui n'agissent pas individuellement. La température et les précipitations agissent indirectement sur le vent et la végétation pour influencer la dynamique des dunes de sable. En fait, les facteurs agissent en synergie et influencent le mouvement des particules de sable sur les dunes dans les zones hyperarides où les sols sont nus ou mal couverts de végétation, où les précipitations sont faibles et où la température est élevée (Tsoar, 2005 ; Yizhaq, et al., 2007).

Dans de nombreuses régions, la désertification est causée principalement par l'augmentation de la population, la déforestation, le défrichement, la mise en culture et le surpâturage (Mainguet, 1994 ; Ayoub, 1998 ; Girma, 2001 ; Cornet, 2002 ; Sinsin, 2018). Cependant, dans les zones désertiques, la désertification, qui se traduit par l'avancée du désert et l'ensablement (Le Houérou, 1962), est causée principalement par la vitesse du vent qui conditionne le mouvement du sable sur les dunes dans les zones où les sols sont nus ou peu couverts par la végétation et où les précipitations sont faibles (Tsoar, 2005 ; Yizhaq, et al., 2007). A cela s'ajoute la sécheresse (Darkoh, 1998) qui devient de plus en plus sévère avec l'augmentation des températures au fil des années (Evan, et al., 2015 ; Hao, et al., 2016).

La fragilité des écosystèmes, l'inadaptation des techniques culturales et les modes de gestion inappropriée des ressources naturelles sont également des facteurs d'aggravation de la désertification dans les zones hyperarides (Guedegbe, et al., 2018). Cependant, la bonne gouvernance et les actions anthropiques (paillage, reboisement) favoriser la lutte contre la désertification (Darkoh, 1994 ; Portnov & Safriel, 2004).

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse étant d'évaluer le phénomène de la désertification sous la forme dans laquelle elle se présente dans les écosystèmes les plus vulnérables du Maroc, une approche méthodologique dite d'analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée a été implémentée à l'échelle de tout le Maroc. Cette approche a permis d'évaluer la vulnérabilité à la désertification de différentes régions du Maroc. L'approche consiste, dans un premier temps, à définir des zones biogéographiques homogènes à partir d'indicateurs environnementaux physiques qui sont principalement: la température, les précipitations, le relief et le type de sol. Enfin, la vulnérabilité à la désertification de chacune des zones homogènes prédéfinies peut être évaluée en analysant les indicateurs biologiques et anthropiques de pression et d'état tels que le taux de couverture forestière, l'étendue des terres cultivées, le taux de charge animal et la densité de population. La méthode d'analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée peut être adaptée, puis réutilisée dans d'autres pays ou régions du monde touchés par la désertification. Elle peut aider à identifier les zones les plus vulnérables à la désertification et ainsi aider les décideurs à tirer les bonnes conclusions et à organiser des actions de lutte contre le phénomène de désertification. Parmi les zones les plus vulnérables du Maroc figurent la zone d'arganeraie au Sud-ouest et les écosystèmes dunaires et leurs oasis notamment au Sud-Est (à Errachidia).

La vulnérabilité de la zone d'arganeraie tient surtout de la présence de l'arganier, arbre à multiples usages (Emberger, 1925 ; M'hirit, et al., 1998), qui joue un rôle socio-économique et culturel très important (El Fasskaoui, 2009) et contribue à la vie de plus de deux millions d'habitants (Tarrier et Benzyane, 2003). Malgré cette importance, l'arganeraie ne cesse de se dégrader à cause de l'aridité du climat et de la pression anthropique principalement (M'hirit, et al., 1998 ; Tarrier et Benzyane, 2003 ; Nouaim, 2005 ; Naggar et M'hirit, 2006 ; Bellefontaine, 2010 ; Achour, et al., 2011). Cependant, le rythme de dégradation varie d'une région à l'autre. En effet, dans les zones à faible pente et sous bioclimat plus aride, la situation est pire. La régression de l'arganier diminue avec la diminution de l'aridité du climat et l'augmentation de la pente à cause de la difficulté d'accès du terrain. Les écosystèmes naturels à Arganiers laissant de plus en plus la place à l'arganiculture notamment dans les zones à faible pente. En montagne, les coupes et le pâturage s'accroissent. Il est donc nécessaire de renforcer les mesures prioritaires susmentionnées pour lutter contre la dégradation des forêts d'arganiers.

Dans les écosystèmes dunaires, l'une des principales conséquences de la désertification est l'ensablement qui menace surtout les palmeraies dans les oasis et les infrastructures notamment dans la province d'Errachidia (HCEFLCD, 2001). L'ensablement est fonction de la dynamique (progressive et régressive) des dunes qui est conditionnée par les facteurs écologiques où la vitesse du vent et le couvert végétal joue un rôle prépondérant (Ash & Wasson, 1983 ; Thomas, et al., 2005). En effet, la vitesse du vent conditionne le mouvement du sable sur les dunes dans les zones où les sols sont nus ou peu couverts par la végétation et où les précipitations sont faibles (Tsoar, 2005 ; Yizhaq, et al., 2007). A cela s'ajoute la sécheresse (Darkoh, 1998) qui devient de plus en plus sévère avec l'augmentation des températures au fil des années (IPCC, 2018). La lutte contre le phénomène de l'ensablement qui ne cesse de prendre de l'ampleur dans la province d'Errachidia passe par un certain nombre d'actions tels que le paillage, le reboisement et le semi pour la fixation des dunes, la mise en défens et l'installation de brise vent.

L'objectif ultime des études d'identification et de modélisation des problèmes et des facteurs de dégradation comme celles réalisées dans ce projet de thèse est d'arriver à préserver les écosystèmes naturels, particulièrement l'arganeraie et les oasis, avec l'amélioration des modes et techniques de gestion et de conservation, et la rationalisation des usages.

A-Recommandations pour lutter contre la désertification

Compte tenu de ce qui précède et sur la base d'observations empiriques sur le terrain, les principales causes et les solutions proposées pour remédier à la vulnérabilité dans chaque zone homogène du Maroc sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11: Résumé des défis et recommandations proposées pour chaque zone homogène du Maroc

Numéro	Zone homogène	Principaux défis	Solutions et recommandations
1	Zone saharienne	Erosion éolienne et ensablement	Fixation des dunes et installation de brises vents
2	Zone pré-désertique	Erosion (hydrique et éolienne) ; salinisation des sols	Reforestation et brises vents
3	Arganeraie	Croissance démographique ; surpâturage ; érosion hydrique ; défrichement ; surexploitation de l'argan et autres produits de l'écosystème	Sensibilisation; Mise en place de meilleures politiques et lois pour la gestion des forêts d'arganiers; Encouragement aux activités annexes comme l'apiculture pour diversifier l'économie
4	Chaîne atlasique versant Nord	Surpâturage ; défrichement et surexploitation des produits forestiers	Protection des forêts ; Arboriculture et cultures fourragères pour le bétail
5	Plaines et plateaux Nord atlasiques	Défrichement et érosion hydrique	Reforestation et agroforesterie
6	Plaines et plateaux de l'Oriental	Surexploitation des ressources forestières ; surpâturage et érosion hydrique	Reforestation ; agroforesterie
7	Plaines agricoles du Gharb	Défrichement ; surexploitation des eaux et du sol	Reforestation; agroforesterie
8	Plaines agricoles du Prérif et la chaîne rifaine	Défrichement ; surexploitation des eaux et du sol ; surpâturage ; culture du cannabis ; érosion hydrique.	Reforestation ; développement d'activités annexes telles que l'aquaculture, l'agroforesterie, l'artisanat

1- Mesures prioritaires dans l'Arganeraie

Les mesures prioritaires à promouvoir pour réduire la dégradation de l'écosystème à arganier sont :

➤ Promouvoir davantage l'approche participative

Cette approche a été initiée dans la gestion de l'arganeraie à partir des années 1990 (Naggar, et al., 2019) notamment suite aux recommandations de la conférence de Rio (1992) Jadis, les forestiers étaient perçus comme les gendarmes de la forêt dont le rôle est de priver la population de son droit d'usage. Cette vision est peu à peu en train de changer grâce à des campagnes de sensibilisation qui se sont succédé et à un aménagement concerté de l'arganeraie. Ce type d'aménagement consiste à identifier les vocations des différents espaces forestiers et à collaborer étroitement avec les usages en vue de proposer les formes de gestion les plus appropriées pour préserver et valoriser les ressources de façon durable pour le bien de la population riveraine.

L'approche participative de l'aménagement concerté intègre donc les aspects biodiversité, bois-énergie, parcours, agriculture, développement de la filière Arganier ou autres (Figuier par exemple) dans les modalités de gestion et d'exploitation des terroirs et l'organisation de l'exploitation des ressources naturelles dans le temps et dans l'espace.

Ainsi, les stratégies globales d'aménagement du territoire pour l'arganeraie doivent être fondées sur une prise en charge solidaire et partenariale des enjeux locaux de développement sociétal et économique.

Il serait également opportun de faire recours à un système de médiation composé de personnes du territoire pour la gestion des conflits qui peuvent naître des modes d'utilisation des terres collectives notamment entre agriculteurs et éleveurs. Cela pourrait se traduire à travers le renforcement des institutions villageoises locales en se basant sur les principes de la Jmâa qui est une organisation sociale paysanne, dont le rôle était d'assurer, dans le maintien de la cohésion sociale, la gestion des affaires internes de la communauté villageoise et le respect des règles coutumières (Rachik, 2001).

➤ Optimisation des systèmes de production agricole

- Agroforesterie et Aridoculture

Compte tenu de l'aridité du climat dans la région de l'arganeraie qui s'accroîtrait à cause du changement climatique (Moukrim, et al., 2019), de nouvelles techniques culturales sont pensées pour mettre à la disposition des paysans les outils et méthodes permettant la diversification des cultures à travers l'arboriculture fruitière et la réduction de la consommation en eau. Ainsi, se promeut dans la région : l'irrigation par goutte à goutte, l'arganiculture ou l'installation de vergers à Arganier, l'utilisation des nouvelles technologies tels que les capteurs de données hygrothermiques, les techniques de conservation des sols et de lutte contre la désertification (Aridoculture, reboisement, mise en défens...).



Photo d'un capteur dans un périmètre de reboisement d'arganier à Agadir

- Elevage

L'élevage extensif du cheptel dont la charge dépasse la capacité fourragère de la région est une des causes importantes de la dégradation de l'arganeraie. Cependant, la taille du cheptel par ménage est très variée en fonction de la situation économique. S'ajoute à cela les subventions de certains investisseurs qui augmentent la charge animale. Il serait donc judicieux de régulariser le secteur de l'élevage en fixant législativement un nombre limite pour la taille du cheptel par ménage.

Il faudrait également organiser les éleveurs en association par exemple, notamment les nomades et les impliquer dans tous les programmes de développement rural. Cette intégration doit être prise soigneusement, en tenant compte du type d'élevage (nomades et semi-nomades d'un côté et les petits et grands éleveurs sédentaires de l'autre côté), et de la situation spécifique des différents villages notamment en termes de la nature des relations entre les éleveurs nomades et la population sédentaire (Chamich, 2013).



Pâturage extensif à Tiznit

➤ Promotion des produits de terroir

L'exploitation de l'arganeraie par la population rurale s'insère dans un mode de production locale, fournissant des revenus complémentaires grâce à la commercialisation des produits forestiers non ligneux tels que l'Argan et ses dérivés, le miel et la figue et ses dérivés. La promotion de ces produits permet de valoriser l'arganeraie et d'améliorer le revenu annuel des exploitations rurales qui seront plus enclins à préserver l'écosystème.

➤ Développement d'activités génératrices de revenus alternatifs

L'éco-tourisme est une des solutions pour promouvoir l'identité naturelle et culturelle de l'arganeraie et faire découvrir leurs richesses paysagères tout en offrant des revenus alternatifs aux populations à travers l'emploi, l'hébergement, la restauration, le guide, la location de mulets. Il contribue au désenclavement des populations rurales et la mise en place d'infrastructures de base (Naggar, 2010).

Il faudrait encourager par de l'investissement et l'encadrement pour le développement d'autres activités génératrices de revenu, telles que l'apiculture, la cuniculture, la pêche artisanale, la filière des plantes aromatiques et médicinales....

➤ Appui et sensibilisation :

Au-delà du volet de l'investissement et de l'encadrement, il s'agit d'appuyer les actions des ONG dans la protection des ressources naturelles et de sensibiliser les coopératives (dont le nombre nécessite de croître) aux bonnes pratiques de jouissance et d'exploitations dans l'arganeraie. Il faudrait également sensibiliser les acteurs porteurs de valeurs et d'intérêts économiques, afin de construire des accords formels ou tacites qui pourraient contribuer à une gestion concertée de biens inscrits dans le territoire (Chamich, 2013).

2- Méthodes de lutte contre l'ensablement

➤ Lutte mécanique

Les techniques de lutte mécanique se subdivisent en quatre groupes à savoir : La palissade, le quadrillage, le "mulching", et le désensablement.

✚ La technique de la palissade consiste à opposer au vent un obstacle linéaire pour arrêter sa circulation et permettre le dépôt et l'accumulation du sable transporté. Elle donne lieu à la formation de dunes artificielles. Le matériau utilisé pour la palissade peut être d'origine végétal ou autres. A Errachidia, les matériaux d'origine végétale peuvent être les feuilles de palmier ou d'alfa, ou les branchages d'Acacia, de Tamaris ou de Retama, Quant aux autres matériaux utilisés, il y a les plaques de fibrociment ou les grillages. Selon la nature du matériau utilisé pour la palissade, la hauteur de cette dernière varie entre 0,3 m et 1 m (FAO, s.d.).

✚ La technique de quadrillage est efficace contre les vents multidirectionnels, pour la fixation des fronts dunaires. Elle consiste à installer un réseau de palissades disposées en losange ou de cloisonnage croisé et couvrant l'ensemble du front dunaire ou installer par bande perpendiculaire aux vents dangereux. Les dimensions des quadras varient en fonction de la dynamique du vent, de la topographie de la dune et de la nature du matériau utilisé pour les palissades.

✚ Le "mulching" consiste à recouvrir partiellement ou totalement les dunes dans le but de conserver l'humidité et d'immobiliser les grains de sable. Les matériaux utilisés pour la couverture sont divers et variés. Il peut s'agir de couverture végétale, en terre (terrassement), ou à base de matériaux synthétiques (filet ou film plastique).

✚ Le désensablement peut être manuel ou à l'aide d'engins mécaniques. Il peut se faire à l'aide du vent en créant des zones de turbulences, et des profils plus aérodynamiques. Le désensablement se fait aussi par l'eau notamment dans le cas des voiles sableux de faible volume qu'on disperse ou que l'on évacue par l'eau d'irrigation. Enfin, la méthode de fossés de transfert est une méthode de désensablement qui consiste à provoquer l'engloutissement du sable dans des fossés creusés.

➤ Lutte biologique

Il s'agit d'une méthode de lutte contre l'ensablement qui implique la fixation des dunes en utilisant une espèce végétale adaptée aux conditions écologiques du milieu. Cette fixation se fait sur le front dunaire en vue de réduire la vitesse du vent, de piéger le sable, et d'arrêter sa progression. La lutte biologique se mène généralement de trois façons différentes parfois complémentaires, à savoir : le reboisement ; le semis direct, et la mise en défens.

Les espèces préconisées pour le reboisement ou le semis dans les zones arides et semi-arides comme Errachidia sont : *Acacia sahariens*, *Calligonum azel Maire*, *Retama raetam*, *Nitraria retusa*, *Atriplex*, *Aristida*.

B- Perspectives de la thèse

1- Générales

La modélisation de la vulnérabilité à la désertification dans le contexte des changements globaux, objet de cette étude, fait suite à un besoin d'actualisation constante des connaissances sur l'état de dégradation des ressources naturelles en vue de prévenir les conséquences du changement climatique ou d'autres risques naturels tels que la sécheresse ou les inondations. Dans cette étude, la vulnérabilité a été évaluée de manière ponctuelle (au moment de la réalisation de l'étude). Cependant, la désertification est un phénomène continu. Son évaluation doit donc se faire de façon continue au fil des années ; mais le processus d'évaluation de la vulnérabilité à la désertification est long et lourd car il nécessite le traitement et la compilation de nombreuses données.

Une des perspectives de cette thèse pourrait donc être de mettre au point une application qui permettrait d'obtenir automatiquement et à n'importe quelle date, projetée dans le futur, une carte indiquant l'état de dégradation ou de vulnérabilité du sol ou des ressources dans une région donnée en entrant dans l'application les caractéristiques écologiques de ladite région comme le climat, les types de sol, la végétation, l'anthropisation ou l'urbanisation etc.

Par ailleurs, afin de valider ou de légitimer d'avantage les résultats de cette thèse, d'autres modèles doivent être testés dans les zones d'étude. Parmi les modèles les plus récents à tester pour évaluer la vulnérabilité à la désertification, on peut citer : la théorie de l'évidence ou le réseau de neurones. De plus, le nombre d'indicateurs ne doit pas se limiter aux quatre indicateurs analysés dans cette thèse. Dans la mesure de la disponibilité et de l'accessibilité aux données, de nombreux autres indicateurs spécifiques à chaque zone peuvent être évalués, comme : l'exposition, les besoins en eaux, les besoins en bois de feu, la superficie et la fréquence des incendies de forêt, la taille des carrières, la taille des zones inondables ou la capacité des bassins d'accumulation des eaux, etc.

2- Au Maroc

L'analyse de la vulnérabilité a révélé que les plaines agricoles du Gharb (zones 7) et les hauts plateaux (zones 5) du Maroc sont les régions les plus vulnérables à la désertification. Une étude plus poussée doit donc être menée dans ces zones pour identifier les réelles causes de cette vulnérabilité et trouver les voies et moyens pour lutter contre la dégradation des terres et augmenter la résilience des populations locales.

En définitive, l'adaptation de l'écosystème à arganiers face au changement climatique et à la pression anthropique passe par une multitude d'actions menées collectivement et visant la régénération naturelle et la végétalisation des espaces dégradés. Ces actions nécessitent d'être accompagné par la mise en place des mécanismes et procédures permettant de faire bénéficier directement les populations rurales des services offerts par les ressources naturelles et de les impliquer dans tout le processus et de les responsabiliser (Naggar, 2010).

Au niveau des dunes, il pourrait être très intéressant de développer mathématiquement un indice, qui pourrait combiner des facteurs naturels et humains pour expliquer le déplacement des particules de sable et donc de l'ensablement.

3- Au Bénin

La principale conséquence de la désertification, concerne la diminution progressive de la productivité des terres ayant pour corollaire une pression démesurée sur les zones affectées ou légèrement menacées par ce fléau, induisant elle-même à son tour le risque de désertification de ces zones non encore touchées (Benguerai, 2011). L'étendue et les conséquences de la désertification varient fortement d'un endroit à l'autre et évoluent au cours du temps. Cette variabilité est tributaire du degré d'aridité et de la pression que les gens exercent sur les ressources des écosystèmes. Ainsi la désertification a également d'importantes conséquences négatives sur des zones non arides pouvant parfois se trouver à des milliers de kilomètres des régions désertifiées.

Dans la République Démographique du Bénin, mon pays d'origine, la désertification est due principalement à la déforestation⁴⁸, et comme presque partout dans le monde, elle affecte toutes les services fournis par les écosystèmes à savoir :

- Les services d'approvisionnement, tels que les fruits, le fourrage, le bois et l'eau ;
- Les services de régulation, tels que la purification de l'eau et la régulation du climat ;
- Les services culturels, tels que les loisirs et l'identité culturelle ;
- Les services de soutien, tels que la conservation des sols et la fixation des berges.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la désertification mises en évidence dans cette étude pourraient être employées pour analyser l'état de dégradation de chacun de ces services écosystémiques cités ci-dessus.

⁴⁸ Rapport National sur le Diagnostic de l'Auto-évaluation Nationale des Capacités à Renforcer pour la Gestion de l'Environnement Mondial du Bénin, 2008.

Références bibliographiques

1. Abdellaoui, A., & Marmi, R. (2010). Mise en evidence de mouvements de sable à partir d'images satellitales ; application au piemont sud de l'atlas saharien (Algerie) ; Annals of the University of Bucharest: Geography Series. 10 p.
2. Abdellaoui, A., & Rougab, A. (1997). Caractérisation du bâti en zone de transition montagne-plaine : cas de l'agglomération blidéenne (Algérie)”, Télédétection des milieux urbains et périurbains, AUPELF/UREF Ed. 75-83.
3. ABHT, (2005). Barrages et lacs collinaires dans la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift. 34 p.
4. Achour, A., Aroui, A., Defaa, C., El Mousadik, A., & Msanda, F. (2011). Effet de la mise en défens sur la richesse floristique et la densité dans deux arganeraies de plaine. Actes du Premier Congrès International de l'Arganier, 15-17 Décembre. Agadir, Maroc.
5. Adams, S., & Bamanga, M. (2020). Modelling and Forecasting Seasonal Behavior of Rainfall in Abuja, Nigeria; A SARIMA Approach. American Journal of Mathematics and Statistics. 10(1), 10-19. doi:10.5923/j.ajms.20201001.02
6. Afilal, M., Ouahid, E., Berrichi, A., & Berrabah, M. (2015). Characterizations of Rif's Argan tree in North of Morocco. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 7(8), 195 .
7. Aït Hamza, M., & El Faskaoui, B. (2010). Les oasis du Drâa au Maroc : Rupture des équilibres environnementaux et stratégies migratoires ; Hommes et migrations : Revue française de référence sur les dynamiques migratoires ; 1284 | 2010 Migrations et environnement. 56-69.
8. Alali, A., & Benmohammadi, A. (2013). L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (Sud-est du Maroc). Larhyss Journal. 16, 53-75.
9. ANR. (2013). Environnement et Changements Globaux : des aléas à la vulnérabilité des societies. cahier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR)- n°7., Paris. 1-17.
10. Aouragh, M., Lacaze, B. ..., Hotyat, M., Ragala, R., & El Aboudi, A. (2012). Cartographie et suivi de la densité des arbres de l'arganeraie (sud-ouest du Maroc) à partir d'images de

télédétection à haute résolution spatiale. . Earth Observation & Geo-information Sciences for Environment and Development in Africa: Global vision and Local Action Synergy.

11. Ash, J. E., & Wasson, R. J. (1983). Vegetation and sand mobility in the Australian dunefield. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band*. 45, 7-25.
12. Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., & Gombos, D. (2011). A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*. 92, 157-174. doi:10.1175/2010BAMS2946.1
13. Ayoub, A. T. (1998). Extent, severity and causative factors of land degradation in the Sudan. *Journal of Arid Environments*. 38(3), 397-409. doi:10.1006/jare.1997.0346
14. Aziz, L., Elharousse, L., Mormont, M., Bellefontaine, R., K., A., & Elamarani, M. (2011). Les conséquences de la marchandisation de l'arganier sur la vie socio-économique et culturelle à Haha. *Actes du Premier Congrès International de l'Arganier*, 15-17 Décembre. Agadir, Maroc. . 252-261.
15. Bado, V., & Bationo, A. (2018). Chapter One - Integrated Management of Soil Fertility and Land Resources in Sub-Saharan Africa: Involving Local Communities. *Advances in Agronomy*. 150, 1-33. doi:10.1016/bs.agron.2018.02.001
16. Bakr, N., Weindorf, D., Bahnassy, M., & El-Badawi, M. (2012). Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: Environmental indicators. *Ecological Indicators*. 15, 271-280. doi:10.1016/j.ecolind.2011.09.034
17. Balzarini, R., Davoine, P., & Ney, M. (2011). Evolution et développement des méthodes d'analyse spatiale multicritère pour des modèles d'aptitude : l'exemple des applications en Géosciences. *Conférence Francophone ESRI, Versailles, France*. 25.
18. Barbero-Sierra, C., Marques, M. J., & Ruíz-Pérez, M. (2013). The case of urban sprawl in Spain as an active and irreversible driving force for desertification. *Journal of Arid Environments*. 20, 95-102. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.10.014

19. Bastiaansen, R., & Carter, P. D. (2019). Stable planar vegetation stripe patterns on sloped terrain in dryland ecosystems. IOP Publishing Ltd & London Mathematical Society. 32(8), 27-59. doi:10.1088/1361-6544/ab1767/meta
20. Belghazi, B., & Mounir, F. (2016). Analyse de vulnérabilité au changement climatique du couvert forestier : Forêt de la Maâmora (Maroc), FAO. ISBN 978-92-5-109471-6. 124.
21. Belghazi, B., Ourous, O., Ponette, Q., Belghazi, T., & Dallahi, Y. (2011). La problématique de la régénération de l'arganier : Quelle innovation en matière de production des plants de qualité? Actes du Premier congrès International de l'Arganier, Agadir, Maroc.
22. Belhouari, S. (2018). Le Drâa Tafilalet dort sur un énorme potentiel minier | Edition N°:5181. Publié le 03/01/2018 sur <https://www.leconomiste.com/>
23. Bellefontaine, R. (2010). De la domestication à l'amélioration variétale de l'arganier (*Argania spinosa* L. Skeels) ? Science et changements planétaires / Sécheresse, 21(1), 42-53.
24. Benbrahim, K., Ismaili, M., Fikri Benbrahim, S., & Tribak, A. (2004). Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation : impact du phénomène au Maroc. Science et changements planétaires / Sécheresse. 15(4), 307-320.
25. Benchekroun, F., & Buttoud, G. (1989). L'arganeraie dans l'économie rurale du sud-ouest marocain. Forêt méditerranéenne, 11(2), 127-136.
26. Benguerai, A. (2011). Evolution du phenomene de desertification dans le sud oranais (Algérie). These de doctorat en science. Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. Faculté des sciences de la nature et de la vie, de la terre et de l'univers. Département des sciences agronomiques et forestières. 152 p.
27. Beuret, J. (2006). Lla conduite de la concertation, Pour la gestion de l'environnement et le partage des ressources. Sciences Politiques Sociologie. L'Harmattan. 340 p.
28. Bezzalla, A., Boudjabi, S., & Chenchouni, H. (2018). Seedlings of Argan (*Argania spinosa*) from different geographical provenances reveal variable morphological growth responses to progressive drought stress under nursery conditions. Agroforestry Systems. 92(5), 1201–1211. doi:10.1007%2Fs10457-016-0057-2

29. Blanc-Pamard C., Faurous E. 2004. L'illusion participative : exemples ouest-malgaches. *Revue autrepart*, 3(31), 3-19.
30. Boudy, P. (1950). *Economie forestière Nord-africaine - Tome 2 : monographies et traitements des essences forestières*. Edition Larose, Paris. 878. Consulté le 03 19, 2019, sur <http://agritrop.cirad.fr/535580/>
31. Bouhata, R., & Kalla, M. (2014). Mapping of environmental vulnerability of desertification by adaptation of the MEDALUS method in the endoreic area of gadaine (eastern Algeria). *Geographia Technica*. 9(2), 1-8.
32. Bourbouze, A., & El Aïch, A. (2005). Étude originale l'élevage caprin dans l'arganeraie : l'utilisation conflictuelle d'un espace. *Cahiers Agricultures*. 14(5), 447-453.
33. Bouzemouri, B. (2007). Problématique de la conservation et du développement de l'arganeraie. Colloque international : « L'arganier : levier du développement humain du milieu rural marocain ». Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, Maroc.
34. Breckle, S.-W., Yair, A., & Veste, M. (2008). *Arid Dune Ecosystems: The Nizzana Sands in the Negev Desert*. Springer. 475. doi:10.1007/978-3-540-75498-5
35. Brownlee, J. (2018). 11 Classical Time Series Forecasting Methods in Python (Cheat Sheet). Récupéré sur <https://machinelearningmastery.com/time-series-forecasting-methods-in-python-cheat-sheet/>
36. Chakib, A. (2013). Programme Gouvernance des Entreprises et Organisations du Développement Durable. Rapport final de mission, Projet de recherche filière Argan. 38.
37. Chamich, M. (2013). La forêt d'Arganier : Quelle gestion pour quelle ressource ? Dossier : enjeux de la gestion des forêts au Maroc. *Rev. For. Fr. LXV AgroParisTech*. (4), 317-328.
38. Charrouf, Z. (1998). Valorisation des produits de l'arganier pour une gestion durable des zones arides du sud-ouest marocain. Laboratoire de Chimie des Plantes et de Synthèse Organique et Bioorganique. Faculté des Sciences. Université Mohammed V de Rabat, Maroc.

39. Clarke, M. L., & Rendell, H. M. (2011). Atlantic storminess and historical sand drift in western Europe: implications for future management of coastal dunes, *Journal of Coastal Conservation*. 15, 227–236.
40. CNEARC, DPA, & ALCESDAM. (2004). Etudes thématiques en vue du développement des oasis de la région de Tata (Maroc) effectuées par des étudiants du CNEARC. Etude n° 3 : Les khetaras et les autres formes de mobilisation de l'eau dans la région de Tata. P. JOUVE & C. SEUGE (Eds.). 44 p.
41. CNEARC, DPA, & ALCESDAM. (2004). Etudes thématiques en vue du développement des oasis de la région de Tata (Maroc) effectuées par des étudiants du CNEARC, option AGIR, mars 2004. Etude n° 1 Déclin et réhabilitation des palmeraies de la région de Tata. P. JOUVE & C. SEUGE (Eds.). 55 p.
42. Cormary, Y., & Masson, J. (1964). Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherches du Génie Rural de Tunisie : application à un projet-type de la formule de perte de sols de Wischmeier. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*. 2(3), 3-26.
43. Cornet, A. (2002). La désertification à la croisée de l'environnement et du développement. Un problème qui nous concerne. Johannesburg. 32 p.
44. CSFD. (2017). Surveiller la désertification par télédétection. Fiche issue du Dossier thématique du CSFD n°12.
45. Darkoh, M. (1994). Population, environment and sustainable development: desertification in Africa. *Desertification Control Bulletin*. 25, 20-26.
46. Darkoh, M. B. (1998). The nature, causes and consequences of desertification in the drylands of Africa. *Land Degradation & Development*. 9(1), 1-20. doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199801/02)9:1<1::AID-LDR263>3.0.CO;2-8
47. De Ponteves, E., Bourbouz, A., & Nargisse, H. (1990). Occupation de l'espace, droit coutumier et législation forestière dans un territoire de l'Arganeraie septentrionale au Maroc. *Les cahiers de la recherche développement*. (26), 28-43.
48. De Wever, P., & Duranthon, F. (2015). Voyage d'un grain de sable. EDP Sciences. 96 p.

49. Demoulin, F. (2008). Etude de l'influence du système de propriété sur la dégradation de l'arganeraie à l'aide d'indicateurs d'état (Commune d'Imin'Tlit, Maroc). Mémoire soutenu pour l'obtention du grade de Bio-ingénieur. Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale. Université Catholique de Louvain, Belgique. 95 p.
50. Dong, Z., Chen, G., He, X., Han, Z., & Wang, X. (2004). Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert. *Journal of Arid Environments*. 57, 329–344.
51. Dregne, H. (1977). La désertification aux Etats-Unis d'Amérique. *Nature et ressources*. (13), 11-14.
52. Dregne, H. (1990). Erosion & soil productivity in Africa. *Journal of Soil and Water Conservation*. 45(4), 432-436.
53. Durán, O., & Herrmann, H. (2006). Vegetation against dune mobility. *Physical review letters*. 97(18), 188000-188001. doi:10.1103/PhysRevLett.97.188001
54. El Aboudi, A. (1990). Typologie des arganeraies inframéditerranéennes et écophysiologie de l'arganier (*Argania spinosa* (L. Skeels) dans le Sous (Maroc). Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier (Grenoble).
55. El Aboudi, A., Carlier, G., & Peltier, J. (1991). Régime hydrique de l'arganier (*Argania spinosa* (L) Skeels) dans le Souss (Maroc). *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides*. 389-403.
56. ElBerkaoui, M. (2012). Caractéristiques environnementales et ressources en eau potable de la province d'Essaouira. Mémoire de Stage de Fin d'Etudes. Licence Sciences et Techniques Eau et Environnement. Département des Sciences de la Terre. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques. 51 p.
57. El Fasskaoui, B. (2009). Fonctions, défis et enjeux de la gestion et du développement durables dans la Réserve de Biosphère de l'Arganeraie (Maroc). *Espaces et aires protégés. Gestion intégrée et gouvernance participative. Études caribéennes*. doi:10.4000/etudescaribeennes.3711

58. El Garouani, A., Merzouk, A., & Ozer, A. (2003). Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions - Proceedings of an international symposium held at Montpellier.* (278), 380-386.
59. El Mousadik, A. & Petit, R.J. (1996). High level of genetic differentiation for allelic richness among populations of the argan tree (*Argania spinosa* (L.) Skeels) endemic to Morocco. *Theor. Appl. Genet.*, 92: 832-839.
60. El Wahidi, F., Bellefontaine, R., Quentin, P., & Defourny, P. (2014). Dynamique de changement de l'arganeraie entre sur-usage et mutations sociales : une opportunité d'équilibre socio-écologique ? *Journal of Agriculture and Environment for International Development.* 108(2), 109-133. doi:10.12895/jaeid.20142.210
61. El Wahidi, F., Mounir, F., Sabir, M., Defourny, P., & Ponette, Q. (2011). Modélisation logistique et analyse multivariée pour l'élaboration des indicateurs de suivi de la dynamique de dégradation qualitative : cas de l'arganeraie (Maroc), *Actes du Premier Congrès International de l'Arganier*, Agadir, Maroc.
62. El Zerey, W. (2014). Etude diachronique de la régression du couvert forestier de la plaine de Telagh (Algérie) : approche par télédétection et SIG. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Vie*, (36), 25-31.
63. Elbaz, Y. (2016). La valorisation des produits d'arganier. Département de géographie, Faculte des lettres et des sciences humaines de Marrakech, Université Cadi Ayyad, Maroc.
64. Elqaidi, Y. (2016). Suivi et analyse des indicateurs de la désertification dans le nord du Maroc. *Mémoire de troisième Cycle*, ENFI, Salé. Maroc. 139 p.
65. Emberger, L. (1925). Le domaine naturel de l'Arganier. *Bulletin de la Société Botanique de France.* 72(4), 770-774. doi:DOI: 10.1080/00378941.1925.10832788
66. Emberger, L. (1938). *Les arbres du Maroc et comment les reconnaître.* Ed. Larose, Paris. 317 p.

67. Emberger, L (1955). Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des laboratoires de botanique, géologie et zoologie de la Faculté des sciences de l'Université de Montpellier; série botanique. 7 : 3 – 43.
68. Engelen, G. (2001). Desertification and Land Degradation in Mediterranean Areas: from Science to Integrated Policy making. CLIM – Climate Change Modelling and Policy. RIKS – Research Institute for Knowledge Systems bv, Maastricht, The Netherlands. 14 p.
69. Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. (2001). Land Degradation: An Overview. Responses to Land Degradation. Proceedings of the 2nd International Conference on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen. Oxford Press, New Delhi.
70. Evan, A. T., Flamant, C., Lavaysse, C., Kocha, C., & Saci, A. (2015). Water Vapor–Forced Greenhouse Warming over the Sahara Desert and the Recent Recovery from the Sahelian Drought. *Journal of Climate*. 28, 108-123. doi:10.1175/JCLI-D-14-00039.1
71. FAO. (2014). Global forest resources assessment 2015. National Report of Morocco. 63 p.
72. FAO. (2016). Irrigation En Afrique En Chiffre Enquete Aquastat 2005. Rapports sur l'Eau 29. 363-380.
73. FAO. (2017). le Maroc face au changement climatique. Récupéré sur http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/FAO-countries/Maroc/docs/2017-CC-FAO.pdf
74. FAO. (s.d.). Deuxieme partie: strategie et techniques de lutte contre l'ensablement. Chapitre: IV: lutte contre l'ensablement. Récupéré sur <http://www.fao.org/3/X5315F/x5315f02.htm>
75. Faouzi, H., & Martin, J. (2014). Soutenabilité de l'arganeraie marocaine. Entre valorisation de l'huile d'argan et non-régénération de l'arganier. 20(20), 65. *Confins*. doi:10.4000/confins.8842
76. Faouzi, K., Rharrabti, Y., Boukroute, A., Mahyou, H., & Berrichi, A. (2015). Cartographie de l'aire de répartition de l'arganier (*Argania spinosa* L. Skeels) dans la région orientale du Maroc par le G.P.S. combiné au S.I.G. *Revue « Nature & Technologie »*. C-Science de l'Environnement, (12), 16-24.
77. Feeny, D., Berkes, F., Mccay, B., & Acheson, J. (1990). The tragedy of the commons: twenty years later. *Human ecology*. 18(1), 1-19.

78. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*. 2(150066). doi:10.1038/sdata.2015.66
79. Funk, C., Peterson, P., Peterson, S., Shukla, S., Davenport, F., Michaelsen, J., Knapp, K. R., Landsfeld, M., Husak, G., Harrison, L., Rowland, J., Budde, M., Meiburg, A., Dinku, T., Pedreros, D., & Mata. N. (2019). A high-resolution 1983-2016 Tmax climate data record based on 2 InfraRed Temperatures and Stations by the Climate Hazard Center. *American Meteorological Society. Journal of Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-18-0698.1
80. Gavinet, J., Ourcival, J.-M., & Limousin, J.-M. (2019). Rainfall exclusion and thinning can alter the relationships between forest functioning and drought. *New Phytologist*. 223(3), 1267-1279. doi:10.1111/nph.15860
81. Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2004). Dynamic Causal Patterns of Desertification, *BioScience*, 54(9), 817–829.
82. Girma, T. (2001). Land Degradation: A Challenge to Ethiopia. *Environmental Management*. 28(6), 815-824. doi:10.1007/s002670010190
83. Guan, Q., Guan, W., Yang, J., Zhao, S., Pan, B., Wang, L., Song, N., Lu, M., & Li, F. (2016). Spatial and temporal changes in desertification in the southern region of the Tengger Desert from 1973 to 2009. *Theoretical and Applied Climatology*. 17. doi:10.1007/s00704-016-1798-6
84. Guedegbe, T., Sinsin, T., & Doukkali, M. (2018). La neutralité en termes de dégradation des terres en Afrique est-elle envisageable ? OCP policy center, Policy Brief. 18(31), 9.
85. Guyon, M. (2008). Analyse socio-territoriale de la filière argan dans la province d’Essaouira (sud-ouest marocain). La valorisation économique d’une ressource naturelle est-elle garante d’un développement socialement durable ?, 70. mémoire de Master 2 recherche en sciences géographiques, Université de Provence. France.
86. Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, D., & Woodward, R. (1995). *Environmental Indicators: A systematic Approach to Measuring and Reporting on*

Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development, World Resource Institute, USA. 2-35.

87. Hammouzaki, Y. (2013). Desertification and its control in Morocco. In Combating Desertification in Asia, Africa and the Middle East; Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands. 91–111.
88. Hao, X., Weihong Li, W., & Deng, H. (2016). The oasis effect and summer temperature rise in arid regions - case study in Tarim Basin. Scientific Reports. 6(35418), 1. doi:10.1038/srep35418
89. HCEFLCD. (2001). Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification (PAN-LCD) : Mise en oeuvre du programme d'Action National de lutte contre la désertification au Maroc. 59 p.
90. HCEFLCD. (2005). Haut-Commissariat aux Eaux Et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. 1er cycle de l'Inventaire Forestier National (IFN) (1990-2005), Maroc.
91. HCEFLCD. (2013). Haut-Commissariat aux Eaux Et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. Actualisation et adaptation aux spécificités zonales, Rapport de synthèse du PAN-LCD, Rabat, Maroc. 50 p.
92. HCP. (s.d.). Haut-Commissariat au Plan. Recensement Général de la Population et de l'Habitat pour les années 1994, 2004 et 2014. Direction de la statistique, Haut-Commissariat au Plan, Rabat, Maroc.
93. Hess, T., Stephens, W., & Thomas, G. (1996). Modeling NDVI from decadal rainfall data in the north east arid zone of Nigeria. Journal of Environmental Management. 48(3), 249-261. doi:10.1006/jema.1996.0076
94. Hillel, D., & Rosenzweig, C. (2005). Desertification. Encyclopedia of Soils in the Environment. 1, 382-388.
95. Hoekstra, T. W., & Shachak, M. (1999). Arid Lands Management: Toward Ecological Sustainability. University of Illinois Press; 1st Printing edition. 296 p.

96. Holtz, U. (2003). The United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) and its Political Dimension. Fifth Parliamentary Round Table in the Context of the Implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn. 8 p.
97. Hugenholtz, C. H., & Wolfe, S. A. (2005). Biogeomorphic model of dunefield activation and stabilization on the northern Great Plains, *Geomorphology*. 70(1-2), 53–70.
98. IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)..
99. IRAM. (2012). Systèmes de production durables en zones sèches quels enjeux pour la coopération au développement ? Ministère des Affaires Etrangères et Européennes ; Direction Générale de la Mondialisation, du Développement et des Partenariats. France.
100. Jaccard, P. (1926). L'Arganier, Sapotaceae oléagineuse du Maroc. *Pharmaceutica Acta Helvetiae*. 203-209.
101. Jadaoui, M. (2012). Savoir-faire local et développement durable : pistes de réflexion à travers l'exemple de l'Arganeraie, Université Ibn Zohr, Agadir. 7, 95-109.
102. Janty, G. (2014). les enjeux de la préservation et du développement d'un paysage culturel. Le cas de la palmeraie de l'oasis de Figuig (Maroc). Doctorat Environnement Milieu Technique et Société Géographie. Université Paris Diderot (Paris 7), Sorbonne Paris Cité. 332 p.
103. Jauffret, S. (2001). Validation et comparaison de divers indicateurs de changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien ; Thèse Doctorat de l'université de droit, d'économie et des sciences. 364 p.
104. JICA- Japan International Cooperation Agency. (2012). Rapport final de l'Etude sur le projet de développement rural dans la province d'Errachidia au royaume de Maroc. 211 p.

105. Jourrane, M. (2015). Utilisation de l'imagerie satellitaire haute résolution et l'intégration de données multi-sources pour l'actualisation de la cartographie de l'arganeraie au Maroc ; Mémoire de troisième Cycle, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé, Maroc.
106. Jourrane, M., Mounir, F., & Sabir, M. (2015). Analyse basée télédétection pour la révision de la carte de répartition des peuplements a arganeraie et comparaison diachronique de sa dynamique spatio-temporelle. Acte du Congrès International de l'Arganer.
107. Jouve, P. (2012). Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité ? Courrier de l'environnement de l'INRA n°62, 113-122.
108. Jouve, P., Loussert, R., & Mouradi, H. (2005). Du déclin à la régénération des oasis de la région de Tata (Maroc). Symposium international pour le développement agricole des systèmes oasiens, 7-10 mars 2005, Erfoud, Maroc. Dans Jouve P., (2012).
109. Katyal, J. C., & Vlek, P. L. (2000). Desertification: Concept causes and amelioration, ZEF Discussion Papers on Development Policy, No. 33, University of Bonn, Center for Development Research (ZEF), Bonn. 74 p.
110. Kaur, S., & Rakshit, M. (2019). Seasonal and Periodic Autoregressive Time Series Models Used for Forecasting Analysis of Rainfall Data. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. 10(1), 230-242.
111. Kawabata, A., Ichii, K., & Yamaguchi, Y. (2001). Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. International Journal of Remote Sensing. 22(7), 1377-1382. doi:10.1080/01431160010028490
112. Kechairi, R. (2009). Contribution à l'étude écologique de l'Arganier *Argania spinosa* (L.) Skeels. Dans la région de Tindouf (Algérie). Mémoire de fin d'étude, USTHB, Faculté des sciences biologique. 95 p.
113. Kochanski, K., Mohan, D., Horrall, J., Rountree, B., & Abdulla, G. (2019). Deep learning predictions of sand dune migration. Tackling climate change with machine learning workshop (NeurIPS 2019), Vancouver, Canada. Récupéré sur <https://arxiv.org/pdf/1912.10798.pdf>

114. Kosmas, C., Kirkby, M., & Geeson, N. (1999). Medalus Project: Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on KEY INDICATORS of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas; Publication of European Union: Brussels, Belgium.
115. Kumar, A. (2020). Forecating of temperature by using time series analysis. *International Journal of Research and Analytical Reviews*. 7(1), 547-551.
116. Labbaci, A. (2010). An Assessment of Sensitivity to Desertification in Western High Atlas of Morocco: An Application to Ain Asmama Site. Doctoral thesis. Laboratory "Geopatrimoine et Géomatériaux" of the Faculty of Sciences of Agadir. Springer International Publishing. 237 p.
117. Lahlaoui, H., Rhinane, H., Hilali, A., Lahssini, S., & Moukrim, S. (2017). Desertification Assessment Using MEDALUS Model in Watershed Oued El Maleh, Morocco. *Geosciences*. 7(50), 1-16. doi:10.3390/geosciences7030050
118. Lai, Y., & Dzombak, D. (2020). Use of the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model to Forecast Near-term Regional Temperature and Precipitation. *Weather and Forecasting*. doi:10.1175/WAF-D-19-0158.1
119. Laki, S. L. (2009). Desertification in the Sudan: causes, effects and policy options. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 198-205. doi:10.1080/13504509409469874
120. Lamchin, M., Lee, J.Y., Lee, W.K., Lee, E.J., Kim, M., Lim, C.H., Choi, H.A., & Kim, S.R. (2016). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*. 57(1), 64-77. doi:10.1016/j.asr.2015.10.006
121. Lamqadem, A. A., Pradhan, B., Saber, H., & Rahimi, A. (2018). Desertification Sensitivity Analysis Using MEDALUS Model and GIS: A Case Study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco. *Sensors*. 18(7), 1-19. doi:10.3390/s18072230.
122. Lancaster, N., & Baas, A. (1998). Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23(1), 69-82. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199801)23:13.0.CO;2-G

123. Landis, J., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *International Biometric Society*, 33(1), 159–174. doi:10.2307/2529310
124. Le Houérou, H., (1962). Les pâturages naturels de la Tunisie aride et désertique, Institut de Sciences Economiques Appliquées, Paris-Tunis
125. Le Houérou, H. (1979). Écologie et désertisation en Afrique. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*. 5-26.
126. Le Houérou, H. (1990). Agroforestry and sylvopastoralism to combat land degradation in the Mediterranean Basin: old approaches to new problems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 33(2), 90-109. doi:10.1016/0167-8809(90)90236-7
127. Li, X., Jia, X., & Dong, G. (2006). Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China. *Journal of Arid Environments*. 64(3), 505-522. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.06.011
128. Loireau, M., Sghaier, M., Fétoui, M., Ba, M.; Abdelrazik, M., D'herbes, J-M., Desconnets, J.-C., Leibovici, D., Debard, S., & Delaître, E. (2007). Système d'Information sur l'Environnement à l'échelle locale (SIEL) pour évaluer le risque de désertification : situations comparées circum-sahariennes (réseau ROSELT). *Surveillance à LT dans les zones arides et semi-arides. Science et changements planétaires / Sécheresse*, 18(4), 328-35. doi:10.1684/sec.2007.0104
129. Lybbert, T., Magnan, N., & Aboudrare, A. (2010). Household and Local Forest Impacts of Morocco's Argan Oil Bonanza. 15, 439-464. *Environment & Development Economics*. doi:10.1017/S1355770X10000136
130. Maatougui, A., Acherkouk, M., Elfadili, M., & Elhoumaizi, M. (2011). Les Paturages Steppiques de l'oriental Marocain : L'essentiel sur l'état de la dégradation actuelle et les voies d'amélioration. *Institut National de la Recherche Agronomique*. 58 p.
131. Mahyou, H., Tychon, B., Balaghi, R., Mimouni, J., & Paul, R. (2010). Désertification des parcours arides au Maroc. *Tropicultura*. 28(2), 107-114.
132. Mainguet, M. (1994). Désertification : Quels sont les vrais problèmes ? *L'information géographique*. 58 , 58-62.

133. Malo, A. R., & Nicholson, S. E. (1990). A study of the rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using the normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments*. 19(1), 1-24. doi:10.1016/S0140-1963(18)30825-5
134. Maria, L. (2010). Entre pratiques coutumières, politiques publiques et impératifs de durabilité. Le cas de la commune rurale d'Imi n-Tlit, Province d'Essaouira, Maroc. Mémoire de Master 2, Géographie, option « Mondialisation et Développement ». 180. Université de Provence, Aix-Marseille. France.
135. MEA. (2005). (Millenium Ecosystem Assessment) - Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire : Écosystèmes et bien-être humain. Synthèse sur la désertification. World Resources Institute : Washington, DC. 29 p.
136. M'hirit, O., Benzyane, M., Benchekroun, F., El Yousfi, S., & Bendaanoun, M. (1998). L'arganier, une espèce fruitière-forestière à usages multiples. (Liège : Mardaga).
137. Mokhtari, N., Mrabet, R., Lebailly, P., & Bock, L. (2014). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation au Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. 2(1), 50-66.
138. Moukal, A. (2004). L'arganier, *Argania spinosa* L. (skeels), usage thérapeutique, cosmétique et alimentaire. Springer-Verlag, 2(5), 135-141.
139. Moukrim, S., Lahssini, S., Alaoui, H.M., Rifai, N., Rhazi, M., Benabou, A., Naggar, M., Labbaci, A., & Rhazi, L. (2019). Impact du changement climatique sur la distribution potentielle de l'*Argania Spinosa*. Actes du 5ème Congrès International de l'Arganier : Capital naturel de l'arganeraie, valeur et valorisation. Agadir, Maroc.
140. Moukrim, S., Lahssini, S., Rhazi, M., Alaoui, H.M., Benabou, A., Wahby, B., El Madihi, M., Arahou, M., & Rhazi, L. (2019). Climate change impacts on potential distribution of multipurpose agro-forestry species: *Argania spinosa* (L.) Skeels as case study. *Agroforestry Systems*. 93(4), 1209–1219. doi:10.1007/s10457-018-0232-8
141. Moukrim, S., Lahssini, S., Alaoui, H.M., Rifai, N., Arahou, M., & Rhazi, L., (2018). Modélisation de la distribution spatiale des espèces endémiques pour leur conservation : cas de l'*argania spinosa* (L.) skeels. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*. 73 (2), 153-166.

142. Mouret, J. C., Moreau, S., Morize, M., Berdaï, J., Dosso, M., & Jouve, P. (2005). Les cultures sur épandage de crues : Un complément de ressources sous-estimé des systèmes oasiens (cas de la région de Tata). Actes du Symposium International sur le Développement Durable des Systèmes Oasiens du 08 au 10 mars 2005 Erfoud, Maroc. B. Boulanouar & C. Kradi (Eds.). 266-273.
143. Msanda, F., El Aboudi, A., & Peltier, J. (2005). Biodiversité et biogéographie de l'arganeraie marocaine. Cahiers Agricultures, 14(4), 357-364. .
144. Naggar, M. (2010). Gestion durable de l'arganeraie et enjeux de la lutte contre la désertification. E.d Libération. Récupéré sur https://www.libe.ma/Gestion-durable-de-l-arganeraie-et-enjeux-de-la-lutte-contre-la-desertification_a11772.html
145. Naggar, M., & Mhirit, O. (2006). . L'arganeraie : un parcours typique des zones arides et semi-arides marocaines. Science et changements planétaires / Sécheresse. 17(1-2), 314-317.
146. Naggar, M., Lahssini, S., Moukrim, S., & Rifai, N. (2019). Quelle approche pour l'aménagement des écosystèmes d'arganier au maroc ? Actes du 5ème Congrès International de l'Arganier : Capital naturel de l'arganeraie, valeur et valorisation. Agadir, Maroc
147. Najjar, M. (2015). Evaluation de la dynamique des parcours des Hauts Plateaux de l'Oriental cas de la commune rurale de Tendirara ; mémoire de 3^e cycle, ENFI Salé. 88 p.
148. Nguyena, A. K., Liouc, Y.-A., Lia, M.-H., & Tran, T. A. (2016). Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. Ecological Indicators. 69, 100-117. doi:10.1016/j.ecolind.2016.03.026
149. Nguyena, K.-A., & Liou, Y.-A. (2019). Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. Science of The Total Environment. 664, 995-1004. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.407
150. Nonguierma, A. (2005). Les systèmes d'information géographique. Programme Majeur Information. 28 p.
151. Nouaim, R. (2005). L'arganier au Maroc: entre mythes et réalités. Une civilisation née d'un arbre. (Paris : L'Harmattan).

152. Nouaim, R., & Chaussod, R. (2007). L'arganier et ses champignons. *Pour la Sciences*. 76-80.
153. Nouaim, R., & Chaussod, R. (2011). Des vergers d'arganier : une agriculture innovante pour une production durable d'huile d'argane. 70-79 in : *Actes du premier congrès international de l'arganier*. Agadir. Maroc.
154. ONEE-Office Nationale de l'Electricité et d'Eau potable, (2016). Mission II de l'étude de renforcement de l'AEP de la ville de Tiznit à partir du barrage youssef ben tachfine. 171 p.
155. ONEM- Observatoire National de l'Environnement du Maroc, (1996). Monographie locale de l'environnement d'Essaouira. 110 p.
156. Panagos, P., Borrelli, P., & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports* volume. 7(4175), 1. doi:10.1038/s41598-017-04282-8
157. Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*. (11), 1633-1644. doi:10.5194/hess-11-1633-2007
158. Peltier, J.-P., Carlier, G., El Aboudi, A., & Doche, B. (1990). Evolution journalière de l'état hydrique des feuilles d'arganier [*Argania spinosa* (L.) Skeels] sous bioclimat aride à forte influence océanique (plaine du Sous, Maroc). *Acta oecologica*. 11(5), 643-668.
159. Perry, W., Rappe, O., Boulhaoua, A., Loux, L.H., Elhouss, Y., Ait Ahssain, H., Ait Barich, Z., Akhiyat, H., Aznague, T.A., & Hraïd, S. (2019). Argan oil and the question of empowerment in rural Morocco. *The Journal of North African Studies*. 24(5), 830-859. doi:10.1080/13629387.2018.1542596
160. Philippe, J. (1993). Adaptation des systèmes de production à l'aridité au Maroc et au Sahel. Vol 1 : synthèse des travaux. Vol 2 : publications et travaux. Thèse de doctorat : Géographie de l'Aménagement, Espaces et Développement : Université Paul Valéry. 410 p.
161. Pinton, F., & Grenand, P. (2007). Savoirs traditionnels, populations locales et ressources globalisées, In : Aubertin Catherine (ed.), Pinton Florence (ed.), Boisvert Valérie (ed.). *Les marchés de la biodiversité*. Paris : IRD, 165-194. .

162. Portnov, B. A., & Safriel, U. (2004). Combating desertification in the Negev: Dryland agriculture vs. dryland urbanization. *Journal of Arid Environments*. 56(4), 659-680. doi:10.1016/S0140-1963(03)00087-9
163. Prabhakaran, S. (2019). ARIMA Model – Complete Guide to Time Series Forecasting in Python. Récupéré sur <https://www.machinelearningplus.com/time-series/arima-model-time-series-forecasting-python/>
164. Pye, K., & Tsoar, H. (1990). *Aeolian sand and sand dunes*. Springer, Berlin, Heidelberg. 396 p. doi:10.1007/978-3-540-85910-9
165. Rachik, H. (2001). Jma'a, tradition et politique. *Hespéris Tamuda*. XXXIX(2), 147-155.
166. Radi, N. (2003). *L'Arganier : arbre du sud-ouest Marocain, en péril, à protéger*. Thèse Doctorat. Université de Nantes Faculté de Pharmacie, France. 59 p.
167. Raimbeau, C. (2009). Colère des paysannes de l'Atlas marocain. *Le Monde diplomatique*. (661), 18-19.
168. Revéret, J.-P., & Webster, A. (2002). « Economics and biodiversity management ». In *The Construction of a New International Biological Order*, sous la dir. de Le Prestre, Philippe. Aldershot, Hampshire : Ashgate Publishing Ltd.
169. Rodríguez-Caballero, E., Fernández, J. R., Chamizo, S., Ramos, B. R., & Castilla, Y. C. (2019). Biocrust landscape-scale spatial distribution is strongly controlled by terrain attributes: Topographic thresholds for colonization in a Semiarid Badland System. *Earth Surface Processes and Landforms*. doi:10.1002/esp.4706
170. Romagny, B., & Boujrouf, S. (2010). La ruée vers l'huile d'argan, chronique de la patrimonialisation d'un terroir marocain. *Hespéris Tamuda*. 45, 151-166.
171. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*. 55(2), 95-107. doi:10.1016/0034-4257(95)00186-7
172. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*. 55, 95-107. doi:10.1016/0034-4257(95)00186-7

173. Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. Katz Graduate School of Business, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15260, USA. *International Journal of Services Sciences*. 1(1), 83-98.
174. Silva, R. (2020). Generalized Autoregressive Neural Network Models. Récupéré sur <https://arxiv.org/abs/2002.05676>
175. Simenel, R., Michon, G., Auclair, L., Thomas, Y., Romagny, B., & Guyon, M. (2009). L'argan : l'huile qui cache la forêt domestique De la valorisation du produit à la naturalisation de l'écosystème. *Autrepart*. 2(50), 51-73.
176. Sinsin, T. (2016). Suivi et analyse des indicateurs de la désertification dans le sud du Maroc. Mémoire de troisième Cycle, ENFI, Salé. Maroc. 102 p.
177. Sinsin, T. E. (2018). La désertification au Maroc: Méthode d'analyse de la vulnérabilité à la désertification des écosystèmes à l'aide d'indicateurs de pression. Rabat: Edition universitaire européenne. 80 p.
178. Sivakumar, M. (2007). Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology*. 142(2), 143-155. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.025
179. Sommer, S., Zucca, C., Grainger, A., Cherlet, M., Zougmore, R., Sokona, Y., Hill, J., Della Peruta, R., Roehrig, J., & Wang, G. (2001). Application of indicator systems for monitoring and assessment of desertification from national to global scales. *Land Degradation & Development*. 11, 271-282. doi:10.1002/ldr.1084
180. Stour, L., & Agoumi, A. (2008). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée*. 215-232. doi:10.1051/hydro/2009003
181. Taghipour-javi, S., Fazeli, A., & Kazemi, B. (2016). A case study of desertification hazard mapping using the MEDALUS (ESAs) methodology in southwest Iran. *Journal of Natural Resources and Development*. 6, 1-8. doi:10.5027/jnrd.v6i0.01
182. Tahiri, M., Tabyaoui, H., El Hammichi, F., Achab, M., Tahiri, A., & El Hadi, H. (2017). Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans

- le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre. (39), 87-101.
183. Tarrier, M., & Benzyane, M. (2003). L'arganeraie marocaine se meurt : problématique et bio-indication. *Revue Sécheresse*, 1(1), 80.
184. Tarrier, M., & Delacre, J. (2007). L'arganeraie victime d'elle-même. A la découverte de l'arganeraie. L'Arganier : un arbre-providence « maltraité ». *Carnets de voyages naturalistes au Maroc*, 8-15.
185. Thomas, D., Knight, M., & Wiggs, G. (2005). Remobilization of southern African desert dune systems by twenty-first century global warming. *Nature Publishing Group*. 435(7046), 1218-1221. doi:10.1038/nature03717
186. Tsoar, H. (2005). Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 357(1), 50-56. doi:10.1016/j.physa.2005.05.067
187. UNCCD. (2009). La gouvernance territoriale et ses enjeux pour la gestion des ressources naturelles. Des approches novatrices pour lutter contre la désertification et la dégradation des terres et des eaux. pp 1-21 & 37-41.
188. UNCCD. (2014). "United Nations Convention to Combat Desertification". *Desertification: The Invisible Frontline*. UNCCD Publications. 20 p.
189. UNEP. (1991). "United Nations Environment Program". Status of desertification and implementation of the united nations plan of action to combat desertification. Report of the executive director, Nairobi. 192 p.
190. United State Geological Survey. (2017). Landsat Satellite imagery. Récupéré sur earthexplorer.usgs.gov.
191. Vallauri, D., Andre, J., Genot, J.-C., De Palma, J.-P., & Eynard-Machet, R. (2008). Biodiversité, naturalité, humanité. Pour inspirer la gestion des forêts. Editions Tes & Doc. (Ed.) Lavoisier. 489 p. doi:ISBN 978 -2-7430-1262-5
192. Van Den Eynde, C. (2006). Etude d'un terroir montagnard dans l'arganeraie du Haut Atlas marocain : « Diagnostic des systèmes traditionnels d'exploitation et d'utilisation de l'espace et

- analyse du rôle de la femme dans l'économie rurale. ». Mémoire de fin d'étude, Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale, Université catholique de Louvain, Belgique.
193. Wagret, P. (1962). L'Arganeraie du sud Marocain relique du tertiaire et providence des populations. *Nature Science Progrès*. 390-393.
194. Wang, X., Chen, F., & Dong, Z. (2006). The relative role of climatic and human factors in desertification in semi-arid China. *Global Environmental Change*. 16, 48–57.
195. Wang, X., Chen, F., Dong, Z., & Xia, D. (2005). Evolution of the southern Mu Us Desert in North China over the past 50 years: an analysis using proxies of human activity and climate parameters. *Land Degradation & Development*. 15, 1-16. doi:10.1002/ldr.663
196. Wang, X., Chen, F., Hasi, E., & Li, J. (2008). Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*. 88, 188–206. doi:10.1016/j.earscirev.2008.02.001
197. Wang, X., Yang, Y., Dong, Z., & Zhang, C. (2009). Responses of dune activity and desertification in China to global warming in the twenty-first century. *Global and Planetary Change*. 67, 167-185. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.02.004
198. Wasson, R. J., & Hyde, R. (1983). Factors determining desert dune type. *Nature*. 304(28), 337-339. doi:10.1038/304337a0
199. Waziri, M. (1993). Les systèmes d'information géographique et l'aménagement du territoire au Niger: le cas de la mise en valeur des mares, cuvettes, vallées et basfond. Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier de Grenoble. 71 p.
200. Weber, H., & Sciubba, J. D. (2019). The Effect of Population Growth on the Environment: Evidence from European Regions. *European Journal of Population*. 35(2), 379–402. doi:10.1007/s10680-018-9486-0
201. Wikipedia. (2020). L'encyclopédie libre que chacun peut améliorer. Récupéré sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dune>
202. Wolfe, S. A., & Nickling, W. C. (1993). The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in Physical Geography*. 17(1), 50-68. doi:10.1177/030913339301700104
-

203. Wu, B., & Ci, L. (2002). Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China. *Journal of Arid Environments*. 50(3), 429-444. doi:10.1006/jare.2001.0847
204. Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., & Pan, J. (2009). Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale-A Case Study in the Ordos Plateau, China. *Sensors*. 9(3), 738-1753. doi:10.3390/s90301738
205. Yann, I. P., & Lambin, E. F. (2011). La dégradation de l'arganeraie et ses causes dans la province de Taroudant. Actes du Premier Congrès International de l'Arganier, 15-17 Décembre. Agadir, Maroc.
206. Yizhaq, H., Ashkenazy, Y., & Tsoar, H. (2007). Why Do Active and Stabilized Dunes Coexist under the Same Climatic Conditions? *Physical Review Letters*. 98(18), 188001-4. doi:10.1103/PhysRevLett.98.188001
207. Yizhaq, H., Ashkenazy, Y., Levin, N., & Tsoar, H. (2013). Spatiotemporal model for the progression of transgressive dunes. *Physica A*. 32 p.
208. Yuei-An, L., Mai Son, L., & Hwa, C. (2019). Normalized Difference Latent Heat Index for Remote Sensing of Land Surface Energy Fluxes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 57(3), 1423 - 1433. doi:10.1109/TGRS.2018.2866555
209. Zugmeyer, L. (2006). Projet de développement sylvo pastoral de l'arganeraie marocaine (commune rurale de Tiout, Taroudant, Maroc), Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy. France.

Annexes

Annexe 1 : Série chronologique des superficies des dunes de sable par année

Date	Total area of sand dune
1987	247744
1988	227947
1989	205745
1990	206367
1991	267118
1992	318049
1993	255278
1994	264843
1995	267487
1996	278279
1997	238607
1998	243524
1999	232486
2000	254389
2001	267099
2002	274564
2003	236488
2004	232303
2005	277168
2006	256443
2007	257734
2008	269209
2009	239037
2010	249806

2011	234744
2012	212252
2013	228617
2014	267076
2015	259968
2016	309394
2017	271841
2018	262007
2019	263280

Annexe 2 : Algorithme en Python du modèle SARIMA

#Bibliotheque importation

import warnings

import itertools

import pandas as pd

import numpy as np

import statsmodels.api as sm

import matplotlib.pyplot as plt

plt.style.use('fivethirtyeight')

from pandas.plotting import register_matplotlib_converters

register_matplotlib_converters()

#Import data

y = pd.read_excel("Sand dune.xlsx", "Feuil1", index_col=0, header=0)

```
#Check if the series is stationary using the Augmented Dickey Fuller test
```

```
from statsmodels.tsa.stattools import adfuller
```

```
x = y.iloc[:,0]
```

```
result = adfuller(x)
```

```
print('ADF Statistic: %f' % result[0])
```

```
print('p-value: %f' % result[1])
```

```
# PACF plot of stationary original series
```

```
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_pacf
```

```
plt.rcParams.update({'figure.figsize':(9,3), 'figure.dpi':120})
```

```
fig, axes = plt.subplots(1, 2, sharex=True)
```

```
axes[0].plot(x.values); axes[0].set_title('Original Series')
```

```
axes[1].set(ylim=(0,5))
```

```
plot_pacf(x.values, ax=axes[1])
```

```
plt.show()
```

```
# ACF plot of stationary original series
```

```
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf
```

```
fig, axes = plt.subplots(1, 2, sharex=True)
```

```
axes[0].plot(x.values); axes[0].set_title('Original Series')
```

```
axes[1].set(ylim=(0,1.2))
```

```
plot_acf(x.values, ax=axes[1])
```

```
plt.show()
```

```
#Attribute a value to freq in dataframe attribute (for annual data freq = '367D')
```

```
y = y['Total area of sand dune'].resample('367D').mean()
```

```
#Null data procedure
```

```
y = y.fillna(y.bfill())
```

```
#Simple data visualization
```

```
y.plot(figsize=(10, 6))
```

```
#Trend and seasonnal data visualization
```

```
from pylab import rcParams
```

```
rcParams['figure.figsize'] = 11, 9
```

```
decomposition = sm.tsa.seasonal_decompose(y, model='additive')
```

```
fig=decomposition.plot()
```

```
plt.show()
```

```
# Testing the Akaike information criterion (AIC) model
```

```
# 1- Define the p, d and q parameters to take any value between 0 and 2
```

```
p = d = q = range(0, 2)

# 2- Generate all different combinations of p, q and q triplets

pdq = list(itertools.product(p, d, q))

# 3- Generate all different combinations of seasonal p, q and q triplets

seasonal_pdq = [(x[0], x[1], x[2], 6) for x in list(itertools.product(p, d, q))]

print('Examples of parameter combinations for SARIMA...')

warnings.filterwarnings("ignore") # specify to ignore warning messages

for param in pdq:

    for param_seasonal in seasonal_pdq:

        try:

            mod = sm.tsa.statespace.SARIMAX(y,

                                             order=param,

                                             seasonal_order=param_seasonal,

                                             enforce_stationarity=False,

                                             enforce_invertibility=False)

            results = mod.fit()

            print('SARIMA{ }x{ }12 - AIC:{ }'.format(param, param_seasonal, results.aic))

        except:

            continue

#SARIMA(1, 0 ,1)(1, 1, 1) implementation
```

```
mod = sm.tsa.statespace.SARIMAX(y,
                                order=(2, 1, 2),
                                seasonal_order=(0, 1, 0, 6),
                                enforce_stationarity=False,
                                enforce_invertibility=False)

results = mod.fit()

print(results.summary().tables[1])

results.plot_diagnostics(lags=2, figsize=(15, 12))

plt.show()

pred = results.get_prediction(start=pd.to_datetime('1997-06-18'), dynamic=False)

pred_ci = pred.conf_int()

ax = y['1987:'].plot(label='observed')

pred.predicted_mean.plot(ax=ax, label='One-step ahead Forecast', alpha=.7)

ax.fill_between(pred_ci.index,
                pred_ci.iloc[:, 0],
                pred_ci.iloc[:, 1], color='k', alpha=.2)

ax.set_xlabel('Years')

ax.set_ylabel('Area of sand dune')

plt.legend()

plt.show()

y_forecasted = pred.predicted_mean
```

```
y_truth = y['1997-06-18:']

# Compute the Mean Absolute Percentage Error of our forecasts

print('One-step ahead Forecast Error calcul : ')

def mean_absolute_percentage_error(y_true, y_pred):

    y_true, y_pred = np.array(y_true), np.array(y_pred)

    return np.mean(np.abs((y_true - y_pred) / y_true)) * 100

MAPE = mean_absolute_percentage_error(y_truth, y_forecasted)

print('The Mean Absolute Percentage Error of our forecasts is: %f' % MAPE)

pred_dynamic = results.get_prediction(start=pd.to_datetime('2000-06-23'), dynamic=False,
full_results=True)

pred_dynamic_ci = pred_dynamic.conf_int()

ax = y['1987:'].plot(label='observed', figsize=(20, 15))

pred_dynamic.predicted_mean.plot(label='Dynamic Forecast', ax=ax)

ax.fill_between(pred_dynamic_ci.index,

                pred_dynamic_ci.iloc[:, 0],

                pred_dynamic_ci.iloc[:, 1], color='k', alpha=.25)

ax.fill_betweenx(ax.get_ylim(), pd.to_datetime('2000-06-23'), y.index[-1],

                alpha=.1, zorder=-1)

ax.set_xlabel('Years')

ax.set_ylabel('Area of sand dune')

plt.legend()
```

```
plt.show()

y_forecasted = pred_dynamic.predicted_mean

y_truth = y['2000-06-23:']

print('Dynamic Forecast Error calcul : ')

MAPE = mean_absolute_percentage_error(y_truth, y_forecasted)

print('The Mean Absolute Percentage Error of our forecasts is: %f' % MAPE)


# Get forecast 50 steps ahead in future

pred_uc = results.get_forecast(steps=50)


# Get confidence intervals of forecasts

pred_ci = pred_uc.conf_int()

ax = y.plot(label='observed', figsize=(30, 20))

pred_uc.predicted_mean.plot(ax=ax, label='Forecast')

ax.fill_between(pred_ci.index,
                pred_ci.iloc[:, 0],
                pred_ci.iloc[:, 1], color='k', alpha=.25)

ax.set_xlabel('Years')

ax.set_ylabel('Area of sand dune')

plt.legend()

plt.show()
```

Annexe 3 : Moyenne annuelle des différents facteurs climatiques

Date	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Prevailing winds (m/s)
1987	28.1869	226	-0.831
1988	27.6487	217	-0.8195
1989	27.5569	252	-0.7905
1990	28.2857	180	-1.0775
1991	27.2273	179	-0.921
1992	26.9986	159	-0.9765
1993	26.9781	188	-0.9195
1994	28.1325	210	-0.7565
1995	28.2495	186	-0.804
1996	27.9677	217	-0.525
1997	28.2076	203	-0.537
1998	28.6269	162	-0.608
1999	28.6916	162	-0.848
2000	28.5915	161	-0.5625
2001	29.4151	142	-0.94
2002	28.7888	161	-0.859
2003	28.4191	170	-0.5895
2004	27.8624	165	-0.6615
2005	28.3328	150	-0.7635
2006	28.2644	253	-1.0455
2007	28.4447	177	-1.029
2008	27.8262	246	-1.107
2009	28.6632	237	-1.0235
2010	29.1077	228	-0.9245
2011	28.3116	206	-0.8205
2012	28.6497	261	-0.8135
2013	29.0187	171	-0.922
2014	29.2099	251	-0.863
2015	29.1902	177	-0.9435
2016	29.5674	197	-1.0765
2017	30.2299	140	-1.1665
2018	28.6283	229	-0.5505
2019	30.0674	163	-0.3975

Annexe 4 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 1989 et 1995 à Errachidia

Communes	Autres	Expansion des dunes	Contraction des dunes	Superficie inchangée des dunes	Dynamique des dunes	Progression du couvert végétal	Régression du couvert végétal	Dynamique du couvert végétal	Température (1989-1995)	Précipitation (1989-1995)	Vent (1989- 1995)
Sidi Ali	427331.85	13821.28	2898.25	45784.53	16719.53	514.17	14788.89	15303.06	29.9	222.01	-0.22
Et-taous	438004.08	5750.35	2209.51	10381.60	7959.86	229.64	6483.79	6713.43	29.3	188.38	-0.42
Er-rissani	176792.51	2485.67	238.82	6704.92	2724.49	274.43	541.45	815.88	28.4	185.79	-0.20
Aarab Sebbah Ziz	106931.23	2837.96	1439.36	7060.66	4277.31	1493.55	1300.48	2794.02	27.7	175.95	-0.08
Melaab	118330.39	42.62	0.00	13.51	42.62	356.32	112.56	468.87	27.5	208.81	0.27
Fezna	47856.15	11334.71	40.70	16365.62	11375.41	468.76	106.58	575.34	27.5	172.79	0.23
Er-rteb	22820.88	771.08		179.01	771.08	145.87	590.53	736.40	27.3	171.09	0.23
Aoufous	67216.97	12853.74	60.93	25906.70	12914.66	136.88	2685.19	2822.07	26.8	166.74	0.18
Ferkla El Oulia	77316.91	76.86	32.25	590.79	109.11	447.93	442.99	890.92	26.8	233.17	0.47
Oued Naam	323751.66	22866.45	19866.52	51363.95	42732.98	555.37	14576.54	15131.91	26.5	169.14	0.08
Gheris Es-soufli	34018.97	1696.04	79.75	1199.18	1775.79	93.90	1270.30	1364.20	26.1	202.97	0.47
Ferkla Es-soufla	17244.17	1507.26	532.23	3005.16	2039.49	59.14	359.11	418.25	26.1	224.15	0.45
Chorfa M Daghra	58358.49	4449.17	37.22	3931.58	4486.39	147.14	1512.15	1659.30	26.1	149.62	0.42
Lkheng	163042.50	6224.65	13.43	2306.40	6238.08	567.37	15126.86	15694.22	25.5	161.99	0.46
Gheris El Ouloui	23737.54	1134.42	345.50	1735.58	1479.92	17.74	3908.00	3925.74	25.4	221.47	0.56
Tadighoust	96038.22	1660.11	6.32	1123.86	1666.43	167.97	13526.09	13694.06	24.7	214.71	0.59
Aghbalou N Kerdous	87497.65	102.64	68.01	207.74	170.66	119.73	35664.49	35784.22	24.4	250.42	0.58

Annexe 5 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 1995 et 2001 à Errachidia

Communes	Autres	Expansion des dunes	Contraction des dunes	Superficie inchangée des dunes	Dynamique des dunes	Progression du couvert végétal	Régression du couvert végétal	Dynamique du couvert végétal	Temperature (1995-2001)	Précipitation (1995-2001)	Vent (1995- 2001)
Gheris Es-soufli	33861.36	237.36	767.46	2127.77	1004.82	344.34	24.84	369.18	27.07	189.80	0.69
Gheris El Ouloui	23518.95	564.09	575.22	2294.78	1139.31	885.76	28.04	913.80	26.32	208.65	0.79
Er-rteb	22776.98	43.90	270.98	679.11	314.88	3365.97	37.18	3403.16	28.30	152.11	0.45
Ferkla Es-soufli	17654.57	121.83	2690.88	1821.54	2812.71	176.71	62.14	238.85	27.01	207.94	0.60
Aoufous	66677.47	600.43	4523.35	34237.08	5123.78	6921.75	65.89	6987.64	27.77	153.59	0.40
Chorfa M Daghra	57795.01	600.70	709.80	7670.95	1310.50	869.82	67.08	936.91	27.02	139.09	0.62
Er-rissani	176767.29	264.32	1278.41	7912.22	1542.73	858.83	128.96	987.80	29.36	164.47	0.08
Fezna	47710.94	185.91	9521.75	18178.57	9707.67	338.57	176.09	514.66	28.40	160.30	0.79
Et-taous	439095.85	1119.98	1699.88	14431.92	2819.87	14098.99	193.55	14292.54	30.19	164.25	-0.10
Melaab	118328.78	1.67	37.13	19.00	38.79	267.51	290.75	558.26	28.40	192.42	0.51
Oued Naam	314661.53	28952.75	5908.28	68322.31	34861.03	28734.84	379.70	29114.54	27.39	156.77	0.29
Aarab Sebbah Ziz	106955.99	1413.49	2232.44	7666.08	3645.93	3332.64	415.58	3748.22	28.65	156.34	0.17
Sidi Ali	422716.08	7512.53	5798.99	53806.87	13311.53	5945.86	426.12	6371.99	30.81	196.78	0.10
Ferkla El Oulia	77341.07	8.08	201.34	466.32	209.42	208.40	913.53	1121.93	27.64	217.74	0.72
Lkheng	162904.54	152.36	5352.13	3178.92	5504.49	2012.61	1686.86	3699.47	26.43	155.05	0.67
Tadighoust	95847.87	197.16	646.08	2137.89	843.24	1013.34	2451.36	3464.71	25.65	207.15	0.79
Aghbalou N Kerdous	87541.09	24.96	178.96	131.43	203.92	4818.92	2539.89	7358.81	25.22	237.42	0.80

Annexe 6 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2001 et 2007 à Errachidia

Communes	Autres	Expansion des dunes	Contraction des dunes	Superficie inchangée des dunes	Dynamique des dunes	Progression du couvert végétal	Régression du couvert végétal	Dynamique du couvert végétal	Temperature (2001-2007)	Précipitation (2001-2007)	Vent (2001- 2007)
Sidi Ali	417243.59	11258.85	991.75	60328.49	12250.60	3459.20	5648.82	9108.02	30.82	186.44	-0.123
Et-taous	437131.96	3657.97	395.45	15156.24	4053.42	1996.14	13189.77	15185.90	30.21	165.62	-0.319
Er-rissani	176801.05	1243.52	938.06	7237.98	2181.58	612.44	833.73	1446.17	29.33	162.85	-0.121
Aarab Sebbah Ziz	108040.76	1147.43	1286.79	7792.61	2434.23	2367.12	2655.62	5022.73	28.61	155.85	-0.001
Melaab	118363.27		17.38	3.29	17.38	1307.73	98.45	1406.19	28.35	188.88	0.366
Fezna	55834.04	1398.65	5998.48	12366.01	7397.13	1333.80	209.54	1543.34	28.34	164.80	0.569
Er-rteb	22937.45	110.50	113.05	609.96	223.56	711.50	2796.24	3507.74	28.25	155.33	0.328
Aoufous	67023.35	4177.47	1763.19	33074.31	5940.66	1737.01	5952.19	7689.20	27.70	155.85	0.273
Ferkla El Oulia	77440.94	98.65	100.40	374.00	199.05	5821.13	58.69	5879.82	27.60	210.05	0.600
Oued Naam	314778.02	5784.26	28996.68	68276.82	34780.94	44933.39	22296.64	67230.03	27.32	156.05	0.165
Gheris Es- soufli	34180.56	448.26	330.47	2034.66	778.73	1512.75	196.00	1708.75	27.03	186.20	0.590
Ferkla Es- soufla	19587.21	758.24	596.24	1347.13	1354.48	1175.66	41.68	1217.34	26.96	202.41	0.322
Chorfa M Daghra	56280.83	2223.98	162.90	8108.75	2386.88	959.76	676.49	1636.25	26.95	141.98	0.533
Lkheng	166895.74	1359.60	779.19	2552.09	2138.79	54174.21	913.89	55088.10	26.37	154.63	0.577
Gheris El Ouloui	23931.97	162.20	555.82	2303.04	718.02	2663.83	280.18	2944.02	26.27	204.43	0.694
Tadighoust	96072.27	420.64	534.22	1800.82	954.86	35020.08	152.72	35172.80	25.58	201.40	0.725
Aghbalou N Kerdous	87701.83	16.72	110.28	46.11	127.01	32222.81	446.72	32669.54	25.17	236.88	0.715

Annexe 7 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2007 et 2013 à Errachidia

Communes	Autres	Expansion des dunes	Contraction des dunes	Superficie inchangée des dunes	Dynamique des dunes	Progression du couvert végétal	Régression du couvert végétal	Dynamique du couvert végétal	Temperature (2007-2013)	Précipitation (2007-2013)	Vent (2007- 2013)	Taux d'accroissement de la population (2004 - 2014)
Aarab Sebbah Ziz	105744.22	3584.03	2907.61	6032.38	6491.64	5933.38	1158.18	7091.57	28.70	191.28	-0.11	86.00
Aghbalou N Kerdous	85443.11	2368.28	49.33	13.50	2417.61	1328.45	31859.76	33188.21	25.22	297.57	0.58	95.60
Aoufous	62369.69	6416.86	2375.68	34876.10	8792.54	15375.49	919.69	16295.18	27.79	190.36	0.18	19.00
Chorfa M Daghra	55846.13	597.60	2934.25	7398.49	3531.85	4937.48	408.52	5346.00	27.04	180.13	0.46	50.90
Er-rissani	175634.71	2103.37	2168.26	6313.32	4271.64	882.01	455.10	1337.10	29.40	200.86	-0.26	-56.50
Er-rteb	22268.84	781.67	69.38	651.08	851.05	5485.27	394.69	5879.95	28.35	191.07	0.24	13.70
Et-taous	437121.46	407.16	6729.27	12085.08	7136.43	17112.14	1409.67	18521.81	30.28	205.51	-0.49	148.50
Ferkla El Oulia	77342.95	198.39	152.79	319.86	351.18	323.04	5205.96	5529.00	27.65	264.48	0.45	255.60
Ferkla Es- soufla	18185.17	1998.27	676.82	1428.55	2675.09	199.75	1095.23	1294.97	27.03	261.17	0.21	-28.40
Fezna	49215.27	12617.25	378.21	13386.45	12995.45	688.50	875.14	1563.65	28.44	206.84	0.43	39.00
Gheris El Ouloui	23459.36	1028.43	530.54	1934.70	1558.98	1385.58	2189.20	3574.78	26.33	266.12	0.56	16.40
Gheris Es- soufli	33088.36	1422.66	726.03	1756.90	2148.69	1526.86	1141.97	2668.83	27.11	240.72	0.47	12.50
Lkheng	162979.09	4695.85	2226.50	1685.18	6922.35	8199.94	48695.05	56895.00	26.46	202.14	0.48	118.50
Melaab	118379.95	0.70	3.29		3.98	251.42	1097.82	1349.24	28.43	241.13	0.24	74.60
Oued Naam	328519.40	15261.34	38542.88	35519.04	53804.22	20280.91	41345.45	61626.36	27.38	198.48	0.10	-36.90
Sidi Ali	413493.06	4742.38	27365.43	44222.71	32107.81	9564.46	3361.17	12925.63	30.88	229.07	-0.32	-91.90
Tadighoust	95437.29	1169.20	627.03	1594.44	1796.23	629.05	31730.94	32359.99	25.67	265.73	0.62	-110.30

Annexe 8 : Valeur moyenne des différents facteurs par commune entre 2013 et 2019 à Errachidia

Communes	Autres	Expansion des dunes	Contraction des dunes	Superficie inchangée des dunes	Dynamique des dunes	Progression du couvert végétal	Régression du couvert végétal	Dynamique du couvert végétal	Temperature (2013-2019)	Précipitation (2013-2019)	Vent (2013- 2019)
Aarab Sebbah Ziz	107216.00	1435.58	2733.23	6883.25	4168.81	5433.96	5579.03	11012.99	29.4	168.49	-0.37
Aghbalou N Kerdous	82159.28	3334.40	67.76	2313.97	3402.16	7345.15	947.47	8292.62	26.1	251.07	0.29
Aoufous	64389.26	356.12	5310.25	35982.71	5666.36	4595.15	6688.37	11283.53	28.5	163.39	-0.06
Chorfa M Daghra	57305.64	1474.73	2270.57	5725.52	3745.30	1305.77	2016.97	3322.74	27.8	155.85	0.22
Er-rissani	177023.11	781.11	783.92	7632.97	1565.03	3108.79	2109.79	5218.57	30.0	177.04	-0.54
Er-rteb	22304.02	34.20	627.08	805.66	661.28	2741.16	2819.48	5560.64	29.0	167.86	-0.02
Et-taous	439708.66	4145.21	124.62	12367.76	4269.83	27304.54	935.24	28239.77	30.8	175.51	-0.79
Ferkla El Oulia	76800.59	697.97	2.40	515.85	700.38	583.23	376.88	960.10	28.4	224.97	0.11
Ferkla Es- soufla	16133.86	2728.13	274.42	3152.40	3002.55	204.26	208.52	412.78	27.8	217.43	-0.08
Fezna	48198.37	1395.11	2631.35	23372.35	4026.47	515.11	416.92	932.04	29.1	179.22	0.12
Gheris El Ouloui	21608.31	2381.59	113.37	2849.76	2494.96	2018.88	904.08	2922.96	27.2	225.11	0.26
Gheris Es- soufli	31673.49	2140.90	180.55	2999.01	2321.44	672.06	728.74	1400.80	27.9	206.19	0.17
Lkheng	159445.43	5761.51	598.38	5782.65	6359.89	5668.50	5171.35	10839.85	27.3	174.27	0.21
Melaab	118304.17	81.71	0.70		82.41	629.74	242.66	872.40	29.1	209.22	-0.09
Oued Naam	348011.69	19066.38	11487.65	39292.89	30554.04	29485.71	8369.83	37855.54	28.1	168.11	-0.09
Sidi Ali	423015.70	17855.53	2146.49	46818.39	20002.01	7238.02	2377.18	9615.20	31.5	209.15	-0.67
Tadighoust	95196.83	868.53	528.75	2234.89	1397.28	5495.13	663.62	6158.75	26.5	232.55	0.36

ANNEXES

Annexe 9 : Matrices de confusion des cartes d'occupation du sol sur la base des ROI

Superficie des classes d'occupation du sol (Km2)	Carte Essaouira 2017								Total
	Cultures en bour	Cultures irriguées	Fruticées	Végétation dense	Végétation claire	Agglomération	Corps d'eau	Autres	
Cultures en bour	217	32	11	28	14	8	0	0	310
Cultures irriguées	37	206	10	39	26	1	0	0	319
Fruticées	19	2	297	2	17	8	0	10	355
Végétation dense	21	40	3	244	27	3	0	2	340
Végétation claire	18	45	24	38	219	5	0	0	349
Agglomération	2	4	7	1	0	279	0	45	338
Corps d'eau	0	0	0	0	0	2	340	0	342
Autres	1	0	9	6	3	48	0	281	348
Total	315	329	361	358	306	354	340	338	2701
Valeur de Kappa	0.8011								
Standard Error	0.0081								

Superficie des classes d'occupation du sol (Km2)	Carte Tiznit 2017									Total
	Cultures en bour	Cultures irriguées	Fruticées	Végétation dense	Végétation claire	Agglomération	Corps d'eau	Sol nu	Autres	
Cultures en bour	66	1	21	0	4	1	0	0	0	93
Cultures irriguées	1	111	2	5	7	0	0	0	0	126
Fruticées	12	0	72	2	5	12	0	0	3	106
Végétation dense	0	0	1	95	17	0	0	0	0	113
Végétation claire	3	1	6	16	82	5	0	0	0	113
Agglomération	3	0	10	0	0	117	0	0	5	135
Corps d'eau	0	0	0	0	0	0	136	0	0	136
Sol nu	0	0	0	0	0	0	0	100	0	100
Autres	1	0	0	0	1	7	0	0	109	118
Total	86	113	112	118	116	142	136	100	117	1040
Valeur de Kappa	0.8801									
Standard Error	0.0108									

ANNEXES

Superficie des classes d'occupation du sol (Km2)	Carte Errachidia 2017								Total
	Cultures en bour	Cultures irriguées	Sol nu et Fruticées	Forêt	Steppe	Agglomération	Corps d'eau	Ravins	
Cultures en bour	19	3	0	0	0	0	0	0	22
Cultures irriguées	0	18	0	0	0	2	0	0	20
Sol nu et Fruticées	0	0	20	0	0	0	0	1	21
Forêt	0	0	0	17	0	0	0	0	17
Steppe	0	0	4	1	19	0	0	0	24
Agglomération	1	0	0	0	0	27	0	1	29
Corps d'eau	0	0	0	0	0	0	26	0	26
Ravins	0	0	0	0	0	1	0	21	22
Total	20	21	24	18	19	30	26	23	181
Valeur de Kappa	0.9281								
Standard Error	0.0216								

Annexe 10 : Résultats des tests de corrélations

Corrélations de la période (1989-1995)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (1989-1995)	Rainfall (1989-1995)	Wind (1989-1995)
Rho de Spearman	Sand dune expansion	Coefficient de corrélation	1.000	.441	.990**	.441	.358	.385	.308	-.578*	-.603*
		Sig. (bilatérale)	.	.087	.000	.076	.158	.127	.230	.015	.010
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune contraction	Coefficient de corrélation	.441	1.000	.512*	.050	.238	.209	.381	.076	-.571*
		Sig. (bilatérale)	.087	.	.043	.854	.374	.438	.145	.778	.021
		N	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Sand dune dynamic	Coefficient de corrélation	.990**	.512*	1.000	.407	.314	.331	.347	-.542*	-.650**
		Sig. (bilatérale)	.000	.043	.	.105	.220	.195	.173	.025	.005
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Progression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.441	.050	.407	1.000	.086	.194	.491*	-.316	-.473
		Sig. (bilatérale)	.076	.854	.105	.	.743	.456	.045	.216	.055
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Regression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.358	.238	.314	.086	1.000	.978**	-.346	-.027	.086
		Sig. (bilatérale)	.158	.374	.220	.743	.	.000	.174	.918	.743
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17

ANNEXES

Corrélations de la période (1989-1995)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (1989-1995)	Rainfall (1989- 1995)	Wind (1989- 1995)
	Vegetation cover dynamic	Coefficient de corrélation	.385	.209	.331	.194	.978**	1.000	-.301	-.002	.081
		Sig. (bilatérale)	.127	.438	.195	.456	.000	.	.240	.993	.758
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Temperature (1989-1995)	Coefficient de corrélation	.308	.381	.347	.491*	-.346	-.301	1.000	-.130	-.888**
		Sig. (bilatérale)	.230	.145	.173	.045	.174	.240	.	.618	.000
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Rainfall (1989-1995)	Coefficient de corrélation	-.578*	.076	-.542*	-.316	-.027	-.002	-.130	1.000	.380
		Sig. (bilatérale)	.015	.778	.025	.216	.918	.993	.618	.	.133
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
	Wind (1989- 1995)	Coefficient de corrélation	-.603*	-.571*	-.650**	-.473	.086	.081	-.888**	.380	1.000
		Sig. (bilatérale)	.010	.021	.005	.055	.743	.758	.000	.133	.
		N	17	16	17	17	17	17	17	17	17
**. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).											
*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).											

Corrélations de la période (1995-2001)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (1995-2001)	Rainfall (1995-2001)	Wind (1995-2001)
Rho de Spearman	Sand dune expansion	Coefficient de corrélation	1.000	.598*	.713**	.608**	-.103	.456	.333	-.375	-.551*
		Sig. (bilatérale)	.	.011	.001	.010	.694	.066	.191	.138	.022
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune contraction	Coefficient de corrélation	.598*	1.000	.973**	.297	-.020	.199	.284	-.397	-.382
		Sig. (bilatérale)	.011	.	.000	.248	.940	.445	.269	.115	.130
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune dynamic	Coefficient de corrélation	.713**	.973**	1.000	.424	.012	.326	.326	-.429	-.463
		Sig. (bilatérale)	.001	.000	.	.090	.963	.202	.202	.086	.061
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Progression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.608**	.297	.424	1.000	.228	.907**	.150	-.341	-.402
		Sig. (bilatérale)	.010	.248	.090	.	.379	.000	.567	.181	.110
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Regression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	-.103	-.020	.012	.228	1.000	.542*	-.093	.270	.150
		Sig. (bilatérale)	.694	.940	.963	.379	.	.025	.722	.295	.567
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Vegetation cover dynamic	Coefficient de corrélation	.456	.199	.326	.907**	.542*	1.000	.140	-.174	-.358

ANNEXES

Corrélations de la période (1995-2001)												
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (1995-2001)	Rainfall (1995- 2001)	Wind (1995- 2001)	
		Sig. (bilatérale)	.066	.445	.202	.000	.025	.	.593	.504	.158	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Temperature (1995-2001)	Coefficient de corrélation	.333	.284	.326	.150	-.093	.140	1.000	-.292	-.811**	
		Sig. (bilatérale)	.191	.269	.202	.567	.722	.593	.	.256	.000	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
		Rainfall (1995-2001)	Coefficient de corrélation	-.375	-.397	-.429	-.341	.270	-.174	-.292	1.000	.449
	Sig. (bilatérale)		.138	.115	.086	.181	.295	.504	.256	.	.071	
	N		17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Wind (1995- 2001)	Coefficient de corrélation	-.551*	-.382	-.463	-.402	.150	-.358	-.811**	.449	1.000	
		Sig. (bilatérale)	.022	.130	.061	.110	.567	.158	.000	.071	.	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).											
	**. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).											

Corrélations de la période (2001-2007)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2001-2007)	Rainfall (2001-2007)	Wind (2001-2007)
Rho de Spearman	Sand dune expansion	Coefficient de corrélation	1.000	.703**	.953**	-.012	.647**	.153	.515*	-.506*	-.715**
		Sig. (bilatérale)	.	.002	.000	.966	.007	.572	.041	.046	.002
		N	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Sand dune contraction	Coefficient de corrélation	.703**	1.000	.855**	.162	.488*	.186	.250	-.377	-.449
		Sig. (bilatérale)	.002	.	.000	.535	.047	.474	.333	.135	.071
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune dynamic	Coefficient de corrélation	.953**	.855**	1.000	.088	.647**	.245	.424	-.498*	-.635**
		Sig. (bilatérale)	.000	.000	.	.736	.005	.343	.090	.042	.006
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Progression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	-.012	.162	.088	1.000	.152	.853**	-.385	.255	.326
		Sig. (bilatérale)	.966	.535	.736	.	.560	.000	.127	.323	.202
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Regression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.647**	.488*	.647**	.152	1.000	.534*	.392	-.598*	-.637**
		Sig. (bilatérale)	.007	.047	.005	.560	.	.027	.119	.011	.006
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17

ANNEXES

Corrélations de la période (2001-2007)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2001-2007)	Rainfall (2001-2007)	Wind (2001-2007)
	Vegetation cover dynamic	Coefficient de corrélation	.153	.186	.245	.853**	.534*	1.000	-.230	-.066	.081
		Sig. (bilatérale)	.572	.474	.343	.000	.027	.	.374	.801	.758
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Temperature (2001-2007)	Coefficient de corrélation	.515*	.250	.424	-.385	.392	-.230	1.000	-.243	-.826**
		Sig. (bilatérale)	.041	.333	.090	.127	.119	.374	.	.348	.000
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Rainfall (2001-2007)	Coefficient de corrélation	-.506*	-.377	-.498*	.255	-.598*	-.066	-.243	1.000	.424
		Sig. (bilatérale)	.046	.135	.042	.323	.011	.801	.348	.	.090
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
	Wind (2001-2007)	Coefficient de corrélation	-.715**	-.449	-.635**	.326	-.637**	.081	-.826**	.424	1.000
		Sig. (bilatérale)	.002	.071	.006	.202	.006	.758	.000	.090	.
		N	16	17	17	17	17	17	17	17	17
**. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).											
*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).											

ANNEXES

Corrélations de la période (2007-2013)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2007-2013)	Rainfall (2007-2013)	Wind (2007-2013)
Rho de Spearman	Sand dune expansion	Coefficient de corrélation	1.000	.419	.797**	.419	.206	.336	.064	-.252	-.186
		Sig. (bilatérale)	.	.094	.000	.094	.428	.188	.808	.328	.474
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune contraction	Coefficient de corrélation	.419	1.000	.775**	.750**	.135	.368	.328	-.551*	-.554*
		Sig. (bilatérale)	.094	.	.000	.001	.606	.147	.198	.022	.021
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune dynamic	Coefficient de corrélation	.797**	.775**	1.000	.664**	.120	.375	.377	-.468	-.527*
		Sig. (bilatérale)	.000	.000	.	.004	.646	.138	.135	.058	.030
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Progression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.419	.750**	.664**	1.000	.186	.657**	.287	-.603*	-.412
		Sig. (bilatérale)	.094	.001	.004	.	.474	.004	.264	.010	.101
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Regression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.206	.135	.120	.186	1.000	.691**	-.387	.490*	.272
		Sig. (bilatérale)	.428	.606	.646	.474	.	.002	.125	.046	.291
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Vegetation cover dynamic	Coefficient de corrélation	.336	.368	.375	.657**	.691**	1.000	-.221	-.105	.103

ANNEXES

Corrélations de la période (2007-2013)												
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2007-2013)	Rainfall (2007- 2013)	Wind (2007- 2013)	
		Sig. (bilatérale)	.188	.147	.138	.004	.002	.	.395	.687	.694	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Temperature (2007-2013)	Coefficient de corrélation	.064	.328	.377	.287	-.387	-.221	1.000	-.446	-.865**	
		Sig. (bilatérale)	.808	.198	.135	.264	.125	.395	.	.073	.000	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
		Rainfall (2007-2013)	Coefficient de corrélation	-.252	-.551*	-.468	-.603*	.490*	-.105	-.446	1.000	.490*
	Sig. (bilatérale)		.328	.022	.058	.010	.046	.687	.073	.	.046	
	N		17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Wind (2007- 2013)		Coefficient de corrélation	-.186	-.554*	-.527*	-.412	.272	.103	-.865**	.490*	1.000
		Sig. (bilatérale)	.474	.021	.030	.101	.291	.694	.000	.046	.	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
		**. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).										
	*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).											

ANNEXES

Corrélations de la période (2013-2019)											
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2013-2019)	Rainfall (2013-2019)	Wind (2013-2019)
Rho de Spearman	Sand dune expansion	Coefficient de corrélation	1.000	.103	.723**	.539*	.225	.402	-.160	.083	-.054
		Sig. (bilatérale)	.	.694	.001	.026	.384	.110	.541	.751	.837
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune contraction	Coefficient de corrélation	.103	1.000	.620**	.252	.701**	.485*	.276	-.721**	-.225
		Sig. (bilatérale)	.694	.	.008	.328	.002	.048	.283	.001	.384
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Sand dune dynamic	Coefficient de corrélation	.723**	.620**	1.000	.581*	.618**	.684**	.147	-.414	-.248
		Sig. (bilatérale)	.001	.008	.	.014	.008	.002	.573	.098	.338
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Progression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.539*	.252	.581*	1.000	.681**	.917**	.043	-.159	-.164
		Sig. (bilatérale)	.026	.328	.014	.	.003	.000	.870	.541	.529
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Regression of vegetation cover	Coefficient de corrélation	.225	.701**	.618**	.681**	1.000	.836**	.171	-.686**	-.211
		Sig. (bilatérale)	.384	.002	.008	.003	.	.000	.513	.002	.417
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Vegetation cover dynamic	Coefficient de corrélation	.402	.485*	.684**	.917**	.836**	1.000	.153	-.446	-.248

ANNEXES

Corrélations de la période (2013-2019)												
			Sand dune expansion	Sand dune contraction	Sand dune dynamic	Progression of vegetation cover	Regression of vegetation cover	Vegetation cover dynamic	Temperature (2013-2019)	Rainfall (2013- 2019)	Wind (2013- 2019)	
		Sig. (bilatérale)	.110	.048	.002	.000	.000	.	.557	.073	.338	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Temperature (2013-2019)	Coefficient de corrélation	-.160	.276	.147	.043	.171	.153	1.000	-.367	-.890**	
		Sig. (bilatérale)	.541	.283	.573	.870	.513	.557	.	.147	.000	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Rainfall (2013-2019)	Coefficient de corrélation	.083	-.721**	-.414	-.159	-.686**	-.446	-.367	1.000	.328	
		Sig. (bilatérale)	.751	.001	.098	.541	.002	.073	.147	.	.198	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	Wind (2013- 2019)	Coefficient de corrélation	-.054	-.225	-.248	-.164	-.211	-.248	-.890**	.328	1.000	
		Sig. (bilatérale)	.837	.384	.338	.529	.417	.338	.000	.198	.	
		N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
	**. La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).											
	*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).											

Annexe 11 : Liste des articles publiés et Indexation des journaux

Numéro	1	2	3	4
Titre de l'article	Comparative analysis of spatio-temporal dynamics in the plain and mountain argan ecosystems, Morocco	Conservation, valuation and sustainable development issues of the Argan Tree Biosphere Reserve in Morocco	Assessment of vulnerability to desertification using the multi-criteria analysis by the weighted sum method	Modelling of the spatio-temporal dynamic of sand dunes and analysis of the driving factors influencing this dynamic in the district of Errachidia, Morocco
Etat de la publication	Publier	Publier	Publier	En cours
Année de publication	Février 2020	Février 2020	Avril 2020	
Position de l'auteur	1	1	1	1
Autres auteurs	Fouad Mounir, Ahmed El Aboudi	Fouad Mounir, Ahmed El Aboudi	Fouad Mounir, Ahmed El Aboudi	Fouad Mounir, Ahmed El Aboudi
Nom du Journal	International Journal of Environmental Studies	Environmental & Socio-economic Studies	Journal of Global Ecology and Environment	Environmental Monitoring and Assessment
Indexation Scopus	Oui	Oui	Non	Oui
Indexation Thomson	Oui	Oui	Non	Oui
CiteScore 2019	1.5	0.3	-	3.4
SCImago Journal Rank 2019	0.242	0.164	-	0.571
Impact per Paper 2019	0.512	0.381	-	0.952
Doi ou lien de l'article	DOI: 10.1080/00207233.2020.1723960	DOI: 10.2478/enviro-2020-0004	http://www.ikprress.org/index.php/JOGEE/article/view/5025	

ANNEXES

Annexe 12 : Fiche descriptive des peuplements sur terrain

NOM_PROVINCE :

DATE : / /

POINT N° :		STRATE : Carte :		COORD.X :		COORD.Y :	
		Terrain :					
ALT	PENTE (%)	EXPOSITION	PROFONDEUR DU SOL 1 : Squelettique 2 : Peu profond 3 : Profond				
POSITION TOPOGRAPHIQUE 1 : Sommet 2 : Haut versant 3 : Mis versant 4 : Bas versant 5 : Dépression 6 : Replat			ROCHE MERE 1 : Schiste 2 : Marne 3 : Calcaire 4 : Grès 5 : autre (à préciser)				
EROSION : 1 : Faible 2 : Modéré 3 : Intense							
ESSENCES ARBOREES PRESENTES (marquer le code des essences présentes) Code 1 : Arganier (As) Code 2 : Thuya (Ta) Code 3 : Chêne vert (Qr) Code 4 : Genévrier rouge (Jp) ESSENCES ARBOREES PRINCIPALES - CODES ESSENCES							
Code 1		Code 2		Code 3		Code 4 autre (à préciser)	
REGIME ET STADE DE DEVELOPPEMENT (marquer le code dans la case de l'essence correspondante). 1 : Semis 2 : Fourré et gaulis 3 : Perchis bas 4. Haut Perchis 5. Jeune futaie 6 : Futaie adulte 7. Vieille futaie 8 : Vielle futaie déperissant 9 : Jeune taillis 10 : Taillis adulte 11 : Vieux taillis							
Code 1		Code 2		Code 3		Code 4	
COUVERT ARBORE (marquer le code dans la case de l'essence correspondante) :						Code 1	Code 2
1 : >45% 2:25-45% 3:5-24% 4 :<5%							
FRUCTIFICATION (marquer le code dans la case de l'essence correspondante). 0: nulle 1 : présente 2: abondante						Code 1	Code 2
REGENERATION						Code 1	Code 2
- Nature de régénération : rejet (code R), drageon (code D), semis (code S)							
- Degré d'acquisition : (marquer le code dans la case de l'essence correspondante)						Code 1	Code 2
0: nulle 1 : faible 2: modérée 3 : dynamique							
ETAT SANITAIRE (arbres attaqués/dépérissants)						Code 1	Code 2
0 : nul 1 : présent 2 : abondant							
BOIS GISANT						Code 1	Code 2
0 : nul 1 : présent 2 : abondant							
ECIMAGE						Code 1	Code 2
0 : nul 1 : présent 2 : abondant							
DELITS						Code 1	Code 2
0 : nul 1 : présent 2 : abondant							

Résumé

La désertification affecte près de la moitié de la surface de la planète (41%). Malgré l'ampleur du phénomène, la désertification reste encore insuffisamment maîtrisée. L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer le phénomène de la désertification sous la forme dans laquelle elle se présente dans les écosystèmes les plus vulnérables du Maroc. Le but étant de comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes afin de proposer des solutions stratégiques spécifiques de renforcement des capacités d'adaptation de la population locale et de la résilience du milieu biophysique face au changement climatique et à la pression anthropique. Dans ce but, une description de l'état actuel des connaissances sur la désertification a été présentée, suivi de l'identification des zones du Maroc les plus vulnérables à la désertification à l'aide de l'analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée. Enfin, une évaluation plus poussée de la désertification a été effectuée dans deux écosystèmes caractéristiques du Maroc à savoir l'arganeraie au Sud-ouest (à Essaouira et Tiznit) et les écosystèmes dunaires à l'Est (à Errachidia). Dans la zone de l'arganeraie, on a noté une augmentation de la superficie occupée par les terrains de culture sous arganiers au détriment des écosystèmes naturels d'arganiers notamment dans les zones à faible pente (< 5%). A Errachidia, l'utilisation du modèle Saisonier Autorégressif Intégré à Moyenne Mobile (SARIMA) a révélé une augmentation de l'étendue des dunes de sable à un taux de 1,7% par an. Cette augmentation serait principalement causée par l'effet combiné des facteurs climatiques fluctuant d'une année à l'autre.

Mots-clefs (5) : Désertification, Vulnérabilité, Arganeraie, Dunes, Changement climatique.

Abstract

Desertification affects almost half of the planet's surface (41%). Despite the extent of the phenomenon, desertification is still little mastered. The main objective of this thesis is to assess the phenomenon of desertification in the form in which it occurs in the most vulnerable ecosystems in Morocco. The aim is to understand the functioning of these ecosystems in order to propose specific strategic solutions to strengthen the adaptive capacity of the local population and the resilience of the biophysical environment against climate change and anthropogenic pressure. To this end, a description of the current state of knowledge on desertification was presented, followed by the identification of the most vulnerable areas to desertification in Morocco using the multi-criteria analysis by the weighted sum method. Finally, a more in-depth assessment of desertification was carried out in two Morocco's characteristic ecosystems, namely the argan tree area in the southwest (in Essaouira and Tiznit) and the dune ecosystems in the east (in Errachidia). In the argan tree area, there has been an increase in the area occupied by cultivated land under argan trees to the detriment of natural argan ecosystems, especially in low-slope areas (<5%). In Errachidia, the use of the Seasonal Autoregressive Integrated with Moving Average (SARIMA) model revealed an increase in the extent of sand dunes at a rate of 1.7% per year. This increase would be mainly caused by the combined effect of climatic factors fluctuating from year to year.

Key Words (5): Desertification, Vulnerability, Argan tree area, Dunes, Climate change.

Année Universitaire : 2020-2021