

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE BATNA 1 HADJ LAKHDAR – BATNA
INSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THÈSE

Présentée par

BEZZIH HOUDA

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat Troisième Cycle

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences Forestières

THÈME

Etude des relations climat-végétation dans le massif du Chélia et ces contreforts (Aurès – Algérie) par la géomatique.

Devant le jury composé de :

Président	Bertella Nabil	Professeur	Université de Batna 1
Directeur de thèse	Kherchouche Dalila	Professeur	Université de Batna 1
Examineur	Beghami Yassine	Professeur	Université de Batna 1
Examineur	Benhizia Toufik	Maître de conférences	Université de Khenchela
Examineur	Mostefaoui Tewfik	Maître de recherche	C.R.S.T.R.A Biskra

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Avec ma profonde affection, Je dédie ce modeste travail :

*À la mémoire de mon cher oncle, **Salah Bouali**, qui nous a quittés avant de pouvoir assister à ma soutenance.*

C'est lui qui m'a transmis la passion de la science et qui m'a encouragé à poursuivre ce chemin. Son absence laisse un vide immense aujourd'hui, mais son souvenir restera gravé dans mon cœur. Paix à son âme.

A ceux qui m'ont soutenu, m'ont encouragé durant toute ma vie. A ceux qui ont toujours voulu que je sois la meilleure : A mon père et à ma mère : Symboles du sacrifice, de l'amour, de l'encouragement, et de la tendresse,... je voudrais vous exprimer toute mon affection, et Admiration.

A mon cher frère Abd Errahim et ma chère sœur Manel , pour leurs contributions, leurs soutiens, et leurs encouragements tout le long de ce travail.

Que l'avenir vous réserve tout le bonheur et la réussite.

A mon mari Dr Mohamed GHELLAM, qui a été toujours à mes côtés.

Que Dieu protège notre petite famille et nous aide à réaliser tous nos rêves partagés À Dhoha, mon petit ange adoré, dont la joie de vivre et la douceur m'ont donné la force de mener à bien ce travail.

À celles qui a été à mes coté durant les moments les plus difficiles, les moments de doutes et de déceptions, à ma chère Khadîdja ZEGHICHI.

Que dieu protège notre belle amitié.

A Mes chères cousines, mes oncles et tantes adorés, toute ma famille et belle famille, mes amies, et tous ceux qui comptent pour moi...

Au peuple palestinien en général et particulièrement les Gazaouis

BEZZIH Houda

Remerciement

Je remercie Dieu le tout puissant, qui gère éternellement le monde, de m'avoir accordé de la Patience, et de la volonté pour pouvoir achever ce modeste travail

*Tout d'abord Je tiens à remercier docteur **MALKI Hmana**, mon ancien directeur de thèse, pour son encadrement et ses conseils précieux lors des premières phases de ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Mme **KHERCHOUCHE Dalila**, ma directrice de thèse, Professeur à l'université Batna 1 pour son engagement et sa confiance en acceptant de prendre en charge ce travail. Sa rigueur, sa disponibilité et ses précieux conseils ont été des atouts majeurs dans la réalisation de cette thèse.*

*A Monsieur le Professeur **BERTELLA Nabil**, c'est avec un très vif plaisir que j'ai appris votre Présidence du jury.*

*Mes respectueux remerciements vont à professeur **BEGHAMI Yassin** doyen de l'institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, Mr **MOSTEFAOUI Tewfik** Maître de recherche au niveau du centre des recherches scientifiques et techniques des régions arides (CRSTRA) de la Wilayaede Biskra et Mr **BENHIZIA Toufik** Maître de conférences Université de Khenchela pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse.*

*Mes sincères remerciements vont à mon collègue **AISSI Abdeldjalil** pour sa gentillesse, humour, encouragement et aide précieux, C'est un honneur pour moi de faire partie de ce jury.*

*Je remercie tout particulièrement l'équipe de circonscription de **Bouhmama** pour leurs orientations et documentations qu'ils ont mise à ma disposition et pour l'effort fournis pour me permettre d'effectuer des différentes sorties nécessaires sur terrain.*

Résumé

Face aux défis posés par les changements globaux, notre thèse de doctorat s'inscrit dans une démarche d'analyse de la dynamique récente de la végétation dans la région des Aurès. Ce travail vise à explorer deux axes principaux : d'une part, la mise en évidence de la corrélation entre les groupements végétaux et les gradients climatiques, et d'autre part, l'identification des tendances des facteurs climatiques et leur impact sur l'activité photosynthétique du Mont Chélia.

Afin d'analyser l'évolution des formations végétales et de comprendre leur état passé et actuel, nous avons mobilisé la télédétection. Cette approche, basée sur l'exploitation d'images satellitaires et de techniques de cartographie assistée par ordinateur (SIG), complétée par des données collectées sur le terrain, a permis de mettre en évidence une diminution significative du couvert forestier au cours des dernières décennies.

Après avoir réalisé une étude approfondie du climat de la région en utilisant différentes cartes thématiques (précipitation, température, bioclimatique), ainsi qu'une carte de la végétation, nous avons pu identifier les différents niveaux bioclimatiques et végétaux de l'Aurès, ainsi que la répartition des végétaux à l'intérieur de ces niveaux.

L'analyse des tendances climatiques à l'aide du test de Mann-Kendall, couplée à l'étude de l'activité photosynthétique via l'indice de végétation NDVI, révèle que la température est le facteur prépondérant dans la structuration du paysage forestier du Mont Chélia. Malgré une augmentation des températures, l'écosystème de la région montre une certaine résilience et capacité d'adaptation, mise en évidence par l'augmentation de la valeur de l'indice NDVI au fil du temps.

Bien qu'intéressants, ces premiers résultats ne représentent qu'un point de départ pour une compréhension plus fine de la dynamique des écosystèmes forestiers des Aurès, en particulier sur le Mont Chélia face aux changements climatiques.

Mots clés : Aurès - Chélia - climat -végétation -télédétection –SIG- NDVI .

Abstract

In the face of the challenges posed by global changes, our doctoral thesis is part of an approach to analyze the recent dynamics of vegetation in the Aurès region. This work aims to explore two main axes: first, to highlight the correlation between plant communities and climatic gradients, and second, to identify climate trends and their impact on the photosynthetic activity of Mount Chélia.

To analyze the evolution of plant formations and understand their past and present state, we used remote sensing. This approach, based on the use of satellite images and computer-aided mapping techniques (GIS), complemented by field data, has revealed a significant decrease in forest cover in recent decades.

After conducting a thorough study of the region's climate using various thematic maps (precipitation, temperature, bioclimatic), as well as a vegetation map, we were able to identify the different bioclimatic and vegetation levels of the Aurès, as well as the distribution of plants within these levels.

The analysis of climate trends using the Mann-Kendall test, coupled with the study of photosynthetic activity via the NDVI vegetation index, reveals that temperature is the predominant factor in structuring the forest landscape of Mount Chélia. Despite an increase in temperatures, the region's ecosystem shows a certain resilience and adaptive capacity, evidenced by the increase in the value of the NDVI index over time.

While interesting, these initial results represent only a starting point for a more detailed understanding of the dynamics of forest ecosystems in the Aurès, particularly on Mount Chélia in the face of climate change.

Key words : Aurès - Chélia - Climate - Vegetation – Remote sensing –SIG- NDVI

Table des matières

Liste des abréviations.....	Erreur ! Signet non défini.
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Introduction générale.....	12
Chapitre. I : Généralités sur les systèmes d’information géographique et la télédétection	15
Introduction	16
I.1 Systèmes d'information géographique (SIG)	16
I.1.1 Les systèmes de projection	18
I.1.2 Intérêt des SIG en foresterie	19
I.1.3 Modèle numérique de terrain MNT	20
I.2 Télédétection.....	23
I.2.1 Principes fondamentaux de la télédétection.....	23
I.2.2 Les applications de la télédétection en foresterie	25
I.2.3 Données de la télédétection appliquées à la gestion des forêts.....	26
I.2.4 Données satellitaires	26
I.2.5 La méthode de classification.....	29
Conclusion	32
Chapitre. II : Contexte physique de la région des Aurès	33
II.1 Situation géographique	34
II.1.1 Situation administrative	34
II.1.2 Contexte géologique	35
II.1.3 Pédologie	36
II.1.4 Hydrographie	38
II.1.5 Particularités des forêts des Aurès.....	38
II.1.6 Historique	39
II.2 Analyse climatique	39
II.2.1 Précipitations	41
II.2.2 Températures	42
II.3 Synthèse bioclimatique.....	43
II.3.1 Diagramme ombrothermique.....	43
II.3.2 Climagramme d’Emberger	44
II.3.3 Indice d aridité de De Martonne	46
II.4 Données spécialisées	47
II.4.1 Élaboration des cartes thématiques.....	47

Chapitre. III : Analyse spatio-temporelle de l'évolution du couvert végétal dans les Aurès par images Landsat	51
Introduction	52
III.1 Matériel et méthodes	53
III.1.1 Zone d'étude.....	53
III.1.2 Méthodologie de travail	54
III.2 Résultats	55
III.2.1 Validation des classifications et résultats cartographiques	55
III.2.2 Occupation de sol (1984 à 2017).....	56
III.2.3 Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1984 à 2017	58
III.3 Discussion	61
Conclusion.....	63
Chapitre. IV : Relation climat - groupement végétal dans les Aurès	64
Introduction	65
IV.1 Matériel et méthodes	65
IV.1.1 Elaboration de la carte de végétation	65
IV.1.2 Élaboration de la carte de type de climat de De Martonne	66
IV.2 Résultats et discussion	66
IV.2.1 Carte de végétation.....	66
IV.2.2 Relation type de climat - formation végétale	67
Conclusion.....	77
Chapitre. V : Relation entre tendance climatique et indice de végétation NDVI dans le Mont de Chélia	78
Introduction	79
V.1 Matériel et méthodes	80
V.1.1 Zone d'étude.....	80
V.1.2 Collecte des données	83
V.2 Résultats et discussion.....	89
V.2.1 Analyse cartographique.....	89
V.2.2 Test de Mann-Kendall.....	92
V.2.3 Relation indice NDVI et facteurs climatiques.....	97
Conclusion.....	98
Conclusion et perspectives.....	100

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

M : Maxima

m : minima

mm : Millimètre

P : Précipitation

PHAE : printemps hiver automne été

T° : Température

CH : Chélia

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

DGF : Direction générale des forêts

ENVI : Environment for visualisation images

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper

F.A.O : Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation

GPS: Global Positioning System.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

LiDar: Light detection and ranging.

MNS : Modèle numérique de surface.

MNT : Model numérique du terrain

NASA National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

OLI: Operational Land Imager

OMM : Organisation mondial de météorologie

ONM : Office National de Météorologie.

BNEDER : Bureau national d'étude et de développement urbain.

MADR : Ministère de l'agriculture et du développement rural.

SIG : Système d'information géographique

TM: Thematic Mapper

UTM: Universal transverse mercator

WGS: World Geodesic System

UICN : Union international pour la conservation de la nature.

MK: Test de Mann Kendell

ESRI: Environmental Systems Research Institute

CCT: Centre canadien de télédétection

DEM : Digital Elévation Model

SRTM : Mission de Topographie Shuttle Radar

Liste des tableaux

Tableau I-1: Sources et techniques de calcul du MNT. Source : (Short, 2000).....	27
Tableau II-1: Stations meteorologiques et periodes d observation.	40
Tableau II-2: Répartition mensuelle et annuelle des précipitations	41
Tableau II-3: Répartition des précipitations saisonnières des différentes stations.	41
Tableau II-4 : Répartition des températures minimales (m), maximales (M) et moyennes (T).....	42
Tableau II-5 : Saison sèche selon le diagramme ombrothermique (Stations de références).....	43
Tableau II-6: Quotient pluviométrique d’Emberger (Stations de références).	44
Tableau II-7 : Classification du climat selon l’indice de De Martonne.....	46
Tableau II-8 : Valeurs de l’indice d’aridité annuel de De Martonne pour les stations de références ...	47
Tableau III-1 : Superficies et dynamique des unités d’occupation de sol entre 1984 et 2017.....	57
Tableau III-2 : Matrice de transition des classes d’occupation du sol dans la région des Aurès entre 1984 et 2017.	61
Tableau IV-1: Superficies des essences forestières dans les Aurès.....	60
Tableau V-1: Caractéristiques des images satellites utilisées.	83
Tableau V-2 : Les valeurs NDVI et niveau de verdure de la végétation (Zhang et al., 2020).	85
Tableau V-3 : Ensemble de données utilisées pour produire la base de données TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018).	86
Tableau V-4 : Coordonnées géographiques des points de références échantillonnés.	87
Tableau V-5 : Valeurs minimales, maximales et moyennes de l’NDVI.	89
Tableau V-7 : Résultats du test de Mann-Kendall pour les données des températures dans le mont de Chélia.....	94
Tableau V-8: Pente de la tendance linéaire des températures moyennes annuelles.....	96

Liste des figures

Figure I-1: Les composants du SIG.	17
Figure I-2 : Modes de données dans un SIG.	19
Figure I-3 : Processus de création d'une carte numérique des sols.	22
Figure I-4 : Etapes de la télédétection (Delenne, 2006).	25
Figure I-5: Présentation d'une image satellitaire.	28
Figure I-6 : Méthode de classification d'une image.	30
Figure II-1: Carte de localisation administrative de la région des Aurès.	35
Figure II-2: Vue générale d'une des forêts des Aurès.	39
Figure II-3 : Diagramme ombrothermique des station de références.	44
Figure II-4 : Projection des stations étudiées sur le climagramme d'Emberger.	45
Figure II-5 : Carte des hauteurs des précipitations annuelles de la région des Aurès.	48
Figure II-6 : Carte des températures moyennes annuelles de la région des Aurès.	49
Figure II-7 : Carte des types de climat selon l'indice de De Martonne.	50
Figure III-1 : Carte de localisation de la région des Aurès.	54
Figure III-2: Carte d'occupation du sol de l'année 1984.	55
Figure III-3: Carte d'occupation du sol de l'année 2003.	56
Figure III-4: Carte d'occupation du sol de l'année 2017.	56
Figure III-5 : Carte des changements opérés pour la période 1984-2017.	59
Figure III-6: Bilan final de l'évolution de l'occupation du sol dans les Aurès.	60
Figure IV-1 : Carte des essences forestières dans le massif des Aurès.	67
Figure IV-2 : Carte de l'aire climatique du cèdre de l'Atlas.	68
Figure IV-3 : Carte de l'aire climatique du pin d'Alep.	69
Figure IV-4 : Carte de l'aire climatique du genévrier thurifère.	70
Figure IV-5 : Carte de l'aire bioclimatique du Chêne fagine.	72
Figure IV-6 : carte de l'aire bioclimatique du Frêne dimorphe.	73
Figure IV-7 : Carte de l'aire climatique du Chêne vert.	74
Figure IV-8 : Carte de l'aire climatique du genévrier oxycèdre.	75
Figure IV-9 : Carte de l'aire climatique genévrier de Phénicie.	76
Figure V-1 : Carte de situation géographique du mont de Chélia.	81
Figure V-2 : Carte d'occupation du sol du mont de Chélia.	77
Figure V-3 : Variation spatio-temporelle de l'NDVI pour les années 1993, 2003, 2013 et 2020.	91



Introduction générale

Introduction générale

Les changements climatiques, à l'échelle temporelle et spatiale, dans les différentes régions du monde, ont été l'un des enjeux scientifiques majeurs au cours des dernières décennies. La principale motivation de ces études approfondies réside dans l'importance des répercussions, souvent préjudiciables, de la variation des divers paramètres climatiques sur la biocénose (FAO, 2013).

le programme des Nations Unies pour l'environnement indique que les régions méditerranéennes, et notamment le Maghreb, seront confrontées à l'horizon 2050 à une forte diminution et à une importante pollution de la ressource en eau liées à la fois au changement climatique (hot spot du changement climatique selon le 4^{eme} rapport du GIEC) et à la pression anthropique (agriculture, industrialisation, urbanisation ...).

L'Afrique du Nord et le Maghreb observent des bouleversements climatiques sans précédent (Quézel et Barbero, 1990 ; Quézel, 1991).

Cette nouvelle tendance s'exprime par une hausse des températures confirmée dans plusieurs pays. Parallèlement à cette tendance, les pluies enregistrées dans cette zone du monde témoignent aussi d'un retour à une période plus humide et à une intensification des cycles climatiques.

L'Algérie à l'instar des autres pays méditerranéens connaît une forte augmentation de la fréquence et de la durée des périodes de sécheresse et vagues de chaleur, qui entraînent non seulement un stress hydrique croissant au sein des massifs forestiers, mais aussi un risque tout aussi croissant des feux de forêts de grande envergure, menaçant de cette façon la survie du patrimoine forestier.

Par sa position géographique, située à l'extrémité orientale de l'Algérie septentrionale en zone aride à semi-aride, le massif des Aurès, appartenant à l'Atlas saharien, forme un véritable rempart contre l'avancée du désert. Ce véritable îlot de verdure se dresse au milieu de paysages arides et menacés par la désertification (Abdessamed, 1984).

La diversité géographique, bioclimatique, géologique, géomorphologique et édaphique des Aurès est à l'origine d'une richesse éco systémique et floristique remarquable (Beghami, 2013). Cette mosaïque de paysages et de milieux a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs qui se sont penchés sur l'organisation, la dynamique et le fonctionnement des essences forestières (Benmessaoud, 2006, Beghami et *al.*, 2013, Bouzekri et Benmessouad, 2014, Guareh et *al.*, 2016).

Afin de caractériser l'évolution de la végétation forestière dans le massif des Aurès, qui est impactée non seulement par les effets directs du changement climatique (réchauffement, sécheresse) mais aussi par les changements liés à l'utilisation des sols (y compris l'abandon des pâturages et de l'agriculture extensive dans certaines régions montagneuses) et à l'urbanisation, qui entraînent une fragmentation du paysage, on a fait appel à la télédétection qui vise essentiellement à surveiller quantitativement l'état de l'environnement de la surface de la terre, ce qui permet de compléter les données météorologiques.

La relation étroite entre le climat et la végétation n'est plus à démontrer. D'un côté, le climat, avec ses températures, ses précipitations et son ensoleillement, dicte les conditions de vie des plantes. De l'autre, la végétation, par son rôle dans les cycles de l'eau et du carbone, influence le climat local et global.

Comprendre cette interaction est crucial, notamment pour anticiper les conséquences du changement climatique sur les écosystèmes forestiers. C'est là qu'interviennent des outils comme l'indice de De Martonne, un indicateur simple et efficace pour caractériser la relation entre le climat et la répartition des types de végétation. Cet indice, basé sur la température et les précipitations, permet de délimiter les grandes zones bioclimatiques et de mieux comprendre la répartition des essences forestières à grande échelle.

La compréhension des relations entre le moment, la durée et la densité de la couverture végétale photo-synthétiquement active, d'une part, et la tendance des températures et les précipitations aux niveaux régional et local, d'autre part, est donc fondamentale pour prédire les réponses des écosystèmes au changement climatique à l'échelle régionale (Nicholson *et al.*, 1990 ; Myneni *et al.*, 1997 ; Stott *et al.*, 1997).

Afin de mieux appréhender l'ampleur des changements qui touchent la végétation, l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) s'est révélé être un outil précieux. Cet indicateur spatio-temporel, en permettant de mesurer l'activité physiologique des plantes et de caractériser leur vigueur, offre une mesure objective de l'impact des variations climatiques sur le développement de la végétation.

En portant une attention particulière au massif du Chélia, caractérisé par son relief différencié qui offre un terrain d'étude idéal pour analyser l'influence du climat sur la distribution des forêts, nous allons donc définir d'une part les tendances des paramètres climatiques (températures et précipitations), et d'autre part de comprendre l'effet de cette tendance sur la dynamique des écosystèmes forestiers.

L'objectif de notre travail est donc de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les évolutions constatées dans les écosystèmes forestiers de la région des Aurès entre 1984 et 2017 ?
- Est-il possible de dresser une carte des variables climatiques qui influencent la distribution des principaux écosystèmes forestiers des Aurès ?
- Quel est le rapport entre la tendance climatique et l'évolution de l'indice de végétation NDVI dans le mont de Chélia ?

Pour répondre à ces principaux objectifs, cette étude sera structurée en cinq chapitres :

Le premier chapitre introductif présente les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection comme outils d'analyse spatiale et temporelle des forêts et leurs applications dans le domaine de la foresterie.

Le deuxième chapitre offre une description complète du cadre physique de la zone d'étude, les Aurès. Le climat, la géologie, la pédologie et les ressources hydriques sont autant d'aspects abordés pour comprendre l'environnement de la végétation.

Le troisième chapitre analyse l'évolution du couvert végétal dans les Aurès sur une période donnée. L'utilisation d'images satellites Landsat permet une analyse diachronique des changements subis par la végétation.

Le quatrième chapitre explore les liens entre les conditions climatiques et les formations végétales présentes dans les Aurès. Il met en lumière l'influence du climat sur la répartition et le développement de la flore.

Enfin le cinquième chapitre se concentre sur le mont de Chélia, point culminant des Aurès et de l'Algérie du nord. Ce chapitre est consacré à une analyse la relation entre les tendances climatiques observées et l'indice de végétation NDVI, un indicateur clé de la santé et de la densité de la végétation.



Chapitre. I

**Généralités sur les systèmes d'information géographique et la
télédétection**

Introduction

La géomatique, vaste champ d'étude, englobe de nombreux domaines d'expertise, parmi lesquels les SIG et la télédétection occupent une place prépondérante. Le service des forêts, pionnier dans l'utilisation des technologies cartographiques, s'appuie depuis de nombreuses années sur ces outils pour la collecte des données forestières.

L'étude des changements d'occupation du sol revêt une importance capitale. En effet, elle permet d'analyser les dynamiques de déforestation, de dégradation des terres, de désertification et d'érosion de la biodiversité à une échelle locale (Lanbien et al., 2001 ; Cristina et al., 2009).

La cartographie, quant à elle, représente l'ensemble des processus, qu'ils soient scientifiques, artistiques ou techniques, visant à créer et à diffuser des cartes, des plans et autres représentations spatiales. Ces réalisations reposent sur des observations directes ou sur l'exploitation de documents existants.

I.1 Systèmes d'information géographique (SIG)

Les SIG se présentent comme un outil essentiel pour structurer les différentes couches d'informations et les analyser afin d'en extraire les données intégrées à l'échelle de la forêt. Ces informations pourraient représenter les données provenant des modèles numériques de terrain et climatiques enregistrées.

L'exploitation d'un SIG dans le cadre de la gestion des ressources forestières implique principalement la cartographie du terrain à étudier (cartes des pentes, des altitudes, des expositions, des ombrages, des bassins versants, des risques d'érosion, des réseaux hydrographiques et des cartes de visibilité) et d'occupation du sol.

D'après Berge et Chataigner (2004), un système d'information géographique (SIG) peut être défini comme un ensemble d'opérations informatisées pour objectif d'exploiter des données géographiques sur un territoire donné.

L'objectif principal de ce dispositif est de maximiser la combinaison des différentes sources disponibles : bases de données, compétences, capacité de traitement en fonction des applications requises.

Un SIG est caractérisé par quatre caractéristiques principales (Hessas, 2005) :

- La collecte des informations d'entrée
- Le stockage, la récupération et la gestion des bases de données
- La manipulation et l'analyse des données

- L'affichage des données facilitant l'appréhension des phénomènes spatiaux par l'utilisateur.

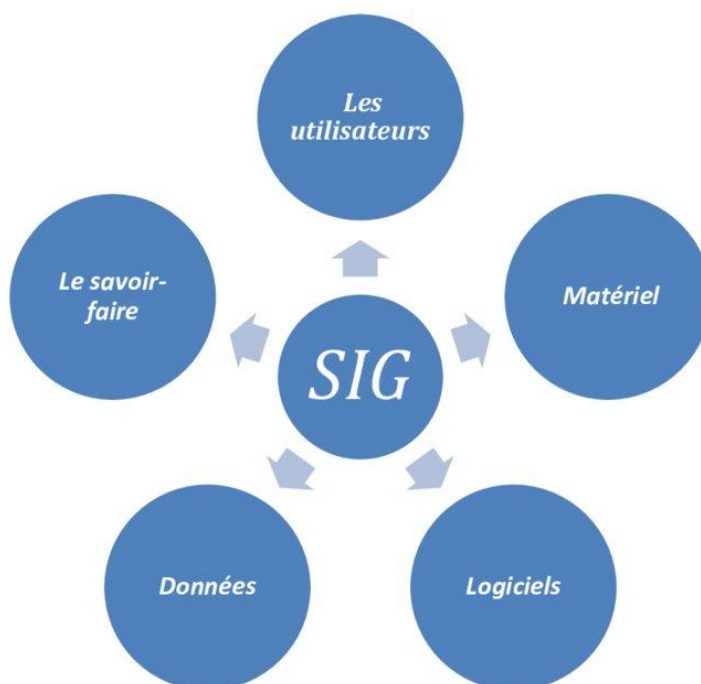


Figure I-1: Les composants du SIG.

Source : <https://meritis.fr/blog/geomatique-le-dessous-des-cartes-numeriques/>.

Les recherches de Berge et Chataigner (2004) et Esri (2009) ont démontré que le progrès scientifique dans le domaine de l'informatique et de l'électronique a engendré diverses applications des SIG :

- La gestion et la planification du territoire
- L'étude des risques majeurs
- La création des plans d'évacuation et d'intervention de sécurité civile
- La santé (analyse de la propagation et de la diffusion d'une épidémie)
- Dans les sciences environnementales (écologie, foresterie, hydrologie et géologie)
- Dans le secteur militaire (logistique et déplacement des troupes)

I.1.1 Les systèmes de projection

D'après ESRI France (2022), les Systèmes d'Information Géographique utilisent deux catégories de modèles géographiques distincts :

I.1.1.1 Le mode vecteur

Le mode vecteur regroupe les informations sous la forme de coordonnées x, y . Dans cette situation, on représente les objets de type ponctuel par un simple point. Les objets linéaires tels que les routes et les fleuves sont représentés par une série de coordonnées x, y .

Les objets polygonaux (territoire géographique, parcelle ...) sont représentés par une série de coordonnées qui délimitent une surface fermée.

Le mode vectoriel est principalement employé afin de représenter des informations discrètes. Les avantages du mode vecteur sont :

- La représentation est très proche à la réalité
- Les objets sont localisés et leurs dimensions sont calculées avec précision
- Il est possible de personnaliser les objets en leur attribuant des caractéristiques
- La taille du fichier est réduite.

I.1.1.2 Le mode raster

Ce mode implique la division régulière de l'espace en cellules ou mailles, généralement carrées, connues sous le nom de pixels, qui donnent la précision minimale de la structure. Par exemple, les pixels correspondent aux centaines de milliers de points lumineux et colorés qui constituent l'écran d'ordinateur.

Les traitements d'images (satellitaires, photos aériennes) utilisent le mode raster. La résolution désigne la taille du pixel, équivalente à x mètres sur le terrain.

Les avantages du mode raster sont :

- Utilisation facile : les données sont présentées sous forme de tableau. Dans le mode vecteur, on utilise des valeurs numériques de la grille pour donner une dimension thématique, tandis que la dimension spatiale est déduite de la position relative du pixel dans la grille.
- La manipulation des données est simple : toutes les dimensions sont réduites à la même unité de base (pixel).

- Il convient parfaitement à diverses méthodes de traitement numérique car chaque pixel renferme une valeur numérique (par exemple : classification supervisée). On conserve cette valeur dans un canal (raster monocanal) ou plusieurs canaux (raster multi-canal), chacun d'entre eux représentant une information différente. L'attribut est le canal tandis que le canal est le vecteur.

Les inconvénients du mode raster sont :

- Fichiers volumineux
- Manque de précision
- Documents imprimés présentant une mauvaise qualité
- Aucune personnalisation des objets.

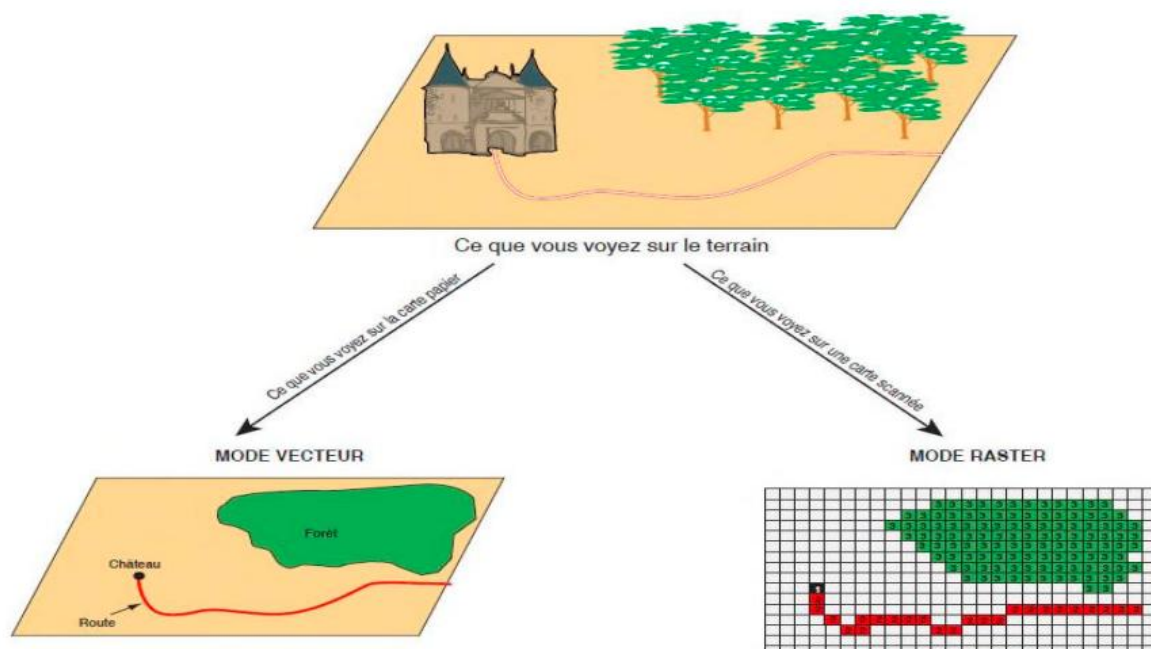


Figure I-2 : Modes de données dans un SIG.

Source : Laboratoire de cartographie appliquée - Élisabeth HABERT - IRD - 2000).

I.1.2 Intérêt des SIG en foresterie

Selon ESRI (2009), un SIG est utilisé par les services de foresterie pour gérer les ressources de gros bois d'œuvre et maintenir une gestion durable des forêts. Ces entités font partie des caractéristiques des SIG pour différentes applications : évaluation des sols, étude du marché du

bois d'œuvre de grande taille, planification des itinéraires de récolte et visualisation du paysage rural.

D'après Dykstra (1996), on peut classer les objectifs des SIG en foresterie en deux catégories:

- Collecte de données précises sur la forêt grâce à la télédétection aéroportée ou satellitaire (occupation du sol, images Radar, MNT,...).
- Création de techniques pour intégrer des informations provenant de différentes sources dans les systèmes d'aide à la prise de décision pour favoriser le développement durable des forêts.

Dans le domaine de la gestion forestière, le système d'information géographique est aujourd'hui l'un des outils de premier choix dans les spécialités suivantes :

- La recherche sur l'impact des constructions ; Poste de vigilance, maison forestière, points d'eau, banquettes, ... etc.
- La surveillance des réseaux de communication qui s'est révélée essentielle dans les opérations liées à la lutte contre les incendies et à l'exploitation du bois
- La supervision des équipements et des employés
- Mise en place d'un cadre du plan cadastral forestier national
- Évaluation, conservation des ressources forestières et sylviculture
- Évaluation de la désertification
- Évaluation de la santé des forêts
- DFCI (défense contre les incendies des forêts)

I.1.3 Modèle numérique de terrain MNT

Afin de créer une cartographie numérique de notre cas d'étude, il est nécessaire d'inclure les données relatives au relief (altitude et versant), également connues sous le nom de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ce MNT consiste à représenter les valeurs d'altitudes continues sur une surface topographique en utilisant un tableau de valeurs Z référencées par rapport à un datum commun. Il est généralement utilisé pour représenter le relief d'un terrain (Guide d'utilisation d'ARCGIS, 2006).

I.1.3.1 Caractéristiques des MNT

Le terme générique de MNT peut être appelé de différentes manières en fonction de la technique de production utilisée pour l'obtenir. Selon Guide d'utilisation d'ARCGIS de 2006, certains modèles numériques ne représentent que le sol (modèle numérique de terrain), tandis

que d'autres incluent également le sursol, tels que la végétation ou les bâtiments (modèle numérique de surface, MNS) ou le modèle numérique d'élévation. (Guide d'utilisation d'ARCGIS, 2006).

En général, on peut obtenir ces derniers en utilisant des jeux de données brutes obtenus grâce à des techniques comme le LiDAR, la photogrammétrie ou la radargrammétrie (Short, 2000). Souvent, les MNT sont un dérivé de ces modèles, qui sont "filtrés" de tous les éléments de la couverture topographique afin de ne conserver que le sol nu. Les éléments situés au-dessus de la surface terrestre continentale sont appelés « couverture topographique ».

I.1.3.2 Acquisition et génération des MNT

On peut acquérir des MNT en utilisant des capteurs de mesure de signal installés sur divers types de véhicules (avions, bateaux) ou en utilisant des levés de terrain. Ils proviennent aussi de combinaisons d'images (satellites ou aériennes), ou encore de numérisation de cartes. Ces diverses méthodes d'acquisition conduisent ensuite à l'un des traitements qui leur est propre. Le calcul du relief peut être effectué à l'aide d'un couple d'images stéréoscopiques (pour des photos aériennes), une phase de traitement du signal (pour des acquisitions laser par exemple) ou une phase d'interpolation (lors de levés de terrain).

Elle permet de créer une représentation continue en utilisant un nombre limité de points. Différents vecteurs sont responsables de la génération des données. L'imagerie fournie par les satellites avec leurs capteurs radar ou optiques permettra d'obtenir l'information d'altitude grâce à des traitements appropriés (figure I-3). Il y a aussi les systèmes embarqués sur des avions (laser, radar ou photographie aérienne). Ces derniers génèrent soit des données d'altitude grâce à des procédés automatiques (laser), soit à nouveau des images qui sont ensuite retraitées. Enfin, il existe aussi les acquisitions de terrains sous forme de points répartis de manière régulière sur la surface à représenter (Short, 2000 ; Berge et *al.*, 2005).

Chacune de ces méthodes comporte des bénéfices mais aussi des contraintes. Les mesures de terrain sont extrêmement précises, cependant, elles requièrent un algorithme d'interpolation pour produire un modèle continu, ce qui entraîne des approximations et des artefacts d'interpolation (Guide d'utilisation d'ARCGIS, 2006).

I.1.3.3 Format des MNT

Après avoir réalisé l'acquisition et effectué les traitements nécessaires pour extraire les informations de relief, il est nécessaire de stocker les modèles numériques dans un format qui peut être facilement réutilisable par la suite au sein d'un SIG. Les formats de MNT les plus fréquemment utilisés comprennent : nuage ou grille de points, courbes de niveau, profils, TIN (*Triangular Irregular Network*) et grille régulière ou non (figure I-3).

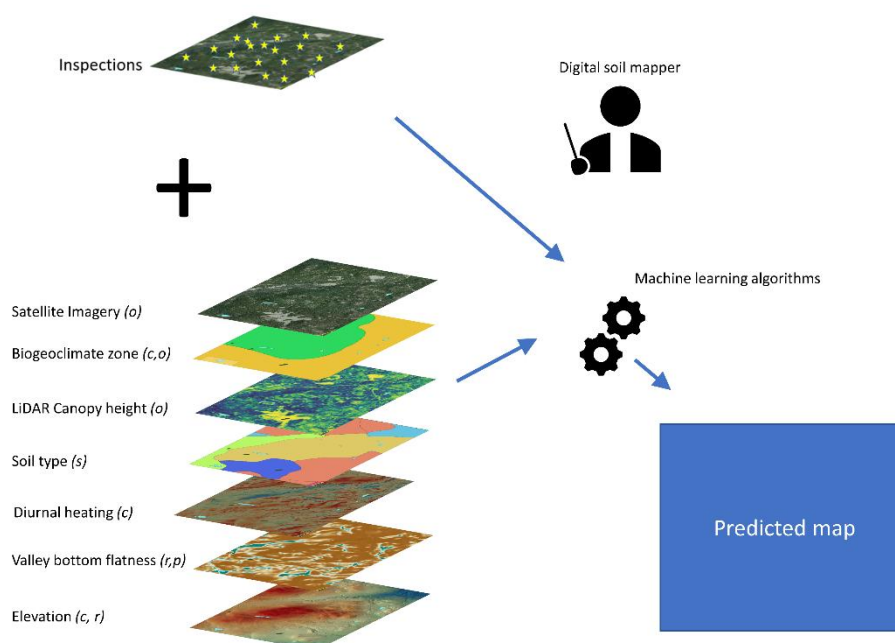


Figure I-3 : Processus de création d'une carte numérique des sols.

Source : <https://openpress.usask.ca/soilsciencefrench/chapter/digital-soil-mapping/>.

I.1.3.4 Application des MNT dans la foresterie

Les MNT sont employés par les ingénieurs forestiers dans diverses études. La pente du relief, l'exposition, le réseau hydrographique, la visibilité du poste de vigie, les directions d'écoulement des eaux, le risque d'érosion et les altitudes peuvent être étudiés par eux.

I.2 Télédétection

Le terme télédétection (*Remote Sensing*, en anglais) fait référence à toutes les méthodes utilisées pour étudier à distance des objets ou des phénomènes. En 1958, Evelyn Pruitt de l'Office of Naval Research des États-Unis a créé le concept de télédétection afin de désigner l'intégration de données provenant d'acquisitions variées telles que des photographies aériennes ou des images satellitaires (Thirion, 2003). Nous proposons une définition plus précise et plus pratique de la télédétection :

Selon le centre canadien de télédétection (2008), la télédétection englobe toutes les méthodes utilisées pour collecter des images de la surface de la terre sans entrer en contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe l'ensemble de la procédure qui implique la collecte et l'enregistrement de l'énergie d'un rayon électromagnétique émis ou réfléchi, de traiter et d'analyser les informations qu'il représente, puis de les mettre en œuvre. La télédétection a trouvé de nombreuses applications dans de nombreux secteurs tels que la météorologie et la climatologie, la foresterie, l'océanographie, la cartographie et la géographie. Selon Thirion (2003), la télédétection offre également la possibilité de repérer des catastrophes naturelles telles que les incendies et les inondations, et elle peut également servir à surveiller les zones sismiques ou volcaniques.

Pour une bonne interprétation des documents de télédétection ou une utilisation efficace des données numériques, il est essentiel de comprendre les principes physiques qui sous-tendent la technique de télédétection utilisée (Kergomard, 2009).

I.2.1 Principes fondamentaux de la télédétection

Selon le Bulletin de l'Information Géographique (*BIG n° 3*), la télédétection peut être décrite en sept étapes principales (figure I-4) :

- **Produit d'énergie ou de lumière** : La source d'énergie nécessaire pour illuminer la cible est à l'origine de tout processus de télédétection. Cette source d'énergie est le soleil, le plus souvent, voire dans la quasi-totalité des cas. Cependant, le satellite lui-même est capable de générer de l'énergie : cela est vrai dans le domaine de la télédétection radar.

- L'interaction rayonnement et atmosphère : Le rayonnement interagit avec l'atmosphère tout au long de son trajet, « aller » entre la source d'énergie et la cible et « retour » entre la cible et le capteur.
- L'interaction avec la cible : L'énergie interagit avec la surface de la cible une fois qu'elle est atteinte de la cible. Cette interaction varie en fonction des propriétés du rayonnement et des caractéristiques de la surface. Chaque élément géographique émet ou réfléchit un rayonnement dans différentes fréquences du spectre électromagnétique. Ce trait est connu sous le nom de comportement spectral. La télédétection suppose que chaque objet ou classe d'objet sur la surface terrestre a sa propre « empreinte digitale » dans le spectre électromagnétique (la signature spectrale), en fonction de la longueur d'onde du rayonnement réfléchi ou émis par lui-même.
- Enregistrement de l'énergie par le capteur : Une fois que la cible a diffusé ou émis de l'énergie, il est nécessaire de la capturer à distance par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible, mais qui est installé à bord d'un satellite ou d'un avion, par exemple, afin d'être enregistrée sous forme numérique.
- Transmission, réception et traitement : Les données enregistrées par le capteur sont transmises, généralement par des moyens électroniques, à une station de réception située généralement au sol, où elles sont converties en images (numériques ou photographiques).
- Interprétation et analyse : Il est ensuite essentiel de réaliser une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée afin d'extraire les informations que l'on souhaite obtenir sur la cible.
- Application : L'étape finale du processus implique l'exploitation des informations extraites de l'image afin de mieux appréhender la cible, c'est-à-dire la zone d'espace étudiée (une ville, une zone inondée, une forêt, ...) afin de nous faire découvrir de nouveaux aspects ou de contribuer à résoudre un problème spécifique.

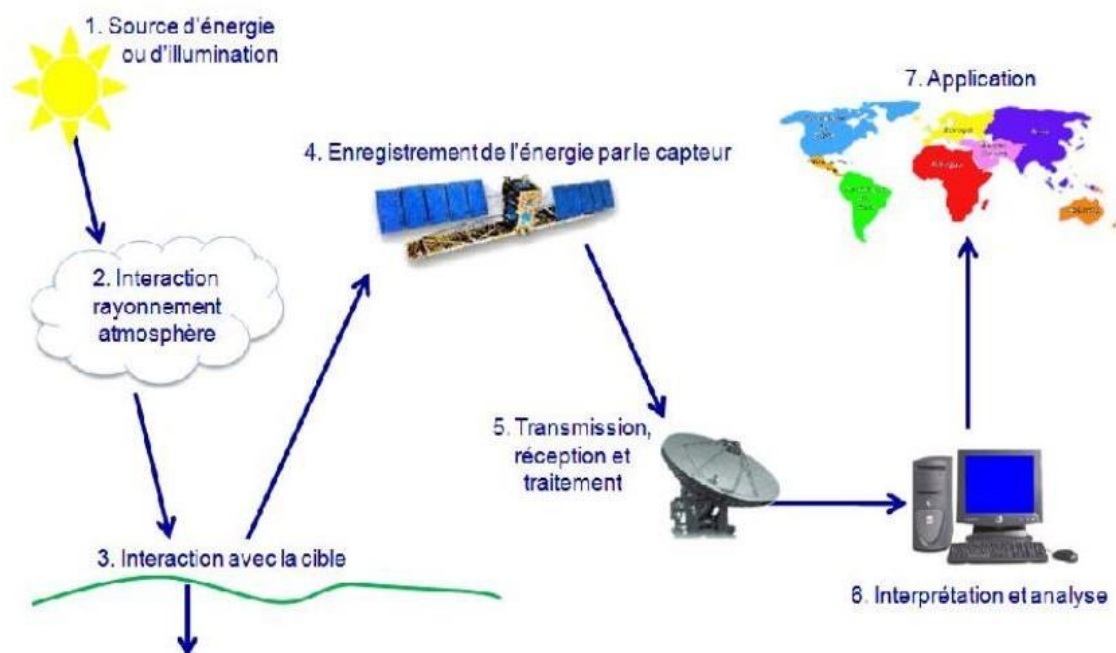


Figure I-4 : Etapes de la télédétection (Deleenne, 2006).

I.2.2 Les applications de la télédétection en foresterie

Selon le centre canadien de la télédétection (2008), la télédétection peut être utilisée de différentes manières :

- L'amélioration du couvert forestier
- La gestion de l'érosion des ressources forestières
- Identifier les caractéristiques biophysiques des forêts
- Recueillir des données concernant les récoltes forestières
- L'actualisation des stocks pour la demande de coupe
- Classification des forêts et détermination des espèces
- La concentration de végétation
- Les données sur la biomasse
- Le contrôle de la qualité et de la santé des forêts
- Protection de la variété des forêts sur terre
- Détermination des dégâts causés aux forêts
- La mise en évidence des zones de feu ou brûlées.

I.2.3 Données de la télédétection appliquées à la gestion des forêts

L'utilisation des données de télédétection pour la gestion forestière remonte aux années 1970, lorsque la première famille de satellites Landsat a été lancée. Depuis, avec l'introduction de plusieurs autres familles de satellites comme SPOT, Terra, Quick-Bird et Ikonos, un large éventail de technologies ont été développées et régulièrement utilisées par les professionnels. (Hadjadj,2011).

Ce type de projet nécessite de choisir une combinaison de types de données et de techniques de classification (Lassieur, 2006).

I.2.4 Données satellitaires

Grâce à la télédétection, il est possible d'obtenir à distance des images terrestres, à partir desquelles on peut extraire les objets d'intérêt. Il est nécessaire de maîtriser non seulement le processus de télédétection, mais également l'interaction entre le rayonnement électromagnétique incident et les pièces. Les systèmes de télédétection utilisent la partie réfléchi de ce rayonnement et modifiée par l'atmosphère comme entrée de base, allant du visible à l'infrarouge (Bensaid, 2006).

De plus, la télédétection est une ressource essentielle pour l'analyse de la gestion forestière. Les SIG ne peuvent même pas fournir des données externes. Il existe en effet plusieurs arguments en faveur de la nécessité de faire de l'image de télédétection une composante essentielle d'un SIG, notamment parce que l'absence de cette composante a créé une apparente dichotomie entre les producteurs de données spatiales et les utilisateurs de SIG. Ces derniers ne disposent pas des moyens qui les rendent capables de produire des connaissances spatiales. On analyse toujours les images de télédétection en interprétant le positionnement des objets et leur nature. Les données présentes dans l'image sont transformées par le processus d'interprétation, visuel ou automatique, en éléments d'informations liés à une localisation géographique, ce qui permet d'intégrer ces éléments dans un SIG. Les données de la télédétection peuvent donc être utilisées dans un processus de gestion des ressources en les combinant avec des données plurithématiques et multisources. C'est au sein de cette intégration des données que réside le plus grand potentiel de développement des applications de télédétection.

Pour un projet qui utilise des données de télédétection, la première étape consiste à sélectionner le capteur qui correspond le mieux à l'étude. Ce choix doit satisfaire à diverses exigences (Lassieur, 2006) :

- Lorsqu'on effectue une analyse multi-temporelle, il est important de prendre en compte la période de "revisité", la disponibilité des données d'archives et la continuité du programme.
- Chaque scène individuelle doit également avoir une emprise (le « *swath* ») qui correspond à l'échelle de la zone à étudier. En effet, l'analyse d'une scène unique est plus aisée qu'une mosaïque de scènes.
- Il est essentiel que la résolution et les caractéristiques spectrales permettent de repérer le phénomène.

I.2.4.1 Satellites LANDSAT

Il est nécessaire de combiner tous ces paramètres afin d'obtenir le meilleur compromis. En outre, la valeur des images joue un rôle crucial dans la prise de décision finale. De nos jours, la majorité des capteurs sont capables d'obtenir des images dans divers modes spectraux. Le mode panchromatique a une plage de longueur d'onde de 0,4 à 0,7 μm . Il s'agit du spectre visible de la lumière. La résolution des images panchromatiques, appelées « noires et blanches », est généralement supérieure à celle des images multispectrales appelées « couleurs ». Cependant, il a été prouvé que la combinaison de la bande panchromatique avec les bandes couleurs peut entraîner une amélioration significative de la précision des résultats (Lassieur, 2006).

Pour sélectionner le capteur le plus approprié, on a récapitulé les caractéristiques des satellites les plus fréquemment utilisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I-1: Sources et techniques de calcul du MNT. **Source :** (Short, 2000)

	Satellite or sensor name	Launch date	Average revisit period	Resolution			Average swath in Km
				Pan	VNIR	SWIR	
Medium	Aster (Terra)	12/15/99	16 days	None	15m	30m	60
Resolution	Landsat 7	04/15/99	16 days	15m	30m	30m	185
	Spot 5	05/04/02	26 days (variable)	10 up to 2.5m	10 up to 2.5m	None	120
High	Quick Bird II	10/18/01	1 to 3.5 days	0.6m	2.5m	None	16
Resolution	Ikonos II	09/24/99	3 days	1m	4m	None	11.3
	LISS (IRS)	10/17/03	24 days	6m	> 6m	None	24 to 140
	Orbview 3	06/26/03	1.5 days	1m	4m	None	8

Dans cette étude, les méthodes de classification ont été testées en utilisant des images Landsat (OLI et ETM). (Téléchargées à partir de Landsat.org and USGS)

Les bénéfices qu'offrent les images satellitaires pour la cartographie forestière de la forêt des Aurès sont nombreux :

- L'acquisition répétitive d'informations permet d'observer l'évolution et le changement du couvert forestier au fil du temps.
- La version numérique des données présente un avantage considérable en matière de traitement numérique et d'extraction d'informations selon les divers programmes SIG.
- Une résolution remarquable qui nous permet de repérer la modification du couvert forestier.
- Le libre accès aux images.

I.2.4.2 Type des images Landsat

Landsat-1 est le premier satellite d'observation lancé par la NASA en 1972. Landsat, initialement appelé erts-1 (*earth resources technology satellite*), avait été développé dans le but de tester la possibilité d'une plate-forme multispectrale d'observation de la terre non habitée. Depuis lors, le programme Landsat a donné la possibilité d'obtenir des données à l'échelle mondiale. Le programme Landsat, initialement géré par la NASA, passe sous la tutelle de la NOAA en 1983. Le logiciel a été mis en vente en 1985 afin de fournir des informations aux différents utilisateurs civils (Girard & Girard, 1999 ; Taylor, 2009).

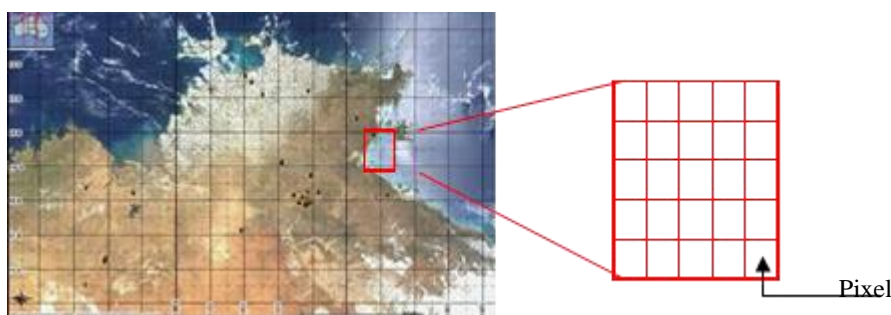


Figure I-5: Présentation d'une image satellitaire.

Source : <http://www.tiger.esa.int/training/Introduction-teledection.pdf>.

I.2.4.3 Apport des images satellites dans l'étude de domaine forestier

- On peut réaliser une cartographie de la composition forestière en utilisant des images LANDSAT-TM et Spot 5 (Wilson & Sader, 2002).
- Aptitude à évaluer différentes caractéristiques, comme la superficie totale et la superficie terrière des forêts, la hauteur dominante du peuplement, le volume de bois, la croissance du peuplement, la productivité et la densité de la végétation (Renaud, 2000 ; Fazakas & Nilsson, 1996 ; Hudak et al., 2002 ; Greenberg et al., 2009 ; Tetuko et al., 2001 ; Huiyan et al., 2006 et Mc Robert et al., 2002).
- Actualisation des cartes topographiques et utilisation des images satellites pour l'occupation des sols (Toney et Lontchi, 2003).
- Repérage des dangers liés aux incendies de forêts (Hessas, 2005 ; Dauriac, 2004). Amélioration de la cartographie forestière en combinant les données optiques et radar (Taylor, 2009).
- L'utilisation des images DEM (*Digital Elevation Model*) provenant du SRTM (*Mission de Topographie Shuttle Radar*) permet de modéliser numériquement le terrain et de visualiser le relief en 3D (Short, 2000).
- Analyse des échanges d'énergie et d'eau dans les forêts (Dauriac, 2004).
- Repérage des évolutions des superficies forestières au fil du temps (Sarr, 2009 ; Laffly, 1993 ; CUQ et al., 1996).

I.2.5 La méthode de classification

La classification consiste à reconnaître les formes. Dans le domaine de la télédétection, elle implique de faire correspondre une scène de l'image, généralement matérialisée par leurs valeurs radiométriques, à des classes connues a priori ou non par l'utilisateur.

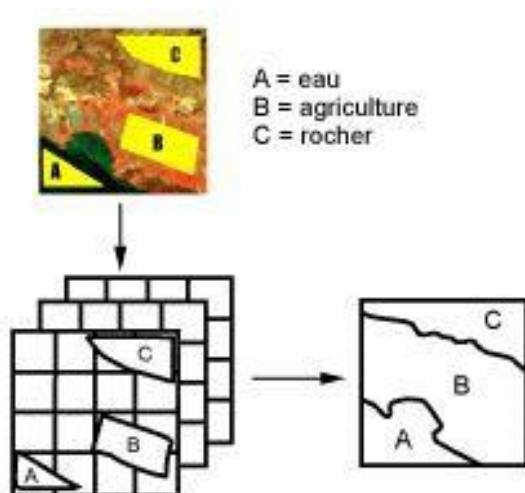


Figure I-6 : Méthode de classification d'une image.

Source : <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/limite-geographique/teledetection/fondements/1039>.

Selon Ducrot (2005), la correspondance est effectuée en utilisant des fonctions discriminantes telles que des règles de décision ou des distances géométriques.

Les approches de classification suggérées incluent une multitude de données et de notions. La classification est une application assez longue et complexe, seuls les aspects les plus importants sont expliqués. La Figure I-6 résume le fonctionnement global de l'application de classification.

I.2.5.1 Classification non supervisée

Les données sont triées selon leurs propriétés spectrales, sans aucune précision préalable quant à la nature des objets à trier. L'interprète intervient afin de déterminer le nombre de groupes, les seuils ... etc. Les classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ou les classifications basées sur des centres mobiles sont les méthodes les plus fréquentes (Girard & Girard, 1999).

La classification non-supervisée repose sur l'idée d'attribuer automatiquement chaque pixel à une classe en fonction de son spectre. Le cluster ISODATA est l'algorithme le plus couramment utilisé. L'algorithme fait appel à plusieurs itérations.

En premier lieu, des groupes sont créés de manière arbitraire, puis les pixels sont assignés. Ensuite, on calcule la moyenne de chaque cluster en se basant sur les nouveaux pixels attribués au cluster. Si le centre de deux clusters est plus proche qu'un seuil donné, ou si le nombre de pixels dans une classe est trop faible, les clusters sont regroupés. Les clusters sont dissociés

lorsque l'écart type dépasse une valeur spécifique, ou lorsque le nombre de pixels dépasse deux fois le seuil du nombre minimal de pixels.

On répète la seconde et la troisième étape jusqu'à ce que les variations entre les itérations soient plus faibles. Une fois cette étape automatique terminée, il est nécessaire d'effectuer une interprétation visuelle afin d'attribuer à chaque cluster une description cohérente, et éventuellement de regrouper manuellement les classes superflues (Erdas IMAGINE User's Guide, 1999).

I.2.5.2 Classification supervisée

L'interprète classe les données en fonction d'objets de référence. Il est possible de les définir soit en utilisant des comptes numériques sur un histogramme à plusieurs dimensions (méthode hypercube, cross-plots en anglais), soit en utilisant des polygones d'entraînement localisés géographiquement sur l'image (zones-test, zones d'apprentissage) (méthode du maximum de vraisemblance) (GIRARD & GIRARD, 1999). Dans le cadre d'une classification supervisée.

La première étape consiste à identifier et à sélectionner, sur l'image, des zones représentatives pour chaque type de surface ou d'objet que l'on souhaite distinguer. Ces zones constituent les "échantillons d'apprentissage".

La deuxième étape se concentre sur l'analyse des pixels contenus dans chaque échantillon d'apprentissage. On extrait des informations statistiques sur la réflectance de ces pixels, pour chaque classe d'objet définie précédemment. Ces informations sont ensuite stockées dans des "fichiers de signatures spectrales".

Par la suite, le classifieur compare chaque pixel aux signatures et les attribue à la classe la plus proche en utilisant une méthode statistique spécifique. Les pixels sont attribués à la classe ayant la signature la plus proche par les classifieurs dits "hard". Les classifieurs appelés « soft » évaluent le niveau d'intégration des pixels dans chaque catégorie. Lorsqu'il y a une faible valeur d'appartenance, le pixel est considéré comme non classifié ou attribué à une classe inconnue. Différentes techniques sont utilisées pour attribuer les pixels à différentes catégories (Erdas Imagine User's Guide, 1999).

Le classifieur maximum-likelihood est le plus complexe, mais également le plus couramment employé pour obtenir les meilleurs résultats (Martin et *al.*, 1998).

Conclusion

Il est crucial de noter que la distinction entre SIG et télédétection ne se cantonne pas à une simple divergence méthodologique ou technologique. Leurs applications et leur impact sur la géomorphologie diffèrent également de manière significative.

En effet, si les SIG excellent dans l'analyse approfondie et la représentation détaillée des phénomènes géospatiaux, la télédétection offre une perspective globale, capable de saisir des nuances et des évolutions souvent imperceptibles à l'œil nu.



Chapitre. II

Contexte physique de la région des Aurès

II.1 Situation géographique

En regardant la carte d'Algérie, il est évident que ce pays regroupe trois régions qui diffèrent les unes de l'autre tant par leurs caractéristiques hydrographiques que par leur climat et leur végétation : le Tell, les Hauts-Plateaux et le pays du Sahara.

Selon Deux grands domaines géographiques sont en contact avec l'Algérie : la région méditerranéenne et le Sahara. Le relief est divisé en grandes bandes grossièrement orientées de l'ouest à l'est, ce qui renforce les oppositions entre les milieux naturels qui se succèdent du nord au sud (Mitard, 1941).

L'Atlas tellien et l'Atlas saharien forment, au nord, deux ensembles de reliefs parallèles qui se rapprochent à l'est et entre lesquels s'intercalent de vastes plaines et Hauts-plateaux. L'est de l'Algérie a tendance à confondre les deux Atlas (Laala, 2016).

À l'intérieur de l'est algérien, les altitudes augmentent et le relief devient impressionnant avec l'Aurès, où se trouve le djebel Chélia (2328 m), le deuxième point culminant de l'Algérie, après le Hoggar.

Le massif des Aurès se trouve géographiquement à 35° de latitude nord et 6 à 7° de longitude est, avec une superficie transversale d'environ 7 000 km² (Benmessaoud, 2009).

Les Aurès, situés à l'extrême Est de l'Algérie septentrionale, sont une région géographique de l'Atlas saharien. Cette structure constitue une sorte de protection biogéographique contre l'expansion du désert. Effectivement, il s'agit d'une île verte entourée de terres désertiques ou en voie de désertification (Anser, 1987).

II.1.1 Situation administrative

Sur le plan administratif, la zone d'étude est divisée entre les wilayas de Batna, Biskra et Khenchela. Elle est encadrée par les routes nationales Khenchela-Batna, Batna-Biskra et Biskra-Khenchela. Cette zone dépend donc des conservations des forêts de Khenchela, de Batna et de Biskra.

La région des Aurès fait référence au territoire compris dans le quadrilatère de Batna, Biskra, Khanga-Sidi-Nadji et Khenchela, sur une distance d'environ 100 kilomètres de côté. Ainsi, elle comprend quarante-sept (47) communes réparties entre trois (03) wilayas : celle de Batna qui compte vingt-six (26) communes, celle de Khenchela qui compte quatorze (14) communes et enfin celle de Biskra qui compte sept (7) communes (Garah, 2020).

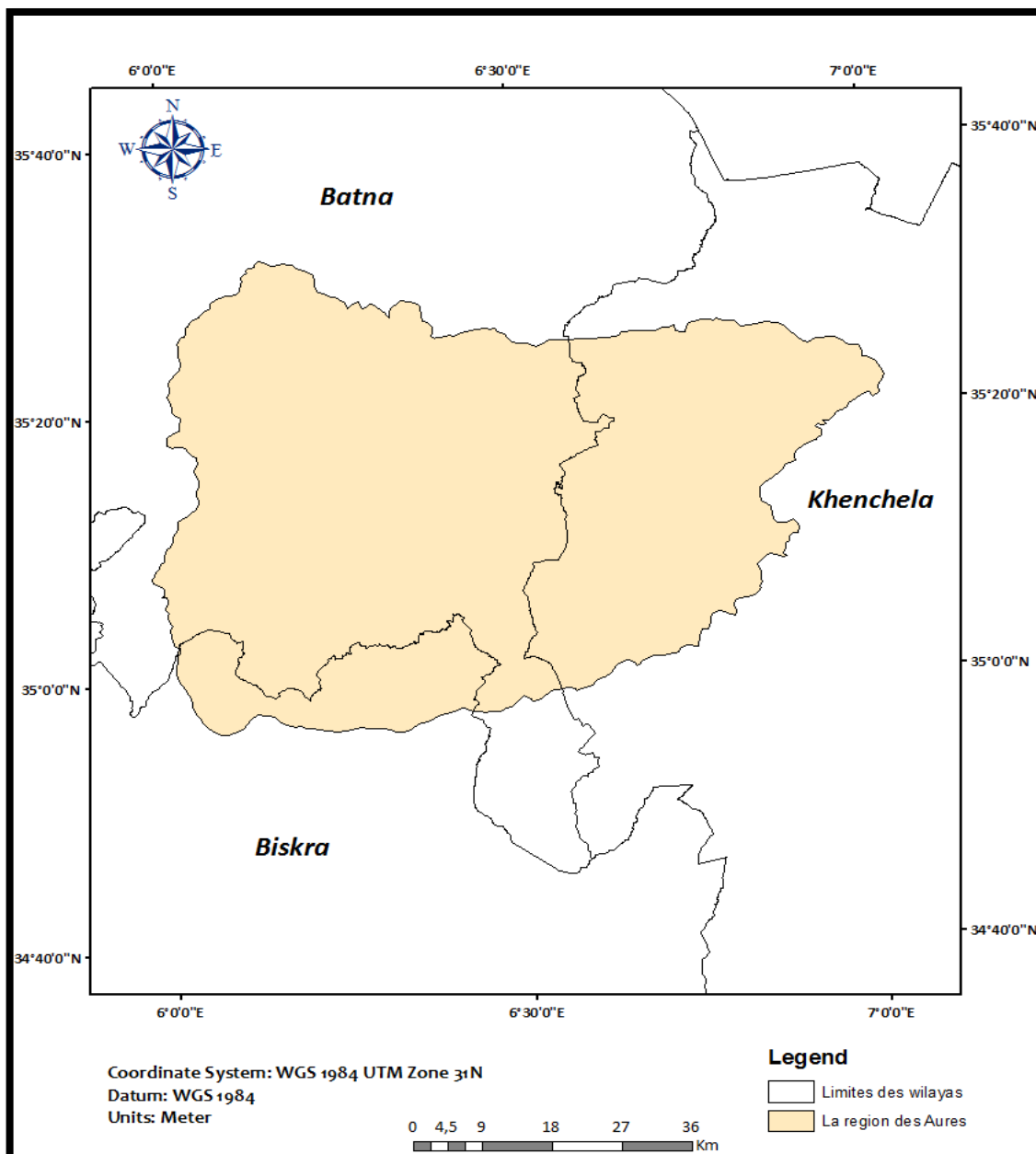


Figure II-1: Carte de localisation administrative de la région des Aurès.

II.1.2 Contexte géologique

Pour bien présenter les propriétés géologiques de la région de l'Aurès, nous présenterons un bref aperçu des principaux aspects qui caractérisent la géologie de ce massif.

Le document principal demeure celui de Laffitte (1939), dont nous fournissons de nombreuses illustrations importantes. En utilisant la carte géologique dressée par Laffitte (1939), nous tenterons d'identifier les principales formes lithologiques, attribuables aux différentes époques géologiques. La recherche sur les principaux types de faciès géologiques

révèle des liens étroits entre l'orographie de cette région et sa structure géologique (Blayac, 1899). Mais la région d'étude couvre des terrains principalement mésozoïques.

L'ensemble des terrains des Aurès s'étend sur des faciès datant du mésozoïque, principalement trias, jurassique et crétacé. Laffitte (1939) a identifié les différentes formes suivantes :

Le trias, qui se distingue par ses argiles gypsifères et salifères, est localisé principalement au Dj Melah (El Outaïa), à la frontière sud-ouest de l'Aurès, à Maafa, à Menaâ, Narah et au nord-ouest de la plaine de Medina.

Le jurassique est formé par la combinaison de différentes formes de calcaire, de calcaréomarneux et de dolomies. Le Dj Azreg, Kef Taghda et Taghit Sidi Bel Kheir sont des exemples de ses apparitions.

D'après Laffitte (1939), **le crétacé** est extrêmement développé dans l'Aurès, il se compose de deux séries successives et très différentes. L'une a une épaisseur de 2000 mètres, principalement composée de grès couronnés par l'Albien. Les marnes et parfois les calcaires de cette série gréseuse sont présents en lentilles plutôt qu'en couches continues. Elle est responsable du crétacé inférieur. L'autre est composée d'une couche marno-calcaire épaisse d'environ 3000 mètres, sans jamais présenter de couches gréseuses, même en plaques minces. C'est une série du Crétacé supérieur.

II.1.3 Pédologie

L'Aurès est principalement constitué de calcaires du Crétacé et de l'Eocène. Il ne fait donc pas de miracle que, dans la plupart des sites, le sol soit argileux avec des blocs rocheux calcaires. Il est possible que ce soit un calcaire homogène ou coquillier, ou même un poudingue à gros blocs dont la désagrégation donne naissance à un sol argileux avec des graviers (Gouat et Gouat, 1983). Des formations gréseuses et dolomitiques ne sont pas si rares dans cette lithologie. Selon la roche principale, la végétation dominante, le climat et le processus d'évolution de ces sols, on a identifié différents types de sols. Les sols les plus courants de la région forestière et pré forestière de l'Aurès sont les suivants :

- **Les sols bruns calcaires :**

Dans les cédraies, ce type de sol est principalement composé de marnes et secondairement de calcaires (Abdessemed, 1981). Ce groupe se forme sous une futaie de pin avec un sous-bois dense de chêne vert, sur des calcaires parfois combinés avec des bancs de marne du cénoomanien, turonien et du lias moyen et supérieur (Schoenenberger, 1970a ; Abdessemed,

1981). Selon Abdessemed (1981), ces sols forment l'ensemble des sols des cédraies de S'gag, notamment les rendzines. Ils se retrouvent également parfois dans la cédraie des Ouled Yagoub (Dj Faraoun) et au Belezma. Dans ce groupe, Abdessemed (1981) a identifié deux types : l'un qui présente une couleur brune calcaire caractéristique, tandis que l'autre est presque complètement décalcifié en surface.

- **Les rendzines**

Ces sols, appelés rendzines, se forment sur un substrat calcaire plus ou moins fissuré, ou sur des dolomies et des calcaires dolomitiques plus ou moins modifiés. Ce genre de sol, en raison de la dégradation extrêmement intense du milieu, est devenu extrêmement rare. D'après Abdessemed (1981), les rendzines se rencontrent au Dj Chentgouma, au Belezma et dans les régions les plus méridionales (Dj Azreg et Dj Taghda) des localités. Selon Schoenenberger (1970a), une grande partie de la chênaie verte et de la thuriféraie est basée sur les rendzines dont, après le défrichement, l'érosion a anéanti une grande partie des horizons humifères.

- **Les sols bruns à peu calcaire**

Selon Abdessemed (1981), cette catégorie de sols est largement répandue, en particulier dans les cédraies les plus arrosées du massif. Leur localisation se fait sur un substrat gréseux des faciès barrémien, aptien et albien. Dans le massif de Chélia et des Ouled Yagoub, ces morphologies se trouvent généralement dans une zone plus élevée. C'est pourquoi tous les sols de la cédraie de Chélia et des Ouled Yagoub sont composés de sols bruns peu calcaires.

Schoenenberger (1970) a identifié différents groupes de sols dans cette zone. Aux groupes déjà mentionnés s'ajoutent des types de sols plus ou moins répandus, notamment dans les régions les plus chaudes. On y trouve :

- Des sols peu évolués : Localisés le long des oueds du massif des Béni-Imloul, ces sols se développent sur des terrasses alluviales récentes.
- Des terra rossa : Ces sols rouges caractéristiques supportent une végétation thermophile composée de taillis de chêne vert et d'*Ampelodesma mauritanicum*

Certains étages de terrains d'une grande puissance ont été complètement engloutis par les eaux dans certaines parties de l'Aurès. Par la suite, ils ont été pétris, triturés et placés en masse limoneuse ou en tufs calcaires dans les fonds de vallées qui ont été ainsi comblés, ou bien ils ont formé d'énormes bourrelets au pied méridional des montagnes.

II.1.4 Hydrographie

La région des Aurès est riche en ressources hydrographiques qui font partie du bassin des Chotts sahariens Melrir et el Rarsa. La plupart de l'année, ses cours d'eau sont presque secs, mais pendant la saison des pluies, ils sont remplis d'eaux torrentielles dont les effets de débâlement sont importants (Blayac, 1899).

Delartigue (1904), Abdessemed (1981) ont décrit le réseau hydrographique de la région des Aurès comme endoréique ou aréique pour l'ensemble du massif. Parmi les rivières, certaines sont sahariennes, tandis que d'autres, généralement plus courtes, se perdent dans les dépressions des hautes plaines.

En ce qui concerne le versant saharien, le massif de l'Aurès est creusé par quatre vallées. C'est l'oued El-Kantara et ses principaux affluents, l'oued Abdi, l'oued El Abiod et l'oued El Arab. Le massif est traversé par ces derniers cours d'eau du nord-est vers le sud-ouest, créant ainsi des fragments dans la structure géographique. Le versant de la plaine des Sbakhs est drainé par les cours d'eau Sebkha Djendeli et Gueraa El Tarf. Ce sont les derniers lacs salés qui accueillent les cours d'eau de l'Aurès. Selon Abdessemed (1981), les principaux cours d'eau alimentant ces milieux sont l'oued Chemora et l'oued Boulefreis.

Comme pour la plupart des oueds nord-africains, les débits des oueds aurasiens sont extrêmement fluctuants : très élevés pendant la saison humide et très faible pendant la saison estivale (Abdessemed, 1981).

II.1.5 Particularités des forêts des Aurès

Le massif des Aurès est un des principaux massifs forestiers de l'Atlas Saharien, avec l'une des plus belles forêts de cèdre dans le mont de Chélia, les pinèdes les plus importantes du pays celle des Beni Imloul, l'unique forêt de thurifera (*Juniperus thurifera*), le peuplement endémique de chêne zeen à petites feuilles (*Quercus canariensis*), les plus grandes formations de frêne épineux (*Fraxinus xanthoxyloides*) et plusieurs espèces rares, comme il a déclaré Abdessemed (1981). Cette richesse floristique notable ainsi le taux d'endémisme élevé offre une valeur patrimoniale considérable et un intérêt économique, écologique et paysager très important.



Figure II-2: Vue générale d'une des forêts des Aurès.

II.1.6 Historique

Tout au long de l'histoire et pendant des siècles, la forêt algérienne a été fortement influencée par l'homme, ce qui a donné à la forêt la forme, la composition et la structure que nous lui connaissons aujourd'hui (Kadik, 1986). La superficie de l'Algérie est d'environ 238.174.100 hectares, avec une couverture forestière d'environ 4.149.400 d'hectares. Le classement mondial des forêts avec une couverture de 1,7 % se situe au 239e rang (DMF, 2014). Le climat, le relief, les sols et la végétation naturelle de ce vaste territoire sont extrêmement variés (Letreuch-Belarouci, 1995). Selon la direction générale des forêts en 2010, il n'y a que 1,7 million d'hectares de forêts sur 4,1 millions d'hectares de terres forestières.

II.2 Analyse climatique

Le climat de l'Algérie, tout comme celui de la plupart des pays méditerranéens, est marqué par un relief très différent qui entraîne une grande variation climatique du nord vers le sud.

Les majeures contraintes climatiques dans notre cas d'étude sont liées essentiellement à la disponibilité de l'eau dans l'écosystème forestier.

Il est important de signaler que notre étude s'intéresse à des peuplements qui ont évolué depuis longtemps et qui s'adaptent progressivement au climat local. La caractérisation de cet aspect ne nécessite pas une analyse aussi approfondie que celle d'une approche axée sur une nouvelle mise en valeur agricole, avec notamment l'introduction de nouvelles espèces. Cependant, les informations disponibles nous permettent de situer l'état général du climat de façon régionale. Les micro-climats très recherchés ne sont pas accessibles dans cette méthode, car il n'y a pas de stations intermédiaires.

En raison de l'étendue de notre zone d'étude, nous utilisons des données climatiques collectées auprès de plusieurs stations météorologiques situées à différentes altitudes et versants.

Il est très important de signaler que les données exploitées dans cette étude sont fournies par le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER).

Tableau II-1: Stations meteorologiques et periodes d observation.

Stations	Coordonnées géographiques	Altitude (m)	Période d'observation
FoumToub	35°42'22"N 4°12'43"E	1220	1913-1953
Arris	35°15'59"N 4°00'57"E	1100	1913-1953
Mena	35°10'19"N 3°40'19"E	983	1915-1987
Chelia Kantina		1300	1992-1999
Batna	35°43'N 6°21'E	1052	1990-2004
T'kout		827	1969-1978
Ichmoul	35°19'46"N 4°10'49"E	1451	

Pour caractériser le climat de notre région d'étude, nous avons utilisé deux paramètres météorologiques, les précipitations et les températures, qui sont les principaux éléments permettant de caractériser les climats. D'après ces données, nous avons élaboré divers paramètres bioclimatiques.

II.2.1 Précipitations

Tableau II-2: Répartition mensuelle et annuelle des précipitations

Stations	Mois												Cumul
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
FoumToub	40	41	66	45	51	17	14	20	44	41	50	46	475
Arris	24	24	32	21	30	19	10	14	35	30	35	37	311
Menaa	24	23	17	23	12	3	2	2	24	26	27	25	208
Kantina	44,8	44,9	41,1	57,7	52,5	38,6	32,5	33	48,8	50,8	42,1	47,8	535
Chélia	30,5	44,2	52,9	54,9	60,6	32,5	8,3	26,3	48,2	29,5	47,9	44,1	480
Batna	34,9	24,3	31	34,6	46,3	15,8	7,6	20	36,5	22,3	30,5	37,4	341,2
T'kout	17	12	11	13	33	11	1	14	17	12	23	7	171

Les totaux dégagés à partir de la répartition des précipitations varient de 171 mm à T'kout au sud de la zone étudiée à 535 mm à Kantina au nord.

II.2.1.1 Régime saisonnier

L'analyse du tableau II-3 montre que la saison la plus arrosée est le printemps suivi de l'automne pour les trois (03) stations (Foum Toub, Kantina et Chélia). En revanche, pour les deux autres stations (Arris et Menaa), la saison la plus arrosée est l'automne suivi de l'hiver. Pour la station de Batna, qui se situe à 827 m d'altitude, la saison la plus arrosée est le printemps suivi par l'hiver. La station de T'kout, bien qu'elle soit plus au Sud, bénéficie d'un régime semblable à celui de Foum-Toub, la plus au Nord par rapport au périmètre d'étude, où se trouvent les séries réparties.

Tableau 0II-3: Répartition des précipitations saisonnières des différentes stations.

Stations	Saisons								Type
	Automne	%	Hiver	%	Printemps	%	Été	%	
Foum Toub	135	28	127	27	162	34	51	11	PAHE
Arris	100	32	85	27	83	27	43	14	AHPE
Menaa	77	37	72	35	52	25	7	3	AHPE
Kantina	141,61	27	137	25	151	29	104,1	19	PAHE
Chélia	125,6	26	119	25	168	35	67	14	PAHE
Batna	89,3	27	96,6	28	111,9	33	43	12	PHAE
T'kout	52	29	36	20	66	37	26	14	PAHE

Deux types de régimes saisonniers ont été distingués (P.A.H.E et P.H.A.E), qui correspondent respectivement aux ensembles suivants : le domaine des hautes plaines et les piémonts d'une part, et la haute montagne d'autre part. Cette dernière constitue la barrière orographique citée antérieurement.

II.2.2 Températures

Le milieu naturel en général et la vie végétative en particulier sont surtout influencés par les valeurs des températures extrêmes qui peuvent agir négativement sur la germination et le développement de la végétation. Concernant ce paramètre important, l'aire d'étude présente les caractéristiques suivantes :

Tableau II-4 : Répartition des températures minimales (m), maximales (M) et moyennes (T).

Station	T°	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Foum Toub	m	-0,37	1,1	4,4	6,91	12,23	16,73	18,75	20,31	15,08	9,39	3,02	-0,65
	T	4,56	6,16	9,76	12,5	18,3	23,2	25,4	27,1	21,4	15,2	8,26	4,26
	M	9,49	11,2	15,12	18,09	24,37	29,67	32,05	33,89	27,72	21	13,5	9,17
Ichemoul	m	-1,54	-0,1	3,23	5,72	11,04	15,54	17,56	19,12	13,89	8,2	1,86	-1,81
	T	3,29	4,89	8,49	11,2	17	21,9	24	25,8	20,1	13,9	6,99	2,99
	M	8,12	9,85	13,75	16,68	22,96	28,26	30,1	32,48	26,31	19,6	12,12	7,79
Arris	m	0,23	1,7	4,99	7,46	12,78	17,28	19,3	20,86	15,63	9,94	3,63	-0,04
	T	5,22	6,82	10,4	13,1	18,9	23,8	26	27,7	22	15,8	9,82	4,92
	M	10,21	11,9	15,81	18,74	25,02	30,32	32,7	35,54	28,37	21,7	14,21	9,88
Mena	m	0,82	2,29	5,63	8,11	13,43	17,92	19,94	21,5	16,27	10,6	4,21	0,54
	T	5,86	7,46	11,1	13,8	19,6	24,5	26,7	28,4	22,7	16,5	9,56	5,56
	M	10,9	12,6	16,57	19,49	25,77	31,08	33,46	35,3	29,13	22,4	14,91	10,58
Batna	m	0,2	0,3	2,9	5,2	10,1	14,5	16,8	17,2	14,4	10,4	4,8	1,5
	T	5,5	6,8	10	12,5	18	23,4	26,2	25,9	21,5	16,8	11,1	6,6
	M	11,7	13,5	17	19,5	25,7	31,9	35	34,7	29,2	23,9	17,3	12,7

Pour les 05 stations considérées, les températures moyennes mensuelles sont inférieures à la moyenne annuelle (un minimum de 13,4 °C pour Ichemoul et 15,9 °C pour Mena) de novembre à avril et supérieures à cette moyenne de mai à octobre. Ce qui divise ainsi l'année en deux périodes, l'une chaude et l'autre froide. A l'exception de la station de Batna, pour les 04 autres stations, décembre est le mois le plus froid (entre 2,99 °C et 5,56 °C), et juillet le mois le plus chaud (entre 25,8 °C et 28,4 °C).

Au cours de la saison froide, des minima absolus sont observés. On distingue les températures extrêmes inférieures à 0 °C qui se manifestent en décembre et janvier pour 03

stations (Foum Toub, Ichemoul et Arris), de celles avoisinant 1 °C (Menaâ, Batna). La valeur la plus basse du minima est de -1,81°C, enregistrée au niveau de la station d'Ichemoul. Ces valeurs enregistrées renseignent sur la vigueur du froid.

Durant la saison chaude, des maxima absolus sont également observés durant le mois d'août. Les maxima du mois le plus chaud (août), qui varient de 32,48 °C (Ichemoul) à 35,3 °C (Menaâ), sont localisés dans la partie Sud et s'expliquent par l'effet de continentalité. Enfin, l'amplitude thermique est en moyenne de 22 °C, ce qui présente un climat ayant des caractères continentaux pour les stations de Foum Toub, Ichemoul, Arris, et Menaâ.

II.3 Synthèse bioclimatique

Elle consiste en l'estimation et l'appréciation de certains paramètres et indices en vue de caractériser d'avantage le climat de la zone. En effet, le climat, dans sa complexité, se manifeste souvent à travers l'interaction de plusieurs paramètres, particulièrement la température et la pluviométrie.

II.3.1 Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique de la juxtaposition entre la courbe thermique et pluviométrique, selon la relation $P = 2T$ (P = précipitation moyenne mensuelle en mm et T = température mensuelle moyenne en °C). Ce diagramme permet de distinguer la saison sèche de la saison humide. Les résultats par station sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 0II-5 : Saison sèche selon le diagramme ombrothermique (Stations de références).

Stations	Saison sèche
Foum Toub	Début du mois de Juin à fin Août
Arris	Début du mois Avril à fin d'Octobre
Menaâ	Mi - Avril à Septembre
Batna	Début Juin à fin Septembre

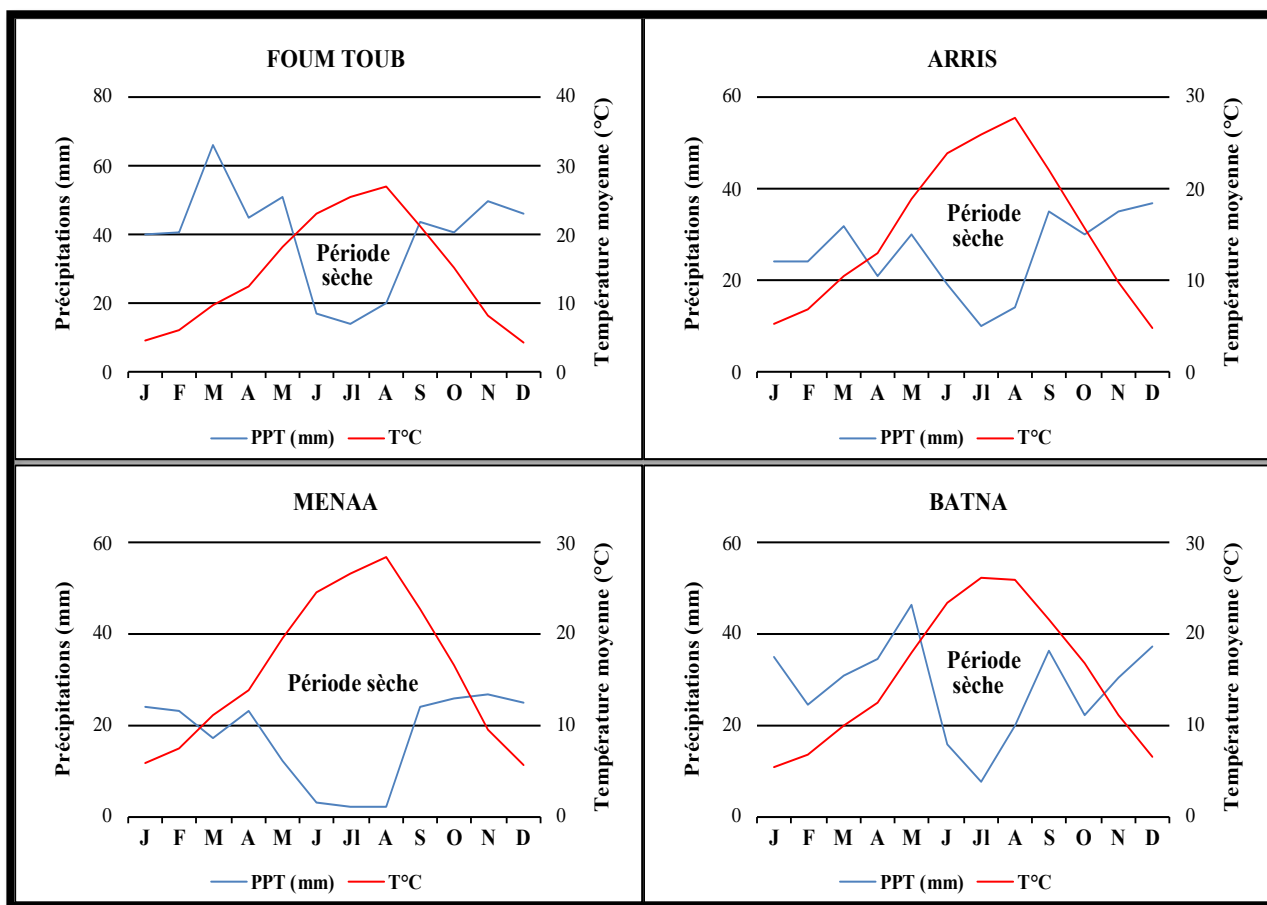


Figure 0II-3 : Diagramme ombrothermique des stations de références.

II.3.2 Climagramme d'Emberger

Le bioclimat est défini à partir du quotient pluviométrique « Q2 » calculé à partir de la formule suivante : $Q2 = 3,42 \times P / (M - m)$

- M : Température moyenne des maxima du mois le plus chaud ;
- m : Température moyenne des minima du le mois le plus froid ;
- P : Pluviométrie moyenne annuelle.

Tableau 0-6: Quotient pluviométrique d'Emberger (Stations de références).

Station	P(mm)	M°C	m°C	Q2	Etage bioclimatique	Variante thermique
FoumToub	475	33,89	-0,65	47,17	Semi-aride	Froid
Arris	311	33,54	0,04	30,04	Semi-aride	Frais
Menaa	208	35,3	0,54	20,52	Arde	Frais
Batna	341	35	0,2	33,62	Semi-aride	Frais

Il ressort qu'à l'exception de la station de Menaâ, représentant la partie sud du périmètre et localisée dans l'étage bioclimatique aride à hiver frais, le climat relève principalement de l'étage semi-aride à hiver frais ou froid. Il est à signaler que certaines micro-zones appartiennent à l'étage bioclimatique subhumide de par les pluies reçues à travers les stations relevées (cas des stations Chélia et Kantina).

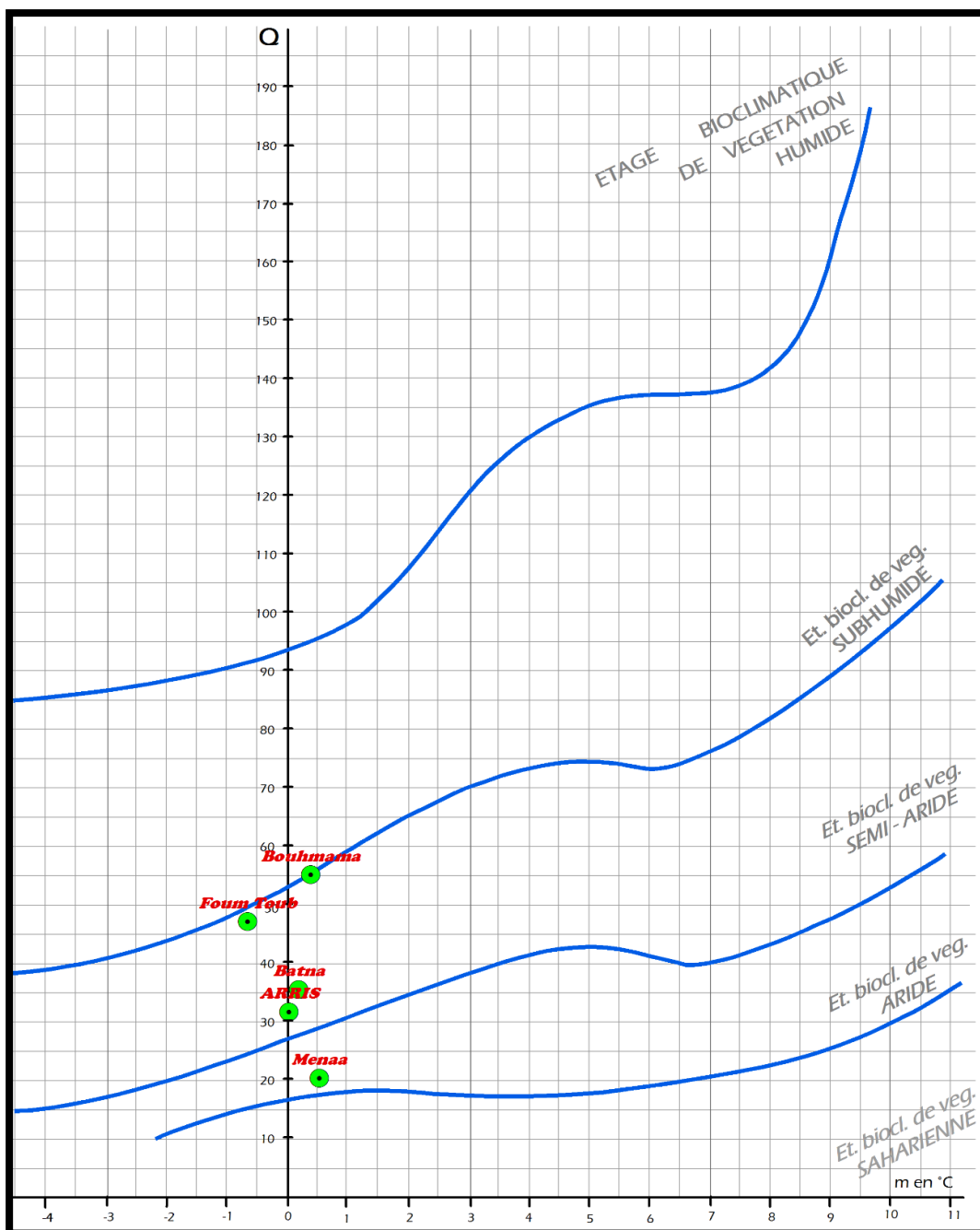


Figure II -4 : Projection des stations étudiées sur le climagramme d'Emberger.

Afin d'illustrer clairement les caractéristiques climatiques de notre zone d'étude, nous avons choisi le point de référence de Bouhmama. Avec un Q2 de 53 et une température minimale de 0,4 °C (Bouzekri.2015). Ce point met en évidence l'étalement géographique de la région étudiée.

Cet espace s'étend des zones arides jusqu'à l'étage bioclimatique subhumide, témoignant ainsi d'une diversité climatique notable.

II.3.3 Indice d'aridités de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne, développé en 1926, est une formule mathématique permettant d'évaluer le degré d'aridité d'une région donnée. Contrairement à d'autres indices basés uniquement sur les précipitations, celui-ci intègre également la température, reflétant ainsi l'influence de l'évapotranspiration potentielle.

Pour déterminer l'indice d'aridité d'une station météorologique donnée, De Martonne utilise la formule suivante :

$$I = P / (T + 10)$$

Où:

I : représente l'indice d'aridité de De Martonne.

P : correspond à la pluviométrie moyenne annuelle en millimètres (mm).

T : représente la température moyenne annuelle en degrés Celsius (°C).

Plus l'indice est faible, plus le climat est aride. De Martonne a établi une classification bioclimatique basée sur cet indice :

Tableau II-7 : Classification du climat selon l'indice de De Martonne.

Valeur d'indice	Type de climat
$0 < I_{DM} < 5$	Hyper aride
$5 < I_{DM} < 10$	Aride
$10 < I_{DM} < 20$	Semi-aride
$20 < I_{DM} < 30$	Semi humide
$30 < I_{DM} < 50$	Humide

Les valeurs de l'indice de De Martonne, calculées à partir des données climatiques disponibles, sont présentées dans le tableau suivant pour chacune des stations de références.

Tableau II-8 : Valeurs de l'indice d'aridité annuel de De Martonne pour les stations de références

Station	P(mm)	T°C	I	Type de climat
FoumToub	475	12,25	21,34	Semi - humide
Arris	311	13,14	13,43	Semi-aride
Menaâ	208	13,82	8,73	Aride
Batna	341	13,46	13,38	Semi-aride

Notre zone d'étude présente une transition climatique progressive, révélée par l'indice de De Martonne. Du climat semi-humide de Foum Toub, on passe à un climat semi-aride à Arris et Batna, puis à un climat aride à Manaâ.

II.4 Données spécialisées

II.4.1 Élaboration des cartes thématiques

Pour élaborer des cartes thématiques de précipitation et de température sous ArcGIS, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- Téléchargement des données de précipitations et de températures à partir du site <https://webfiles.york.ac.uk/KITE/AfriClim/> pour l'Algérie puis l'extraction la région d'intérêt (les Aurès). Ces données sont disponibles sous forme de fichiers raster.
- Importation des données raster dans ArcGIS en utilisant l'outil "Add Data". les données sont correctement géo référencées.
- Classification des données de précipitations et de températures en catégories appropriées en fonction de l'étendue dans la région des Aurès.
- Création de la carte représentant les précipitations et une autre les températures de la région des Aurès.

II.4.1.1 Carte des précipitations annuelles

L'analyse des données révèle que la zone d'étude reçoit en moyenne 448 mm de précipitations par an, avec une variabilité interannuelle allant de 183 mm à 713 mm.

La carte des précipitations illustre une diminution progressive des cumuls pluviométriques selon trois gradients distincts : d'est en ouest, du nord au sud et des altitudes élevées vers les basses altitudes.

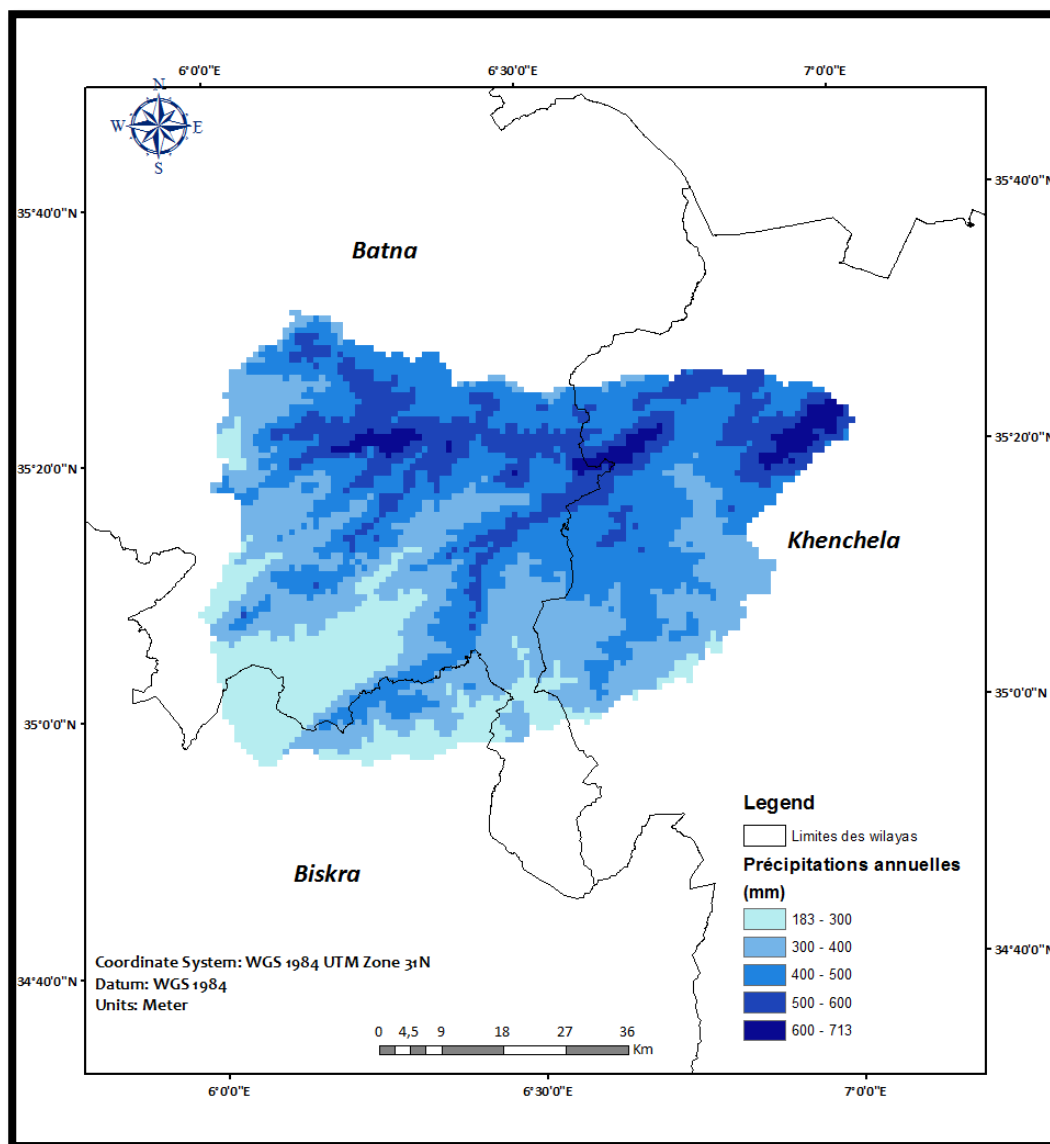


Figure II-5 : Carte des hauteurs des précipitations annuelles de la région des Aurès

II.4.1.2 Carte des températures moyennes annuelles

La région étudiée enregistre des températures moyennes comprises entre 6 °C et 19 °C. À l'instar des précipitations, la distribution spatiale des températures suit un schéma tridimensionnel, influencé par des gradients longitudinaux, latitudinaux et altitudinaux. Ainsi, on observe une évolution progressive des températures d'est en ouest, du nord au sud et des zones de haute altitude vers les zones de basse altitude.

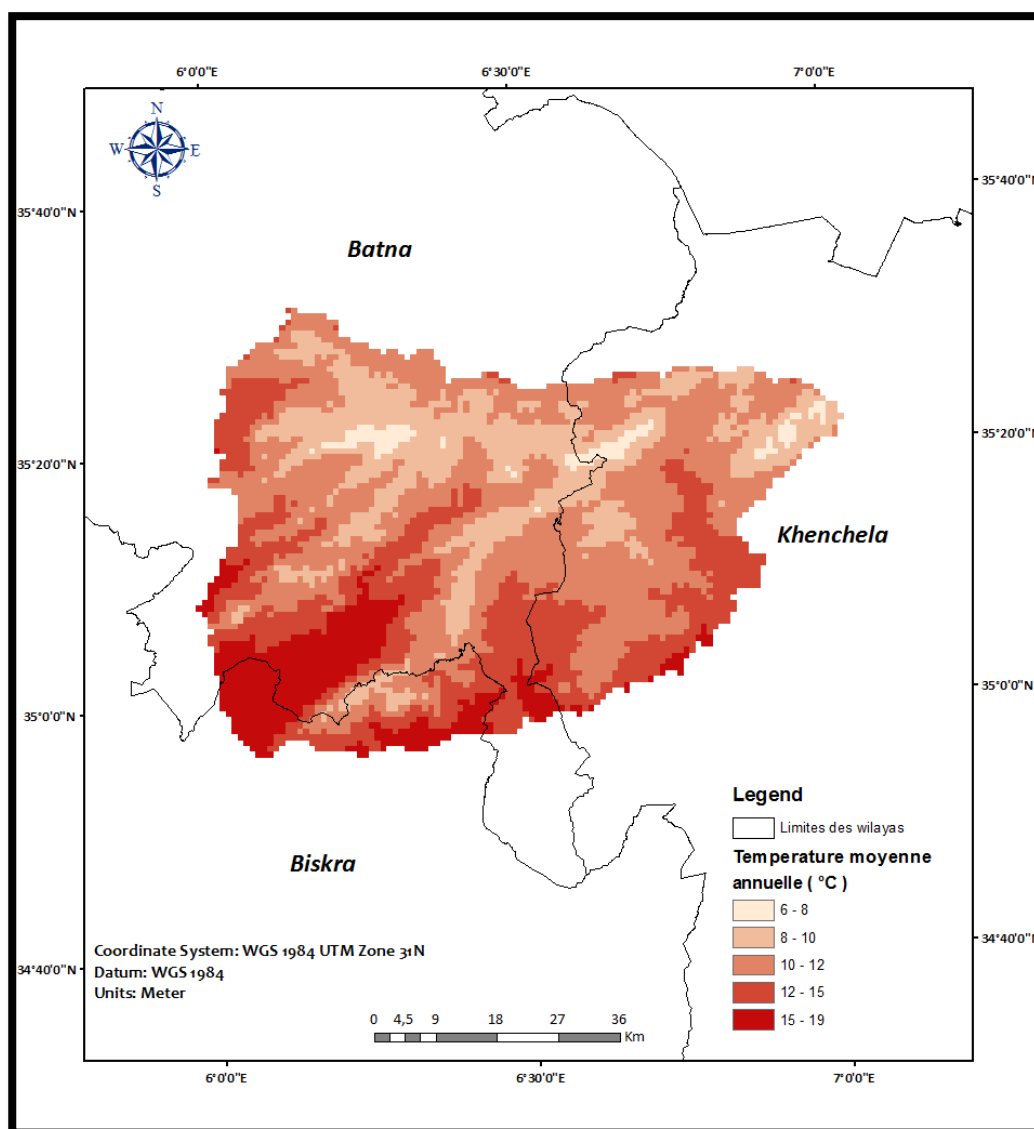


Figure II-6 : Carte des températures moyennes annuelles de la région des Aurès.

II.4.1.3 Carte de l'indice de De Martonne

En superposant les données de précipitations et de températures, on peut obtenir une carte unique qui combine les deux variables climatiques (**Figure 0-7**). Cela est fait par l'utilisation de l'outil "Raster Calculator" dans ArcToolbox (Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator) puis l'insertion de la formule de l'indice de De Martonne en ajoutant les noms des couches raster importées.

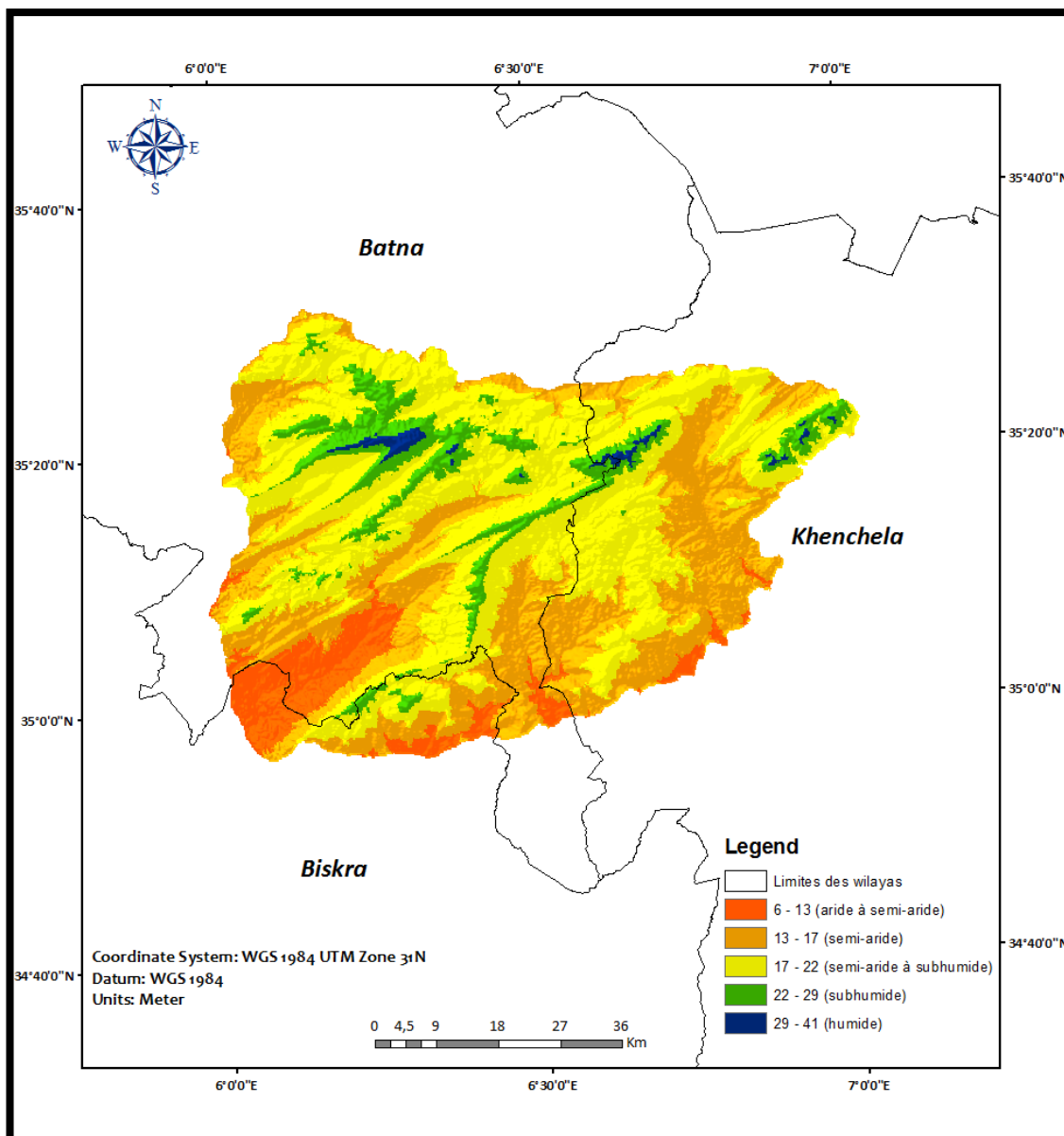


Figure II-7 : Carte des types de climat selon l'indice de De Martonne.

La région des Aurès se distingue par une grande variété de conditions climatiques, allant de l'aride au sud jusqu'à l'humide au nord.



Chapitre. III

**Analyse spatio - temporelle de l'évolution du couvert végétal dans
les Aurès par images Landsat**

Introduction

Les forêts fournissent à l'humanité de nombreux biens et services. D'après Tabopda et Huynh (2009) et Tankoano (2017), elles sont essentielles pour préserver la biodiversité et sont responsables de la localisation des espèces animales et végétales.

Les ressources naturelles jouent un rôle crucial dans l'évolution des sociétés et leur valorisation représente un véritable défi. Effectivement, les hommes utilisent des éléments de l'environnement physique pour répondre directement ou indirectement à leurs besoins alimentaires domestiques et financiers (Mercoiret, 1994).

Les ressources naturelles sont constamment exposées à des agressions humaines et animales, ce qui rend la végétation incapable de résister et de se maintenir. Selon Roche (1998), ces actions provoquent des perturbations des écosystèmes terrestres et des pertes de biodiversité.

L'évolution de l'écosystème a des conséquences directes sur l'utilisation du sol et sur la structure du paysage. Plus précisément, les forêts méditerranéennes, dont font partie les forêts algériennes, connaissent une forte diminution, principalement en raison des conditions climatiques difficiles, de l'érosion des sols, de la fréquence élevée des incendies et de l'action humaine, notamment l'exploitation irresponsable des pâturages, l'abattage des arbres et le défrichement (Benabdeli, 1993 ; Louni, 1999).

Comme dans l'ensemble de la forêt algérienne, les monts des Aurès et du Belezma sont riches en biodiversité, mais sont submergés par une dégradation qui affecte plus ou moins les forêts de cèdre et de pin et les matorrals de chêne vert, qui forment le premier couvert ligneux contre le grand désert.

La télédétection devient un outil extrêmement efficace pour mesurer et mieux appréhender le phénomène de dégradation, en fournissant des données spatiales quantitatives pour le suivi des variations de l'occupation du sol. Dans cette optique, de nombreuses recherches ont été menées dans la région des Aurès dans le but primordial d'étudier la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal (Benmessaoud, 2006 ; Beghami et *al.*, 2013, Bouzekri et Benmessaoud, 2014 ; Garah et *al.*, 2016). Cependant, le contexte dans lequel ces études ont été menées demeure malheureusement disparate, ce qui explique en partie la difficulté de comprendre l'évolution de la couverture végétale dans la région.

L'objet de ce chapitre est l'évolution d'occupation du sol dans la région des Aurès. Dans cette optique, nous avons analysé des images satellites afin de cartographier le couvert végétal, et retracer sa variation sur une période de 33 ans, de 1984 à 2017.

III.1 Matériel et méthodes

III.1.1 Zone d'étude

Le massif des Aurès est un ensemble montagneux situé entre 34°90' et 35°60' de latitude nord et entre 5°10' et 7°10' de longitude est. Il est le plus haut massif de l'est algérien avec le point culminant du mont de Chélia (2326 m) et le deuxième plus haut sommet montagneux d'Algérie après le mont Tahat situé dans le Hoggar. Le massif des Aurès est un massif de la partie orientale de l'Atlas saharien qui protège les hautes plaines constantinoises du désert. Il se distingue par sa configuration orientée nord-est, sud-ouest (Laffitte, 1939). D'après le même auteur (1939), la région d'étude est composée de terrains du Crétacé (inférieur et supérieur) et du Quaternaire, avec des formations gréseuses, marno-calcaires, à flyschs et dolomitiques.

Selon Seltzer (1946), Schoenenberger (1972), Beghami (2013), le climat est de type méditerranéen, avec des précipitations annuelles moyennes variant de 300 mm dans les stations de basse altitude à 800 mm dans les stations les plus élevées. L'impact de l'altitude est très prononcé et on peut clairement observer la variation spatiale des précipitations. Selon la typologie synthétique d'Emberger, ce grand ensemble englobe les différents niveaux bioclimatiques, allant du semi-aride aux subhumides jusqu'aux hivers froids (Emberger, 1955).

En cette atmosphère, où se trouvent les formations forestières les plus remarquables, les céderais et les pinèdes constituent de véritables forêts en combinaison avec plusieurs espèces, telles que le chêne vert (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp), les seuls peuplements de thurifère de l'Algérie (*Juniperus thurifera* subsp. *aurasiaca* (Véla et Schäfer, 2013).

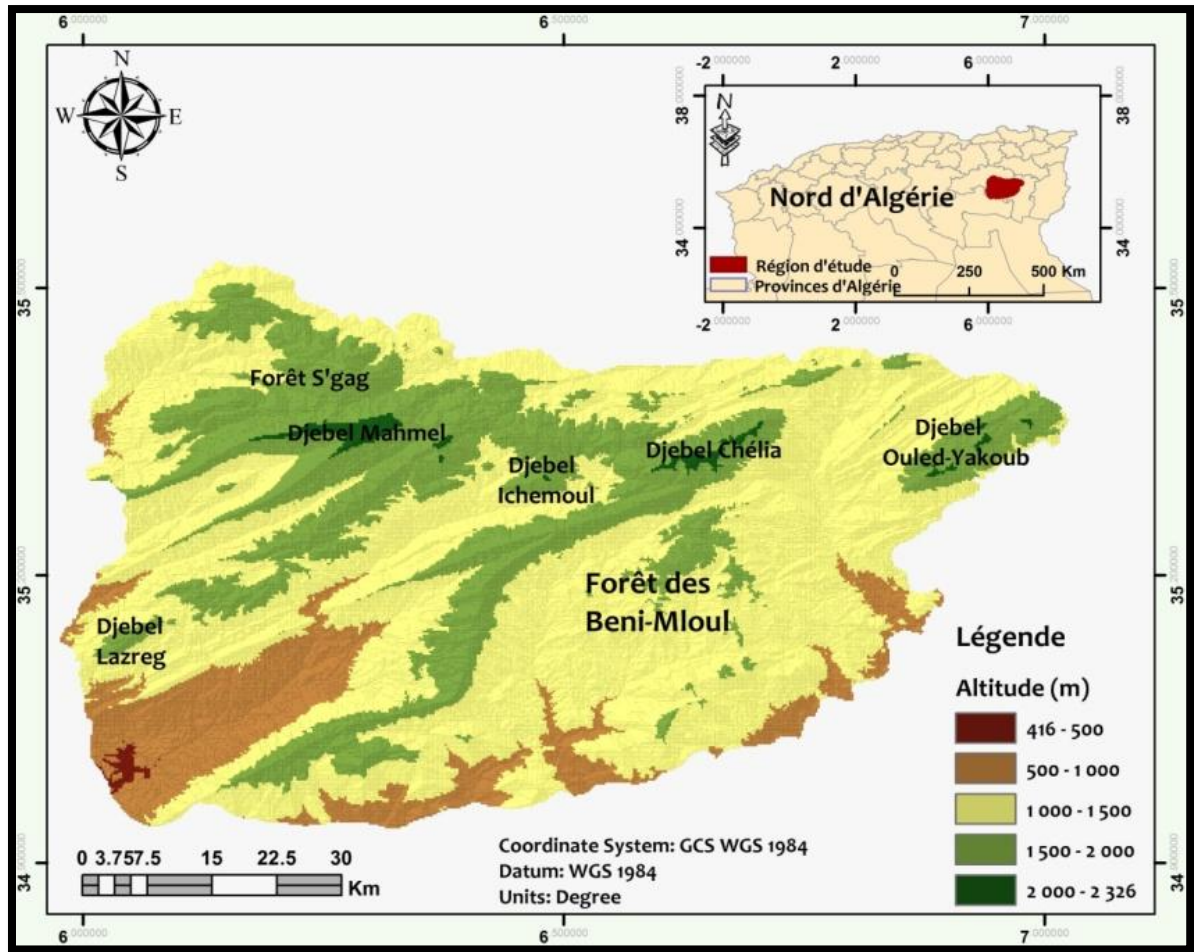


Figure III-1 : Carte de localisation de la région des Aurès.

III.1.2 Méthodologie de travail

Dans cette étude, la méthodologie utilisée est basée sur des données satellitaires, ainsi que sur des mesures et des observations réalisées sur le terrain. Pour l'étude de l'évolution de la forêt dans le massif des Aurès, nous avons analysé trois images satellitaires prétraitées (corrigées sur le plan atmosphérique) : LANDSAT_8, date : 22/09/2017, LANDSAT5_TM, date : 14/07/2003 et ETL5_TM, date : 07/06/1984, avec une résolution spatiale de 30 m. Les prétraitements réalisés se sont limités aux ajustements atmosphériques et radiométriques. Selon Jofack-Sokeng (2016), ces opérations de prétraitements visent à rectifier les déformations géométriques et radiométriques des plates-formes et des capteurs spécifiques, afin d'améliorer la lisibilité des images en éliminant tous les effets atmosphériques.

Ces images sont toutes acquises pendant la saison sèche, afin de mieux distinguer entre les différentes formations biogéographiques existantes. Les images utilisées ont été obtenues gratuitement du site internet de l'U.S. Geological Survey (2017).

La cartographie a été effectuée en utilisant le logiciel QGIS version 2.18.11 (Quantum GIS Development Team, 2016). Les cartes d'occupation de sol des trois dates ont été produites en utilisant la méthode de classification supervisée « maximum de vraisemblances ».

III.2 Résultats

III.2.1 Validation des classifications et résultats cartographiques

L'analyse des images satellitaires de Landsat a permis d'obtenir une précision globale satisfaisante. Effectivement, les résultats offrent respectivement des Kappa de 81 %, 87 % et 92 % pour les images de 1984, 2003 et 2017 respectivement. Il est donc possible d'utiliser judicieusement les résultats de cette classification (Pontius, 2000).

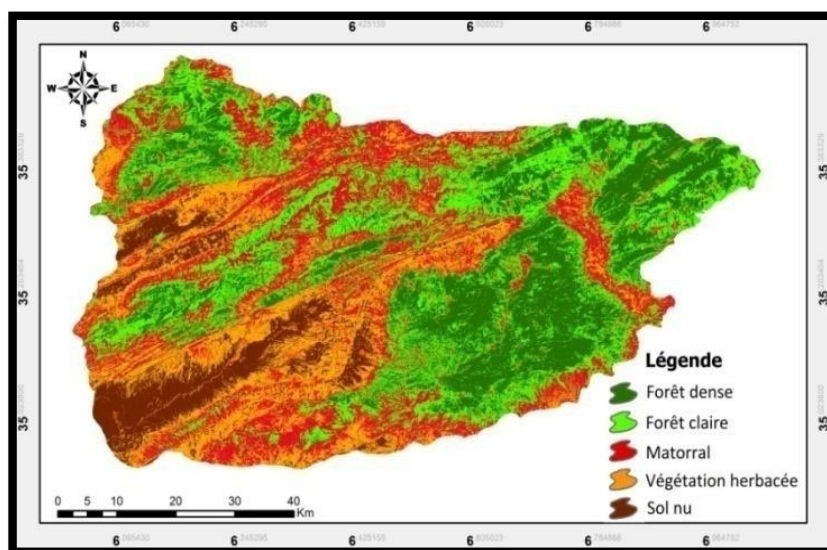


Figure II-2: Carte d'occupation du sol de l'année 1984.

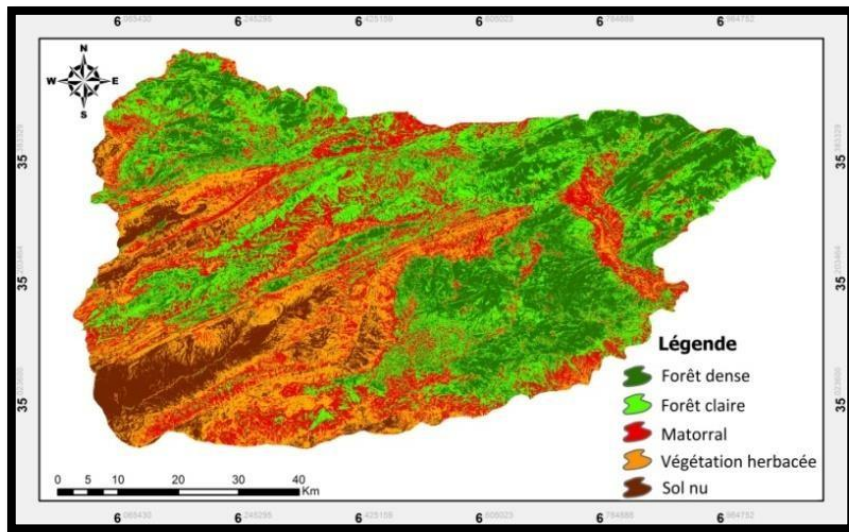


Figure III-3: Carte d'occupation du sol de l'année 2003.

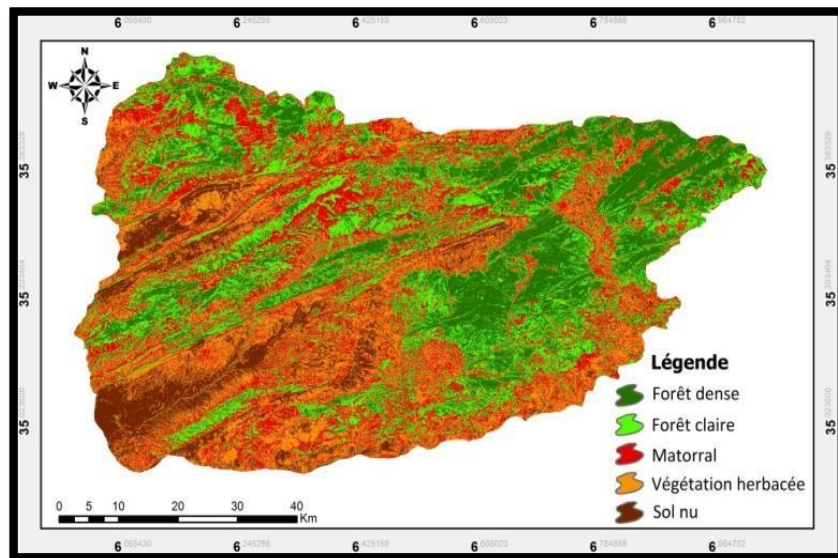


Figure III-4: Carte d'occupation du sol de l'année 2017.

III.2.2 Occupation de sol (1984 à 2017)

En utilisant la classification supervisée par maximum de vraisemblance des images Landsat (2017, 2003 et 1984), cinq classes d'occupation du sol ont été identifiées (Figure III-2, III-3, III-4) :

La catégorie des forêts denses regroupe essentiellement les cédraies pures des hautes altitudes notamment celles de Chélia et Ouled Yakoub ainsi que la pinède de Beni Imloul.

Selon Abdessemed (1984), les formations à dominance de cèdre (*Cedrus atlantica* Endl.) Carrière) présentent une couverture élevée dans les régions nord et très faible dans le sud-ouest et l'extrême nord-est de la zone visée.

Cette classe se trouve dans les zones à moyenne et forte altitude (dépassant 1400m), essentiellement dans le nord et le nord-est de l'aire d'étude et recule lorsque nous nous dirigeons vers le sud. Les forêts deviennent de plus en plus claires, cédant graduellement la place, en premier lieu, aux matorrals à chêne vert (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp), à frêne dimorphe (*Fraxinus dimporha* Coss. & Durieu) et à genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea* L.). Ces derniers se manifestent sur toute la surface de la zone d'étude, en s'étalant de 800 à près de 1400 m, notamment sur les versants sud. La plupart des peuplements sont extrêmement dégradés et sont presque toujours en taillis.

La végétation buissonnante se rencontre entre 1900 et plus de 2100 m d'altitude, et touche donc essentiellement les plus hauts sommets de l'Aurès, en l'occurrence, Chélia et Mahmel. À l'extrême sud-ouest de l'aire d'étude, les sols sont généralement nus ou recouverts par des pelouses.

Les états d'occupation du sol des années 1984, 2003 et 2017 sont synthétisés dans le tableau III-1.

Tableau III-1 : Superficies et dynamique des unités d'occupation de sol entre 1984 et 2017.

	1984		2003		2017		Dynamique 1984-2003		Dynamique 2003-2017		Dynamique 1984-2017	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Forêt dense	97036,29	23,24	95293,80	22,82	86021,28	20,61	-1742,49	-0,42	-9272,52	-2,22	-9272,52	-2,64
Forêt claire	114524,30	27,43	112918,10	27,05	99964,80	23,95	-1606,20	-0,38	-12953,30	-3,10	-12953,30	-3,49
Matorral	99624,33	23,86	106081,50	25,41	109126,3	26,15	6457,17	1,55	3044,80	0,73	3044,80	2,28
Végétation	67129,83	16,08	65448,15	15,68	78682,77	18,86	-1681,68	-0,40	13337,61	3,19	13337,61	2,79
Sol nu	39195,54	9,39	37768,74	9,05	43509,15	10,43	-1426,80	-0,34	5843,40	1,40	5843,40	1,06
Total	417510,29	100	417510,29	100	417304,3	100						

L'examen des cartes (figures III-2, III-3 et III-4) et du Tableau III-1 associé à ces figures montre une modification notable de l'occupation du sol dans le massif des Aurès entre 1984 et 2017. L'occupation du sol en 1984 révèle une prédominance des forêts claires, représentant 27,43 % de la superficie globale, qui se rencontrent généralement sur toutes les expositions et encerclent les forêts denses. De même pour l'année 2003, les forêts claires demeurent toujours les plus dominantes, néanmoins, une augmentation de la superficie des matorrals au détriment d'autres classes, notamment les forêts denses claires et la végétation buissonnante, est observable. En 2017, les matorrals deviennent les plus dominants (26,61 % de surface totale) avec une augmentation des superficies de la végétation buissonnantes (18,86 %) et les sols nus (10,43 %).

III.2.3 Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1984 à 2017

La figure III-5 et le tableau III-2 présentent les évolutions de l'occupation des sols au fil des 33 ans, mesurées et spatialisées. L'évolution des unités d'occupation du sol est illustrée par la matrice produite par un croisement des cartes d'occupation du sol de 1987 et de 2017.

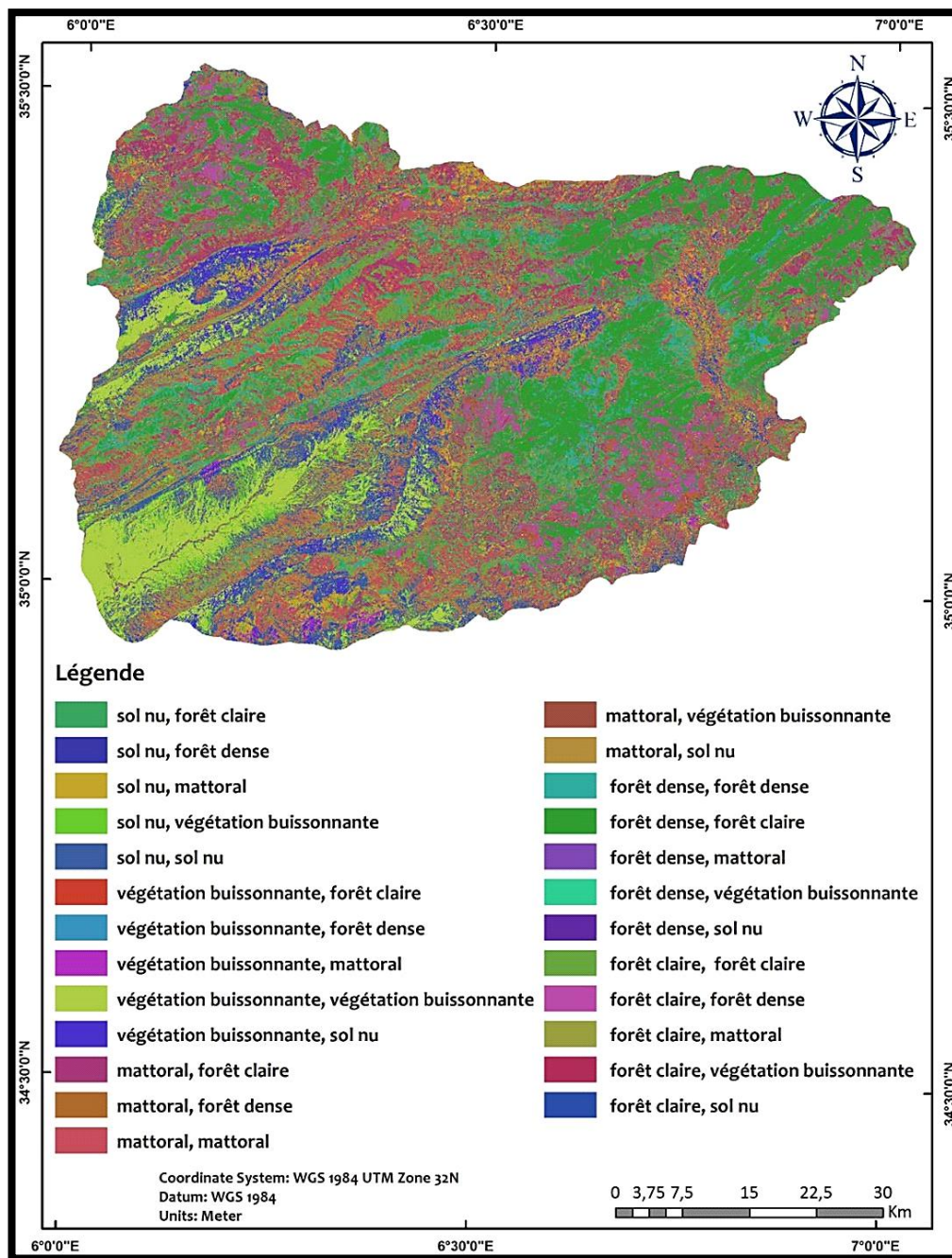


Figure III-5 : Carte des changements opérés pour la période 1984-2017

La figure III-5 et le tableau III-2 montrent que le passage d'un type à un autre de formation touche la totalité des formations. Pendant la période d'étude, les forêts denses et claires tendent à se régresser vers des matorrals, avec 29,24 et 37,84 % respectivement. Les causes paraissent être multiples, dont les coupes illicites, les incendies de forêts et le dépérissement des pieds de cèdre de l'Atlasen particulier sont les plus observables. De même pour les matorrals, un pourcentage moyennement élevé (33,29 %) s'est transformé en végétation buissonnante, et ceci est dû probablement à l'usage intense par les populations locales pour subvenir à leurs besoins

en bois de chauffage et l'alimentation de leurs troupeaux. Presque la moitié (49,54 %) de la surface de la végétation buissonnante est devenue des sols nus. Cela exprime malheureusement le stade final de la dégradation du couvert végétal suite aux conditions environnementales xériques associés à des forts défrichements. Néanmoins, cela n'empêche pas la transformation vers d'autres catégories de végétation, généralement d'un pourcentage relativement faible.

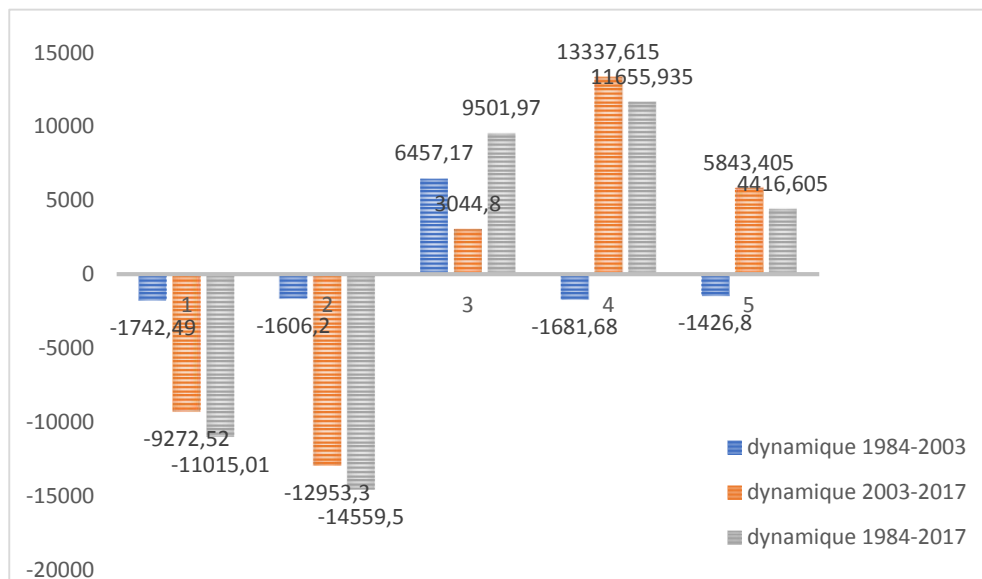


Figure III-6: Bilan final de l'évolution de l'occupation du sol dans les Aurès.

1 : classe des forêts denses ; 2 : forêts claires ; 3 : matorrals ; 4 : végétations buissonnantes ; 5 : sols nus.

La figure 0-6 révèle que parmi les cinq classes d'occupation du sol adoptées, deux ont connu une régression relativement importante. Ces classes se représentent par les forêts denses et claires, montrant une diminution de 11015,01 et 14559,50 hectares, respectivement. Par ailleurs, les trois autres classes d'occupation du sol, à savoir, les matorrals, la végétation buissonnante et les sols nus ont connu d'importantes progressions. La progression la plus remarquable est celle de la classe des matorrals avec une surface de 11655,93 hectares.

Tableau III-3 : Matrice de transition des classes d'occupation du sol dans la région des Aurès entre 1984 et 2017.

FD : classe des forêts denses ; **FC** : forêts claires ; **M** : matorrals ; **VB** : végétations buissonnantes ; **SN** : sols nus.

	FD	Changement en %	FC	Changement en %	M	Changement en %	VB	Changement en %	SN	Changement en %
	Ha		ha		ha		Ha		ha	
FD	53053,30	40,25	35,46	0,05	473,74	0,41	199,31	0,70	50,95	0,06
FC	28423,44	21,56	28202,09	42,35	624,63	0,54	30,29	0,11	41,78	0,05
M	38539,86	29,24	25201,07	37,84	49136,13	42,40	1977,89	6,99	155,30	0,17
B	639,41	0,49	11301,54	16,97	38582,54	33,29	12077,87	42,66	645,07	0,70
SN	11169,76	8,47	1858,26	2,79	27073,51	23,36	14026,91	49,54	90890,16	99,03
	131825,78	100,00	66598,43	100,00	115890,55	100,00	28312,27	100,00	91783,27	100,00

III.3 Discussion

L'analyse spatio-temporelle de l'occupation des sols montre une dynamique régressive du milieu naturel dans la région des Aurès, notamment pour ce qui est de la période d'étude (1984-2003-2017). Tandis que les classes des matorrals, végétation buissonnante et sols nus divulguent une augmentation remarquable en termes de superficie, par opposition aux forêts denses et claires qui subissaient et subissent encore des diminutions accentuées.

Le déclin de la forêt dense se manifeste d'une manière très marquante et alarmante essentiellement dans les cèderaies de Chélia, Ouled Yakoub et S'gag, dont les causes sont multiples et restent toujours incertaines. Selon Quézel (1998), cette dégradation plus ou moins rapide des peuplements et l'éclaircissement progressif des strates arborescentes conduisent la cèdraie à adopter une structure de végétation de type préforestier et matorralisation.

Selon Bentouati *et al.* (2008), le dépérissement du cèdre dans les Aurès est vraisemblablement lié à la fois aux conditions climatiques (sécheresse, stress hydrique, influences sahariennes), à l'action anthropique, au surpâturage et à l'exploitation non contrôlée des coupes.

Les cèderaies des Aurès ont connu une forte diminution vers les années 1982. Selon Bentouati et Bariteau (2006), les surfaces de ces dernières ont connu une diminution significative, atteignant environ 400 hectares par an (Abdessemed, 1984). Selon le BNEDER (2010), les peuplements sains de cèdre de l'Atlas ne couvrent que 1713 hectares à Ouled Yakoub. Selon

Khanfouci (2005), il a été observé une forte diminution des superficies des cédraies des Aurès et du Belezma, passant respectivement de 20 000 à 12 000 hectares et de 8 000 à 4 250 hectares. D'après certains écrivains, les conditions météorologiques défavorables sont sans doute le principal responsable du déclin. Selon Belloula et *al.* (2017), il a été observé une forte diminution de la surface du cèdre de l'Atlas dans le mont de Chélia et Ouled Yakoub entre 1999 et 2016. Cette période correspond à une période de sécheresse de 1999 à 2002, la plus sèche depuis 1845, selon l'étude réalisée par Kherchouche et *al.* (2013). Selon Smaïhi et Kalla (2017), le changement climatique est perçu comme étant responsable du déclin du cèdre dans le parc national du Belezma (à la frontière nord-ouest des Aurès).

Selon Benmassaoud et *al.*, (2009) et Bouzekri et Benmassaoud (2014), l'analyse du sud-ouest des Aurès et de l'Aurès oriental montrait également une diminution du couvert végétal, principalement en raison de la localisation géographique exposée aux influences sahariennes.

Selon Kherchouche (2013), les céderaies dans le sud des Aurès présentent une distribution très ouverte, peut-être due à une activité anthropique accrue combinée à des contraintes environnementales.

Selon Guereh et *al.* (2017), on observe une baisse de 3% de la superficie occupée par le cèdre de l'Atlas dans le massif de Ouled Yakoub, ce qui représente 1506 hectares. Cette diminution est en partie attribuable aux exigences écologiques de l'espèce qui ne lui permettent plus de coloniser les basses et moyennes altitudes du versant sud, en particulier. Selon Beghami et *al.* (2013), les formations forestières denses, en particulier les cédraies, sont en déclin, souvent remplacées par des garrigues et des formations herbacées, ce qui donne lieu à un couvert clair et sujet à toute forme de dégradation.

Après cette régression, il convient de souligner que le chêne vert et le frêne dimorphe ont connu un développement remarquable, en particulier dans les régions de déclin, sous la forme de matorrals (Chafai, 2016). Les chênaies vertes ont des caractéristiques adaptatives aux perturbations environnementales (stress hydrique et thermique, types de substrat).

La région des Aurès est confrontée à une dégradation très significative (Abdessemed, 1984).

Selon Aissi (2019), les formations ouvertes et dégradées de chêne vert sont probablement le résultat de l'action humaine, qui se manifeste notamment par un pacage intense et des coupes irrationnelles, ce qui met en danger leur durabilité et la biodiversité qu'elles abritent.

De plus, la régression du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est observée, en particulier dans la pinède de Beni Imloul, qui est le plus grand peuplement de pin d'Alep en Algérie, avec une

superficie d'environ 70 000 hectares (DGF, 2010). Cette baisse est principalement causée par les incendies qui sont le principal et le plus fréquent responsable de la détérioration de la forêt de pin d'Alep. Effectivement, cette région a été victime de nombreux incendies ayant des conséquences diverses, dont celui de 2012 qui a eu un impact considérable sur la pinède sur une superficie d'environ 6000 hectares (Garah et *al.*, 2017).

Toutefois, le mode de vie des populations locales, étroitement lié à leur besoin en ressources naturelles, accélère le processus de dégradation de la couverture forestière en elle-même, entraînant ainsi la progression des formations plus ou moins dégradées (matorral et végétation buissonnante) au détriment des forêts denses et claires. Les sols nus sont le résultat d'une pratique intense et répétée de défrichement associée au phénomène de désertification, qui peut avoir un impact potentiel dans ses phases avancées.

Conclusion

Cette étude examine les nécessités de mise à jour de l'état de l'écosystème forestier dans la région des Aurès et met en lumière les conséquences de la mauvaise gestion des espaces dans cette région. La télédétection permet d'obtenir des données précises concernant l'évolution des superficies des terres touchées. Toutes les informations provenant de diverses sources ont été intégrées dans un système d'information géographique grâce auquel il sera possible d'accéder facilement à l'information et de faciliter la gestion des données. La géomatique contribue à l'éco-aménagement des systèmes écologiques fragilisés en établissant une base de données cartographique qui permettra de mener des actions de développement concertées en intégrant les visions des scientifiques et des praticiens dans le processus cartographique. Parmi les mesures prioritaires à prendre, la préservation ne peut être réalisée que par l'amélioration des itinéraires, ce qui constitue sans doute l'action la plus ardue. Il est nécessaire d'admettre que la préservation du patrimoine forestier est d'abord un problème socio-économique, mais aussi technique. À ce sujet, il semble que la préservation des environnements naturels ne puisse être réalisée qu'en collaboration et en impliquant les communautés locales.

Chapitre. IV



Relation climat - groupement végétal dans les Aurès

Introduction

Le climat est le principal facteur qui façonne la répartition géographique des plantes (Tuhkanen, 1980 ; Godron, 1984).

La distribution des forêts en région méditerranéenne est fortement influencée par deux facteurs clés : la disponibilité en eau, qui conditionne la croissance végétale, et la température (Quezel, 1985 ; Ozenda, 1975, 2002 ; Rivas Martinez, 1981).

De point de vue écologique, les aires de répartition des espèces forestières sont dynamiques et évoluent en permanence en réponse aux fluctuations climatiques (Brubaker, 1986 ; Huntley, 1991).

Au sein d'un écosystème forestier, chaque essence possède une zone de distribution, un espace géographique où le climat est optimal. Au cœur de cette zone, l'arbre atteint un pic de vitalité, lui permettant de mieux résister aux aléas et de se reproduire avec succès (Brussard, 1984 ; Lawton, 1993 ; Brown *et al.*, 1996).

L'un des sujets clés en climatologie est d'étudier comment les types de climat déterminent les différents écosystèmes forestiers.

En raison de sa position géographique, la région des Aurès présente une vulnérabilité écologique marquée. Cette fragilité est notamment due à la sensibilité de ses écosystèmes face à la sécheresse et à la désertification (SPANB, 2016).

De ce fait, plusieurs indices bioclimatiques et d'aridité ont été proposés en se basant généralement sur la combinaison des précipitations (P), des températures (T_m , T_{max} et T_{min}) et du pouvoir évapo-transpirant de l'atmosphère (ETP).

Dans ce chapitre, l'étude de l'aridité ou la classification des climats se base sur l'indice d'aridité de De Martonne en vue de délimiter spatialement les zones bioclimatiques et pour expliquer la distribution géographique de la végétation par la combinaison des différents facteurs climatiques (Gavilan, 2005).

La cartographie des bioclimats, rendue possible grâce aux outils d'analyse spatiale et aux systèmes d'information géographique, permet de créer des cartes illustrant la distribution de chaque formation végétale au sein de sa zone climatique spécifique.

IV.1 Matériel et méthodes

IV.1.1 Elaboration de la carte de végétation

On a identifié et délimité toutes les formations forestières présentes dans la zone d'étude en collectant leurs coordonnées géographiques sur le terrain à l'aide d'un GPS. De plus, on a

également employé le logiciel Google Earth Pro (version 7.1.1) afin de mieux définir les limites de chaque formation et les zones les plus difficiles à atteindre, comme les crêtes des monts, les falaises, etc. On intègre les polygones obtenus dans le gestionnaire ArcGIS pour créer une carte de la plus part des formations végétales.

IV.1.2 Élaboration de la carte de type de climat de De Martonne

La carte de type de climat selon De Martonne (figure IOI-7) a été déjà élaborée dans le chapitre II.

IV.2 Résultats et discussion

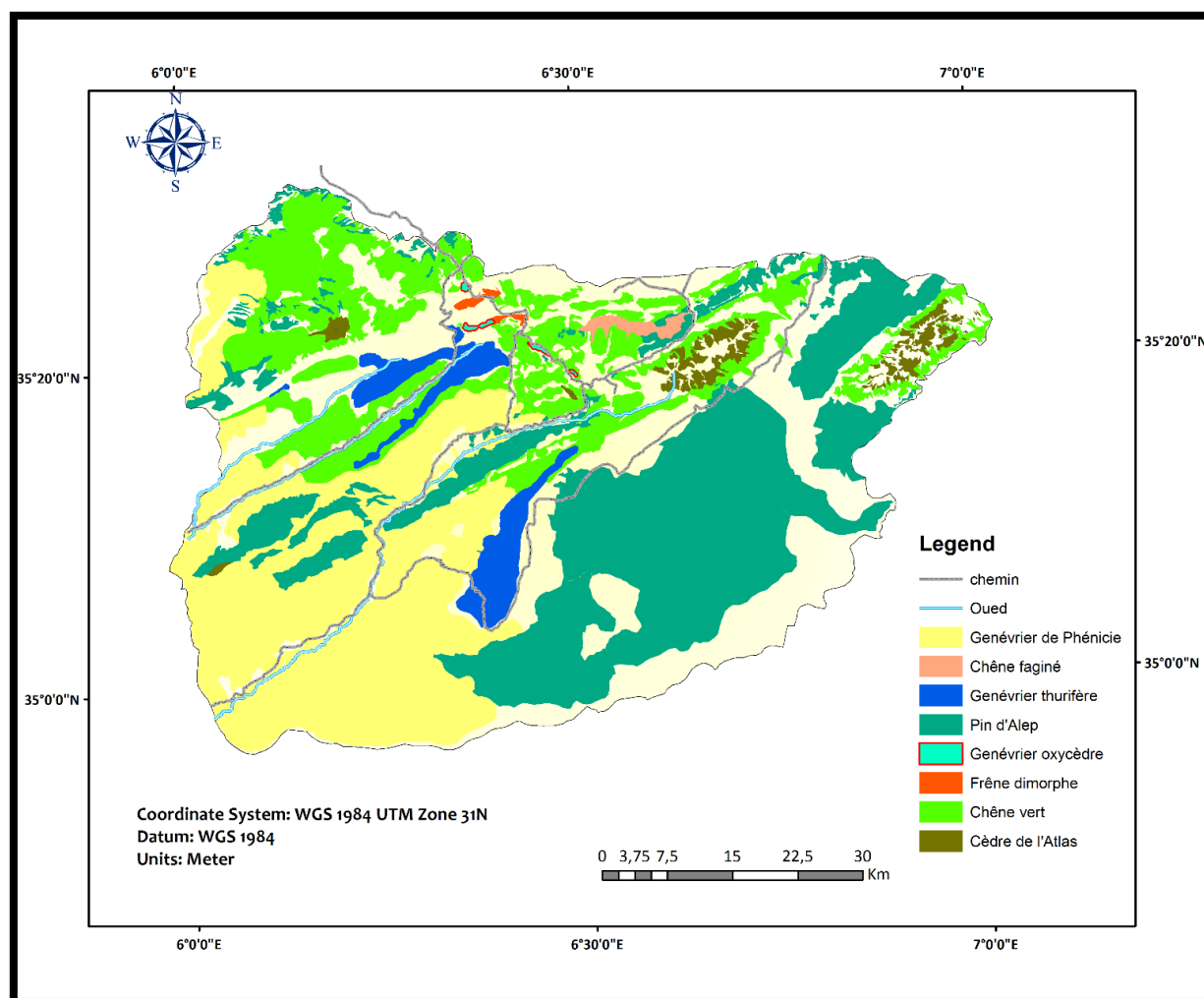
IV.2.1 Carte de végétation

La zone d'étude présente une biodiversité remarquable, tant au niveau des espèces que des écosystèmes. Elle se caractérise par une mosaïque de peuplements forestiers composés d'essences variées, notamment le pin d'Alep, le chêne vert, le chêne faginé, le cèdre de l'Atlas et l'érable de Montpellier. L'analyse des données collectées a permis d'identifier et de classifier les différents habitats et formations présents (Figure IV-1).

Selon les résultats de l'analyse cartographique, nous avons identifié huit groupements forestiers dans la zone d'étude (tableau VI-1).

Tableau VI -1 : Superficies des essences forestières dans les Aurès.

N°	Essence	Superficie (ha)
1	Cèdre de l'Atlas	8 982
2	Chêne vert	69 539
3	Frêne dimorphe	737
4	Genévrier oxycèdre	431
5	Genévrier de Phénicie	99 480
6	Pin d'Alep	114 654
7	Genévrier thurifère	6 936
8	Chêne faginé	1817



FigureVI-1 : Carte des essences forestières dans le massif des Aurès.

IV.2.2 Relation type de climat - formation végétale

La superposition de la carte de végétation et celle de l'indice de De Martonne montre la distribution de chaque formation à l'intérieur de la zone climatique qu'elle convient.

IV.2.2.1 Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.))

En analysant le tableau VI-1 et la figure VI-2, le cèdre occupe une superficie d'environ 9000 ha, située entre le climat subhumide et l'humide.

L'interprétation de la carte de distribution du cèdre de l'Atlas croisée avec la carte des types de climat dans les Aurès révèle une étroite corrélation entre la présence de cet arbre majestueux et des conditions climatiques spécifiques.

Le cèdre occupe les zones où les altitudes moyennes sont de 1619 ± 2100 m, mais il peut atteindre jusqu'à 2322 m. Ce résultat semble quasiment conforme à celui rapporté par Aussenac et Guehl (1990) qui indiquent que le cèdre dans son aire d'origine pousse entre 1400 et 2200 m d'altitude, avec des limites supérieures et inférieures différentes d'une cédraie à l'autre en fonction des conditions climatiques du relief. Selon Abdessemed (1982), les limites les plus basses du cèdre en Algérie se trouvent sur les versants méridionaux, aux environs de 1600 m.

Les deux versants (Nord et Sud) ont une limite supérieure de 2200 m, même si certains individus isolés atteignent jusqu'à 2300 m.

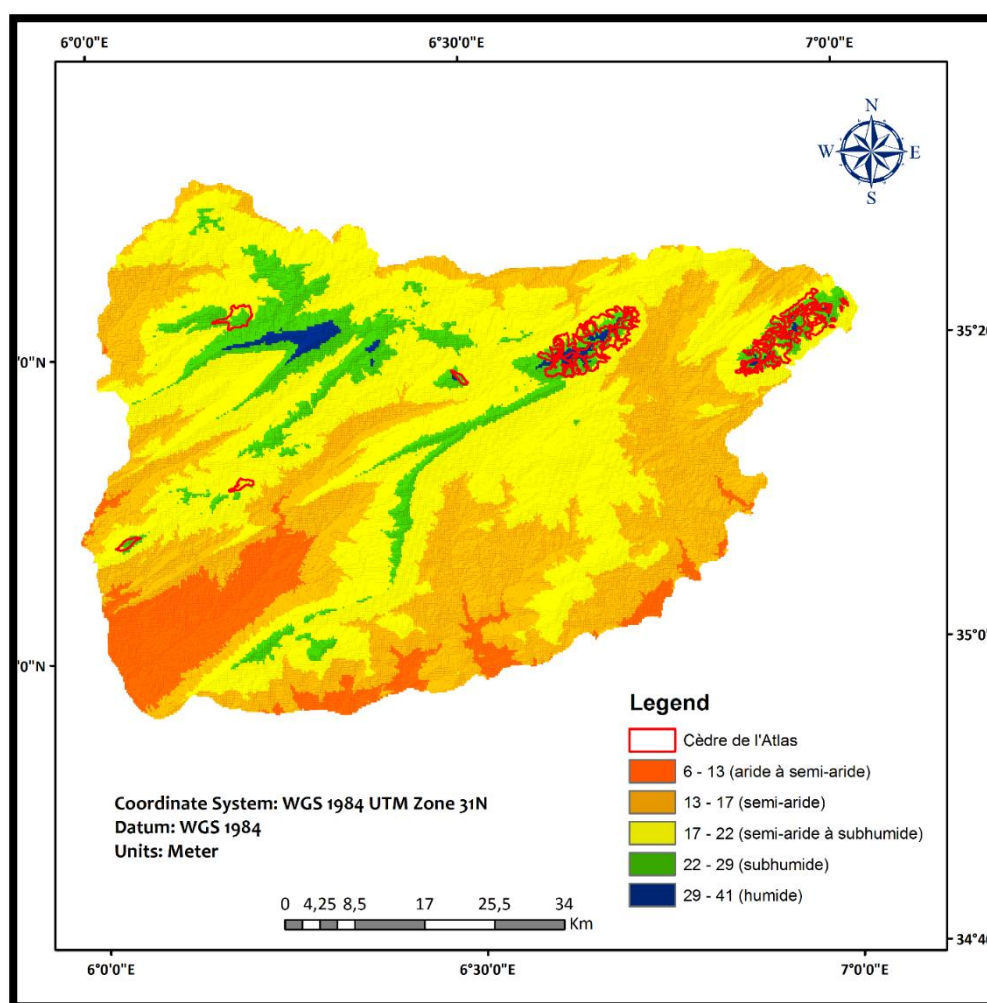


Figure VI -2: Carte de l'aire climatique du cèdre de l'Atlas.

IV.2.2.2 Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.)

L'analyse des données cartographiques de notre étude, présentées dans le tableau VI-1 et la figure VI-3, révèle la dominance du pin d'Alep dans les Aurès. L'espèce y forme de vastes ensembles forestiers, s'adaptant à un large spectre climatique allant des zones subhumides

jusqu'aux milieux arides. Ces observations convergent avec les travaux de Bentouati et *al.* (2005) qui identifient deux massifs majeurs de pin d'Alep dans cette région : les massifs des Béni Imloul (75 000 ha) et des Ouled Yakoub (plus de 20 000 ha). Bien que l'espèce témoigne d'une grande plasticité écologique, c'est en zone semi-aride qu'elle enregistre une croissance optimale.

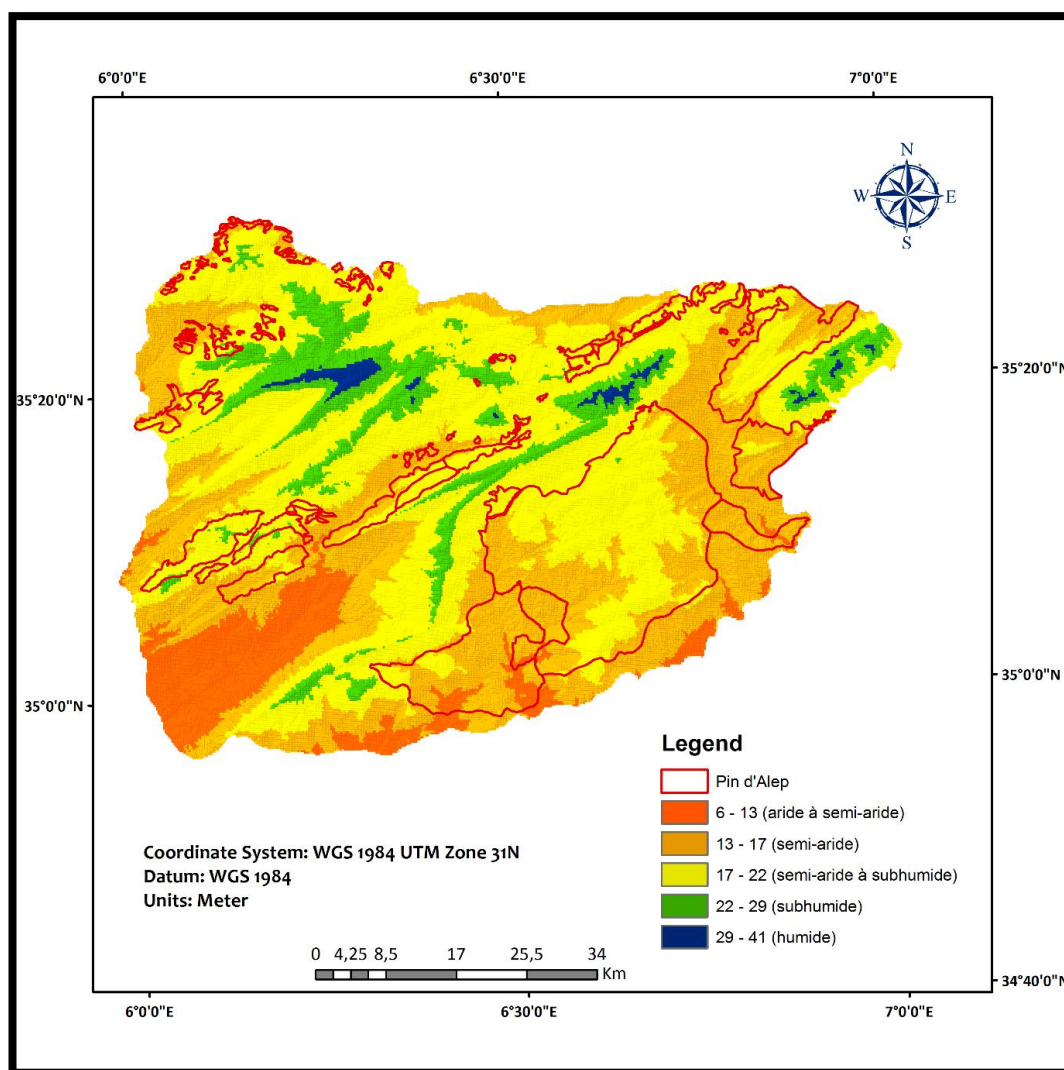


Figure VI-3 : Carte de l'aire climatique du pin d'Alep.

IV.2.2.3 Le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*)

Les résultats révèlent que le genévrier thurifère occupe une aire de répartition d'environ 7000 hectares dans les Aurès, se distribuant entre 1300 ha avec le chêne vert et il côtoie le cèdre jusqu'à 2100 mètres d'altitude.

En utilisant la classification de De Martonne, l'analyse de la figure VI-4 révèle que le genévrier thurifère occupe une gamme de zones climatiques variées, s'étendant des milieux humides aux milieux arides à semi arides.

Espèce d'une grande rareté en Algérie (Boudy, 1952), le genévrier thurifère trouve refuge dans les Aurès où il forme des peuplements clairsemés. Abdessemed (1982) souligne la rigueur des conditions climatiques auxquelles cette espèce est soumise, notamment en raison de l'altitude. Temagoult (1988) précise sa distribution biogéographique au sein des Aurès : si les premiers peuplements apparaissent à partir de 1700 m d'altitude, des individus isolés peuvent subsister jusqu'à 1300 m.

Selon le rapport de l'UICN (2011), cette essence occupe en réalité une aire vaste, quoique discontinue, au sein de l'étage semi-aride froid des Aurès, se manifestant sous forme d'îlots dispersés.

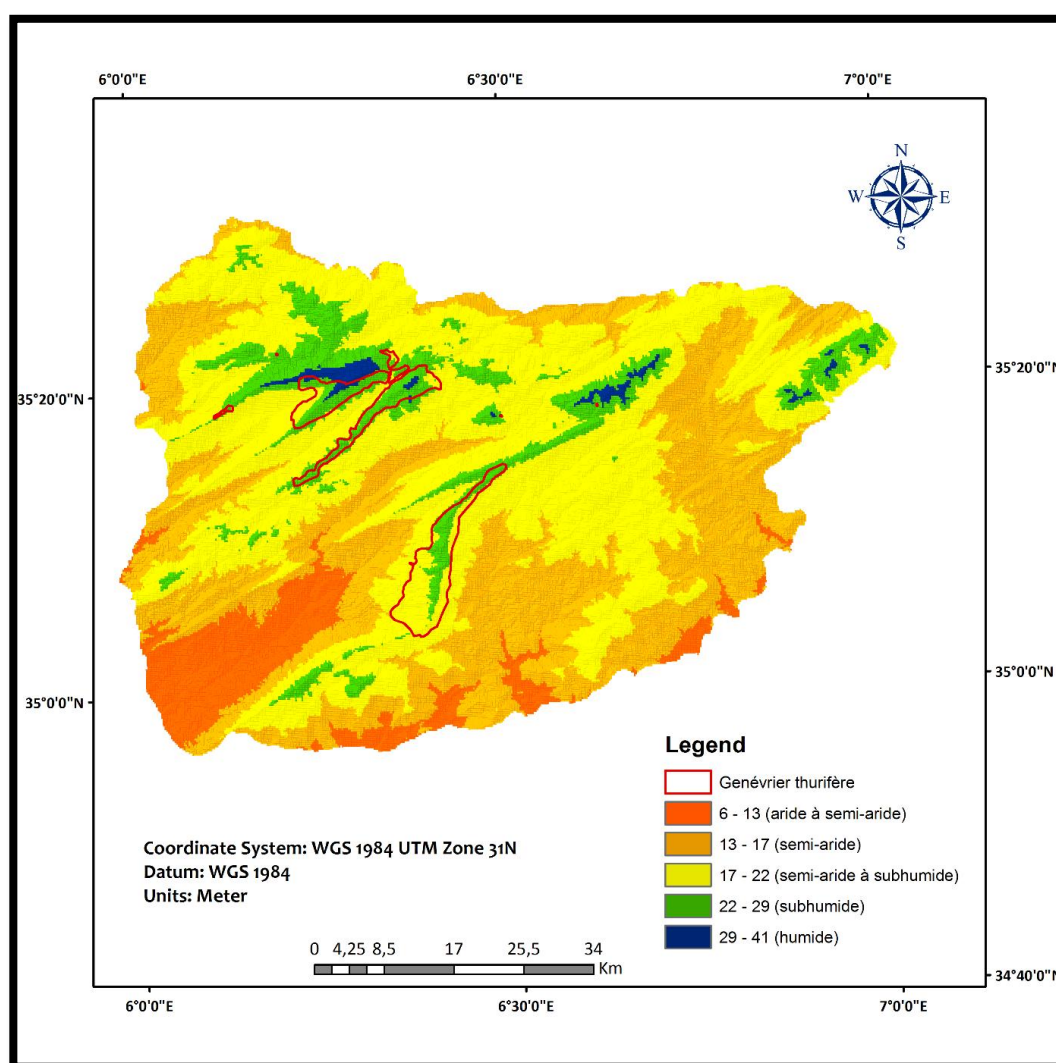
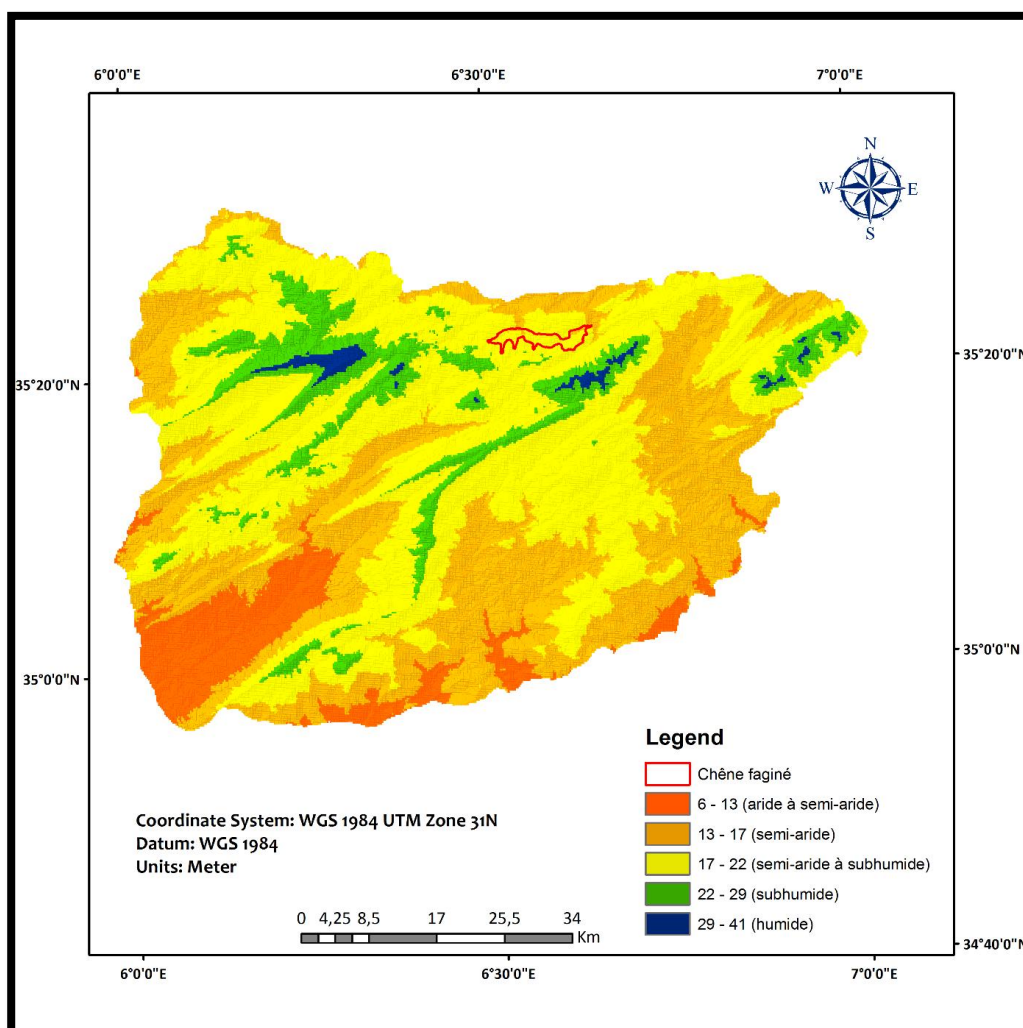


Figure VI -4 : Carte de l'aire climatique du genévrier thurifère.

IV.2.2.4 Le chêne faginé (*Quercus faginea*)

L'analyse de la figure VI -5 révèle une concentration du chêne faginé dans les zones à climat semi-aride à subhumide. Ces observations qui coïncident avec celles des travaux d'Aissi (2019) confirment les exigences écologiques spécifiques de l'espèce face à ce gradient climatique.

Comme le souligne Aissi (2019), *Quercus faginea* trouve dans les Aurès un environnement propice à son développement. L'espèce se rencontre entre 850 et 1700 m d'altitude, colonisant l'étage supra-méditerranéen et montagnard méditerranéen, notamment dans les montagnes de Chélia. Les travaux de Aissi soulignent l'importance des ravins pour cette espèce. En effet, c'est dans ces milieux frais et humides que le chêne faginé se retrouve le plus fréquemment, souvent associé au pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et au chêne vert. Bien que plus rares, des associations avec le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) ont également été observées. En dehors de ces habitats privilégiés, le chêne faginé se disperse en individus isolés, principalement au sein des espaces agricoles privés.



Figure

VI -5 : Carte de l'aire bioclimatique du **Chêne fagine**

IV.2.2.5 Le Frêne dimorphe (*Fraxinus dimorpha*)

Dans notre zone d'étude, l'analyse de la carte de l'aire climatique du frêne dimorphe (figure VI -6) révèle sa présence significative dans les zones à climat semi-aride à subhumide, couvrant une superficie estimée à 737 ha. Ces observations concordent avec les travaux d'Abdessemed (1984), qui situent la distribution du frêne dimorphe entre le semi-aride froid et le subhumide inférieur froid, à des altitudes variant de 1100 à 1600 m.

De même, Beghami (2013) a observé que dans les Aurès, le frêne dimorphe se trouve généralement sur des substrats rocheux, dans les pâturages d'altitude, et souvent associé aux formations d'illiciaie dégradée et au genévrier thurifère. Cette adaptabilité aux milieux difficiles est également soulignée par Emberger (1938), qui décrit le frêne dimorphe comme "l'arbre à feuilles caduques le plus xérophile de notre flore nord-africaine et le feuillu qui monte le plus

haut dans nos montagnes sèches", capable de supporter le climat aride des montagnes en bordure du Sahara.

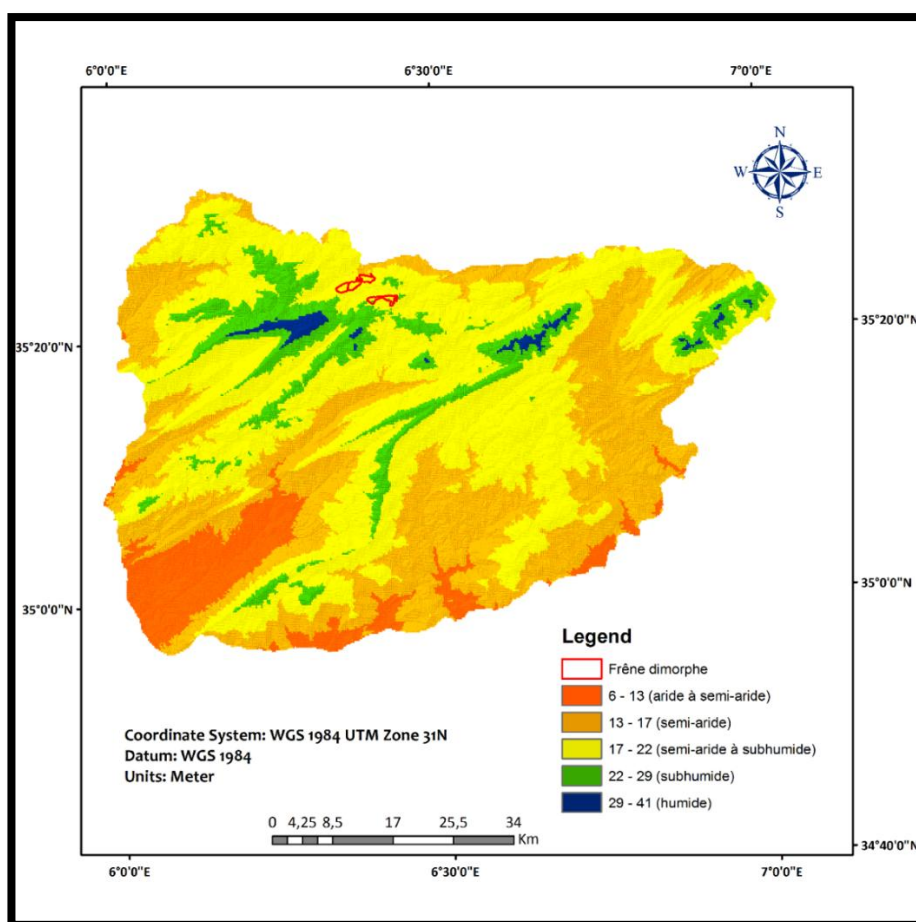


Figure VI-6 : carte de l'aire bioclimatique du Frêne dimorphe .

IV.2.2.6 Le Chêne vert (*Quercus ilex*)

Comme le montre la figure VI -7, le chêne vert occupe une place prépondérante au sein de l'aire d'étude. Avec une superficie de 69 539 ha, il se classe comme la deuxième espèce la plus répandue, s'épanouissant dans les milieux forestiers et pré forestiers.

Sa présence s'étend sur un large gradient climatique, du semi-aride, où il atteint son plein développement (Reille & Pons 1992), jusqu'à l'humide où il côtoie le cèdre.

Son amplitude altitudinale témoigne également de sa grande adaptabilité. Si dans les Aurès, on le retrouve entre 1200 et 1900 m d'altitude, il peut s'élever jusqu'à 2200 m dans l'Atlas Saharien (Letreuch, 1995). Dans les zones les plus sèches, il adopte souvent une forme buissonnante.

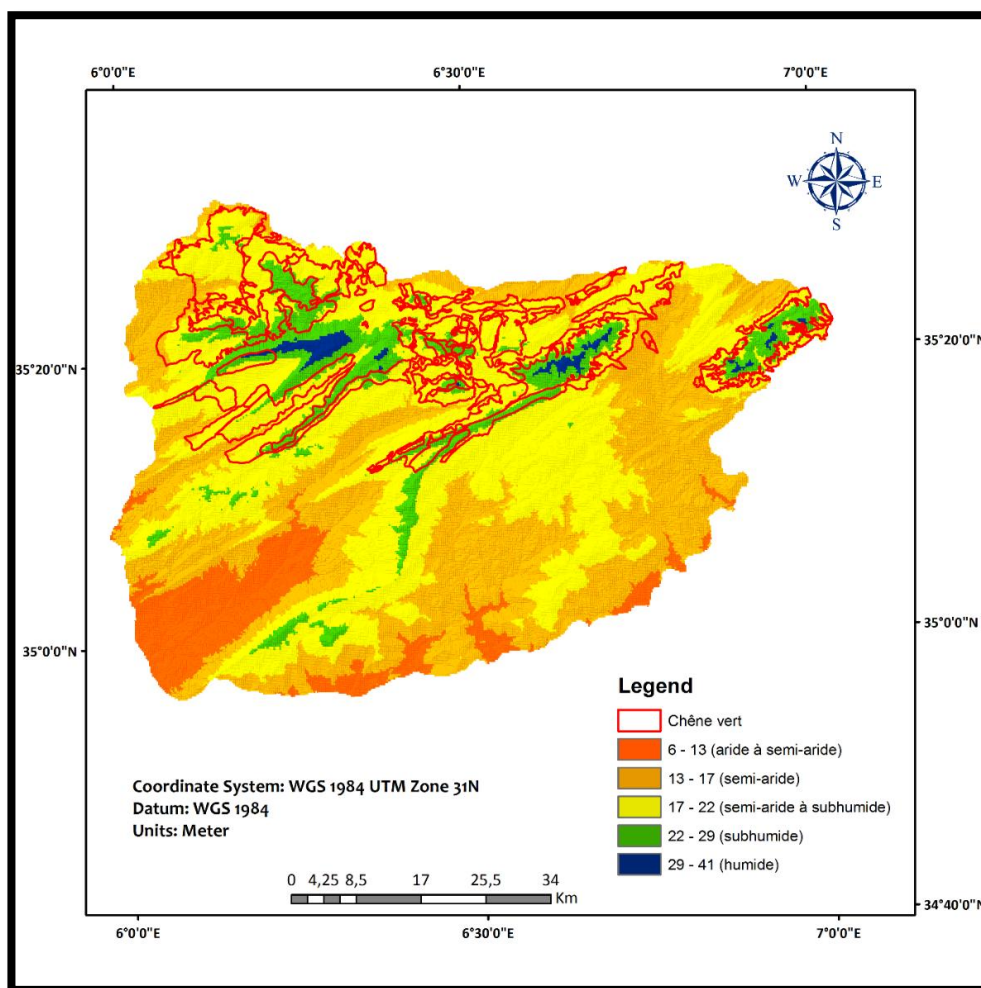


Figure VI -7: Carte de l'aire climatique du **Chêne vert**.

IV.2.2.7 Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*)

D'après le tableau VI -1, l'oxycèdre couvre une superficie de 431 ha, principalement dans les zones caractérisées par un climat semi-aride à subhumide (figure 0VI-8).

Le cade (*Juniperus oxycedrus*), espèce commune des régions semi-arides algériennes, se caractérise par une grande adaptabilité écologique. Comme l'a souligné Boudy dès 1950, on le retrouve fréquemment dans le sous-bois et les zones dégradées. Sa distribution altitudinale est également étendue, allant du niveau de la mer sur les dunes littorales jusqu'à 1200 m d'altitude en montagne (Gaston, 1990). Le cade s'intègre souvent aux formations végétales dominées par le pin d'Alep et le chêne vert, formant des associations caractéristiques de ces milieux (Zeraib, 2016).

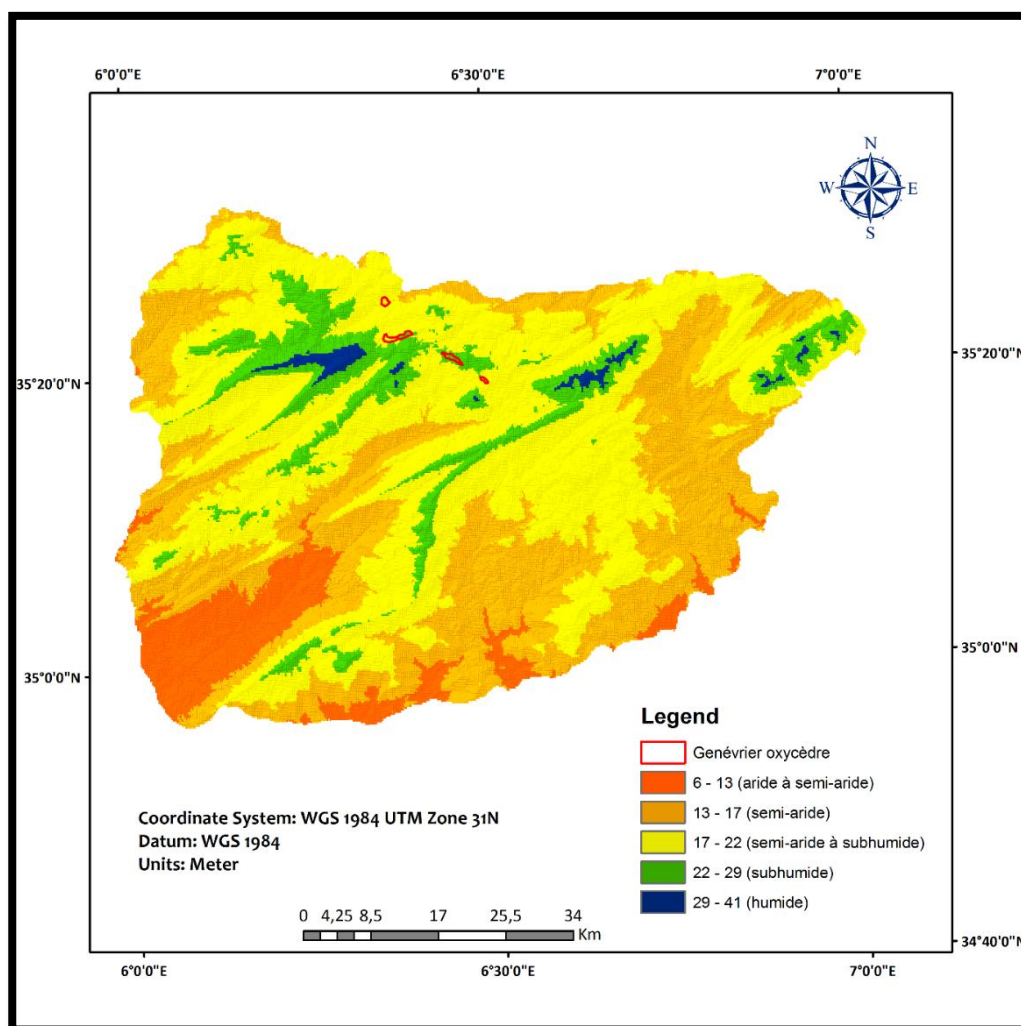


Figure VI-8 : Carte de l'aire climatique du genévrier oxycède.

IV.2.2.8 Genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*)

L'analyse cartographique que nous avons menée révèle que le genévrier de Phénicie occupe une superficie considérable de 99 000 ha. Cette espèce présente une affinité marquée pour les climats arides à semi-arides, qui constituent son aire de répartition principale. Toutefois, on la retrouve également dans certaines zones à climat semi-aride à subhumide, illustrant une certaine plasticité écologique (figure VI-9).

Le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*), espèce emblématique du pourtour méditerranéen, témoigne d'une grande adaptabilité à des conditions environnementales difficiles. En effet, il colonise des altitudes variées, allant de 1 à 2400 m, et s'établit sur des substrats souvent ingrats, tels que les sols caillouteux, peu profonds et les falaises (Quézel et Gast, 1998). Cette espèce xérophile affectionne particulièrement les régions à bioclimat aride

et semi-aride, caractérisées par des précipitations annuelles généralement comprises entre 200 et 400 mm (Quézel et Gast, 1998). De plus, le genévrier de Phénicie est exigeant en lumière, ce qui souligne son caractère héliophile.

Cependant, malgré son adaptation aux climats arides, le genévrier de Phénicie n'est pas à l'abri des conséquences du changement climatique. Les épisodes de sécheresse prolongés et répétitifs, de plus en plus fréquents, menacent sa survie. Plusieurs études ont d'ailleurs mis en évidence des taux de mortalité élevés chez différentes espèces de genévriers suite à des sécheresses persistantes (Körner et *al.*, 2005 ; Gazol et *al.*, 2017), soulignant ainsi la vulnérabilité de cet arbre emblématique face aux changements globaux.

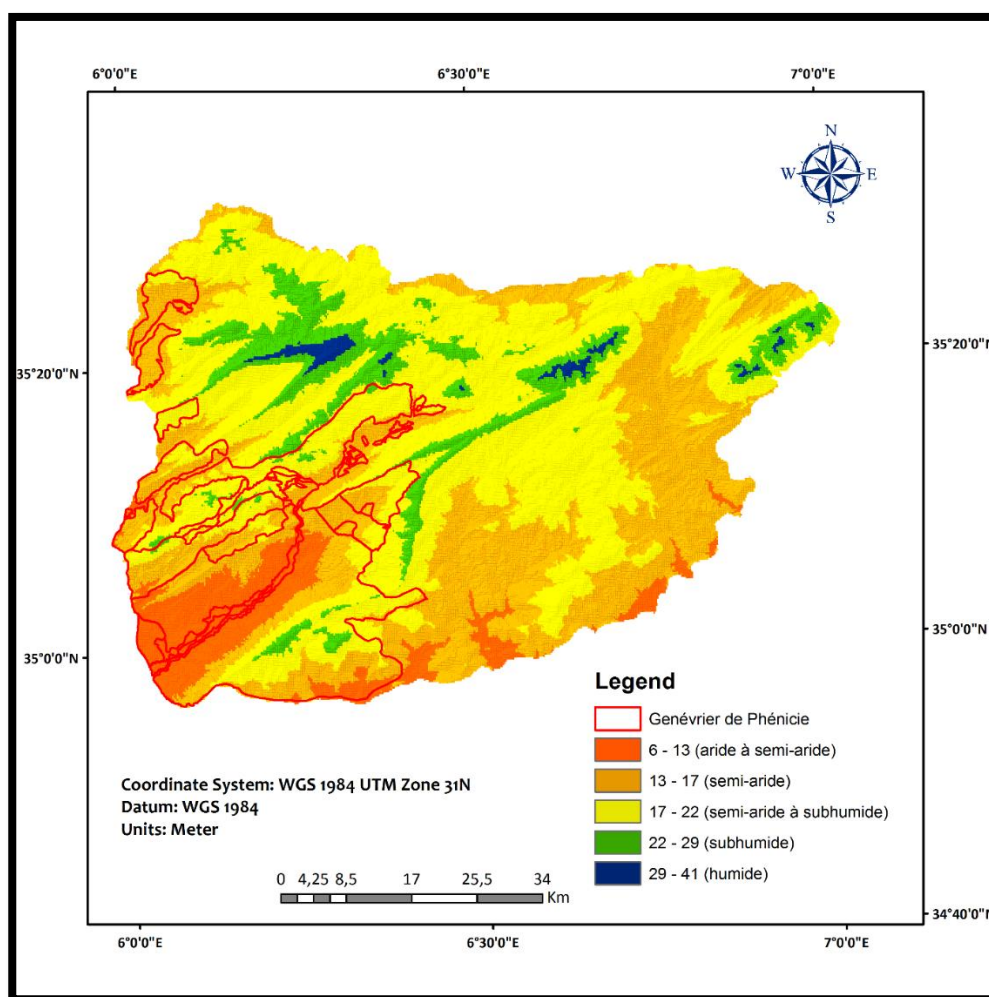


Figure VI-9 : Carte de l'aire climatique genévrier de Phénicie.

Conclusion

Il a été constaté que les groupements à pin d'Alep et à genévrier de Phénicie se concentrent principalement dans les zones caractérisées par un indice de De Martonne faible, traduisant un climat aride à semi-aride.

A l'inverse, les groupements à cèdre de l'Atlas affichent une préférence pour les zones à indice plus élevé, indicatrices de conditions climatiques plus humides.

Les groupements à chêne vert présentent une plus large amplitude écologique que d'autres, ils existent dans tous les types de climat identifiés par l'indice de De Martonne.

Ces résultats confirment la pertinence de l'indice de De Martonne comme indicateur synthétique pour appréhender l'influence du climat sur la répartition des groupements végétaux à grande échelle.

Cependant, il est important de rappeler que l'indice de De Martonne, bien qu'efficace, ne constitue qu'une approximation de la complexité des facteurs qui influencent la répartition des

espèces végétales. D'autres facteurs écologiques tels que la topographie, le sol, la compétition interspécifique ou encore l'action anthropique, jouent également un rôle déterminant.

En conclusion, ces résultats soulignent l'étroite interdépendance entre le climat et la végétation, et met en évidence l'utilité de l'indice de De Martonne pour appréhender cette relation. Ces connaissances sont essentielles pour la gestion durable des écosystèmes et la conservation de la biodiversité face aux défis du changement climatique.



Chapitre. V

**Relation entre tendance climatique et indice de végétation
NDVI dans le Mont de Chéla**

Introduction

Face au changement climatique et à l'importance croissante du développement durable, la protection des ressources naturelles, notamment forestières, est devenue un enjeu crucial. L'Algérie, consciente de cet impératif, a adopté la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 (19 Joumada El Oula 1424) relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Cette loi, prévoyant la création d'aires protégées et de parcs nationaux, vise à préserver l'équilibre bioécologique et à lutter contre les changements climatiques à l'échelle locale et globale (MADR, 2011).

Les modèles mondiaux de distribution et de phénologie de la végétation sont étroitement liés aux régimes spatiaux et temporels du climat (Stephenson, 1990 ; Bonan, 2008).

Parmi les facteurs climatiques qui contribuent à la variation temporelle et spatiale de la végétation, la température et les précipitations sont les plus importants.

La compréhension des relations entre le moment, la durée et la densité de la couverture végétale photo-synthétiquement active, d'une part, et la tendance des températures et des précipitations aux niveaux régional et local, d'autre part, est donc fondamentale pour prédire les réponses des écosystèmes au changement climatique à l'échelle régionale (Nicholson et *al.*, 1990 ; Myneni et *al.*, 1997 ; Stott et *al.*, 1997).

Compte tenu de cela, de nombreuses études ont été menées afin de détecter les tendances climatiques dans différentes régions du monde (Safari, 2012 ; Addisu et *al.*, 2015 ; Hussain et *al.*, 2015 ; Gümüş et *al.*, 2017 ; Getchew, 2017, Panda et *al.*, 2019). La plupart des études indiquent que les précipitations et la température de l'air sont deux des facteurs les plus importants dans les domaines des sciences du climat et de l'hydrologie. Par conséquent, l'examen de leur comportement est important pour comprendre la variabilité du climat, car ces deux facteurs sont très variables dans l'espace et temporairement à différentes échelles locales, régionales et mondiales (Beyene, 2016). Afin de vérifier la présence de tendances, le test de Mann-Kendall (MK) a été appliqué aux séries temporelles disponibles. Il s'agit d'un test non paramétrique, qui ne suppose donc pas de distribution a priori pour les données, il nous permet de quantifier l'importance des tendances dans les séries temporelles ; à cette fin, il est souvent utilisé pour l'analyse des séries temporelles environnementales.

Dans ce chapitre la végétation n'est pas prise en compte dans son aspect purement botanique ou phytogéographique, mais plutôt dans son rôle de couverture du sol, qui a été plus ou moins altérée par l'homme.

Afin de quantifier le changement de la végétation forestière, la télédétection et les SIG sont devenus depuis quelques années des outils performants pour la collecte et la combinaison des données (Puech, 1993 ; Bonn, 1998). Aujourd'hui, ils apparaissent comme des outils indispensables dans les systèmes interactifs d'aide à la décision (Roy & Bouyoussou, 1993 ; Wachal & Hudak, 2000 ; Shrimalil et al., 2001 ; Lee, 2004 ; bou kheir et al., 2006)

Pour mieux estimer l'intensité de ces changements, l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) s'est imposé comme un outil précieux pour évaluer l'ampleur de ces changements affectant la végétation. Cet indicateur spatio-temporel permet de mesurer l'activité physiologique des plantes et de caractériser leur vigueur.

Les observations de la végétation par télédétection révèlent une corrélation étroite entre les indicateurs d'activité végétale et les variations saisonnières et interannuelles du climat.

Cette étude a pour objectif d'évaluer la corrélation entre les indicateurs d'activité végétale, en particulier l'indice de végétation, et la variabilité climatique dans le mont Chélia.

V.1 Matériel et méthodes

V.1.1 Zone d'étude

La série forestière de Chélia, d'après les données de l'ex-Office National des Travaux forestiers (O.N.T.F, 1982), actuellement ERGG, s'étend sur 5600 hectares répartis en 38 parcelles. Principalement composée de cèdres, elle se situe au nord du massif de Beni Imloul.

Ses limites géographiques sont : l'oued El Askar et la route de Bouhmama-Medina au sud, des plateaux de haute pelouse à l'ouest, la zone agricole proche de l'oued Talha au nord, et la série forestière de Cantina à l'est.

Patrimoine naturel partagé entre les wilayas de Batna et de Khenchla, le mont Chélia domine la chaîne montagneuse des Aurès du haut de ses 2 328 mètres d'altitude. Situé entre 35°18' et 35°22' de latitude Nord, et 6°36' et 6°42' de longitude Est, il est le deuxième plus haut sommet d'Algérie après le mont Tahat dans le Hoggar (Abdessemad, 1984).

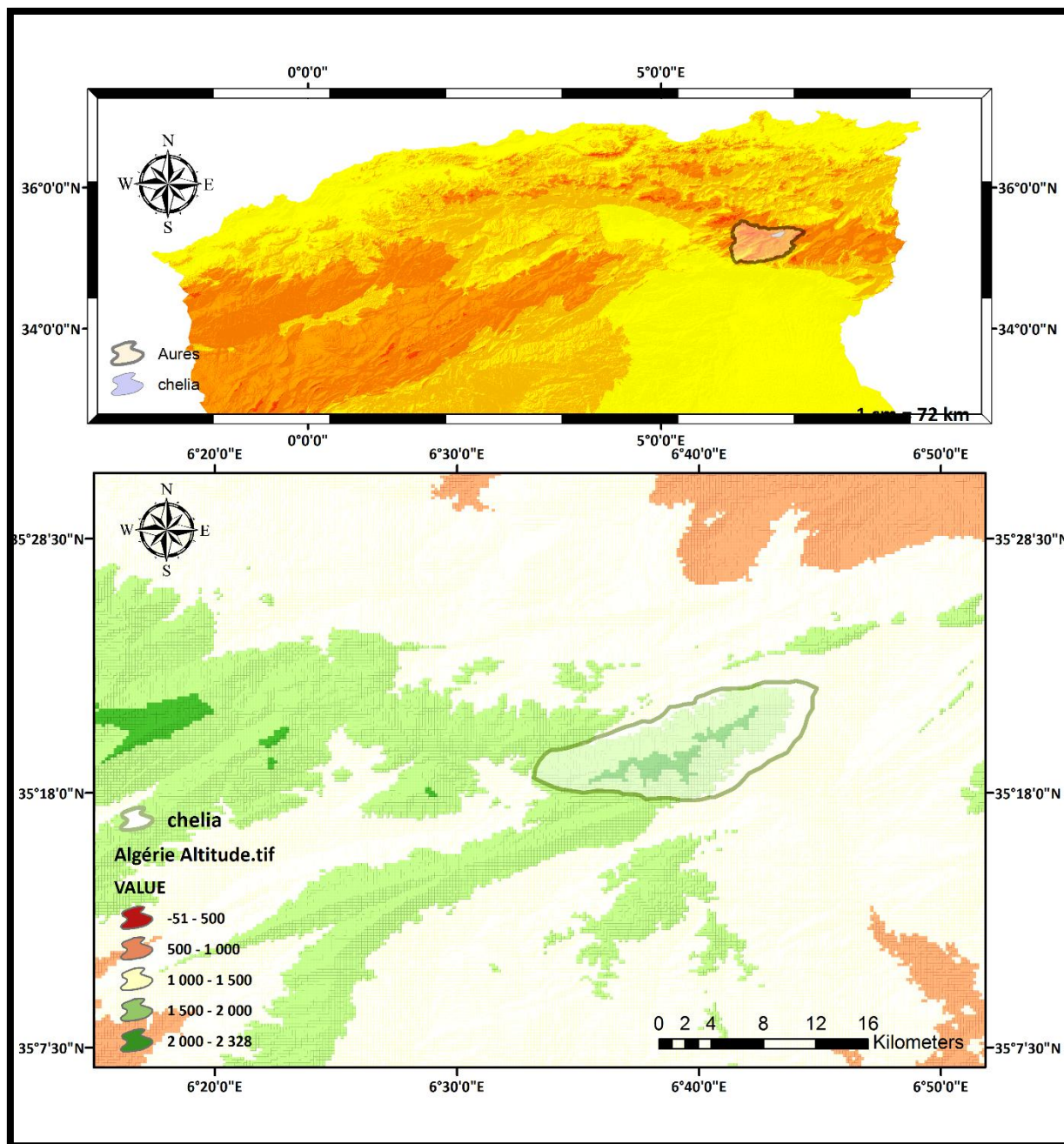


Figure V-1 : Carte de situation géographique du mont de Chélia

V.1.1.1 Occupation de sol pour Chélia

Elaborée à partir de données Landsat, Google Earth et de vérifications sur le terrain, une carte d'occupation du sol de la région du Chélia a été produite dans le cadre d'un séminaire de l'Association Internationale de Climat en 2017. Cette carte met en lumière les principales essences forestières qui composent le passage forestier du Chélia et a servi de référence pour valider les zones réelles de progression et de recul de la forêt.

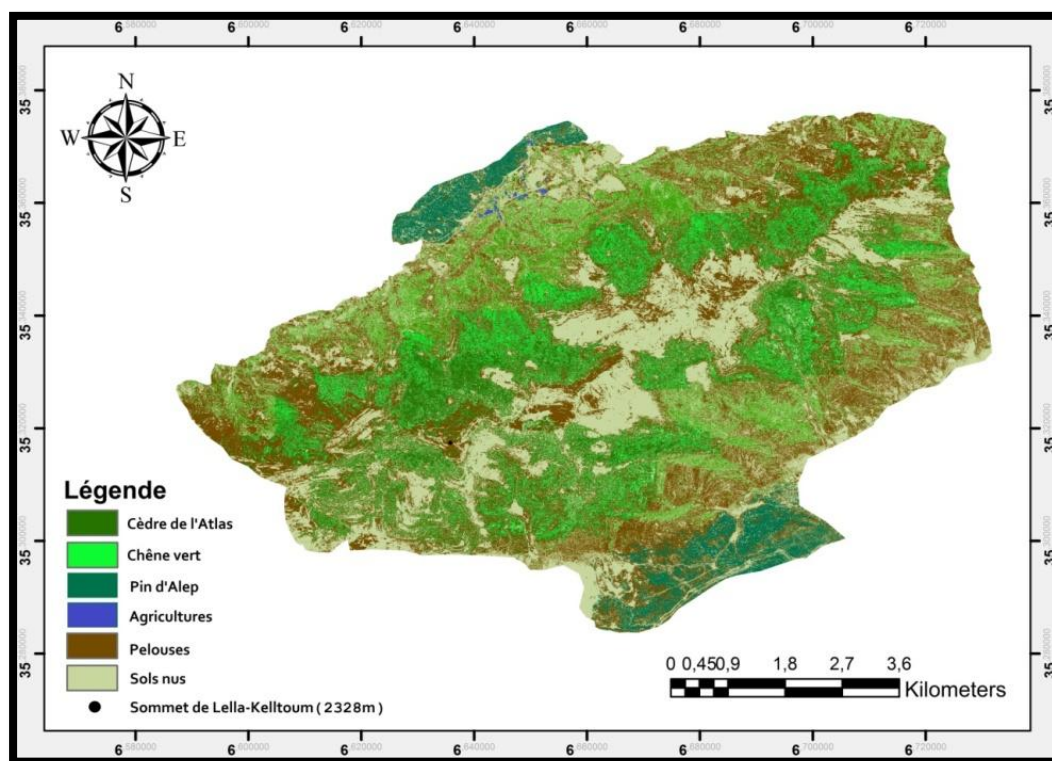


Figure V-2 : Carte d'occupation du sol du mont de Chélia.

En comparant la figure V-1 et la figure V-2, il est évident que le massif du Chélia se démarque par une couverture végétale riche et diversifiée. Cette diversité s'exprime à travers une organisation en quatre étages de végétation distincts :

- Étage alpin (2100 à 2328 m) : Principalement composé de pelouses d'altitude
- Étage de la cédraie pure (1800 à 2100 m) : Dominé par une forêt dense de cèdres
- Étage de la cédraie à chêne vert (1600 à 1800 m) : Une zone de transition où cèdres et chênes verts se partagent l'espace.
- Étage du chêne vert et de la pinède (1200 à 1600 m) : Composé de deux sous-étages :
 - Chênaie verte (1500 à 1600 m)
 - Pinède à chêne vert (1200 à 1500 m), dont la présence est particulièrement remarquable.

Cette comparaison met en évidence la variété des écosystèmes présents sur le massif du Chélia, chaque étage offrant un habitat unique à une flore spécifique.

V.1.2 Collecte des données

V.1.2.1 Données de télédétection

L'analyse de la dynamique du couvert végétal, notamment forestier, repose généralement sur l'analyse spatio-temporelle et le traitement d'images satellitaires, outils majeurs offerts par la Télédétection spatiale.

Ce travail s'appuie sur cette approche méthodologique en exploitant des images satellitaires Landsat (tableau 0-1), téléchargées gratuitement sur le site web de l'*United State Geological Survey* (USGS), accessible au public : <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

L'étude de l'évolution de la végétation dans le temps exige une attention particulière à la date d'acquisition des données. Les caractéristiques du terrain pouvant fluctuer significativement, non seulement d'une année à l'autre, mais également au fil des saisons d'une même année.

Ainsi, la difficulté dans ce type d'étude réside dans la distinction et l'identification de la végétation naturelle, en particulier forestière.

Pour maximiser la précision spatiale et radiométrique de l'étude, la période d'observation choisie s'étend de juin à septembre, correspondant à la saison sèche. Ce choix se justifie par l'absence de nuages durant cette période, améliorant la qualité des images satellitaires, ainsi que par le cycle végétatif des cultures, notamment céréalières, qui se trouvent alors à un stade de sécheresse avancée.

L'analyse spatiale et quantitative des images satellitaires révèle des changements significatifs dans la couverture végétale de la zone d'étude au fil du temps. Ces changements peuvent se traduire par une progression, une régression ou une stabilité du couvert végétal.

Tableau V-1 : Caractéristiques des images satellites utilisées.

Nom du satellite	Date acquisition	Résolution (m)
ETM (Landsat 5)	08/08/1993	30
ETM (Landsat 5)	27/07/2003	30
OLI (Landsat 8)	08/06/2013	30
OLI (Landsat 8)	09/06/2020	30

De nombreuses techniques, basées sur le calcul d'indices spécifiques, permettent d'étudier et de classifier la dynamique du couvert végétal. Parmi les plus utilisés, on peut citer l'indice de végétation par différence normalisée (*NDVI*), l'indice de végétation résistante à l'atmosphère (*ARVI*), ou encore l'indice de surveillance de l'environnement mondial (*GEMI*).

Dans notre étude, nous avons effectué l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) afin de distinguer précisément les zones d'extension du couvert végétal et forestier pour les différentes dates sélectionnées.

Dans la méthodologie présentée ci-après, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS version 10.3 développé par ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

V.1.2.1.1 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Le NDVI, une mesure satellitaire facile à calculer et largement utilisée, permet de normaliser en partie les effets d'éclairement ou de pentes afin de les normaliser. On l'emploie pour évaluer la santé des plantes, détecter les modifications phénologiques, évaluer la biomasse verte et les rendements, et dans de nombreuses autres utilisations.

Selon Nath et Acharjee (2013), le NDVI est principalement employé afin de distinguer les zones végétatives des zones non végétatives et s'est révélé être un signal de végétation puissant.

L'indice NDVI présente des valeurs allant de -1 à +1, avec des valeurs de -1 à 0 qui indiquent des caractéristiques non végétatives comme une surface nue, une étendue d'eau et une zone habitée. Cependant, la présence de végétation est indiquée par une valeur NDVI supérieure à 0 (Tucker, 1979 ; Eidenshink, 1990 ; Kustas et *al.*, 1993 ; Jiang et *al.*, 2006).

Le NDVI est calculé en utilisant le canal visible rouge (**R**) et le canal proche infrarouge (**PIR**) pour mettre en évidence la disparité entre ces deux bandes (Vermote et *al.*, 2016).

L'indice NDVI se calcule selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Où :

PIR : Réflectance dans la bande « proche infrarouge »

R : réflectance dans la bande « rouge »

Le tableau 0V-2 ci-dessous présente la classification des valeurs NDVI selon le degré de la verdure de la végétation.

Tableau V-2 : Les valeurs NDVI et niveau de verdure de la végétation (Zhang et *al.*, 2020).

Plages de classification	Le niveau de verdure de la végétation
$-1 < \text{NDVI} < -0,03$	Zone de non-végétation, zone ouverte, masse d'eau
$-0,03 < \text{NDVI} < 0,15$	Végétation dense très basse
$0,15 < \text{NDVI} < 0,25$	Végétation basse et dense
$0,25 < \text{NDVI} < 0,35$	Végétation modérément dense
$0,35 < \text{NDVI} < 1$	Végétation très dense

V.1.2.2 Données climatiques

En Algérie en général et les Aurès en particulier, la disponibilité des données climatologiques représente un défi majeur et constant pour les études, en raison du manque de réseau d'observation.

L'insuffisance de stations météorologiques et leur emplacement peu représentatif ne permettent pas de bien caractériser le climat de la zone d'étude. On fait souvent appel à des données issues de la base de données **TerraClimate**.

TerraClimate est une collection de données spatiales à haute résolution ($1/24^\circ$, ~ 4 -km) qui fournit des informations sur le climat mensuel et le bilan hydrique climatique pour les surfaces terrestres mondiales de 1958 à nos jours, avec des mises à jour annuelles (Abatzoglou et *al.*, 2018).

TerraClimate fait appel à une méthode d'interpolation assistée par le climat qui combine des données climatologiques à haute résolution spatiale provenant de trois ensembles de données climatiques globales en grille, chacun présentant des caractéristiques spatiales ou temporelles différentes (tableau0-3).

Tableau V-3 : Ensemble de données utilisées pour produire la base de données TerraClimate (Abatzoglou et *al.*, 2018).

Dataset	Spatial Resolution Used	Temporal Resolution Used	Variables
WorldClim v2 ¹⁵	1/24°	Monthly, 1970–2000 normals	Tas, vap, pr, srad, ws
WorldClim v1.4 ¹¹	1/24°	Monthly, 1960–1990 normals	Tmax, Tmin, Tas
CRU Ts4.0 ⁴	0.5°	Monthly, 1958–2015	Tmax, Tmin, vap, pr, Tas
JRA-55 ²	1.25°	Monthly, 1958–2015	Tas, vap, pr, srad, ws
Root zone storage capacity ³²	0.5°	Time invariant	Water storage capacity

Les variables mentionnées se désignent par les abréviations suivantes :

- Température maximale mensuelle (**Tmax**)
- Température minimale mensuelle (**Tmin**)
- Température moyenne (**Tas**)
- Pression de vapeur (**Vap**)
- Vitesse du vent (**Ws**)
- Flux d'ondes courtes descendant à la surface (**Srad**)
- Précipitations mensuelles cumulées (**Pr**)

Le TerraClimate est utilisé dans le monde entier pour des usages différents, on peut citer l'étude d'Abdi (2019) qui a examiné les liens entre l'intensité de la défoliation forestière et la gravité des incendies de forêt, ou encore les travaux de Ficklin et *al.* (2018) qui ont analysé les tendances des précipitations et de l'évapotranspiration (ETo) afin de comprendre les causes des variations du débit des cours d'eau, qu'elles soient naturelles ou anthropiques.

Selon Fick et Hijmans (2017), les données WorldClim ne fournissent que des moyennes mensuelles des normales climatiques sur la période d'enregistrement.

10 points (de CH1 à CH10) ont été téléchargés, répartis sur tout le massif (tableau 0-4) et couvrant la période 1958-2020, sous format csv. Chaque fichier contient des données de la température maximale mensuelle (Tmax), la température minimale mensuelle (Tmin) et les précipitations mensuelles cumulées (Pr).

TableauV-4 : Coordonnées géographiques des points de références échantillonnés.

Station Chélia	Longitude	Latitude	Altitude (m)
CH1	6°38'11.33"E	35°19'4.58"N	2300
CH2	6°38'42.69"E	35°19'29.43"N	2100
CH3	6°40'0.26"E	35°19'6.41"N	1800
CH4	6°39'18.97"E	35°18'37.60"N	2000
CH5	6°38'14.05"E	35°19'58.63"N	1800
CH6	6°38'0.36"E	35°18'54.28"N	2200
CH7	6°37'36.79"E	35°18'49.62"N	2000
CH8	6°41'30.13"E	35°20'2.80"N	1700
CH9	6°40'43.43"E	35°19'21.63"N	1600
CH10	6°40'33.13"E	35°18'20.88"N	1500

V.1.2.2.1 Test de Mann Kendall

Le test de Mann-Kendall (MK), communément appelé statistique du taux de Kendall, est un test non paramétrique utilisé pour l'analyse des tendances. Mann (1945) a utilisé ce test pour la première fois et Kendall (1975) a dérivé la distribution de la statistique du test. Le test a été suggéré par l'organisation météorologique mondiale (OMM) pour évaluer les tendances dans les séries chronologiques de données environnementales (Rustum et *al.*, 2017), car il convient aux cas où la tendance peut être supposée monotone et où, par conséquent, les données ne présentent aucun aspect saisonnier.

Selon Pohlert (2018), l'un des principaux avantages du test de Mann-Kendall est le suivant :

- Il ne s'agit pas d'une méthode présupposée en termes de distribution des données, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'hypothèses nécessaires sur la distribution des données, ce qui est la condition préalable de cette méthode connue sous le nom de méthode non paramétrique.

Par conséquent, il n'y a pas d'incertitude associée à la distribution des données.

- Elle est directement applicable aux données climatiques d'un mois ou d'une saison donnée.

Dans cette étude, Mann Kendall a été calculé, à l'aide de logiciel **R**, et utilisé pour l'analyse de la tendance des données des températures et précipitations pour la période allant de 1958 à 2020.

Le test de tendance MK commence par le calcul de la statistique :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

Où :

n est le nombre de points de données, x_i et x_j sont les valeurs des données dans les séries temporelles i et j ($j > i$), respectivement, et $\text{sgn}(x_j - x_i)$ est le signe de la fonction.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{if } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{if } x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

La variance est calculée comme suit :

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

Où :

n est le nombre de points de données,

P est le nombre de groupes liés,

le signe de sommation (Σ) indique la sommation sur tous les groupes liés,

t_i est le nombre de valeurs de données dans le groupe Path.

S'il n'y a pas de groupes liés, ce processus de sommation peut être ignoré (Kisi et Ay , 2014).

Un groupe lié est un ensemble de données d'échantillonnage qui ont la même valeur.

Dans les cas où la taille de l'échantillon (n) est supérieur à 30, la statistique de test normale standard ZS est calculée comme suit:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

Les valeurs positives de ZS indiquent des tendances à la hausse, tandis que les valeurs négatives de ZS indiquent des tendances à la baisse.

Le test des tendances est effectué au niveau de signification α spécifique. Lorsque $|ZS| > |Z_{1-\alpha/2}|$, l'hypothèse nulle est rejetée, ce qui indique l'existence d'une tendance significative dans la série temporelle.

$Z_{1-\alpha/2}$ est obtenu à partir de la table de distribution normale standard. Dans cette étude, on a utilisé $\alpha = 0,05$.

Au niveau de signification de 5 %, l'hypothèse nulle d'absence de tendance est rejetée si $|ZS| > 1,96$.

V.2 Résultats et discussion

V.2.1 Analyse cartographique

Les variations interannuelles de l'NDVI sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau V-5 : Valeurs minimales, maximales et moyennes de l'NDVI.

Année	Min	Max	Moyenne
1993	0,065	0,393	0,227
2003	-0,065	0,372	0,162
2013	0,048	0,406	0,227
2020	0,049	0,421	0,235

L'analyse du tableau V-5 et des figures V-2 et V-3, présentant les données de l'NDVI du massif, met en évidence les points suivants :

L'analyse NDVI révèle un couvert végétal modérément dense et en bonne santé, avec des valeurs maximales atteignant 0.393 à 0.421. Ces valeurs témoignent de la présence de cédraines claires en bon état sanitaire, principalement situées au sud du massif à plus de 1900 m d'altitude.

Il est important de noter que les valeurs de NDVI comprises entre 0.4 et 0.6 sont généralement associées à une végétation modérément dense et photosynthétiquement active (Tableau V-2).

Les valeurs minimales de NDVI, comprises entre 0,049 et 0,065, ont été enregistrées en 1993 et 2020. Ces valeurs, typiques d'une couverture végétale très limitée (NDVI entre 0 et 0.1), caractérisent les zones où le sol est majoritairement nu, rocailleux, ou recouvert d'une végétation herbacée clairsemée. Ces zones se retrouvent principalement à haute altitude, ainsi que sur les versants sud de basse altitude.

La stabilité relative des valeurs minimales et maximales de NDVI entre 1993 et 2020 indique une certaine constance dans la couverture végétale du mont Chélia durant cette période. Cette

faible variation suggère que les zones de végétation dense et clairsemée, ainsi que les zones de sol nu, ont globalement peu évolué au cours de ces années.

La recherche menée par Laala et *al.* (2019), révèle une stabilité remarquable de l'activité photosynthétique dans les forêts de l'Est algérien. En effet, 94,97% de la superficie forestière étudiée présente un écart type d'NDVI inférieur à 0,06, ce qui témoigne d'une grande homogénéité des données. Selon le même auteur cette faible irrégularité de l'indice NDVI indique que les valeurs sont regroupées autour de la moyenne, confirmant une activité photosynthétique stable et une densité de végétation constante. Les formations forestières de l'Algérie orientale se caractérisent donc par une certaine stabilité de leurs fonctions végétatives.

Pour approfondir ces résultats, nous avons comparé les valeurs moyennes du NDVI entre les années. Entre 1993 et 2003, le NDVI moyen chute de 0,227 à 0,162, indiquant une dégradation de la santé de la végétation. Cette période coïncide avec une sécheresse sévère (1999-2002), la plus importante depuis 1845 (Kherchouche et al., 2013), susceptible d'avoir fortement impacté la végétation, notamment les cédraies (Belloula et *al.*, 2017).

Toutefois, une tendance inverse est observée entre 2013 (NDVI moyen de 0,227) et 2020 (NDVI moyen de 0,235) avec une amélioration de la santé végétale. Cette augmentation pourrait s'expliquer par le remplacement progressif de la végétation dégradée, notamment les cédraies affaiblies, par des espèces plus résistantes aux conditions arides, comme le chêne vert.

Ces observations rejoignent d'autres études démontrant l'impact des changements climatiques et de l'utilisation des terres sur la dynamique du NDVI dans la région des Aurès (Garah, 2020).

Chafai (2016) souligne le développement notable du chêne vert et du frêne dimorphe, formant des maquis, notamment dans les zones de déclin forestier. L'adaptation du chêne vert au stress hydrique et thermique pourrait expliquer son expansion dans ce contexte.

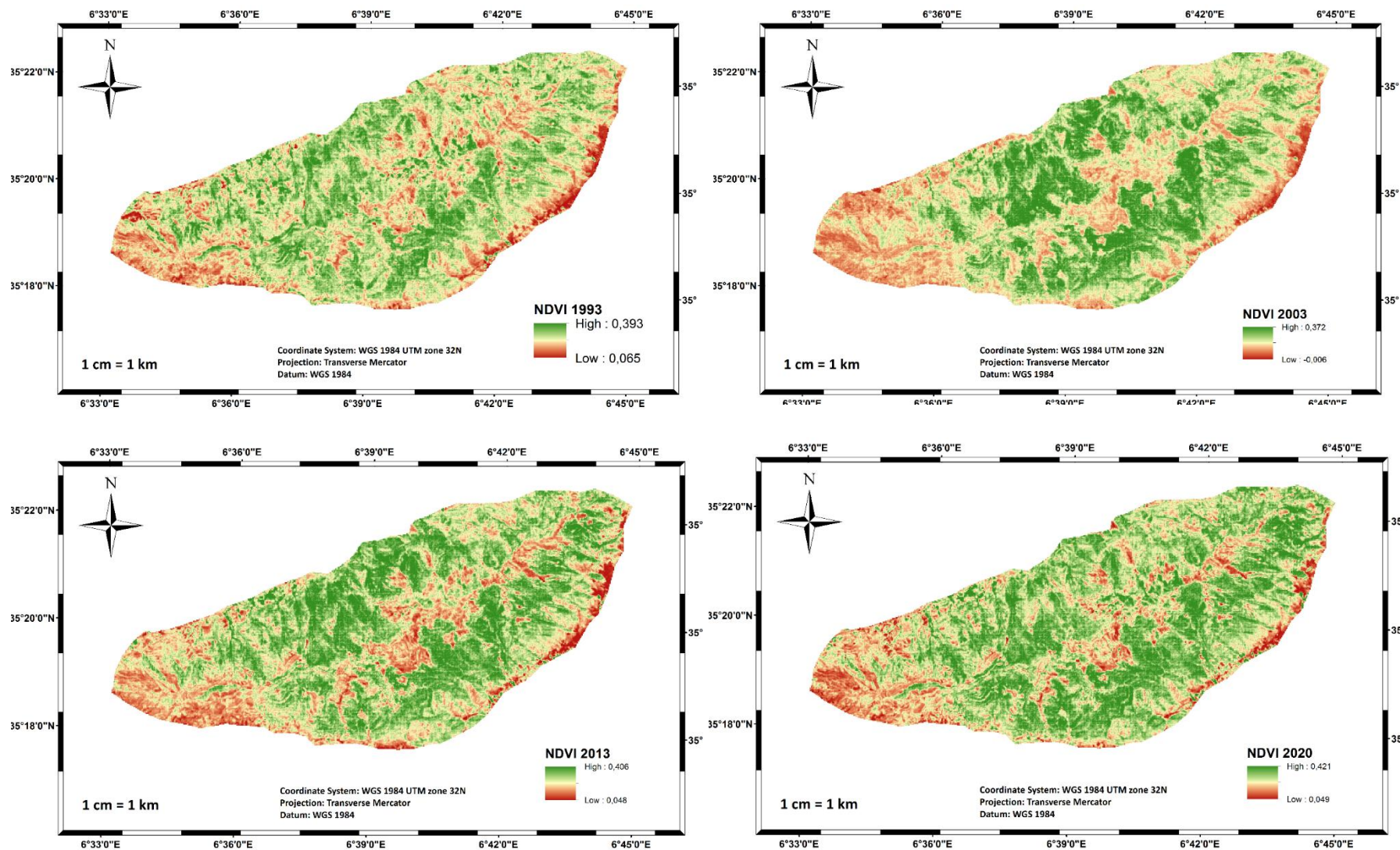


Figure V-3 : Variation spatio-temporelle de l'NDVI pour les années 1993, 2003, 2013 et 2020.

V.2.2 Test de Mann-Kendall

V.2.2.1 Précipitations

Les résultats de l'analyse des tendances des précipitations annuelles du mont de Chélia sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V-6: Résultats du test de Mann-Kendall pour les données de précipitations dans le mont de Chélia.

Station	Taux	P Value
CH1	-0,03	0,78
CH2	-0,03	0,75
CH3	-0,04	0,69
CH4	-0,01	0,89
CH5	-0,04	0,68
CH6	-0,03	0,70
CH7	-0,03	0,78
CH8	-0,03	0,75
CH9	-0,03	0,72
CH10	-0,03	0,78

Lorsque la valeur p est inférieure au seuil de signification α (alpha) = 0,05, H0 est rejetée. Le rejet de H0 signifie que la série temporelle présente une tendance, tandis que l'acceptation de H0 signifie qu'aucune tendance n'a été observée. Si l'hypothèse nulle est rejetée, le résultat est jugé statistiquement significatif.

Pour ce cas, l'hypothèse nulle a été acceptée pour tous les points. Les valeurs de p sont comprises entre 0,82 et 0,68 > 0,05 donc il n'y a aucune tendance observée.

Les résultats de test de Mann-Kendall attestent que pratiquement toutes les stations pluviométriques étudiées à l'échelle annuelle présentent une absence de tendance significative.

Ce résultat a été noté par Hallouz (2019) pour la même période d'étude.

La figure V-4 présente les cumuls annuels de précipitations observées aux dix points choisis, sur la période 1958-2020. Chaque graphique intègre une droite de tendance linéaire (Figure V-4), révélant une absence de tendance significative pour les précipitations

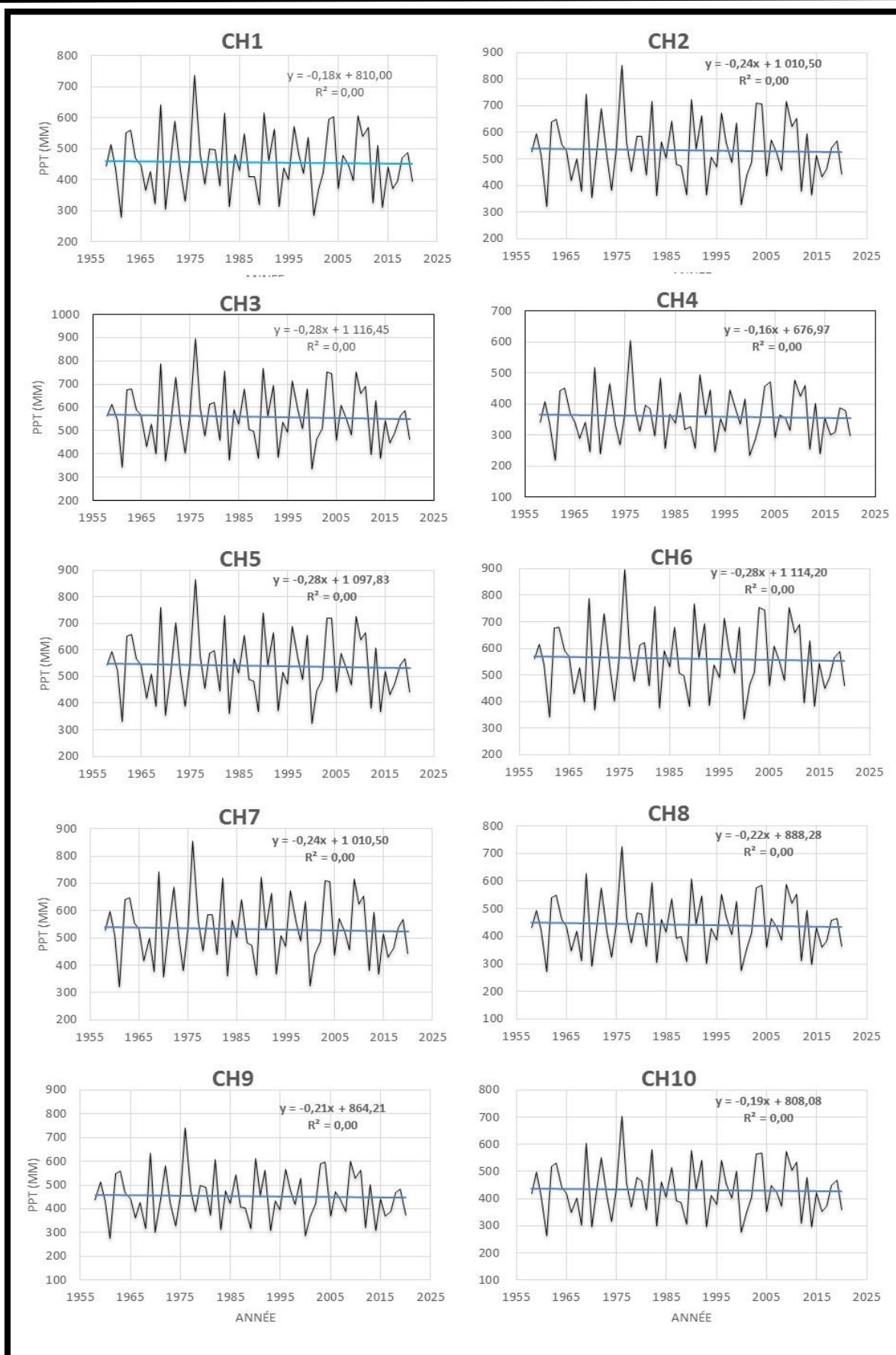


Figure V-4 : Lignes de tendance linéaire correspondant aux données de précipitations pour les dix stations.

V.2.2.2 Les températures

En effectuant le test de Mann-Kendall sur les données de température, les résultats suivants (Tableau V-7) ont été obtenus pour les points échantillonnés.

Tableau V-7 : Résultats du test de Mann-Kendall pour les données des températures dans le mont de Chélia.

Station	Taux	P Value
CH1	0,37	0,0000228
CH2	0,38	0,0000149
CH3	0,37	0,0000180
CH4	0,38	0,0000130
CH5	0,36	0,0000296
CH6	0,37	0,0000175
CH7	0,37	0,0000228
CH8	0,38	0,0000149
CH9	0,38	0,0000141
CH10	0,37	0,0000194

Le tableau V-7 indique que l'hypothèse nulle n'a pas été acceptée pour tous les points car ($p < 0,05$), les résultats sont considérés comme statistiquement significatifs.

En traçant la tendance linéaire pour chaque graphique, on obtient les résultats suivants (Figure V-5).

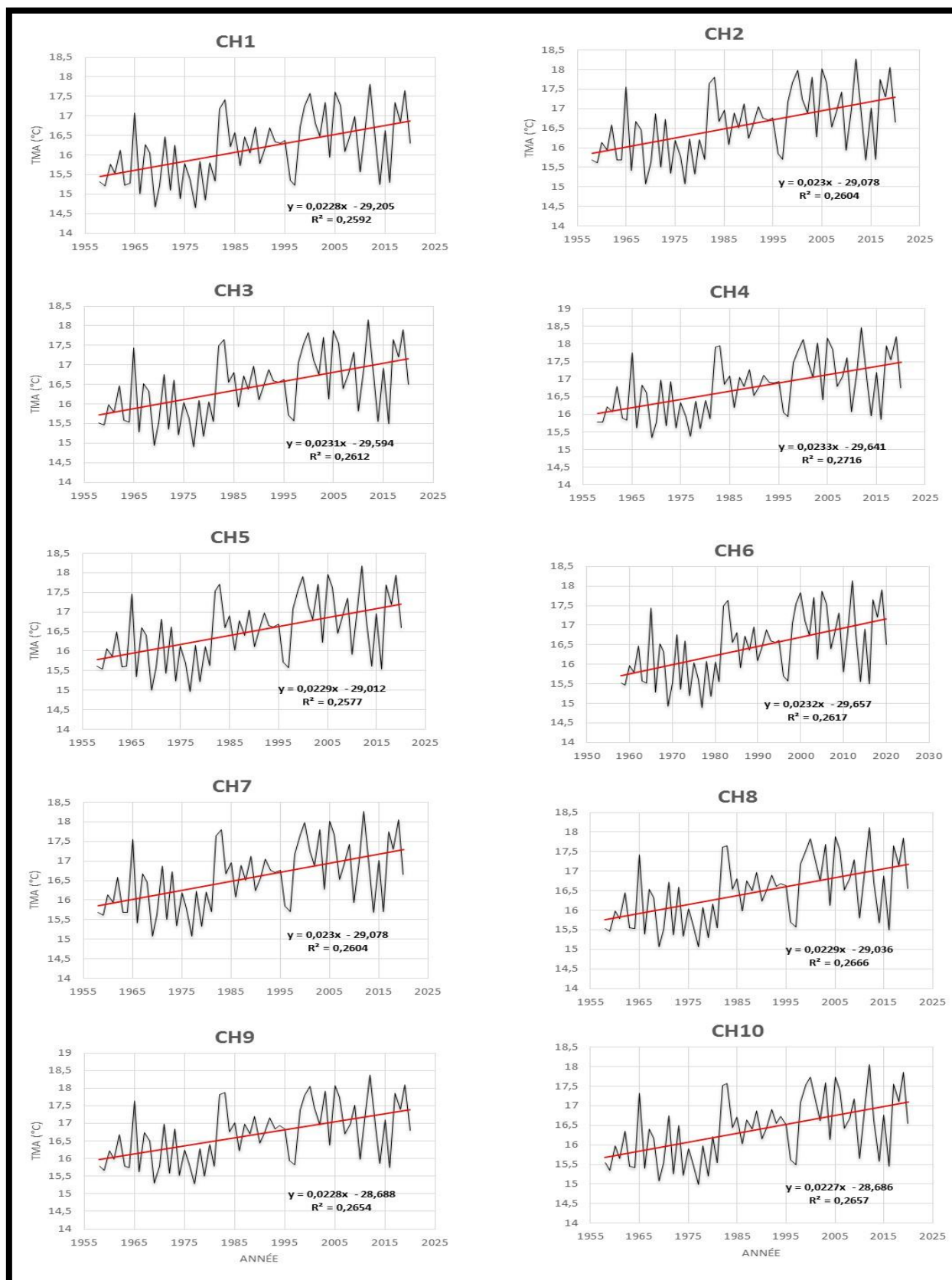


Figure V-5 : Ligne de tendance linéaire correspondant aux données de température pour les dix stations.

L'ajustement des lignes de tendance linéaire montre qu'il existe une tendance à l'augmentation de la température pour les dix stations.

Cette situation est conforme aux tendances confirmées par la 2^{ème} Communication Nationale de l'Algérie au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), qui mentionne une hausse de la température moyenne annuelle enregistrée sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis les années soixante-dix et qui continue jusqu'à nos jours.

A la suite de ces résultats nous voulons déterminer l'augmentation de la température moyenne annuelle pendant ce demi-siècle dans la région des Aurès notamment dans le mont de Chélia, de 1958 à 2020.

L'ajustement de la droite de régression permet d'un côté d'obtenir la moyenne modélisée du total annuel des températures entre le début et la fin de la série (modélisation statistique des températures) et d'un autre côté de prédire les valeurs de l'augmentation de la température moyenne annuelle après plusieurs années (pente de chaque point, b du tableau V-8).

Tableau V-8: Pente de la tendance linéaire des températures moyennes annuelles.

Station	a	P value	b	P value
CH1	-29,20	0,004202	0,0228	0,000020
CH2	-29,08	0,004484	0,0230	0,000019
CH3	-29,59	0,004074	0,0231	0,000019
CH4	-29,64	0,003415	0,0233	0,000012
CH5	-29,01	0,004713	0,0229	0,000022
CH6	-29,66	0,003996	0,0232	0,000018
CH7	-29,20	0,004202	0,0228	0,000020
CH8	-29,04	0,003853	0,0229	0,000015
CH9	-28,69	0,004272	0,0228	0,000016
CH10	-28,69	0,004025	0,0227	0,000015
Moyenne (par année)			0,0229	

Le tableau V-8 montre que la température moyenne annuelle augmente par 0.022 °C par année.

Si cette tendance se poursuit à l'avenir, elle pourrait atteindre une augmentation de 1.14 °C par 50 ans et 2. 28°C par 100 ans. Cette augmentation des températures est en cohérence avec celle au niveau mondial.

Le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC2, 2022) fait état d'une augmentation de la température globale entre 0,8 °C et 1,2 °C par rapport à l'ère pré-industriel qui pourrait atteindre 1,5 °C entre 2030 et 2052.

V.2.3 Relation indice NDVI et facteurs climatiques

L'interprétation de l'augmentation de l'NDVI dans un contexte de stabilité des précipitations et d'augmentation des températures est complexe et nécessite de prendre en compte plusieurs

Points :

- L'augmentation de l'NDVI malgré la hausse des températures pourrait indiquer une certaine résilience des écosystèmes. Cela suggère que, pour le moment, les espèces végétales tolèrent le stress thermique accru, probablement grâce à des adaptations physiologiques ou à des interactions bénéfiques entre espèces.
- Certaines espèces végétales sont naturellement plus résistantes à la chaleur et à la sécheresse. Une augmentation de la température peut favoriser ces espèces au détriment d'autres, modifiant ainsi la composition de la végétation et se traduisant par une augmentation globale du NDVI.
- Cependant, il est important de noter que L'NDVI ne capture pas tous les aspects de la santé d'un écosystème. Il est possible que des changements subtils, comme des modifications de la composition des espèces ou de la structure forestière, ne soient pas reflétés dans l'NDVI
- La stabilité des précipitations pourrait jouer un rôle clé dans la résilience observée. Un apport en eau constant pourrait aider les plantes à supporter des températures plus élevées en maintenant leur transpiration et en évitant un stress hydrique trop important.
- La stabilité actuelle de l'NDVI ne garantit pas une stabilité future. Chaque espèce a ses limites de tolérance au stress thermique. Si les températures continuent d'augmenter, il est possible que des seuils soient franchis, entraînant un déclin de l'NDVI à terme.
- Les écosystèmes peuvent mettre du temps à réagir aux changements climatiques. Il est possible que les effets négatifs de l'augmentation des températures ne soient visibles sur l'NDVI qu'après un certain délai.

Conclusion

Le massif du Chélia, confronté à diverses pressions environnementales, notamment climatiques et anthropiques, nécessite une analyse approfondie de sa dynamique environnementale à l'échelle locale. Cette étude s'est penchée sur l'évolution de la végétation du Chélia au cours des dernières décennies, en mettant l'accent sur l'influence des facteurs climatiques.

Grâce à une approche diachronique s'appuyant sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dérivé de données satellitaires, et à un test de Mann-Kendall appliqué aux séries de température et de précipitations, plusieurs constats se dégagent :

Alors que les précipitations restent stables sur la période étudiée, les températures affichent une tendance significative à la hausse.

Le NDVI suit une évolution en deux temps avec une diminution entre 1993 et 2003, suivie d'une augmentation de 2003 à 2020.

L'augmentation du NDVI, malgré des températures en hausse et des précipitations stables, pourrait indiquer une certaine résilience des écosystèmes du Chélia. Toutefois, cette interprétation doit être nuancée. L'NDVI, bien qu'utile, ne reflète pas la complexité des changements écologiques. Des analyses complémentaires, prenant en compte les limitations de l'indicateur, les seuils de tolérance des espèces et les effets spécifiques du changement climatique, sont nécessaires pour une compréhension fine de la dynamique à l'œuvre et pour anticiper l'évolution future de ces écosystèmes fragiles.



Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

En guise de conclusion, une synthèse des principaux résultats mis en lumière par cette étude, concernant l'étude de la dynamique de la végétation de l'Aurès, répond à certaines questions soulevées dans l'introduction de cette thèse. Il est particulièrement intéressant de répondre à la question suivante :

Quelle est la dynamique récente de la végétation des Aurès ?

La dynamique récente de la végétation des Aurès, mise en évidence par une approche géomatique notamment l'analyse d'images satellitaires multi spectrales, révèle une diminution significative du couvert forestier, principalement dans les catégories "forêts denses" et "forêts ouvertes". Sur une période de 33 ans, ces pertes sont estimées à environ 9300 ha et 1300 ha respectivement. Dans le même temps, on observe une augmentation des surfaces dédiées aux cultures, aux maquis et aux sols nus. Ces changements sont attribuables à l'effet combiné des activités humaines et des facteurs climatiques.

En réponse au deuxième objectif, l'élaboration et la superposition des cartes climatiques basées sur l'indice de De Martonne et celle de la végétation s'avèrent un outil précieux pour visualiser la distribution des principaux groupements végétaux en fonction de leurs conditions climatiques favorables.

L'analyse spatiale des groupements végétaux révèle une étroite corrélation avec les gradients climatiques mis en évidence par l'indice de De Martonne :

Le pin d'Alep et le genévrier de Phénicie, espèces adaptées aux milieux secs, se concentrent dans les zones à faible indice de De Martonne, caractéristiques d'un climat aride à semi-aride.

A l'inverse, le cèdre de l'Atlas, marqueur de conditions plus humides, privilégie les zones à indice de De Martonne élevé.

Quant au chêne vert, l'espèce la plus plastique, il affiche une large amplitude écologique et se retrouve dans tous les types de climat caractérisés par différents indices de De Martonne. Ces observations confirment le rôle déterminant du climat, tel que traduit par l'indice de De Martonne, dans la distribution des principales essences forestières de la région.

Bien que l'indice de De Martonne se révèle un outil pertinent pour appréhender la distribution des espèces végétales, il est crucial de rappeler qu'il ne reflète qu'une partie de la réalité bien plus complexe.

En effet, la répartition des espèces est le fruit d'interactions multiples entre des facteurs écologiques variés. La topographie, la nature du sol, les relations de compétition entre espèces ou encore les pressions anthropiques, exercent également une influence notable sur la présence et l'abondance des plantes.

Dans le dernier chapitre relatif au mont de Chélia, l'objectif visé est l'identification de la relation existante entre l'activité photosynthétique de la végétation et les tendances des températures et précipitations. Les résultats montrent une diminution de l'NDVI entre 1993 et 2003, suivie d'une augmentation de 2003 à 2020.

L'augmentation observée de l'indice NDVI au Chélia, malgré des températures en hausse et des précipitations stables, suggère une certaine résilience de ces écosystèmes face aux changements climatiques. Cette capacité à maintenir, voire à intensifier, l'activité végétale malgré des conditions climatiques moins favorables constitue un signal encourageant.

Il convient toutefois de rester prudent dans l'interprétation de ce résultat. Si l'indice NDVI est un outil précieux pour évaluer l'activité photosynthétique, il ne reflète pas la complexité globale des changements écologiques en cours. Il ne permet pas, par exemple, de rendre compte des modifications de la composition des espèces, de la structure de la végétation ou encore de la santé globale de l'écosystème.

Des analyses complémentaires s'avèrent donc essentielles pour décrypter précisément la dynamique à l'œuvre au Chélia. Ces analyses devront notamment :

- Intégrer les limites intrinsèques de l'indicateur NDVI en le couplant à d'autres indicateurs écologiques pertinents.
- Explorer les seuils de tolérance spécifiques des différentes espèces face aux stress hydrique et thermique engendrés par le changement climatique.
- Évaluer finement l'impact du changement climatique sur les interactions entre espèces et sur le fonctionnement global de l'écosystème.

C'est en combinant une approche multi-indicateurs et une compréhension approfondie des effets du changement climatique à l'échelle locale qu'il sera possible de :

- Confirmer ou infirmer la résilience observée et identifier les facteurs clés de cette résilience.

- Évaluer la durabilité de cette résilience face à l'intensification attendue des changements climatiques.
- Concevoir et mettre en place des stratégies de gestion et de conservation adaptées pour préserver ces écosystèmes fragiles et garantir la pérennité de leurs précieux services écosystémiques.

Ces premiers résultats, bien qu'intéressants, ne constituent qu'une première étape vers une compréhension approfondie de la dynamique des écosystèmes forestiers des Aurès face aux changements climatiques.

Pour aller plus loin et mettre en place un suivi efficace de ce patrimoine naturel précieux, plusieurs pistes de recherche et d'action méritent d'être explorées :

- **Mettre en place un système de suivi à long terme** : Établir un réseau de placettes permanentes d'observation pour suivre l'évolution de la composition, de la structure et de la fonction des écosystèmes forestiers sur le long terme.
- **Intégrer le changement climatique dans les plans de gestion forestière** : Adapter les pratiques sylvicoles (choix des essences, densité de plantation, etc ...) aux conditions climatiques futures et favoriser la diversification des essences pour accroître la résilience des forêts.
- **Renforcer la protection des écosystèmes les plus vulnérables** : Identifier et protéger les zones refuges pour la biodiversité et les écosystèmes les plus sensibles aux changements climatiques.
- **Développer une approche multi-disciplinaire** : Intégrer, en complément du NDVI, des données issues de la télédétection (autres indices de végétation, images haute résolution), des mesures de terrain (relevés floristiques, dendrochronologie, analyses physiologiques) et des modèles écologiques pour obtenir une vision globale et précise des changements en cours.
- **Approfondir l'étude des seuils de tolérance des espèces clés** : Mener des expérimentations en conditions contrôlées et in situ pour déterminer les seuils de tolérance des espèces clés face aux stress hydrique et thermique, et identifier les espèces les plus vulnérables et les plus résilientes au changement climatique.
- **Modéliser l'évolution future des écosystèmes** : Utiliser des modèles de distribution d'espèces et des modèles écosystémiques pour simuler l'impact potentiel de différents scénarios climatiques sur la composition, la structure et la fonction des écosystèmes forestiers de la région.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018).** TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, Article 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Abdessemed K. (1984).** Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie), première partie : la dégradation et ses origines et ses conséquences. *Forêt Méditerranéenne*, 6 (1) : 19-26.
- Abdessemed, K. (1981).** Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*, Mannetti) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma - Etude phytosociologique et problème de conservation et de développement [Doctoral dissertation, Faculté St. Jérôme].
- Abdessemed, K. (1985).** Problèmes de dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie), deuxième partie : les mesures à prendre. *Forêt Méditerranéenne*, 7(1), 43–52.
- Abdi, O. (2019).** Climate-Triggered Insect Defoliators and Forest Fires Using Multitemporal Landsat and TerraClimate Data in NE Iran: An Application of GEOBIA TreeNet and Panel Data Analysis. *Sensors*, 19(18), Article 3965. <https://doi.org/10.3390/s19183965>
- Addisu, S., Selassie, Y. G., Fissaha, G., Gebrehiwot, M., Tekleab, S., & Birhanu, B. (2015).** Time series trend analysis of temperature and rainfall in lake Tana Sub-basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 4, Article 25. <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0051-0>
- Aissi A., (2019).** Le chêne zéen à petites feuilles (*Quercus faginea* Lam.) dans l'Aurès : cartographie, écologie et taxinomie. Thèse de doctorat de l'Université Hadj Lakhdar- Batna 1. 93 p.
- Aissi, A., Beghami, Y., Lepais, O., & Vela, E. (2020).** Analyse morphologique et taxonomique du complexe *Quercus faginea* (Fagaceae) en Algérie. *Botany*. <https://doi.org/10.1139/cjb-2020-0075>
- Allen, J. C., & Barnes, D. F. (1985).** The causes of deforestation in developing countries. *Annals of the Association of American Geographers*, 75(2), 163–184. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1985.tb00332.x>
- ARCGIS, 2006.** Guide d'utilisation. https://odr.inrae.fr/intranet/carto/cartowiki/images/b/b9/Applications_g%C3%A9n%C3%A9rales_ArcGis.pdf

- Aussenac, G., & Guehl, J. (1990).** Ecophysiologie des cèdres (*Cedrus* Sp.), conséquences pour la sylviculture. *Bulletin Scientifique Botanique de France*, 131, 384-398.
- Beghami Y., Kalla M., Thinon M., Benmessaoud H. (2012).** Spatiotemporal Dynamics of Forest and Mountain Formations in Aurès Area, Algeria. *Journal of Life Sciences*, 6 : 663-669.
- Beghami, Y. (2013).** Écologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde [Doctoral dissertation, Université de Mohamed Khidhar].
- Beghami, Y., Kalla, M., Thinon, M., & Benmessaoud, H. (2012).** Dynamique spatio-temporelle des formations forestières et montagnardes dans la région de l'Aurès, Algérie. *Journal of Life Sciences*, 6, 663–669.
- Beghami, Y., Kalla, M., Vela, E., Thinon, M., & Benmessaoud, H. (2013).** Le Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans les Aurès, Algérie: considérations générales, cartographie, écologie, et groupements végétaux. *Ecologia Mediterranea*, 39(1), 17–30.
- Belloula, S., & Beghami, Y. (2017).** Évaluation de la dynamique du déclin du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* MANETTI). *The Arabe World Geographer*, 24(2-3). <https://doi.org/10.3138/awg-2017-4513>
- Benabdeli, K. (1993).** L'agriculture menacée par la déforestation, l'érosion et l'aridité. In Journée Scientifique 6 juin 1993 [Conference presentation]. Institut de Biologie, Sidi Bel Abbes, Algeria.
- Benmessaoud H., Kalla M., Driddi H. (2009).** Évolution de l'occupation des sols et désertification dans le sud des Aurès (Algérie). *M@ppemonde*, 94 (6) : 1-11
- Bensaid, A. (2006).** SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : Le cas de la Wilaya de Naâma (Algérie) [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1].
- Bentouati, A. (2008).** Situation du cèdre de l'Atlas de l'Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 29(2), 203–208.
- Bentouati, A., & Bariteau, M. (2006).** Réflexion sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas de l'Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 27(4), 317–322.
- Bentouati, A., Oudjehih, B., & Alatou, D. (2005).** Croissance en hauteur dominante et classes de fertilité du Pin d'Alep dans le massif de Ouled Yakoub et des Beni Oudjana (Khenchela-Aurès). *Science et Technologie*, 23, 57–62.

- Barge, O., Chataigner, C, 2004.** Un SIG pour l'analyse des approvisionnements l'exemple de l'obsidienne en Arménie. *Revue d'Archéométrie*, 28, 25-33.
- Berger, A., Lacroix, P., Lavenu, G., Lesellier, S., Reynaud, I., Tournadre, G., & Gonzalez, O. (2005).** ArcView 9 niveau 1. Support de cours avec exercices pratiques et données. ESRI France.
- Beyene, Y., Semagn, K., Mugo, S., Prasanna, B.M., Tarekegne, A., Gakunga, J., Sehabiague, P., Meisel, B., Oikeh, S.O., Olsen, M. & Crossa, J. (2015).** Performance and grain yield stability of maize populations developed using marker-assisted recurrent selection and pedigree selection procedures. *Euphytica*, 208(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1590-1>
- Bezzih, H., Malki, H., & Aissi, A. (2017).** Relations entre le climat et la répartition de la végétation dans les Aurès (cas du Mont Chélia) : Apport des systèmes d'information géographique (SIG) dans leur mise en évidence. In XXXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie [Conference presentation]. Sfax, Tunisia.
- Bulletin de l'Information Géographique, 3.(BIG n° 3) . Initiation à la télédétection.
https://www.academia.edu/8928385/BIG_n_3_Initiation_%C3%A0_la_T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection_BULLETIN_DE_L'INFORMATION_GEOGRAPHIQUE
- Blayac, J. (1899).** Le pays des Nememchas à l'est des monts Aurès. *Annales de Géographie*, 8(38), 141–159. <https://doi.org/10.3406/geo.1899.5570>
- Bonan, G. B. (2008).** Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5878), 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bonn, F. (1998).** La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, 9(3), 185–192.
- Bou Kheir, R., Cerdan, O., & Abdallah, C. (2006).** Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82(3–4), 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.010>
- Boudy, P. (1950).** Economie forestière nord-africaine. Tome II, monographie et traitement des essences forestières. La Rose.
- Boudy, P. (1952).** Guide du forestier en Afrique du Nord. La Maison Rustique.
- Bouzekri, A., & Benmessaoud, H. (2014).** Étude et analyse diachronique des changements de l'occupation du sol de l'Aurès oriental Algérie. *Analele Universității Din Oradea, Seria Geografie*, 24(2), 180–189.

- Brown, J. H., Stevens, G. C., & Kaufman, D. M. (1996).** The geographic range: Size, shape, boundaries, and internal structure. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 597–623. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.27.1.597>
- Brubaker, L. B. (1986).** Responses of tree populations to climatic change. *Vegetatio*, 67(2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/BF00045300>
- Brussard, P. F. (1984).** Geographic patterns and environmental gradients: The central-marginal model in *Drosophila* revisited. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 15, 25–64. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.15.110184.000325>
- Bureau National d'Études Pour Le Développement Rural (BNEDER). (2010).** Étude et expertise sur le dépérissement de la cédraie d'Ouled Yagoub et Chelia - Wilaya de Khenchela, phase II : identification et localisation des foyers de dépérissement.
- Centre canadien de télédétection (CCT). (2008).** Tutoriel : Notions fondamentales de télédétection. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php
- Chafai, C. (2016).** Contribution à l'étude de la dynamique spatiale et de la biomasse du frêne épineux dans la cédraie d'Ouled Yagoub ville de Khenchela [Master's thesis, Université Elhaj Lakhdar Batna 1].
- Cuq, F., Madec, V., & Gourmelon, F. (1996).** Mise à jour de la carte d'occupation des sols des provinces côtières de Guinée-Bissau. *Journal Mappes Monde*, 4, 21–26.
- Dauriac, F. (2004).** Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt [Thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts].
- Dauriac, F. (2004).** Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt [Doctoral dissertation, L'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts]. CEMAGREF.
- De Lartigue, M. (1904).** Monographie de l'Aurès. Imprimerie à vapeur Marle-Audrino.
- Delenne, C. (2006).** Extraction et caractérisation de vignes à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale : Application en Languedoc-Roussillon pour la constitution de bases de données géographiques [Thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts].
- Direction Générale des Forêts (DGF). (2010).** Rapport national. Évaluation des ressources forestières mondiales.
- Direction Générale des Forêts (DGF). (2014).** Note sur les forêts algériennes: Gestion durable des forêts pour lutter contre les feux de forêts.

Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099110823163530127/pdf/P1776690df4652080094ed07663fc864a5a.pdf>

Ducrot, D. (2005). Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources, Extraction de caractéristiques du paysage [Habilitation thesis, INP Toulouse].

Dykstra, D. P. (1996). Système d'information appliquée à la foresterie. *Revue Internationale des Forêts et des Industries Forestières* (FAO), 47(189).

<http://www.fao.org/docrep/w4086f/w4086f04.htm>

Emberger, L. (1955). [Please provide the title and source of this reference.]

Emberger, L. (1971). Considérations complémentaires au sujet des recherches bioclimatiques et phytogéographiques - écologiques. In *Travaux de botanique et d'écologie de Louis Emberger* (pp. 291–301). Masson.

ERDAS Imagine 8.4. (1999). Géosystème France. [CD-ROM].

ESRI, France (2009). The top nine reasons to use a files geodatabase, Esri Education service.

FAO. (2013a). État des forêts méditerranéennes 2013. <http://www.fao.org/docrep/017/i3226f/i3226f.pdf>

FAO. (2013b). Projet de vision et stratégie relatives aux activités de la FAO en matière de nutrition. Cent vingt-neuvième session, Comité du Programme de la FAO (9-13 novembre).

FAO. www.fao.org/3/nd940fr/nd940fr.pdf

Fazakas, Z., & Nilsson, M. (1996). Volume and forest cover estimation over southern Sweden using AVHRR data calibrated with TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1701–1709. <https://doi.org/10.1080/01431169608948768>

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(7), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Ficklin, D. L., Robeson, S. M., & Knouft, J. H. (2016). Impacts of recent climate change on trends in baseflow and stormflow in United States watersheds. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5079–5088. <https://doi.org/10.1002/2016GL069292>

Garah, K., Chafai, C. H., & Bentouati, A. (2016). Changements spatio-temporels des écosystèmes forestiers de pin d'Alep dans l'Aurès oriental (Algérie). *Revue Forestière Française*, 3, 217–229. <https://doi.org/10.4267/2042/62003>

- Garah, K. (2020).** Réponse du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) aux changements climatiques récents dans la région des Aurès: Quantification et spatialisation par les approches dendrochronologique et géomatique [Doctoral dissertation, Université de Batna 2].
- Gaston, K. J. (1990).** Patterns in the geographical ranges of species. *Biological Journal of the Linnean Society*, 43(2), 105–129. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1991.tb00579.x>
- Gavilán, R. G. (2005).** The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case study in the Spanish Sistema Central. *International Journal of Biometeorology*, 50(2), 111–120. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0253-x>
- Getachew Birhan, B. (2018).** Trend analysis of temperature and rainfall in south Gondar zone, Ethiopia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 5(1), 1111–1125. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.051.1111>
- Girard, M. C., & Girard, C. M. (1999).** Traitement des données de télédétection. Dunod.
- Godron, M. (1984). *Écologie de la végétation terrestre*. Masson.
- Gouat, P., & Gouat, J. (1983).** L'habitat du goundi (*Ctenodactylus gundi*) dans le massif de l'Aurès (Algérie). *Mammalia*, 47(4), 227–238. <https://doi.org/10.1515/mamm.1983.47.4.527>
- Greenberg, J. A., Dobrowski, S. Z., & Vanderbilt, V. C. (2009).** Limitations on maximum tree density using hyperspatial remote sensing and environmental gradient analysis. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.010>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022).** Changements climatiques 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [A. H. Shukla et al. (eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Gümüş, V., Soydan, N. G., Şimşek, O., Algin, H. M., Aköz, M. S., & Yenigun, K. (2017).** Seasonal and annual trend analysis of meteorological data in Şanlıurfa, Turkey. *European Water*, 59, 131–136. <https://doi.org/10.3126/hn.v10i0.13140>
- Haddouche, I., Benhanifia, K., & Gacemi, M. (2011).** Analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie de la forêt de Fergoug à Mascara, Algérie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 307, 23–31. <https://doi.org/10.19182/bft.2011.307.23-31>
- Hadjadj, M. (2011).** Apport des SIG et des images satellites pour la cartographie numérique de la forêt du Chettabah (Wilaya de Constantine). Modélisation climatique et classification [Thèse de doctorat, Université Elhaj Lakhedhar, Batna].

- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Karahacane, H., & Ali Rahmani, S. E. (2019).** Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(2), 83–114. <https://doi.org/10.7202/1065202ar>
- Hessas, N. (2005).** Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt. Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes–Maritimes [Doctoral dissertation, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier – Grenoble II].
- Huiyan, G., Limin, D., Gang, W., Dong, X., Shunzhong, W., & Hui, W. (2006).** Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(1), 54–62. <https://doi.org/10.1007/s11431-006-0054-z>
- Hussain, F., Nabi, G., & Boota, M. W. (2015).** Rainfall trend analysis by using the Mann-Kendall test & Sen's slope estimates: A case study of district Chakwal rain gauge, Barani area, Northern Punjab Province, Pakistan. *Science International*, 27(4), 3159–3165.
- Jofack Sokeng, V. C. (2016).** Cartographie du potentiel aquifère des Hauts Plateaux de l'Ouest - Cameroun : contribution de la Télédétection (optique et radar), des Systèmes d'Information Géographique et des Réseaux de Neurones [Doctoral dissertation, Université Félix Houphouët Boigny].
- Kadik, B. (1987).** Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie: Ecologie dendrométrie morphologie. OPU.
- Kendall, M. G. (1975).** Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.
- Kergomard, C. (2009).** La télédétection aéro-spatiale : une introduction. [Notes de cours, École normale supérieure de Paris]. <http://www.geographie.ens.fr/~kergomard/Teledetection/CTeledetection.pdf>
- Khanfouci, M. S. (2005).** Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma [Master's thesis, Université El Hadj Lakhdar Batna 1].
- Kherchouche, D. (2013).** Approches sylvicoles et paléoécologiques pour l'étude des facteurs de dépérissement et de la distribution spatio-temporelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) de l'Aurès [Doctoral dissertation, Université El Hadj Lakhdar Batna 1].

- Kisi, O., & Ay, M. (2014).** Comparison of Mann-Kendall and Innovative Trend Method for Water Quality Parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*, 513, 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.005>
- Körner, C., Asshoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S. G., ... Zotz, G. (2005).** Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, 309(5739), 1360–1362. <https://doi.org/10.1126/science.1113977>
- Laala, A., Alatou, D., & Adimi, A. (2019).** Analyse spatiale de la corrélation entre les variables thermiques et l'activité végétative des forêts de l'Est Algérien. *Agriculture and Forestry Journal*, 3(2), 95–103. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3590377>
- Laffitte, R. (1939).** Esquisse géologique de l'Aurès [Doctoral dissertation].
- Laffy, D. (1993).** L'évolution des paysages et de l'occupation du sol observée par satellites. *Journal Mapped Monde*, 3, 22–28.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... Xu, J. (2001).** The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Lassieur, S. (2006).** Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales [Rapport de stage de master 2, Université Jean Monnet].
- Lawton, J. H. (1993).** Range, population abundance and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(11), 409–413. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90043-O](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90043-O)
- Le Houérou, H. N. (1980).** Les fourrages ligneux en Afrique du Nord. In *Les fourrages ligneux en Afrique. Etat actuel des connaissances. Actes du colloque sur les fourrages ligneux en Afrique* (pp. 57-84). Centre International pour l'Elevage en Afrique.
- Le Houérou, H. N. (1995).** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides d'Afrique du Nord ; diversité biologique, développement durable et désertification. *Options Méditerranéennes*, B, 10.
- Le Houérou, H. N. (2001).** Biogéographie des steppes arides au nord du Sahara. *Journal of Arid Environment*, 48, 103–128. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0740>
- Lee, S. (2004).** Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information systems: A case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 45(4), 457–465. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0872-9>
- Letreuch-Belarouci, N. (1991).** Les reboisements en Algérie et leur perspective d'avenir (Vol. 1). OPU.

- Ministère de l'agriculture et de développement durable (MADR), 2002...** Soutien à la relance économique à court et moyen termes, 17p.
- Malo, A. R., & Nicholson, S. E. (1990).** A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments*, 19(1), 1–24. [https://doi.org/10.1016/0140-1963\(90\)90040-U](https://doi.org/10.1016/0140-1963(90)90040-U)
- Mann, H. B. (1945).** Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 163–171. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martin, M. E., Newman, S. D., Aber, J. D., & Congalton, R. G. (1998).** Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 65, 249–254. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00030-2)
- Martonne, E. (1926).** Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 181, 1395–1398.
- McRoberts, R. E., Nelson, M. D., & Wendt, D. G. (2002).** Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-nearest neighbors technique. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3), 457–468. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00025-7)
- Mercoiret, M. R. (1994).** L'appui aux producteurs ruraux, guide pratique à l'usage des agents de développement et des responsables de groupements. Karthala.
- Myneni, R., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., Nemani, R. R., Rahman, A. F., ... Running, S. W. (1997).** Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626), 698–702. <https://doi.org/10.1038/386698a0>
- Nath, B., & Acharjee, S. (2013).** Forest cover change detection using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A study of Reingkhongkine Lake's adjoining areas, Rangamati, Bangladesh. *Indian Cartographer*, 33, 348–353.
- Nicholson, S. E., Davenport, M. L., & Malo, A. R. (1990).** A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17(2), 209–241. <https://doi.org/10.1007/BF00138369>
- Office National des Travaux Forestiers (ONTF). (1977).** Inventaire forestier de la forêt de Beni Imloul dans le massif des Aurès–Algérie. Rapport de la Direction du grand projet Aurès Batna. Projet de mise en valeur agro-sylvo-industriel des Aurès. [Report No. G.T.Z n° 114].
- Ozenda, P. (1975).** Sur les étages de végétation dans les montagnes du bassin méditerranéen. *Documents de Cartographie Écologique*, 16, 1-32.

- Panda, A., & Sahu, N. (2019).** Trend analysis of seasonal rainfall and temperature pattern in Kalahandi, Bolangir and Koraput districts of Odisha, India. *Journal of Atmospheric Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/asl.932>
- Pohlert, T. (2018).** Non-parametric trend tests and changepoint detection. CRAN R Project. <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/trend.pdf>
- Pontius, R. G. (2000).** Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(8), 1011–1016.
- Puech, C. (1993).** Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants [Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier Grenoble I].
- Quézel, P. (1985).** Definition of the mediterranean region and the origin of this flora. In C. Gomez-Campo (Ed.), *Plant conservation in the Mediterranean area* (pp. 9-24). Dr. W. Junk Publ.
- Quézel, P. (1991).** Structures de végétation et flore en Afrique du Nord: leurs incidences sur les problèmes de conservation. In M. Rejdali & V. H. Heywood (Eds.), *Conservation des ressources végétales* (pp. 19-32). Actes Editions, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II.
- Quézel, P., & Barbero, M. (1990).** Les forêts méditerranéennes. Problèmes posés par leur signification historique, écologique et leur conservation. *Acta Botanica Malacitana*, 15, 145-178. <https://doi.org/10.24310/abm.v15i.9300>
- Quézel, P., & Gast, M. (1998).** Genévrier. In *Encyclopédie Berbère* (Vol. 20, pp. 3016–3023). Edisud.
- Reille, M., & Pons, A. (1992).** The ecological significance of sclerophyllous oak forests in the western part of the Mediterranean basin: A note on pollen analytical data. *Vegetation History and Archaeobotany*, 1(1), 13–17. <https://doi.org/10.1007/BF00118206>
- Renaud, A. (2000).** Cartographie du volume ligneux des peuplements de la forêt boréale à l'aide de données d'altimétrie laser [Thèse de magister, Université du Québec à Montréal].
- Rivas-Martínez, S. (1981).** Les étages bioclimatiques de la végétation de la péninsule Ibérique. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 37(2), 251–268.
- Roche, P. (1998).** Dynamique de la biodiversité et action de l'homme [Report No. ENV-SRAE–94233].
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993).** Méthodes multicritères d'aide à la décision. *Economica*.
- Rustum, R., Adeloje, A. J., & Mwale, F. (2017).** Spatial and temporal Trend Analysis of Long Term rainfall records in data-poor catchments with missing data, a case study of Lower

- Shire floodplain in Malawi for the Period 1953–2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5467–5486. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5467-2017>
- Safari, B. (2012).** Trend analysis of the mean annual temperature in Rwanda during the last fifty-two years. *Journal of Environmental Protection*, 03(06), 538–551. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.36065>
- Sarr, M. A. (2009).** Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.22707>
- Schoenenberger, A. (1970a).** Etude du couvert forestier de l'Aurès oriental tendances évolutives de ce peuplement. *Projet Algérie 15*, FAO.
- Schoenenberger, A. (1970b).** Catalogue des espèces vasculaires des massifs forestiers des Ben Imloul-Chèlia-Belezma-S'gag (Aurès). CRBT/ONRS.
- Seltzer P. (1946).** Le climat de l'Algérie. Alger, Carbonel.
- Smaïhi et Kalla (2017).** Spatiotemporal evolution of plant formations in the Belezma national park in the eastern region of Algeria, *Courrier du Savoir*, 24, 175-184.
- Schoenenberger, A. (1971).** Étude du couvert forestier de l'Aurès Oriental et inventaire des espèces pastorales du massif des Beni Imloul. *Projet Algérie 15*, A.D.F.
- Schoenenberger, A. (1972).** Présentation géobotanique du massif des Aurès (Algérie). *Comptes Rendus des Séances Mensuelles de la Société des Sciences Naturelles et Physiques du Maroc*, 38, 68–77.
- Schweingruber, F. H. (1990).** Anatomie europäischer Hölzer. *Anatomy of European Woods*. Eidgenöss. Forschungsanst. f. Wald, Schnee u. Landschaft; Verlag Paul Haupt.
- Short, N. M. (2000). Remote sensing tutorial. NASA. <http://rst.gsfc.nasa.gov/>
- Shrimalil, S. S., Aggarwal, S. P., & Samra, J. S. (2001).** Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS – a case study of the Sukhna Lake catchment (Northern India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 54–60. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(00\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(00)00008-0)
- Spanb. (2016).** La biodiversité pour le développement économique et social durable et l'adaptation au changement climatique. Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement.
- Stephenson, N. L. (1990).** Climatic Control of Vegetation Distribution: The Role of the Water Balance. *The American Naturalist*, 135(5), 649–670. <https://doi.org/10.1086/285065>

- Stott, K., Keeler, J., Van, Q. N., & Shaka, A. J. (1997).** One-dimensional NOE experiments using pulsed field gradients. *Journal of Magnetic Resonance*, 125(2), 302–324. <https://doi.org/10.1006/jmre.1997.1110>
- Tankoano, B. (2017).** Contribution de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique à l'évaluation de l'impact des activités anthropiques sur le couvert végétal : cas du Parc National des Deux Balé (PNDB), à l'ouest du Burkina Faso [Doctoral dissertation, Université Nazi Boni].
- Taylor, M. P. (2009).** LANDSAT 7 Users Handbook. NASA .
http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html
- Temagaoult, O. (1988).** Inventaire et répartition du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) [Engineering thesis, Institut National d'Enseignement Supérieur en Agronomie].
- Tetuko, S. S. J., Tateishi, R., & Wikantika, K. (2001).** A method to estimate tree trunk diameter and its application to discriminate Java-Indonesia tropical forests. *International Journal of Remote Sensing*, 22(1), 177–183. <https://doi.org/10.1080/01431160121449>
- Thirion, L. (2003).** Modélisation de l'interaction cohérente des ondes électromagnétiques avec des couverts forestiers [Thèse de doctorat non publiée, Université Paul Sabatier].
- Toney, E., & Lontchi, P. (2003).** Télédétection et SIG pour la mise à jour cartographique. *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur*, 3, 40–51.
- Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., Jr., & McMurtrey, J. E., III. (1981).** Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11(2), 171–189. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(81\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90012-4)
- Tuhkanen, S. (1980).** Climatic parameters and indices in plant geography. *Almqvist & Wiksell International*.
- Vela, E., & Schafer, P. A. (2013).** Typification de *Juniperus thurifera* var. *africana* Maire, délimitation taxonomique et conséquences nomenclaturales sur le Genévrier thurifère d'Algérie. *Ecologia mediterranea*, 39(1), 69–80. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2013.1293>
- Vermote, E., Justice, C. O., Claverie, M., & Franch, B. (2016).** Preliminary Analysis of the Performance of the Landsat 8/OLI Land Surface Reflectance Product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Wachal, D. J., & Hudak, P. F. (2000).** Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. *GeoJournal*, 51(3), 245–253. <https://doi.org/10.1023/A:1007144921921>

Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00328-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00328-9)

Zeraib, S. (2016). Le massif des Aurès "Algérie": rupture du système des complémentarités et recherche d'un hypothétique équilibre. *Revue Territoire et Développement*, 1(3), 61–72.

Zhang, Y., Migliavacca, M., Peñuelas, J., & Ju, W. (2020). Advances in hyperspectral remote sensing of vegetation traits and functions. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112121>