



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie



THESE

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat LMD

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Ecologie Végétale

Etude de la répartition de la végétation spontanée de la région d'El Oued par l'utilisation de SIG et télédétection (Famille : Fabaceae).

Présenté et soutenue publiquement Par :

M. HANAFI Mohamed Tahar

Le 17/03/2025

Devant le jury composé de :

Président	M. CHEMSA Ahmed Elkhalfa	Pr	Université d'El Oued
Directeur de Thèse	M. GHEMAM AMARA Djilani	Pr	Université d'El Oued
Co- Directeur	M. BOUNAR Rabah	Pr	Université de Msila
Rapporteur	M ^{me} . REZKALLAH Chafika	Pr	Université de Tebessa
Rapporteur	M. KHECHEKHOUCHE El Amine	MCA	Université d'El Oued
Rapporteur	M. BENAMOR Bilal	MCA	Ecole Supérieure d'Agriculture Saharienne – El oued
Rapporteur	M. SALMANE Mehdi	MCA	Université d'El Oued

Année Universitaire 2024-2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

À mes parents, qui ont été mon premier soutien,

À mes frères et sœurs, pour leur amour et leur encouragement,

À ma femme et mes enfants, qui a toujours cru en moi.

Cette thèse est aussi la vôtre.

À la mémoire de ma grand mère,

Qui aurait été fier de voir l'aboutissement de ce travail.

Votre absence est douloureuse, mais votre inspiration m'a accompagné à chaque
étape.

À ceux qui persistent.

Que ce travail soit une preuve que tout est possible avec passion et
détermination.

Remerciements

Louange à ALLAH, nôtre grand seigneur, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de nous avoir donné la bonne volonté et la patience pour l'achèvement de ce travail.

Que le salut d'ALLAH soit sur son prophète MOHAMED, nôtre éducateur et guide du bon chemin.

Il est des parcours qui ne se font pas seuls. Cette thèse est l'aboutissement de plusieurs années de travail, d'efforts et de réflexions, mais aussi de soutien, d'accompagnement et d'encouragement. Il me tient à cœur d'exprimer ma profonde gratitude à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur **Pr. GHEMAM AMARA Djilani** mon directeur, pour son encadrement bienveillant, sa patience et ses précieux conseils. Son expertise et ses encouragements ont été essentiels tout au long de cette recherche.

Ma reconnaissance va aussi à Monsieur **Pr. BOUNAR Rabah** mon co-directeur, qui, par leurs connaissances et leur disponibilité, ont nourri ma réflexion et m'ont permis d'avancer.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur **Pr. CHEMSA Ahmed Elkhalfa** pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également aux membres du jury de ma soutenance de thèse Messieurs **Dr. SALMANE Mehdi**, **Dr. KHECHEKHOUCHE El Amine**, **Dr. BENAMOR Bilal** et madame **Pr. REZKALLAH Chafika** pour avoir accepté de faire partie du jury. Leurs remarques et suggestions ont été précieuses et m'ont permis d'en améliorer la qualité.

Un immense merci à mes **parents**, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien moral indéfectible. Sans eux, je ne serais pas là aujourd'hui.

Enfin, une pensée particulière à ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette thèse.

À toutes et à tous, du fond du cœur, **MERCI**.

Sommaire

I. Remerciements	
II. Sommaire	
III. Résumé	
IV. Résumé en anglais (Summary)	
V. Résumé en arabe (ملخص)	
IX. Liste des figures	
X. Liste des tableaux	
XI. Liste des abréviations	
Introduction	1

Partie I : Bibliographique

Chapitre I : Biodiversité et endémisme

1. Concepts et dimensions de la biodiversité.....	5
1.1. Biodiversité.....	5
1.1.1. Définition de la biodiversité.....	5
1.1.2. Niveaux de biodiversité.....	6
1.1.3. Répartition géographique de la biodiversité.....	7
1.1.4. Diversité floristique.....	9
1.1.5. Importance et valeur de la biodiversité.....	10
1.1.6. Niveaux de mesure de la biodiversité.....	11
1.1.6.1. Indices de diversité spécifique.....	12
1. Richesse spécifique.....	12
2. Indice de Shannon-Wiener (H').....	12
3. Indice de Simpson (D).....	12
4. Indice de Pielou (J').....	12
1.1.6.2. Méthodes d'échantillonnage.....	12
1. La diversité α	13
2. La diversité β	13
3. La diversité γ	13
4. La diversité δ	13
1.1.6.3. Nouvelles approches.....	13
1.1.6.4. Défis et conservation.....	14
2. Endémisme et Spéciation.....	14
2.1. Endémisme.....	14
2.2. Spéciation.....	15
2.2.1 Modes de spéciation.....	15
A) Spéciation allopatrique.....	15
B) Spéciation sympatrique.....	15
C) Spéciation parapatricque.....	15
2.3. Lien entre endémisme et spéciation.....	15
3. Les écosystèmes arides : caractéristiques climatiques, pédologiques et végétales.....	16
3.1. Caractéristiques climatiques.....	16
3.2. Caractéristiques pédologiques.....	16
3.3. Végétation des écosystèmes arides.....	17
3.3.1 Nature de la végétation.....	17
3.3.2 Distribution de la végétation.....	17
4. Niveaux de biodiversité dans la région d'El Oued.....	18
5. Distribution géographique de la biodiversité dans la région d'El Oued.....	20
6. L'importance et la distribution spatiale des espèces endémiques.....	21
6.1. L'endémisme dans la région d'El Oued.....	21
7. Généralités sur la famille des <i>Fabaceae</i>	23
7.1. Caractères botaniques des <i>Fabaceae</i>	24

7.2. Habitat et distribution géographique des Fabaceae.....	25
7.3. Les Fabaceae dans la région d'El Oued.....	26
7.4. Diversité des Fabaceae à El Oued.....	26
a) Espèces clés.....	26
b) Adaptations écologiques.....	27
c) Importance écologique.....	27
d) Utilisations traditionnelles et potentiel économique.....	27
7.5. Menaces et conservation des Fabaceae.....	28
7.6. Les études sur la distribution des Fabaceae en Algérie.....	29
7.7. Limitations des études existantes des Fabaceae en Algérie.....	29

Partie I : bibliographique

Chapitre II : Télédétection et Systèmes

d'Information Géographique (SIG) dans l'étude de la répartition de la végétation

1. Fondements de la télédétection.....	32
1.1. Définitions de la Télédétection.....	32
1.2. Histoire et évolution de la télédétection.....	33
1.3. Energie électromagnétique (les ondes et les photons).....	35
1.4. Spectre électromagnétique (rayonnement électromagnétique).....	35
2. Processus de télédétection.....	37
2.1. Application de la télédétection à l'étude de la végétation.....	39
2.1.1. Principes de base de la télédétection de la végétation.....	39
2.1.2. Utilisation des indices de végétation.....	40
2.3. Avantages et limites de la télédétection.....	41
3. Concepts de base des Systèmes d'Information Géographique (SIG).....	43
3.1. Définition et composantes des SIG.....	43
3.2. Les composantes essentielles d'un SIG.....	44
3.3. Fonctionnalités des SIG (analyse spatiale, géostatistique, etc.).....	45
3.3.1. L'analyse spatiale.....	45
3.3.2. La géostatistique.....	45
3.3.3. La modélisation spatiale.....	45
3.3.4. La cartographie et la visualisation.....	45
3.3.5. La gestion de bases de données spatiales.....	45
4. Application des SIG dans l'étude de la végétation.....	46
4.1. Analyse spatiale et modélisation des habitats.....	46
4.2. Cartographie des espèces endémiques et rares.....	47
4.3. Utilisation des SIG pour la gestion et la conservation de la biodiversité.....	48
5. Intégration des données de télédétection dans les SIG.....	48
6. Cas d'études et exemples d'application de la télédétection et des SIG.....	50
6.1. Applications en zones arides et désertiques.....	50
6.2. Études de la répartition des Fabaceae par télédétection et SIG.....	51

Partie II : Expérimentales

Chapitre III Diversité et répartition des espèces

spontanées et endémiques dans la région d'étude

1. Présentation de la région d'étude.....	53
1.1. Localisation géographique.....	54
2. Milieu abiotique.....	55
2.1. Géologie de la région d'étude.....	55
2.1.1. Géologie régionale.....	55
2.1.2. Géologie local.....	57
2.1.2.1. Formations de l'ère secondaire.....	57
2.1.2.2. Formations de l'ère tertiaire.....	58
2.2. Géomorphologie.....	59
2.3. Hydrologie et hydrogéologie.....	60
2.4. Pédologie.....	61
2.5. Climat.....	62

2.5.1. Les précipitations mensuelles et annuelles.....	62
2.5.2. Variations interannuelles des précipitations.....	63
2.5.3. Les températures.....	64
2.5.4. Diagramme ombrothermique.....	65
2.5.5. Climagramme d'EMBERGER.....	65
3. Milieu biotique.....	67
3.1. La végétation.....	67
3.2. Etat et phytogéographie de la végétation.....	68
4. Méthodologie et Choix des stations.....	69
5. Méthode d'échantillonnage et collecte de données.....	70
6. Analyse de la diversité végétale.....	71
6.1. Indices de diversité.....	71
6.2. Beta diversité.....	72
6.3. Types morphologiques.....	73
6.4. Forme de vie des plantes.....	73
6.5. Types phytogéographiques.....	73
7. Résultats.....	73
7.1. Composition floristique.....	73
7.2. Structures taxonomiques.....	74
7.3. Diversité des espèces.....	78
7.4. Analyse de la similarité de la diversité végétale entre les sites phytoécologiques.....	79
7.5. Caractéristiques fonctionnelles des plantes.....	82
7.5.1. Formes de vie.....	82
7.5.2. Types morphologiques.....	82
7.5.3. Types chorologiques.....	82
7.5.4. Répartition des Fabaceae dans les sites d'Etudes.....	84
8. Discussion.....	85
Partie II : Expérimentales	
Chapitre IV : Analyse spatio-temporelle et prédiction des changements de couverture végétale par télédétection	
1. Matériels et méthodes.....	89
1.1. Collecte des données.....	89
1.2. Traitement d'images.....	90
1.3. Modified Soil Adjusted Index (MSAVI).....	91
1.4. Prédiction et validation du modèle.....	93
2. Résultats et discussion.....	93
2.1. Changement de couverture végétale (2015-2023).....	98
2.2. Prédiction des changements futurs (2031).....	98
2.3. Interpolation spatiale pour l'étude de répartition de la végétation endémique (Famille :Fabaceae).....	100
Conclusion	102
Références bibliographiques.....	104
Publications.....	119
Annexes.....	121
Annexe 1.....	121
1. Variations moyennes mensuelles des précipitations, stations de Biskra et El Oued pour la période (1987-2022).....	121
2. Variations moyennes mensuelles des températures, stations de Biskra et El Oued pour la période (1987-2022).....	121
Annexe 2.....	122
La méthode du point-intercept	122
Annexe 3.....	123

1. Précipitation moyennes de la station de Biskra (1987-2022) exprimées en (mm).....	123
2. Précipitation mensuelles de la station d'El Oued (1987-2022) exprimées en (mm).....	124
3. Températures moyennes de la station de Biskra (1987-2022).....	125
4. Températures moyennes de la station d'El Oued (1987-2022)	126
Annexe 4 : Liste des espèces rencontrées dans la région d'étude	127

Résumé

Cette étude explore la répartition de la végétation endémiques (Famille :Fabaceae) dans la région d'El Oued, une zone saharienne en Algérie, en s'appuyant sur des approches écologiques, de télédétection et de SIG pour comprendre et cartographier la biodiversité végétale. La région, en tant qu'écosystème transitionnel entre le biome méditerranéen et saharien, est soumise à des pressions climatiques et anthropiques croissantes, menaçant sa biodiversité singulière. L'inventaire floristique a recensé 3 885 individus répartis sur 44 espèces, 36 genres et 16 familles, dont les plus abondantes sont les Chenopodiaceae (22,73 %), les Fabaceae (18,18 %) et les Asteraceae (11,36 %). La dominance des Fabaceae et des Phanérophyte, en particulier *Retama retam*, met en évidence leurs rôles écologiques cruciaux dans la stabilisation des sols et l'enrichissement en azote. L'étude a également révélé une forte influence des facteurs environnementaux, avec un ratio G/S supérieur à 89 % et un ratio F/S au-delà de 43 %, ce qui confirme l'adaptation des espèces aux contraintes locales, notamment à la sécheresse et à la salinité. Une analyse spatio-temporelle de la végétation entre 2015 et 2023, basée sur l'indice MSAVI et des images Landsat, a identifié une dégradation notable des écosystèmes : les zones de parcours dégradés ont augmenté de 40 542,18 hectares, tandis que des zones moins dégradées ont progressé de 43 717,35 hectares. D'ici 2031, les projections indiquent une expansion des terres agricoles (+2 365,49 ha) et des oasis de palmiers dattiers (+1 860,99 ha), associée à une réduction des parcours dégradés (-3 470,3 ha). Les résultats de cette recherche enrichissent la compréhension des Fabaceae et soulignent l'importance de stratégies de conservation basées sur l'implication des communautés locales et le suivi régulier par télédétection et le recours à l'intelligence artificielle dans les analyses SIG.

Mot clés : Ecosystème, Végétation endémiques, Biodiversité, Télédétection, MSAVI, El Oued.

Abstract

This study explores the distribution of endemic vegetation (Family: Fabaceae) in the El Oued region, a Saharan area in Algeria, using ecological, remote sensing, and GIS approaches to map plant biodiversity. As a transitional ecosystem between the Mediterranean and Saharan biomes, this region faces increasing climatic and anthropogenic pressures that threaten its unique biodiversity. A floristic inventory identified 3,885 individuals across 44 species, 36 genera, and 16 families, with the most abundant being Chenopodiaceae (22.73%), Fabaceae (18.18%), and Asteraceae (11.36%). The dominance of Fabaceae and Phanerophyte, particularly *Retama retam*, highlights their critical ecological roles in soil stabilization and nitrogen enrichment. The study also revealed a strong influence of environmental factors, with a G/S ratio over 89% and an F/S ratio above 43%, confirming species adaptations to local constraints, notably drought and salinity. A spatio-temporal analysis of vegetation from 2015 to 2023, based on the MSAVI index and Landsat images, identified significant ecosystem degradation: degraded rangelands increased by 40,542.18 hectares, while less degraded areas grew by 43,717.35 hectares. By 2031, projections indicate an expansion of agricultural land (+2,365.49 ha) and date palm oases (+1,860.99 ha), alongside a reduction in degraded rangelands (-3,470.3 ha). The findings of this research enhance the understanding of Fabaceae and underscore the importance of conservation strategies that involve local communities and regular monitoring through remote sensing, along with the use of artificial intelligence in GIS analyses.

Keywords: Ecosystem, Endemic vegetation, Biodiversity, Remote sensing, MSAVI, El Oued.

الملخص

تستكشف هذه الدراسة توزيع الغطاء النباتي المتوطن (الفصيلة: البقوليات) في منطقة الوادي، وهي منطقة صحراوية في الجزائر، بالاعتماد على مناهج بيئية والاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لفهم ورسم خرائط التنوع النباتي. تُعد المنطقة نظامًا بيئيًا انتقاليًا بين الحوض المتوسطي والصحراوي، وتواجه ضغوطًا مناخية وبشرية متزايدة تهدد تنوعها البيولوجي الفريد. حصر الجرد النباتي 3,885 فردًا موزعين على 44 نوعًا، 36 جنسًا، و16 عائلة، وكان أكثرها وفرةً هي الشجيرات الرمرامية (22.73%)، والبقوليات (18.18%)، والنباتات النجمية (11.36%). يبرز انتشار البقوليات والفانيروفيت، خاصةً الرتم، أدوارها البيئية الهامة في استقرار التربة وإثرائها بالنيتروجين. كما كشفت أكثر من 43%، مما F/S أكثر من 89% ومعدل G/S الدراسة تأثيرًا كبيرًا للعوامل البيئية، حيث بلغ معدل يؤكد تكيف الأنواع مع القيود المحلية، خصوصًا الجفاف والملوحة. وقد حدد تحليل التغير الزمني المكاني، اعتمادًا على مؤشر MSAVI وصور الأقمار الصناعية Landsat للغطاء النباتي بين، تدهورًا ملحوظًا عامي 2015 و2023 في النظم البيئية، حيث زادت مساحات المراعي المتدهورة بمقدار 40,542.18 هكتارًا، بينما زادت المساحات الأقل تدهورًا بمقدار 43,717.35 هكتارًا. بحلول عام 2031، تشير التوقعات إلى توسع الأراضي الزراعية (+2,365.49 هكتارًا) وزيادة الواحات المزروعة بالنخيل (+1,860.99 هكتارًا)، مع انخفاض المراعي المتدهورة (-3,470.3 هكتارًا). تسهم نتائج هذا البحث في فهم دور البقوليات وتؤكد على أهمية استراتيجيات الحفاظ على التنوع البيولوجي القائمة على إشراك المجتمعات المحلية والمتابعة الدورية باستخدام الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي في تحليلات نظم المعلومات الجغرافية

الكلمات المفتاحية: النظام البيئي، الغطاء النباتي المتوطن، التنوع البيولوجي، الاستشعار عن بعد،

الوادي, MSAVI

Liste des figures

Figure 1 :	Niveaux de biodiversité.....	6
Figure 2 :	Répartition de la biodiversité végétale dans le monde.....	8
Figure 3 :	Importance de la biodiversité pour l'humanité.....	12
Figure 4 :	Catégories de diversité.....	13
Figure 5 :	Espèces caractéristiques de la région d'El Oued.....	21
Figure 6 :	Nature et propagation d'une onde électromagnétique	35
Figure 7 :	Spectre électromagnétique.....	36
Figure 8 :	processus de télédétection.....	38
Figure 9 :	Caractéristiques spectrales de la végétation, du sol et de l'eau.....	50
Figure 10 :	Avantages et inconvénients de la télédétection.....	43
Figure 11 :	Composantes essentielles d'un SIG.....	44
Figure 12 :	Fonctionnalités des SIG.....	46
Figure 13 :	Carte de Localisation de la wilaya d'El Oued	54
Figure 14 :	Carte de localisation géographique de la région d'étude.....	55
Figure 15 :	Carte géologique régionale (Grand Erg Oriental).....	56
Figure 16 :	Carte géologique local de la région d'étude.....	57
Figure 17 :	Coupe géologique transversale régionale du Sahara.....	59
Figure 18 :	Carte du réseau hydrographique de la région d'étude.....	61
Figure 19 :	Variations moyennes mensuelles des précipitations, station de Biskra (1987-2022).....	63
Figure 20 :	Variations moyennes mensuelles des précipitations, station d'El Oued (1987-2022).....	63
Figure 21 :	Variations interannuelles des précipitations de Biskra (1987-2022).....	64
Figure 22 :	Variations interannuelles des précipitations d'El Oued (1987-2022).....	64
Figure 23 :	Variation des moyennes mensuelles des températures, stations de Biskra et El Oued (1987-2022).....	64
Figure 24 :	Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de (a) Biskra et (b) EL Oued.....	65
Figure 25 :	Climagramme d'Emberger de la région d'étude (1987- 2022).....	67
Figure 26 :	Carte de géolocalisation montrant la localisation des sites d'échantillonnage dans la partie Nord-Est du Sahara algérien (EL Oued).....	69
Figure 27 :	Ratios richesse familiale/richeesse spécifique (F/S) et richesse générique/richeesse spécifique (G/S) pour différents sites d'étude dans la partie Nord-Est du Sahara algérien (EL Oued).....	74
Figure 28 :	Relations entre la richesse spécifique (S) et la richesse familiale (F) / générique (G) aux différents sites d'échantillonnage dans la partie nord-est du Sahara algérien (El Oued).....	78
Figure 29 :	Le diagramme de Venn à sept ensembles montrant la richesse spécifique des espèces (S) collectées dans différents sites du nord-est du Sahara algérien (El Oued).....	79
Figure 30 :	Cartes thermiques et dendrogrammes (graphiques colorés latéraux) de l'analyse de regroupement hiérarchique (méthode de Ward), représentant la matrice de similarité des espèces entre les sites d'échantillonnage dans la partie nord-est du Sahara algérien (EL Oued).....	81
Figure 31 :	(a) Formes de vie, (b) types morphologiques et (c) types chorologiques Distribution pour différents sites d'échantillonnage de la partie Nord-Est du Sahara algérien (El Oued).....	83
Figure 32 :	le diagramme de venn à sept ensembles montrant la richesse spécifique des espèces (S) des familles de Fabaceae de la région d'étude.....	84
Figure 33 :	Cartes des changements de couverture végétale de la région d'étude, illustrant la répartition spatiale de toutes les classes de végétation pour les années 2015 (a),	

	2023 (b), et l'année projetée 2031 (c).....	95
Figure 34 :	Variation temporelle des précipitations à Biskra (a) et El Oued (b) de 2013 à 2023.....	96
Figure 35 :	Classes d'occupation du sol de 2015 à 2031.....	98
Figure 36 :	Types d'utilisation des terres dans la zone d'étude de 2015 à 2031.....	99
Figure 37 :	Interpolation spatiale de la végétation endémique de la région d'étude (Famille :Fabaceae).....	100

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Le Spectre visible et leur Longueurs d'onde.....	36
Tableau 2 :	Etages climatiques en fonction des valeurs du Q2.....	66
Tableau 3 :	Liste de la diversité taxonomique et de la densité végétale à plusieurs sites différents dans la partie nord-est du Sahara algérien (El Oued).....	75
Tableau 4 :	Paramètres de diversité des communautés végétales dans différents sites du nord-est du Sahara algérien (El Oued).....	78
Tableau 5 :	Les scènes obtenues pour les deux dates 2015 et 2023.....	90
Tableau 6 :	Classes de MSAVI et types de végétation correspondants.....	92
Tableau 7 :	Analyse multi temporelle des types de couverture végétale basés sur les classes MSAVI.....	94

Liste des abréviations

ANOVA : Analyse de la variance

E : L'indice de régularité

H' : Indice de diversité de Shannon

IR : Infrarouge

(J) : Indice de Jaccard

MSAVI: Modified Soil Adjusted Index

N: nombre total d'individus

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

ni : nombre d'individus

OLI : Operational Land Imager

PNDA : Plan National de Développement Agricole

REM : rayonnement électromagnétique

RVB : Rouge Vert Bleu

(S) : Indice de Sørensen

S : Richesse en espèces

SIG : Système d'information géographique

TM: Thematic Mapper

Tmax: Température maximale

Tmin : Température minimale

UTM : Universal Transverse Mercator

INTRODUCTION

Introduction

La biodiversité est un pilier fondamental de la durabilité des écosystèmes et du bien-être humain. Elle désigne la variété des organismes vivants et les processus écologiques auxquels ils participent, un concept devenu essentiel face aux défis environnementaux contemporains (Bakkenes et al, 2002). Cette diversité biologique est cruciale pour la résilience des écosystèmes, particulièrement dans les zones aux climats extrêmes, comme les régions arides, qui abritent des espèces uniques dotées d'adaptations remarquables (Baameur et al., 2021). Ces milieux offrent des exemples de biodiversité singulière, comprenant des espèces endémiques et rares dont les adaptations écologiques et génétiques leur permettent de survivre dans des conditions environnementales hostiles (Médail et Quézel, 1997).

L'Algérie, située dans le sud de la Méditerranée et à la lisière nord du Sahara, bénéficie d'une grande diversité de climats et de paysages, allant des zones méditerranéennes aux vastes étendues désertiques. Ce gradient climatique et topographique influence fortement la répartition de la biodiversité et explique en partie la richesse floristique de ce pays. Plus de 3900 espèces de plantes vasculaires ont été répertoriées en Algérie, dont environ 15 % sont endémiques (Hamel et al, 2013; Sakraoui et al, 2020). La famille des Fabaceae, qui constitue une part importante de cette diversité, joue un rôle clé dans les écosystèmes algériens, particulièrement dans les régions arides. Ces plantes, notamment les genres tels qu'*Astragalus*, *Genista*, *Argyrolobium* et *Retama*, sont essentielles pour la stabilisation des sols et l'enrichissement en azote. En outre, tout en fournissant nourriture et habitat à diverses espèces animales, ce qui contribue à la résilience et au fonctionnement des écosystèmes sahariens (Meddour et al, 2023).

Pour mieux comprendre cette biodiversité et les spécificités des écosystèmes sahariens en Algérie, il est essentiel d'examiner le rôle des familles de plantes particulièrement adaptées aux conditions extrêmes. La région d'El Oued, située dans le Nord Est du Sahara algérien, présente un écosystème modèle caractérisé par une diversité de micro habitats (Ozenda, 1991). La biodiversité des Fabaceae et leur rôle dans les zones arides d'El Oued soulèvent d'importantes questions pour les chercheurs, notamment en matière d'endémisme. L'endémisme, qui se définit par la présence d'espèces uniques à une zone géographique restreinte (Ramade, 2009), constitue un phénomène essentiel pour la biogéographie et l'écologie. La flore d'une zone géographique représente une composante biotique importante et un patrimoine économique et génétique. Avec ses dunes, oueds, sebkhas et palmeraies, la

région d'El Oued offre une diversité d'habitats qui favorisent le développement d'espèces endémiques adaptées aux conditions extrêmes du désert (Ozenda, 1991). Cependant, cette biodiversité est de plus en plus menacée par des pressions anthropiques, telles que le surpâturage et les effets du changement climatique qui entraînent une sécheresse prolongée (Benguerba et al, 2019). La dégradation de l'habitat et la fragmentation des écosystèmes, résultant de ces pressions, perturbent les dynamiques naturelles et compromettent la survie des espèces endémiques, menaçant parfois leur disparition (Aidoud, 2006).

Dans ce contexte, la conservation de la biodiversité dans les écosystèmes arides et désertiques représente un défi de taille (Chenchouni, 2012), qui devient d'autant plus important face aux effets du changement climatique et de l'intensification des pressions humaines (Chehma et Huguenin, 2017; Baameur et al., 2021; Meddour et al., 2023). Bien que la région d'El Oued abrite un patrimoine naturel unique, elle est particulièrement vulnérable aux pressions climatiques et anthropiques croissantes. L'expansion des cultures, la surexploitation des ressources en eau, et les activités humaines en général menacent la biodiversité, la stabilité des écosystèmes locaux et, en particulier, la végétation endémiques de la région (Baameur et al, 2021). Cette thèse vise ainsi à contribuer à l'élaboration de stratégies de conservation et de gestion durable pour les espèces endémiques, en particulier les Fabaceae, qui représentent un groupe végétal essentiel pour la région d'El Oued. En sensibilisant la communauté scientifique et le public à l'importance de ces espèces et à la nécessité de les protéger.

L'objectif principal de cette thèse est d'approfondir notre compréhension de la diversité et de la répartition de la végétation endémique, en particulier les Fabaceae, dans la région d'El Oued, en évaluant cette diversité à l'aide de méthodes quantitatives et qualitatives. Pour ce faire, nous avons réalisé un inventaire floristique des formations végétales de la région, une analyse de la communauté végétale à travers les caractéristiques des plantes, fournissant des informations précieuses sur les interactions entre la végétation et son environnement. Cette étude s'appuie également sur des méthodes de télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG). En intégrant des indices spécifiques tels que le MSAVI, elle vise à cartographier la végétation et évaluer les dynamiques spatio-temporelles de la couverture végétale, dans le but de mieux comprendre l'impact des facteurs climatiques et édaphiques sur la biodiversité (Boufennara et al., 2012). Sur la base de ces analyses, une carte de répartition de la végétation endémique de la région pour la famille des Fabaceae a été produite,

contribuant ainsi à formuler des recommandations pour une gestion durable de la flore saharienne, essentielle pour la préservation des écosystèmes arides face aux défis environnementaux contemporains.

La thèse est structurée en deux parties principales. La première partie aborde les fondements théoriques et se compose de deux chapitres : le premier présente une revue de littérature sur la biodiversité et l'endémisme dans les milieux désertiques, mettant en lumière les enjeux écologiques de la conservation dans ces environnements fragiles ; le second chapitre examine l'application de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude de la répartition de la végétation, soulignant leur utilité pour la gestion des écosystèmes arides. La seconde partie est dédiée aux résultats empiriques : le troisième chapitre valorise la diversité des espèces végétales à travers un inventaire floristique et analyse cet inventaire à l'aide de techniques quantitatives et qualitatives, avec un focus sur la répartition des espèces endémiques de Fabaceae dans la région d'El Oued ; le quatrième chapitre, quant à lui, se concentre sur l'analyse spatio-temporelle de la couverture végétale et propose des prédictions des changements futurs grâce à la télédétection.

PARTIE I : BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : BIODIVERSITE ET ENDEMISME

La richesse biologique constitue une dimension clé de la durabilité des écosystèmes, particulièrement dans les régions caractérisées par des climats extrêmes (Tilman et al., 2014). Dans le contexte de l'Algérie, et plus précisément de la région d'El Oued, cette richesse se manifeste par une diversité significative, notamment au sein des Fabaceae, une famille de plantes qui joue un rôle crucial dans l'équilibre écologique (Quézel et Santa, 1962). L'endémisme, qui se définit par la présence exclusive d'espèces dans une zone géographique restreinte, revêt une importance unique pour comprendre la dynamique des systèmes écologiques locaux (Myers et al., 2000). Cette introduction vise à explorer les concepts de biodiversité en lien avec les Fabaceae, en abordant les enjeux de leur répartition et de leur préservation face aux menaces environnementales.

En mettant l'accent sur trois niveaux fondamentaux de biodiversité, la biodiversité génétique, spécifique et écosystémique, il apparaît essentiel d'analyser comment ces dimensions interagissent au sein des écosystèmes d'El Oued. La biodiversité génétique permet d'évaluer la variabilité au sein des populations de Fabaceae, ce qui est crucial pour leur capacité d'adaptation aux variations climatiques (Frankham et al., 2002). Par ailleurs, la biodiversité spécifique, impliquant une multitude d'espèces endémiques, contribue à la résilience des écosystèmes face aux perturbations. Enfin, la biodiversité écosystémique, qui englobe les variabilités des habitats désertiques, se révèle être un cadre pertinent pour étudier les interrelations entre les différentes espèces et leur environnement (Chapin et al., 2000). Cette approche intégrative incite à considérer les Fabaceae non seulement comme des individus isolés, mais comme des acteurs majeurs d'un réseau complexe d'interactions écologiques.

À l'échelle régionale, la répartition géographique de la biodiversité en Algérie, et en particulier dans le bassin méditerranéen, illustre les adaptations spécifiques des Fabaceae aux conditions arides (Médail et Quézel, 1997). Les études antérieures sur cette thématique suggèrent un fort endémisme au sein de cette famille, reflet des processus de spéciation induits par l'isolement géographique et les conditions environnementales restrictives. Cette recherche aspire à combler certaines lacunes dans les connaissances actuelles sur la distribution des Fabaceae dans les zones désertiques d'El Oued et pourrait fournir des recommandations pour la conservation de la biodiversité locale. Il est décisoire d'approfondir la compréhension des dynamiques écologiques spécifiques à cette région afin d'élaborer des stratégies de gestion durable et efficace des ressources naturelles.

1. Concepts et dimensions de la biodiversité

1.1. Biodiversité

1.1.1. Définition de la biodiversité

Biodiversité ou diversité biologique désigne la variété des espèces vivantes qui peuplent la biosphère. C'est aussi la richesse totale ou nombre total d'espèces vivantes qui peuplent un type d'habitat de surface donnée, la totalité d'un écosystème, d'une région biogéographique ou encore de la biosphère tout entière (Ramade, 2008).

Selon la convention des Nations Unies sur La diversité biologique tenue à Rio De Janeiro en 1992 (CDB, 1992), l'article 2 définit la diversité biologique comme étant la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres systèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie. Cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes.

La biodiversité, entendue comme la variété et la variabilité des formes de vie sur Terre, revêt une importance cruciale pour le maintien des écosystèmes et des services qu'ils fournissent, la biodiversité est essentielle pour assurer la résilience des écosystèmes face aux perturbations environnementales. Cette biodiversité peut être appréhendée à travers plusieurs concepts majeurs, notamment la diversité génétique, spécifique et écosystémique (CBD, 1992). Chacun de ces niveaux interagit de manière dynamique pour favoriser l'adaptation des espèces aux changements environnementaux.

Les contextes historiques et géographiques, notamment ceux des régions arides comme El Oued, influencent fortement cette diversité (Ozenda, 2004). Comprendre ces concepts fondamentaux est primordial pour saisir les enjeux des efforts de conservation qui visent à préserver des espèces uniques dans ces écosystèmes fragiles. En effet, la richesse biologique de ces milieux est souvent mise à mal par la pression humaine et le changement climatique, rendant d'autant plus urgente la nécessité d'études approfondies sur ces thématiques. Une analyse des niveaux de biodiversité révèle comment l'origine et l'évolution des espèces façonnent leur répartition géographique. La diversité génétique constitue la base sur laquelle reposent la diversité spécifique et l'intégrité des écosystèmes.

Enfin, la répartition géographique de la biodiversité est intrinsèquement liée aux spécificités écologiques de chaque région (Médail et Quézel, 1997).

1.1.2. Niveaux de biodiversité

La biodiversité, ou diversité biologique, peut être appréhendée à différents niveaux, chacun offrant une perspective unique sur la variété et la complexité de la vie sur Terre. Les principaux niveaux de biodiversité selon Ramade, (2008) comprennent (Figure 1).

1. Diversité Génétique : la diversité génétique se réfère à la variabilité des gènes et des génotypes au sein des populations et entre les espèces. Elle est essentielle pour l'adaptation des organismes aux changements environnementaux et pour la survie à long terme des espèces.

2. Diversité des Espèces : Ce niveau de biodiversité fait référence à la variété des espèces présentes dans un écosystème donné. Plus il y a d'espèces différentes, plus la biodiversité des espèces est élevée. La conservation de la diversité des espèces est cruciale pour maintenir l'équilibre écologique et la stabilité des écosystèmes.

3. Diversité des Écosystèmes : La diversité des écosystèmes englobe la variété des habitats, des communautés biologiques et des interactions entre les organismes au sein d'un environnement donné. Chaque écosystème a ses propres caractéristiques uniques qui contribuent à la richesse de la biodiversité globale. Cette diversité joue un rôle crucial dans la résilience et la stabilité des systèmes écologiques à grande échelle et fournit une gamme variée de services écosystémiques essentiels pour le bien-être humain.

4. Diversité Fonctionnelle : Ce niveau de biodiversité se réfère aux différentes fonctions et interactions écologiques assurées par les organismes au sein d'un écosystème. Chaque espèce joue un rôle spécifique dans le maintien de l'équilibre écologique et de la productivité des écosystèmes. En comprenant et en préservant ces différents niveaux de biodiversité, nous pouvons contribuer à maintenir la santé des écosystèmes, assurer la durabilité des ressources naturelles et préserver la diversité de la vie sur notre planète.

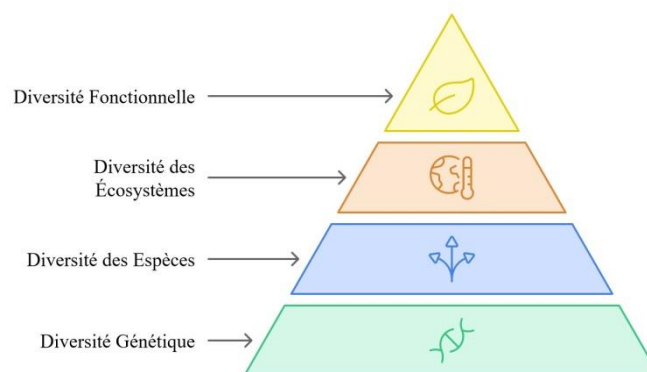


Figure 1 : Niveaux de biodiversité

1.1.3. Répartition géographique de la biodiversité

La biodiversité n'est pas uniformément répartie sur la planète. Certaines régions abritent une richesse biologique exceptionnelle, tandis que d'autres sont relativement pauvres en espèces. Cette distribution inégale est le résultat de facteurs historiques, géographiques, climatiques et écologiques complexes.

1.1.3.1. Biodiversité dans le monde

À l'échelle mondiale, les régions tropicales sont reconnues comme les plus riches en biodiversité. Les forêts tropicales humides, bien qu'elles ne couvrent qu'environ 7% de la surface terrestre, abritent plus de 50% des espèces connues. Ces "points chauds" de biodiversité sont caractérisés par un taux élevé d'endémisme, c'est-à-dire la présence d'espèces qu'on ne trouve nulle part ailleurs (Figure 2).

Parmi les zones les plus remarquables, on peut citer l'Amazonie, le bassin du Congo, et l'archipel indo-malais. Ces régions sont non seulement riches en espèces, mais elles jouent également un rôle crucial dans la régulation du climat mondial et le cycle du carbone (Malhi et al., 2008).

Cependant, la biodiversité n'est pas l'apanage des seules régions tropicales. Les écosystèmes tempérés et boréaux, les milieux marins et les zones arides abritent également une diversité biologique importante, souvent adaptée à des conditions environnementales extrêmes (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

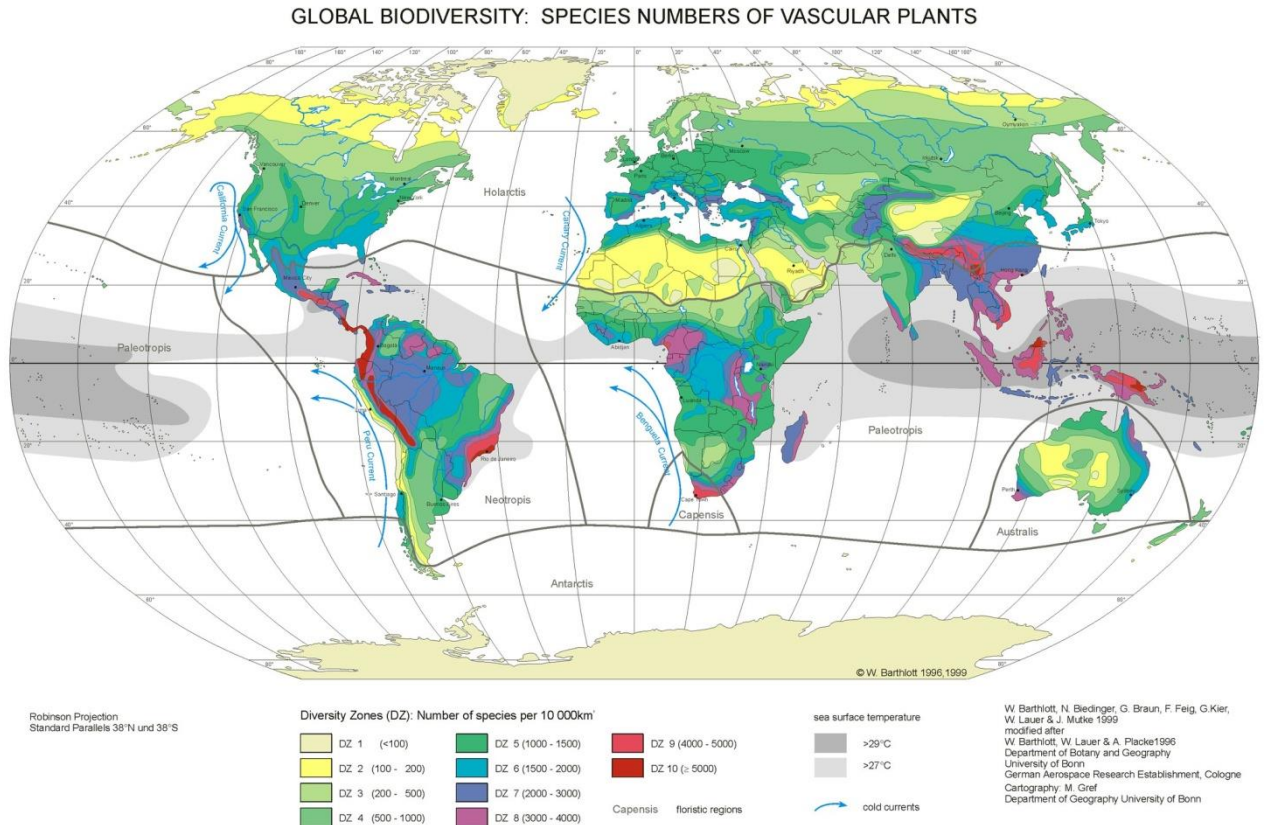


Figure 2 : Répartition de la biodiversité végétale dans le monde (Girod, 2010).

1.1.3.2. Biodiversité dans le bassin méditerranéen

Le bassin méditerranéen est reconnu comme l'un des 34 points chauds de biodiversité à l'échelle mondiale. Cette région, qui ne représente que 1,5% de la surface terrestre, abrite environ 10% des plantes vasculaires connues dans le monde, dont plus de la moitié sont endémiques.

La richesse biologique de cette région s'explique par sa position géographique à la croisée de trois continents, sa topographie variée et son histoire géologique complexe. De plus, l'influence millénaire des activités humaines a contribué à façonner des paysages et des écosystèmes uniques (Médail et Quézel, 1999).

1.1.3.3. Biodiversité en Algérie

L'Algérie, située dans la partie sud du bassin méditerranéen, présente une biodiversité remarquable due à sa position géographique, sa diversité de climats et de reliefs. Le pays abrite une flore estimée à plus de 3 000 espèces de plantes vasculaires, dont environ 15% sont endémiques (Quézel et Santa, 1963).

La diversité faunistique est également importante, avec plus de 100 espèces de mammifères, 400 espèces d'oiseaux et une riche diversité d'insectes et de reptiles. Cependant, comme dans de nombreuses régions du monde, la biodiversité algérienne est menacée par divers facteurs anthropiques, notamment la destruction des habitats, la surexploitation des ressources naturelles et les changements climatiques

La préservation de cette biodiversité, tant à l'échelle mondiale que régionale, représente un défi majeur pour l'humanité. Elle nécessite des efforts concertés de conservation, une gestion durable des ressources naturelles et une meilleure compréhension des interactions complexes au sein des écosystèmes (Aidoud et al., 2011).

1.1.4. Diversité floristique

La diversité floristique, ou diversité des plantes, est une composante essentielle de la biodiversité globale. Elle englobe la variété des espèces végétales, leurs interactions écologiques et leur distribution géographique. Cette diversité joue un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes, la régulation du climat et la fourniture de services écosystémiques essentiels. À l'échelle mondiale, on estime qu'il existe environ 391 000 espèces de plantes vasculaires connues, dont 369 000 plantes à fleurs (Willis, 2017). Seulement, cette richesse n'est pas uniformément répartie. Certaines régions, notamment les forêts tropicales et les points chauds de biodiversité méditerranéens, abritent une diversité floristique particulièrement élevée (Myers et al., 2000).

1.1.4.1. Diversité floristique en Algérie

L'Algérie, de par sa position géographique stratégique et sa diversité de climats et de reliefs, possède une flore remarquablement riche et variée. Le pays s'étend sur trois zones bioclimatiques distinctes : la zone méditerranéenne au nord, les hauts plateaux au centre, et la zone saharienne au sud. Selon les estimations récentes, la flore algérienne compte plus de 3 900 espèces et sous-espèces de plantes vasculaires, appartenant à 150 familles botaniques. Parmi celles-ci, environ 15% sont considérées comme endémiques, c'est-à-dire qu'elles ne se trouvent naturellement nulle part ailleurs dans le monde (Dobignard et Chatelain, 2013).

La diversité floristique algérienne se manifeste à travers une variété d'écosystèmes et d'espèces remarquables. Dans les régions côtières et montagneuses du nord, on trouve des forêts méditerranéennes caractérisées par des espèces comme le chêne-liège (*Quercus suber*), le chêne vert (*Quercus ilex*) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis*). Les hauts plateaux abritent une végétation steppique adaptée aux conditions semi-arides, dominée par l'alfa (*Stipa*

tenacissima) et l'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) (Benabadji et al., 2007). Dans le Sahara, malgré les conditions extrêmes, on trouve une flore adaptée à l'aridité, comme le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) dans les oasis, et diverses espèces d'acacias et de tamarix dans les oueds. Parmi les espèces endémiques remarquables, on peut citer *Abies numidica*, un sapin endémique des monts Babors, *Cupressus dupreziana*, un cyprès endémique du Tassili n'Ajjer, et le *Myrtus nivellei*, un myrte saharien rare (Médail et Quézel, 1999).

1.1.5. Importance et valeur de la biodiversité

La biodiversité, qui englobe la diversité des gènes, des espèces et des écosystèmes, est d'une importance capitale pour le fonctionnement de la planète et le bien-être humain. Sa valeur peut être appréhendée sous différents angles : écologique, économique, social et culturel.

1.1.5.1. Importance écologique

D'un point de vue écologique, la biodiversité est essentielle au maintien des processus écosystémiques et à la résilience des écosystèmes face aux perturbations. La perte de biodiversité peut altérer le fonctionnement des écosystèmes aussi dramatiquement que d'autres formes de stress environnemental global. La diversité des espèces contribue à la stabilité des écosystèmes, à la régulation des cycles biogéochimiques et à la productivité primaire (Cardinale et al., 2012),

1.1.5.2. Valeur économique

La biodiversité a une valeur économique considérable, bien que souvent sous-estimée. Selon Costanza et al. (2014), la valeur annuelle globale des services écosystémiques était estimée à 125 billions de dollars en 2011. Ces services incluent la pollinisation des cultures, la purification de l'eau, la séquestration du carbone et la fourniture de ressources génétiques pour l'agriculture et la médecine. Par exemple, plus de 75% des cultures alimentaires mondiales dépendent de la pollinisation animale.

1.1.5.3. Importance sociale et culturelle

La biodiversité joue également un rôle crucial dans les systèmes sociaux et culturels. De nombreuses communautés, en particulier les peuples autochtones, dépendent directement de la biodiversité pour leur subsistance, leur santé et leur identité culturelle. Les écosystèmes naturels fournissent des espaces de loisirs, d'éducation et de bien-être mental, contribuant ainsi à la qualité de vie humaine (Díaz et al., 2018).

1.1.5.4. Valeur intrinsèque et éthique

Au-delà de son utilité pour l'homme, la biodiversité a une valeur intrinsèque, chaque espèce a le droit d'exister indépendamment de son utilité perçue pour l'humanité. Cette perspective éthique souligne notre responsabilité morale de préserver la biodiversité pour les générations futures et pour elle-même (Mouysset, 2021).

1.1.5.5. Biodiversité et santé humaine

La biodiversité est intimement liée à la santé humaine (Figure 3). Elle fournit des ressources médicinales, contribue à la régulation des maladies et soutient la sécurité alimentaire. Selon Hautereau-Boutonnet (2017), la biodiversité sous-tend le fonctionnement des écosystèmes dont nous dépendons pour notre alimentation et notre eau douce; elle aide à réguler le climat, les inondations et les maladies.

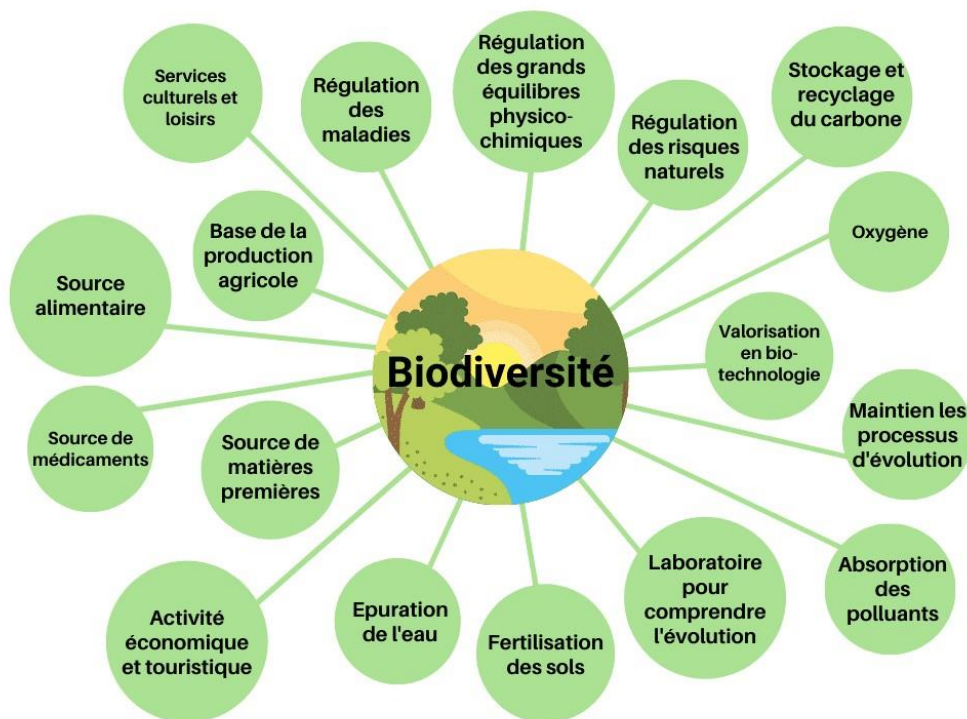


Figure 3: Importance de la biodiversité pour l'humanité (Díaz et al., 2018).

1.1.6. Niveaux de mesure de la biodiversité

La biodiversité peut être mesurée à différents niveaux d'organisation biologique : génétique, spécifique et écosystémique (Loreau et al., 2024).

1. Diversité génétique : Elle se réfère à la variété des gènes au sein d'une espèce ou d'une population. Sa mesure implique des techniques moléculaires comme le séquençage de l'ADN et l'analyse des marqueurs génétiques.

2. Diversité spécifique : C'est le niveau le plus couramment mesuré. Il concerne la variété des espèces dans un écosystème ou une région donnée.

3. Diversité écosystémique : Elle englobe la diversité des habitats, des communautés biotiques et des processus écologiques dans une zone donnée.

1.1.6.1. Indices de diversité spécifique

Plusieurs indices ont été développés pour quantifier la diversité spécifique. Les plus couramment utilisés sont (Magurran, 2004) :

1. Richesse spécifique : C'est simplement le nombre d'espèces présentes dans un échantillon ou une zone donnée. Bien que facile à comprendre, cet indice ne tient pas compte de l'abondance relative des espèces.

2. Indice de Shannon-Wiener (H') : Cet indice prend en compte à la fois le nombre d'espèces et leur abondance relative. Il est calculé selon la formule :

$$H' = -\sum (p_i * \ln p_i)$$

où p_i est la proportion d'individus appartenant à l'espèce i .

3. Indice de Simpson (D) : Il mesure la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard dans un échantillon appartiennent à la même espèce. Sa formule est :

$$D = 1 - \sum (p_i^2)$$

où p_i est la proportion d'individus appartenant à l'espèce i .

4. Indice de Pielou (J') : C'est une mesure de l'équitabilité, c'est-à-dire de la répartition des individus entre les espèces. Il est calculé en divisant l'indice de Shannon par le logarithme du nombre d'espèces.

1.1.6.2. Méthodes d'échantillonnage

La mesure précise de la biodiversité dépend fortement des méthodes d'échantillonnage utilisées. La mesure de la biodiversité la plus fréquemment utilisée est la richesse en espèces, au point qu'on a parfois tendance à les confondre à tort. Lors de l'évaluation de la diversité, il est crucial de ne pas mélanger les concepts de diversité et de dominance. On distingue quatre catégories de diversité (α , β , γ et δ) (Figure 4), chacune ayant sa propre signification (Whittaker, 1972):

1. La diversité α , représente le nombre d'espèces au sein d'un écosystème local.

2. La diversité β , permet de comparer la composition en espèces entre différents écosystèmes. Elle montre comment la diversité α évolue d'un écosystème à l'autre et indique le taux de renouvellement des espèces entre habitats.

3. La diversité γ , ou diversité du paysage, englobe à la fois la diversité α et β . Elle représente la diversité totale à l'échelle d'un paysage, celui-ci étant considéré comme un ensemble complexe d'écosystèmes interconnectés.

4. La diversité δ , ou diversité inter-région, est un indicateur de similarité entre différentes régions.

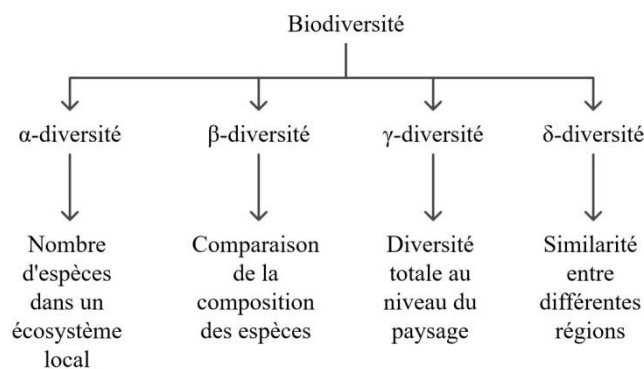


Figure 4: Catégories de diversité (Whittaker, 1972)

1.1.6.3. Nouvelles approches

Les nouvelles approches pour évaluer la biodiversité incluent (Marcon, 2015):

- **Le métabarcoding environnemental**, qui utilise l'ADN présent dans l'environnement pour identifier les espèces, offrant une évaluation rapide.
- **La télédétection**, qui emploie des technologies satellitaires et aériennes pour mesurer la diversité des habitats et estimer la richesse spécifique à grande échelle, ainsi que
- **Les approches fonctionnelles**, qui se concentrent sur les traits fonctionnels des espèces plutôt que sur leur identité taxonomique, fournissant ainsi des informations sur le fonctionnement des écosystèmes.

La mesure de la biodiversité reste confrontée à des défis tels que la difficulté d'échantillonner certains groupes taxonomiques, la variabilité temporelle et spatiale de la biodiversité, et les biais taxonomiques, qui nécessitent une attention particulière pour être surmontés.

Pereira et al. (2013) ont souligné qu'il est décisif de développer des indicateurs de biodiversité qui soient pertinents pour les décideurs politiques et compréhensibles par le grand

public. La mesure de la biodiversité est un domaine en constante évolution, intégrant de nouvelles technologies et approches pour mieux comprendre et conserver la diversité de la vie sur Terre.

1.1.6.4. Défis et conservation

Malgré son importance cruciale, la biodiversité est menacée à l'échelle mondiale par des facteurs tels que la destruction des habitats, la surexploitation, les espèces invasives et le changement climatique. La conservation de la biodiversité est donc un défi majeur du 21^e siècle, nécessitant des efforts concertés à l'échelle locale, nationale et internationale. La valeur de la biodiversité est multidimensionnelle et fondamentale pour la vie sur Terre. Sa conservation n'est pas seulement une question environnementale, mais aussi un impératif économique, social et éthique pour assurer un avenir durable.

En Algérie, la richesse, la diversité floristique fait face à de nombreuses menaces, notamment la déforestation, l'urbanisation, le surpâturage et les changements climatiques (Aidoud et al., 2011). La surexploitation de certaines espèces médicinales ou aromatiques pose également un problème de conservation. Face à ces défis, l'Algérie a mis en place un réseau d'aires protégées, comprenant des parcs nationaux et des réserves naturelles, visant à préserver les écosystèmes les plus représentatifs et les espèces menacées. La conservation de cette diversité floristique unique nécessite une approche intégrée, combinant la recherche scientifique, la gestion durable des ressources naturelles et l'éducation environnementale. Elle représente un enjeu majeur pour la préservation du patrimoine naturel algérien et la durabilité des services écosystémiques qu'il fournit (Hamilton, 2006).

2. Endémisme et Spéciation

2.1. Endémisme :

Ramade, (2009) a défini l'endémisme comme la présence exclusive d'un taxon (espèce, genre, famille) dans une aire géographique donnée. Il souligne que l'endémisme est un phénomène fondamental en biogéographie et en écologie, reflétant l'histoire évolutive des espèces et leurs adaptations à des environnements spécifiques.

L'endémisme peut varier en échelle et en degré. L'endémisme peut s'appliquer à différentes échelles spatiales, des micro-habitats aux continents entiers, et peut concerner des taxons de différents niveaux, des sous-espèces aux familles entières, les zones à fort taux d'endémisme représentent des réservoirs irremplaçables de biodiversité, essentiels pour la conservation à l'échelle mondiale.

2.2. Spéciation :

Pour Ramade, (2009) la spéciation est le processus évolutif par lequel de nouvelles espèces se forment. Il s'appuie sur le concept biologique de l'espèce, définissant les espèces comme des groupes de populations naturelles interfécondes et reproductivement isolées des autres groupes. La spéciation allopatrique soit probablement le mode le plus commun, la spéciation sympatrique et parapatricque jouent également des rôles importants dans la diversification des espèces, en particulier chez certains groupes comme les insectes phytophages et les poissons des grands lacs.

2.2.1. Modes de spéciation :

A) Spéciation allopatrique :

C'est le mode de spéciation le plus couramment observé. Il se produit lorsqu'une population est divisée par une barrière géographique, conduisant à l'isolement reproductif et à la divergence génétique (Ramade, 2009).

B) Spéciation sympatrique :

Ramade, (2009) admet la possibilité de spéciation sympatrique, bien qu'il la considère comme moins fréquente. Ce mode de spéciation se produit au sein d'une même zone géographique, souvent due à des changements écologiques ou comportementaux.

C) Spéciation parapatricque :

Ce mode intermédiaire se produit lorsque les populations divergent le long d'un gradient environnemental, sans barrière géographique nette.

Ramade, (2009) souligne l'importance des facteurs écologiques dans la spéciation. Il met en avant le rôle de l'adaptation à différentes niches écologiques comme moteur de la divergence entre populations, même en l'absence de barrières géographiques strictes.

2.3. Lien entre endémisme et spéciation :

D'après Ramade, (2009), l'endémisme élevé dans certaines régions est souvent le résultat de taux de spéciation élevés combinés à un faible taux d'extinction, en particulier dans les zones géographiquement isolées ou écologiquement stables sur de longues périodes, voit un lien étroit entre l'endémisme et la spéciation. Il considère que l'endémisme est souvent le résultat de processus de spéciation, en particulier dans des environnements isolés comme les îles ou les lacs anciens. Les espèces endémiques sont, selon lui, des témoins de l'histoire évolutive d'une région et des processus de spéciation qui s'y sont déroulés.

3. Les écosystèmes arides : caractéristiques climatiques, pédologiques et végétales

Les écosystèmes arides, caractérisés par une faible pluviométrie et une forte évapotranspiration, couvrent environ 41% de la surface terrestre mondiale. Ces environnements, bien que souvent perçus comme hostiles, abritent une biodiversité unique et jouent un rôle crucial dans les cycles biogéochimiques globaux. Répartis principalement autour des tropiques du Cancer et du Capricorne, ces écosystèmes font face à des défis croissants liés aux changements climatiques et à la pression anthropique (Huang et al., 2016).

3.1. Caractéristiques climatiques

Le climat des zones arides est défini par des précipitations faibles et irrégulières, généralement inférieures à 250 mm par an. Cette rareté des pluies s'accompagne souvent d'une forte variabilité interannuelle, pouvant atteindre 100% dans certaines régions. Les températures y sont extrêmes, avec des moyennes annuelles élevées et des amplitudes thermiques journalières et saisonnières importantes. Par exemple, dans le désert du Sahara, les températures diurnes peuvent dépasser 50°C, pour chuter à près de 0°C la nuit (Rahdari et Rodríguez-Seijo, 2021).

L'évapotranspiration potentielle dans ces régions excède largement les précipitations, créant un déficit hydrique chronique. Ce bilan hydrique négatif est accentué par des phénomènes climatiques globaux qui peuvent exacerber les périodes de sécheresse, la combinaison de ces facteurs climatiques façonne profondément les caractéristiques pédologiques et biologiques de ces écosystèmes (Wang et al., 2012).

3.2. Caractéristiques pédologiques

Les sols des écosystèmes arides présentent des propriétés distinctes, résultant de processus pédogénétiques spécifiques. On y trouve principalement des aridisols et des entisols, caractérisés par une faible teneur en matière organique (souvent < 1%) et une structure peu développée. La formation de ces sols est lente, due à la rareté des précipitations et à la faible activité biologique. Une caractéristique majeure de ces sols est leur tendance à la salinisation, résultant de l'accumulation de sels solubles en surface due à une évaporation intense. Ce processus peut conduire à la formation de croûtes salines, limitant davantage la croissance végétale. De plus, ces sols sont particulièrement vulnérables à l'érosion éolienne et hydrique, cette dernière étant paradoxalement intense lors des rares mais violents épisodes pluvieux (Aidoud et al., 2011).

3.3. Végétation des écosystèmes arides

3.3.1. Nature de la végétation

La flore des milieux arides a développé des adaptations remarquables pour survivre dans ces conditions extrêmes. Les adaptations morphologiques incluent la réduction de la surface foliaire, la présence de cuticules épaisses et de trichomes, ainsi que le développement de systèmes racinaires extensifs. Les adaptations physiologiques sont tout aussi impressionnantes. Certaines plantes, comme les cactus, ont adopté le métabolisme CAM (Crassulacean Acid Metabolism), leur permettant d'ouvrir leurs stomates la nuit pour limiter les pertes en eau. D'autres espèces entrent en dormance pendant les périodes sèches, ne reprenant leur croissance qu'avec le retour des pluies.

La diversité des formes de vie est remarquable, incluant des plantes annuelles à cycle court (éphémères du désert), des vivaces ligneuses, et des succulentes. Cette diversité permet une exploitation optimale des ressources limitées et une résilience face aux conditions changeantes (Ogle et Reynolds, 2004).

3.3.2. Distribution de la végétation

La répartition spatiale de la végétation dans les écosystèmes arides est fortement influencée par la microtopographie et la disponibilité en eau. On observe souvent des patterns de distribution en mosaïque ou en bandes, reflétant les variations locales des conditions édaphiques et hydriques. La végétation peut se concentrer dans les dépressions où l'eau s'accumule, formant des "îlots de fertilité".

La dynamique temporelle de cette végétation est marquée par une forte saisonnalité et une variabilité interannuelle. Les années pluvieuses peuvent déclencher des "explosions" de végétation éphémère, transformant temporairement le paysage. Cette variabilité temporelle joue un rôle crucial dans le maintien de la biodiversité et la résilience de ces écosystèmes (Schlesinger et al., 1990).

Les écosystèmes arides, caractérisés par leur climat extrême, leurs sols fragiles et leur végétation adaptée, représentent des systèmes écologiques uniques et complexes. Leur conservation et leur gestion durable sont capitales, non seulement pour la préservation de leur biodiversité unique, mais aussi pour leur rôle dans les cycles biogéochimiques globaux et leur importance socio-économique pour les populations locales. Les recherches futures devront se concentrer sur la compréhension des mécanismes de résilience de ces écosystèmes face aux

changements globaux, afin de développer des stratégies de gestion adaptées à ces environnements fragiles mais essentiels (Maestre et al., 2012).

4. Niveaux de biodiversité dans la région d'El Oued

La région d'El Oued présente un écosystème unique caractérisé par des conditions climatiques arides et des paysages désertiques. Malgré ces conditions apparemment hostiles, la zone abrite une biodiversité remarquable, adaptée à cet environnement extrême.

La flore de la région est dominée par des espèces xérophytes, capables de résister à de longues périodes de sécheresse. Ozenda, (1991) a identifié plus de 130 espèces végétales dans la région, dont de nombreuses plantes endémiques du Sahara. Les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera*) jouent un rôle crucial dans l'écosystème local, fournissant non seulement une ressource économique importante, mais aussi un habitat pour de nombreuses espèces animales.

La faune de la région d'El Oued est également diversifiée, bien que moins visible que la flore. Les invertébrés, en particulier les insectes, constituent une part importante de la biodiversité locale. Les arthropodes, tels que les scorpions et les araignées, sont également bien représentés et jouent un rôle crucial dans les chaînes alimentaires locales.

Les oiseaux, bien que moins nombreux en termes d'espèces résidentes, sont représentés par des espèces migratrices qui utilisent la région comme halte lors de leurs déplacements saisonniers. Les mammifères, bien que moins visibles, sont également présents dans la région. Des espèces comme la gazelle dorcas (*Gazella dorcas*) et le fennec (*Vulpes zerda*) sont adaptées aux conditions arides et jouent un rôle important dans l'écosystème local (Irzagh et al., 2020).

Cependant, la biodiversité de la région d'El Oued est menacée par divers facteurs anthropiques. L'urbanisation croissante, l'agriculture intensive et la surexploitation des ressources en eau mettent en péril l'équilibre fragile de cet écosystème désertique. Bouselsal et Saibi (2022) ont souligné l'impact négatif de ces activités sur la biodiversité locale, notamment la réduction des habitats naturels et la pollution des nappes phréatiques.

La conservation de la biodiversité dans la région d'El Oued représente un défi majeur pour les autorités locales et les scientifiques. Des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre la dynamique de cet écosystème unique et développer des stratégies de conservation efficaces. La sensibilisation de la population locale à l'importance

de la biodiversité et la promotion de pratiques durables dans l'agriculture et le tourisme sont essentielles pour préserver ce patrimoine naturel unique.

La région d'El Oued abrite une biodiversité remarquable, adaptée aux conditions extrêmes du désert saharien. Cette richesse biologique, bien que menacée par les activités humaines, représente un patrimoine naturel inestimable qui mérite d'être préservé et étudié davantage.

La diversité biologique est un concept multidimensionnel qui inclut non seulement la variété des espèces, mais aussi leurs interactions au sein des écosystèmes. Les recherches préliminaires montrent que la biodiversité d'El Oued est soumise à des pressions croissantes, notamment en raison de la surexploitation des ressources naturelles et des effets du changement climatique (Le Houérou, 2001). Comprendre les niveaux de biodiversité est essentiel pour un développement durable et pour la mise en place de stratégies de conservation adaptées.

L'analyse des niveaux de biodiversité englobe la diversité génétique, spécifique et écosystémique, chacune ayant des implications distinctes pour la robustesse des écosystèmes. La diversité génétique au sein des espèces de la région d'El Oued est vitale pour leur adaptation aux conditions environnementales variables (Frankham et al., 2002). En parallèle, la diversité spécifique représente la variété des espèces présentes, contribuant ainsi à la résilience des écosystèmes face aux perturbations. Selon Zedam et al., (2022), l'endémisme dans les zones arides d'Algérie, ainsi que la richesse en espèces comme celles observées à Chott El Hodna, témoigne de la nécessité de stratégies de conservation ciblées. Il est impératif d'évaluer ces niveaux afin de mieux comprendre les interrelations entre les espèces et leur environnement.

La région d'El Oued, en tant que zone aride, présente des défis uniques en matière de conservation. La présence d'espèces endémiques et rares, telles que celles de la famille des Fabaceae, nécessite une attention particulière. Les études antérieures illustrent que même dans un contexte de menaces environnementales, la région conserve une diversité riche et distinctive. La mise en place d'initiatives de conservation efficaces, enracinées dans une compréhension théorique des niveaux de biodiversité, est essentielle pour préserver les écosystèmes fragiles de cette zone. La sauvegarde de ces espèces est non seulement une question de protection de l'environnement, mais également un impératif pour le futur de la biodiversité en Algérie (Chriqui et al., 2024).

5. Distribution géographique de la biodiversité dans la région d'El Oued

La région d'El Oued se distingue par une distribution géographique complexe de sa biodiversité, influencée par la diversité des paysages et des microclimats. Cette étude a pour objectif d'examiner la répartition spatiale des espèces végétales et animales dans cette zone aride, afin de mieux comprendre les facteurs qui façonnent la richesse et la distribution de la biodiversité locale. La région se caractérise par une topographie variée, incluant des dunes de sable, des lits d'oueds, des sebkhas et des palmeraies oasiennes. Cette diversité de paysages crée une hétérogénéité des conditions écologiques, offrant ainsi des niches écologiques pour une grande variété d'espèces (Hanafi et al., 2024). La distribution de la flore suit un gradient lié à la disponibilité en eau. Dans les zones les plus arides, dominées par les dunes de sable, la végétation est clairsemée et dominée par des espèces xérophytes adaptées à la sécheresse, comme le drinn (*Aristida pungens*). En revanche, les oueds et les zones humides des sebkhas abritent une végétation plus dense et diversifiée, avec des espèces comme le tamaris (*Tamarix sp.*) et le jonc (*Juncus sp.*) (Chenchouni, 2012). La distribution de la faune suit également un patron lié à la disponibilité en eau et à la qualité des habitats. Les invertébrés, tels que les coléoptères et les lépidoptères, sont plus diversifiés dans les zones où la végétation est plus abondante, comme les palmeraies et les oueds. Les reptiles occupent une variété d'habitats, des dunes de sable aux sebkhas, en fonction de leurs exigences écologiques spécifiques. Les mammifères, comme la gazelle dorcas (*Gazella dorcas*) et le fennec (*Vulpes zerda*), utilisent une gamme d'habitats, des zones désertiques aux palmeraies, selon leurs besoins en nourriture et en eau. Certaines espèces, comme le mouflon à manchettes (*Ammotragus Lervia*), sont plus fréquemment observées dans les zones montagneuses (Irzagh et al., 2020). Les oiseaux, bien que moins diversifiés en tant que espèces résidentes, utilisent la région d'El Oued comme halte migratoire, exploitant divers habitats selon les saisons (Chiheb et al., 2021). Les zones humides des sebkhas et les palmeraies sont déterminantes pour ces espèces migratrices. Les activités anthropiques, telles que l'urbanisation et l'agriculture intensive, ont un impact négatif sur la biodiversité. La fragmentation des habitats et la dégradation des écosystèmes menacent la capacité de certaines espèces à se maintenir dans leurs aires de répartition historiques (Davis, 1996). La région d'El Oued présente une biodiversité complexe, influencée par ses paysages variés et ses conditions écologiques. Comprendre cette répartition est capital pour la conservation de cet écosystème unique. La flore endémique rare et les menaces anthropiques révèlent des défis pour la survie des espèces (Ozenda, 2004). Des études sur la répartition géographique permettent d'évaluer la richesse des espèces et leur vulnérabilité. L'analyse du patrimoine floral met en évidence l'interconnexion des éléments de

l'écosystème, soulignant la nécessité d'inventaires exhaustifs (Figure 5). Un suivi diligent est essentiel pour préserver l'intégrité des habitats naturels et garantir la durabilité de la biodiversité d'El Oued.

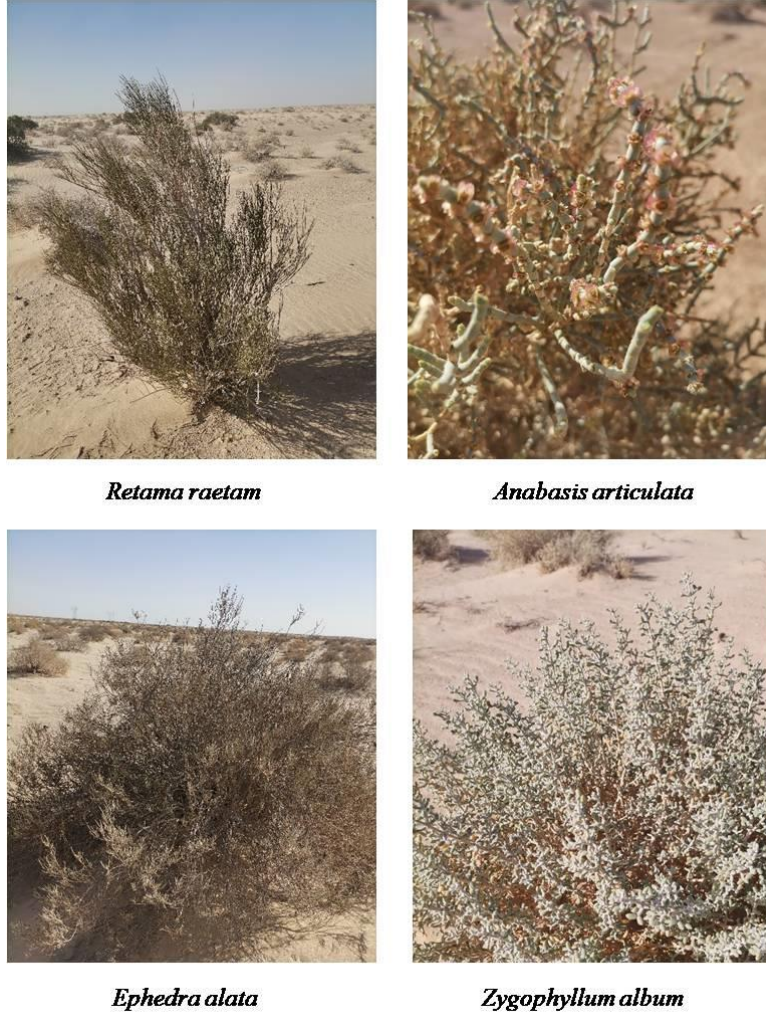


Figure 5 : Espèces caractéristiques de la région d'El Oued

6. L'importance et la distribution spatiale des espèces endémiques

6.1. L'endémisme dans la région d'El Oued

La région d'El Oued, présente un écosystème unique caractérisé par des conditions arides extrêmes. L'endémisme dans cette région est le résultat de l'adaptation des espèces à ces conditions environnementales spécifiques sur de longues périodes géologiques (Quézel, 1978).

Les écosystèmes désertiques, comme celui d'El Oued, sont souvent considérés comme des "îles" écologiques, isolées par des barrières climatiques et géographiques. Cette isolation

favorise l'évolution d'espèces endémiques adaptées aux conditions locales. Dans le Sahara, on estime que près de 20% de la flore est endémique, ce qui témoigne de l'importance de ces écosystèmes pour la biodiversité globale (Le Houérou, 2001).

La flore d'El Oued est principalement composée d'espèces xérophytes adaptées à la sécheresse. Bien que les données spécifiques sur l'endémisme à El Oued soient limitées, des études sur la flore saharienne en Algérie ont révélé plusieurs espèces endémiques. Sakraoui et al., (2020) ont identifié plusieurs espèces endémiques dans les régions arides algériennes, dont certaines pourraient potentiellement se trouver dans la région d'El Oued. Les palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera*), bien que non endémiques à El Oued, jouent un rôle déterminant dans l'écosystème local et l'économie de la région. Les oasis créées par ces palmiers fournissent des microhabitats qui peuvent abriter des espèces endémiques.

La faune de la région présente également des adaptations uniques aux conditions désertiques. Certains reptiles et petits mammifères pourraient présenter des caractéristiques endémiques locales, bien que des études plus approfondies soient nécessaires pour confirmer l'étendue de l'endémisme faunique dans la région d'El Oued spécifiquement.

Les dunes de sable, caractéristiques de la région d'El Oued, créent des microhabitats spécifiques qui peuvent favoriser l'endémisme. Les plantes psammophiles (adaptées aux sols sableux) en particulier peuvent présenter des adaptations uniques à ces environnements (Bel et Ashkenazy, 2014).

L'endémisme dans les régions arides comme El Oued est menacé par plusieurs facteurs. Le changement climatique, en particulier, pose un défi majeur pour la survie des espèces endémiques adaptées à des conditions environnementales spécifiques (Thomas et al., 2004). L'augmentation des températures et la modification des régimes de précipitations pourraient dépasser les capacités d'adaptation de certaines espèces endémiques.

De plus, les activités humaines telles que l'agriculture intensive, l'urbanisation et la surexploitation des ressources en eau menacent les habitats naturels et, par conséquent, les espèces endémiques. Dans le cas d'El Oued, l'expansion des cultures de palmiers dattiers et l'utilisation intensive des eaux souterraines pourraient avoir un impact sur les écosystèmes naturels et les espèces qui y sont associées.

La conservation des espèces endémiques dans la région d'El Oued nécessite une approche intégrée. Des études approfondies sur la biodiversité locale sont essentielles pour

identifier et cataloguer les espèces endémiques. La création d'aires protégées, la gestion durable des ressources en eau et la sensibilisation de la population locale à l'importance de la biodiversité endémique sont des stratégies clés pour la préservation de ces espèces uniques (Chenchouni, 2012).

Bien que les données spécifiques sur l'endémisme à El Oued soient limitées, la région présente un potentiel significatif en termes de biodiversité unique. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre et protéger les espèces endémiques de cette région saharienne fascinante.

7. Généralités sur la famille des *Fabaceae*

La famille des Fabaceae, également connue sous le nom de Leguminosae, est l'une des plus importantes et diversifiées parmi les plantes à fleurs. Avec environ 750 genres et plus de 19 500 espèces connues, elle représente la troisième plus grande famille d'Angiospermes après les Orchidaceae et les Asteraceae. Les Fabaceae sont réparties dans le monde entier, des régions tropicales aux zones tempérées, et occupent une variété d'habitats allant des forêts tropicales humides aux déserts arides (Lewis et al., 2005).

Traditionnellement, la famille était divisée en trois sous-familles : Caesalpinioideae, Mimosoideae et Papilionoideae. Cependant, des études phylogénétiques récentes ont conduit à une révision de cette classification, reconnaissant désormais six sous-familles : Caesalpinioideae (incluant les anciennes Mimosoideae), Cercidoideae, Detarioideae, Dialioideae, Duparquetioideae et Papilionoideae (Lewis et al., 2005).

Les Fabaceae sont caractérisées par leur fruit distinct appelé gousse ou légume, d'où leur nom commun de "légumineuses". Cette structure unique dérive d'un carpelle unique et s'ouvre généralement le long de deux sutures à maturité. La morphologie florale varie considérablement au sein de la famille, allant des fleurs actinomorphes des Mimosoideae aux fleurs zygomorphes caractéristiques des Papilionoideae, souvent décrites comme papilionacées ou en forme de papillon (Sprent, 2009).

Une caractéristique remarquable de nombreuses Fabaceae est leur capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium* ou apparentées. Cette association se manifeste par la formation de nodules racinaires où les bactéries convertissent l'azote atmosphérique en une forme utilisable par la plante (Sprent,

2009). Cette capacité confère aux légumineuses un avantage écologique significatif et explique en partie leur succès évolutif et leur importance agronomique.

Les Fabaceae jouent un rôle important dans l'agriculture mondiale. Elles constituent la deuxième famille de plantes la plus importante économiquement après les Poaceae (graminées). Des cultures majeures comme le soja (*Glycine max*), l'arachide (*Arachis hypogaea*), les haricots (*Phaseolus* spp.), les pois (*Pisum sativum*) et les lentilles (*Lens culinaris*) sont des sources essentielles de protéines végétales pour l'alimentation humaine et animale. En plus de leur importance alimentaire, les Fabaceae ont de nombreuses autres utilisations. Certaines espèces sont cultivées comme plantes fourragères (par exemple, la luzerne, *Medicago sativa*), d'autres pour la production de bois (comme le robinier faux-acacia, *Robinia pseudoacacia*), ou encore pour l'extraction de composés médicinaux ou industriels (Graham et Vance, 2003).

Du point de vue écologique, les Fabaceae jouent un rôle crucial dans de nombreux écosystèmes. Leur capacité à fixer l'azote en fait des espèces pionnières importantes dans la succession écologique et la restauration des sols appauvris. De plus, de nombreuses espèces de Fabaceae sont impliquées dans des interactions complexes avec d'autres organismes, notamment des pollinisateurs et des herbivores, contribuant ainsi à la biodiversité globale des écosystèmes (Sprent, 2009).

La recherche sur les Fabaceae continue d'apporter des connaissances précieuses dans divers domaines de la biologie, de l'écologie à la génomique. Les avancées dans la compréhension de la fixation de l'azote, par exemple, pourraient avoir des implications majeures pour l'agriculture durable et la réduction de l'utilisation d'engrais azotés synthétiques (Graham et Vance, 2003).

La famille des Fabaceae, par sa diversité, son importance économique et écologique, et ses caractéristiques biologiques uniques, reste un sujet d'étude fascinant et crucial pour la botanique, l'agronomie et l'écologie.

7.1. Caractères botaniques des Fabaceae

La famille des Fabaceae, remarquable par sa diversité morphologique et écologique, présente néanmoins un ensemble de caractères botaniques distinctifs qui la définissent.

Les Fabaceae sont traditionnellement divisées en trois sous-familles : Caesalpinioideae, Mimosoideae et Papilionoideae. Cependant, des études phylogénétiques récentes basées sur

des données moléculaires ont conduit à une révision de cette classification, proposant une nouvelle sous-famille, les Cercidoideae, et redéfinissant les limites des autres sous-familles.

Les Fabaceae présentent une remarquable diversité morphologique, tout en conservant des caractères botaniques distinctifs qui unifient cette vaste famille. Leur importance écologique et économique, couplée à leur diversité, en fait un sujet d'étude fascinant en botanique et en évolution. Les recherches futures continueront sans doute à affiner notre compréhension de la systématique et de l'évolution de cette famille cruciale (Lewis et al., 2005).

7.2. Habitat et distribution géographique des Fabaceae

Les Fabaceae présentent une distribution cosmopolite, étant présentes sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique. Elles sont particulièrement diverses dans les régions tropicales et subtropicales, mais de nombreuses espèces se sont adaptées aux climats tempérés et même arctiques. La sous-famille des Caesalpinioideae est principalement tropicale, avec une forte concentration en Amérique du Sud et en Afrique. Les Mimosoideae sont également largement tropicales, mais avec une diversité particulière en Australie et en Amérique. Les Papilionoideae, la plus grande sous-famille, ont une distribution plus large, s'étendant des tropiques aux régions tempérées et même arctiques (Lewis et al., 2005).

Les Fabaceae démontrent une remarquable capacité d'adaptation à divers habitats. On les trouve dans les forêts tropicales humides, les savanes, les déserts, les prairies tempérées, les zones alpines et même dans les écosystèmes aquatiques. Cette adaptabilité est en partie due à leur capacité de fixation de l'azote, qui leur permet de coloniser des sols pauvres en nutriments (Sprent, 2009).

Dans les forêts tropicales, les Fabaceae sont souvent des composantes majeures de la canopée et du sous-bois. Dans les savanes et les prairies, elles jouent un rôle crucial dans le cycle de l'azote et la structure de la communauté végétale. Certaines espèces, comme celles du genre *Acacia*, sont des éléments clés des écosystèmes arides et semi-arides (Ward et al., 2013).

La diversité des habitats occupés par les Fabaceae est le reflet de nombreuses adaptations écologiques. La symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote du genre *Rhizobium* est une adaptation majeure, permettant aux légumineuses de prospérer dans des

sols pauvres en azote. Cette capacité a joué un rôle déterminant dans la colonisation de nouveaux habitats et dans l'évolution de la famille.

La distribution et l'habitat des Fabaceae sont de plus en plus affectés par le changement climatique global. Des études récentes suggèrent que les aires de répartition de nombreuses espèces pourraient se déplacer en réponse au réchauffement climatique. Cependant, la capacité d'adaptation de nombreuses Fabaceae, combinée à leur diversité génétique, pourrait les rendre relativement résilientes face à ces changements (Bellard et al., 2012).

La vaste distribution géographique et la diversité des habitats occupés par les Fabaceae témoignent de leur remarquable succès évolutif. Leur capacité à s'adapter à une large gamme de conditions environnementales, en grande partie grâce à leur symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote, a joué un rôle crucial dans leur diversification et leur importance écologique globale. Comprendre la distribution et les exigences en matière d'habitat des Fabaceae est essentiel non seulement pour la botanique et l'écologie, mais aussi pour la conservation et la gestion des écosystèmes dans un contexte de changement global (Sprent, 2009).

7.3. Les Fabaceae dans la région d'El Oued

La région d'El Oued, située dans le nord-est du Sahara algérien, est caractérisée par son climat aride et ses vastes étendues de dunes de sable. Malgré ces conditions environnementales difficiles, la flore de cette région présente une biodiversité remarquable, notamment au sein de la famille des Fabaceae. Cette famille, l'une des plus importantes des Angiospermes, joue un rôle capital dans les écosystèmes sahariens, contribuant à la stabilisation des sols et à l'enrichissement en azote (Macheroum et al., 2021).

7.4. Diversité des Fabaceae à El Oued

Les études floristiques menées dans la région d'El Oued ont révélé une présence significative des Fabaceae, cette famille représente environ 15% de la diversité floristique totale de la région, ce qui en fait l'une des familles les plus représentées après les Asteraceae et les Poaceae. Les genres les plus couramment rencontrés incluent *Acacia*, *Astragalus*, *Retama*, et *Medicago* (Monod, 1992).

a) Espèces clés

Parmi les espèces de Fabaceae les plus importantes écologiquement et économiquement dans la région d'El Oued, on peut citer (Boufennara et al., 2012) :

1. *Retama Raetam* : Cet arbuste xérophYTE joue un rôle déterminant dans la stabilisation des dunes et la création de microhabitats favorables à d'autres espèces
2. *Acacia tortilis subsp. raddiana*: Cet arbre, localement connu sous le nom de "Talha", est une espèce clé de voûte dans les écosystèmes sahariens, fournissant ombre et ressources pour de nombreuses autres espèces.
3. *Medicago Sativa* : Bien que principalement cultivée, cette espèce s'est naturalisée dans certaines zones et contribue significativement à l'enrichissement des sols en azote.

b) Adaptations écologiques

Les Fabaceae de la région d'El Oued présentent diverses adaptations leur permettant de survivre dans cet environnement aride. Ces adaptations incluent (Ozenda, 2004):

1. Systèmes racinaires profonds : De nombreuses espèces, comme *Acacia tortilis*, développent des racines pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de profondeur, leur permettant d'accéder aux nappes phréatiques.
2. Réduction de la surface foliaire : Des espèces comme *Retama raetam* ont des feuilles réduites ou absentes, limitant ainsi la perte d'eau par transpiration.
3. Fixation de l'azote : La symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote du genre *Rhizobium* permet à ces plantes de prospérer dans des sols pauvres en nutriments.
4. Phénologie adaptée : Beaucoup d'espèces annuelles ont un cycle de vie court, synchronisé avec les rares périodes de pluie.

c) Importance écologique

Les Fabaceae jouent un rôle écologique crucial dans la région d'El Oued (Baameur et al., 2021) :

1. Stabilisation des sols : Les systèmes racinaires extensifs de nombreuses espèces contribuent à la fixation des dunes et à la lutte contre l'érosion éolienne.
2. Enrichissement des sols : Grâce à leur capacité de fixation de l'azote, ces plantes améliorent la fertilité des sols, bénéficiant ainsi à l'ensemble de l'écosystème.
3. Création de microhabitats : Les arbustes et arbres de cette famille, comme *Acacia tortilis*, créent des îlots de fertilité qui favorisent la biodiversité locale.
4. Ressources pour la faune : Les Fabaceae fournissent nourriture et abri à de nombreuses espèces animales, notamment les insectes pollinisateurs et les herbivores.

d) Utilisations traditionnelles et potentiel économique

Les populations locales d'El Oued utilisent traditionnellement diverses espèces de Fabaceae (Quezel et Santa, 1962 ; Mechaala et al., 2022) :

1. Fourrage : De nombreuses espèces, notamment *Medicago Sativa* et certaines espèces d'*Astragalus*, sont utilisées comme fourrage pour le bétail.
2. Médecine traditionnelle : Certaines espèces, comme *Retama raetam*, sont utilisées dans la pharmacopée locale pour traiter diverses affections.
3. Bois et combustible : *Acacia tortilis* est une source importante de bois et de charbon de bois pour les populations locales.
4. Restauration écologique : Les Fabaceae, en particulier les espèces fixatrices d'azote, sont de plus en plus utilisées dans les projets de restauration des écosystèmes dégradés.

7.5. Menaces et conservation des Fabaceae

Malgré leur importance, les Fabaceae de la région d'El Oued font face à diverses menaces :

1. Changement climatique : L'augmentation des températures et la diminution des précipitations pourraient affecter la distribution et la survie de certaines espèces (Chenchouni, 2012).
2. Surpâturage : La pression du pâturage, particulièrement intense durant les périodes de sécheresse, menace la régénération de nombreuses espèces (Kouba et al., 2021).
3. Collecte excessive : La récolte non durable de certaines espèces pour le bois ou à des fins médicinales menace leur pérennité (Baameur et al., 2021).
4. Urbanisation et agriculture intensive : L'expansion des zones urbaines et agricoles empiète sur les habitats naturels de nombreuses espèces de Fabaceae (Baameur et al., 2021).

Face à ces menaces, des efforts de conservation sont nécessaires. Ils incluent la création de zones protégées, la promotion de pratiques d'utilisation durable des ressources, et la mise en place de programmes de restauration écologique utilisant des espèces locales de Fabaceae (Meddour et al., 2023).

Les Fabaceae jouent un rôle écologique et économique important dans la région d'El Oued, contribuant significativement à la biodiversité et à la résilience des écosystèmes sahariens. Leur capacité d'adaptation aux conditions arides, combinée à leur importance pour les populations locales, en fait un groupe végétal d'un intérêt particulier pour la conservation et la gestion durable des ressources naturelles dans cette région. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre la distribution, l'écologie et le potentiel d'utilisation durable des Fabaceae dans le contexte du changement climatique et des

pressions anthropiques croissantes dans la région d'El Oued (Chehema et Huguenin, 2017; Baameur et al., 2021; Meddour et al., 2023).

7.6. Les études sur la distribution des Fabaceae en Algérie

Les études sur la distribution des Fabaceae en Algérie ont débuté au 19^e siècle avec les travaux de Battandier et Trabut (1888), qui ont établi une base solide pour les recherches futures. Leur "Flore de l'Algérie" a catalogué de nombreuses espèces, constituant un point de référence. Au 20^e siècle, Quézel et Santa (1963) ont actualisé cette flore, soulignant la richesse des Fabaceae dans des régions allant des côtes au Sahara. Par la suite, des recherches plus localisées, comme celles de Médail et Quézel (1997), ont intégré les Fabaceae dans un contexte méditerranéen, mettant en avant l'Algérie comme un hotspot de biodiversité, notamment dans l'Atlas Tellien et Saharien.

Des études récentes se sont concentrées sur des genres spécifiques. Bena et al. (1998) ont exploré le genre *Medicago*, révélant une forte diversité génétique et morphologique. Benabadji et al. (2007) ont examiné l'adaptation des Fabaceae aux régions arides. Miara et al. (2017) ont révélé plusieurs espèces endémiques dans l'Atlas Tellien. Enfin, Hamel et al. (2013) ont étudié les effets du changement climatique et de l'anthropisation, soulignant la nécessité de stratégies de conservation. Globalement, ces travaux montrent la diversité et l'importance des Fabaceae en Algérie, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires.

7.7. Limitations des études existantes des Fabaceae en Algérie

Malgré l'importance écologique et économique des Fabaceae en Algérie, les études existantes sur cette famille présentent plusieurs limitations qui entravent une compréhension complète de leur distribution, de leur écologie et de leur conservation.

Une des principales limitations concerne la couverture géographique inégale des études. Bien que certaines régions, comme le nord du pays, aient fait l'objet de recherches approfondies, d'autres zones, notamment dans le sud saharien, restent sous-étudiées. Cette disparité géographique crée des lacunes importantes dans notre connaissance de la distribution réelle des Fabaceae à l'échelle nationale (Miara et al., 2017).

De plus, la plupart des études se concentrent sur des inventaires floristiques et des analyses taxonomiques, négligeant souvent les aspects écologiques et fonctionnels des

communautés de Fabaceae. Cette approche limite notre compréhension des interactions entre les espèces et leur environnement, ainsi que leur rôle dans les écosystèmes.

Les méthodologies employées dans de nombreuses études présentent également des limitations. L'utilisation prédominante de méthodes d'échantillonnage traditionnelles peut conduire à une sous-estimation de la diversité réelle, en particulier pour les espèces rares ou cryptiques (Azizi et al., 2021). L'intégration limitée des techniques moléculaires et de modélisation écologique dans les études algériennes sur les Fabaceae constitue un obstacle majeur à une compréhension plus fine de leur diversité génétique et de leur potentiel d'adaptation aux changements environnementaux (Panzeri et al., 2022).

Une autre limitation significative réside dans le manque d'études à long terme sur la dynamique des populations de Fabaceae. La majorité des recherches sont ponctuelles, offrant une image statique de la distribution des espèces. Cette approche ne permet pas de saisir les changements temporels dans la composition et la structure des communautés, particulièrement importants dans le contexte du changement climatique et des perturbations anthropiques croissantes.

Les études existantes souffrent également d'une intégration insuffisante des facteurs anthropiques dans l'analyse de la distribution et de l'écologie des Fabaceae. Bien que certaines recherches mentionnent l'impact humain (Bouazza et al., 2004), peu d'entre elles quantifient systématiquement ces effets ou proposent des modèles prédictifs intégrant les changements d'utilisation des terres.

De plus, la taxonomie de certains groupes de Fabaceae en Algérie reste problématique, avec des révisions nécessaires pour plusieurs genres complexes. Cette incertitude taxonomique entrave les efforts de conservation et la comparaison entre différentes études (Miara et al., 2017). Enfin, il existe un manque notable d'études interdisciplinaires combinant des approches écologiques, génétiques, et socio-économiques. Cette limitation empêche une compréhension holistique des Fabaceae et de leur importance dans les systèmes socio-écologiques algériens. Pour surmonter ces limitations, il est concluant d'adopter des approches plus intégratives et à long terme dans l'étude des Fabaceae en Algérie. L'utilisation accrue de techniques modernes, telles que la génomique du paysage et la modélisation écologique, couplée à des études de terrain exhaustives couvrant l'ensemble du territoire, permettrait de combler les lacunes actuelles. De plus, l'intégration de perspectives socio-écologiques et la

collaboration interdisciplinaire sont essentielles pour développer des stratégies de conservation efficaces et durables pour cette famille botanique capitale.

Bien que les études existantes aient fourni une base précieuse pour notre compréhension des Fabaceae en Algérie, leurs limitations soulignent la nécessité d'efforts de recherche plus complets et intégrés pour assurer la conservation et la gestion durable de cette famille botanique importante.

Ce premier chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension de la biodiversité, en mettant en lumière ses dimensions génétique, spécifique, écosystémique et fonctionnelle. Nous avons examiné la répartition géographique de la biodiversité à l'échelle mondiale, en accordant une attention particulière à la richesse floristique de l'Algérie, notamment dans les écosystèmes arides du Sahara. L'étude de l'endémisme et de la spéciation a permis d'établir un lien crucial entre l'isolement géographique et l'apparition d'espèces endémiques, particulièrement dans la région d'El Oued.

La diversité des Fabaceae dans cette région illustre leur remarquable capacité d'adaptation aux conditions arides, soulignant à la fois leur importance écologique et leur potentiel économique. Cependant, ces espèces font face à des menaces croissantes, notamment en raison des pressions anthropiques et des contraintes environnementales.

En synthèse, ce chapitre met en exergue les défis majeurs de la conservation des espèces endémiques dans les environnements arides, tout en jetant les bases pour une analyse plus approfondie de la répartition des Fabaceae dans cette région. Les outils méthodologiques tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), explorés dans les chapitres suivants, seront essentiels pour comprendre et préserver cette biodiversité unique.

CHAPITRE II : TELEDETECTION ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) DANS L'ETUDE DE LA REPARTITION DE LA VEGETATION

La télédétection est devenue un outil incontournable dans l'étude et la gestion des écosystèmes naturels. Dans les environnements complexes et souvent inaccessibles, tels que les zones arides et montagneuses, elle permet une observation détaillée et continue de la surface terrestre. Ce chapitre explore l'utilisation de la télédétection pour cartographier et analyser la répartition de la végétation spontanée et endémique. En combinant des données multi spectrales et des indices de végétation, il est possible d'identifier et de suivre les dynamiques spatio-temporelles de ces populations végétales. Cette approche offre non seulement une meilleure compréhension des écosystèmes locaux, mais elle est également cruciale pour la conservation des espèces endémiques menacées. Les outils de télédétection fournissent des informations précieuses qui peuvent guider les politiques de gestion et de préservation de la biodiversité.

1. Fondements de la télédétection

Les fondements de la télédétection reposent sur l'interaction entre l'énergie électromagnétique et les objets terrestres. Cette discipline exploite le fait que chaque élément de la surface terrestre réfléchit et émet des rayonnements de manière distinctive, créant ainsi une "signature spectrale" unique (Jensen, 2009). Les capteurs embarqués sur des plateformes aériennes ou spatiales enregistrent ces signatures, permettant l'identification et l'analyse des différents types de couverture terrestre (Campbell & Wynne, 2011). L'évolution technologique a considérablement amélioré la résolution spatiale, spectrale et temporelle des données obtenues, élargissant le champ des applications possibles (Lillesand et al., 2015). Dans le domaine de l'étude de la végétation, la télédétection s'est révélée particulièrement précieuse, offrant des moyens non invasifs pour surveiller la santé des plantes, estimer la biomasse et cartographier la distribution des espèces à grande échelle (Xie et al., 2008). L'intégration de ces données avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG) a ouvert de nouvelles perspectives pour l'analyse spatiale et la modélisation écologique (Sánchez-Mercado et al., 2010).

1.1. Définitions de la Télédétection

La télédétection est une technologie qui permet d'acquérir des informations sur des objets ou des phénomènes à distance, sans contact physique direct. On peut parfois définir cette science comme une technique ou un art. Selon Jensen (2009), elle "implique la détection et la mesure de l'énergie électromagnétique émise ou réfléchi par la surface de la Terre et

l'atmosphère". Cette technique utilise des capteurs montés sur des plateformes aériennes ou spatiales pour collecter des données sur de vastes zones.

Richards et Jia (2006) soulignent que la télédétection "comprend non seulement l'acquisition de données, mais aussi leur traitement et leur interprétation". Elle permet d'observer et d'analyser divers phénomènes terrestres, de la végétation aux structures urbaines, en passant par les océans et l'atmosphère.

Lillesand et al. (2015) ajoutent que la télédétection "fournit une vue synoptique et répétitive de la Terre, offrant des informations uniques sur les processus environnementaux à différentes échelles spatiales et temporelles". Cette capacité en fait un outil essentiel pour la surveillance environnementale, la gestion des ressources naturelles et l'étude des changements globaux.

1.2. Histoire et évolution de la télédétection

La télédétection a connu une évolution remarquable au cours des dernières décennies. Cette technique, qui englobe aujourd'hui une vaste gamme de technologies et d'applications, trouve ses racines dans les premières observations aériennes du XIXe siècle. Les premiers commencements de la télédétection remontent à 1858, lorsque Gaspard-Félix Tournachon, plus connu sous le nom de Nadar, réalisa la première photographie aérienne depuis un ballon au-dessus de Paris (Olsen, 2007). Cette innovation marqua le début d'une nouvelle ère dans l'observation de la Terre. Au cours des décennies suivantes, l'utilisation de cerfs-volants, de pigeons et d'avions pour la photographie aérienne se développa rapidement, trouvant des applications tant civiles que militaires.

La Première Guerre mondiale vit une utilisation accrue de la photographie aérienne à des fins de reconnaissance, ce qui stimula le développement de nouvelles technologies et techniques d'interprétation (Campbell et Wynne, 2011). L'entre-deux-guerres fut marqué par des avancées significatives dans la photogrammétrie et l'interprétation des images aériennes. La véritable révolution dans le domaine de la télédétection survint après la Seconde Guerre mondiale, avec l'avènement de l'ère spatiale. Le lancement du premier satellite artificiel, Spoutnik 1, par l'Union soviétique en 1957, ouvrit la voie à l'observation de la Terre depuis l'espace (Liang et al., 2012). Les États-Unis suivirent rapidement avec le lancement de TIROS-1 en 1960, le premier satellite météorologique opérationnel.

Les années 1970 marquèrent un tournant décisif avec le lancement de Landsat 1 en 1972, le premier satellite civil dédié à l'observation de la Terre à des fins environnementales et de gestion des ressources (Verger, 2021). Cette mission inaugura une nouvelle ère de surveillance continue de la surface terrestre, fournissant des données précieuses pour une multitude d'applications scientifiques et pratiques.

Parallèlement au développement des plateformes satellitaires, les capteurs et les techniques de traitement des données connurent des avancées significatives. L'introduction de capteurs multispectraux, puis hyperspectraux, permit d'acquérir des informations de plus en plus détaillées sur la composition et l'état des surfaces observées (Goetz, 2009). Les progrès de l'informatique et des algorithmes de traitement d'images facilitèrent l'exploitation de volumes de données toujours croissants.

Les années 1990 et 2000 virent l'émergence de nouvelles technologies, telles que le radar à synthèse d'ouverture (SAR) et le LiDAR, élargissant encore les capacités de la télédétection (Moreira et al., 2013). Ces techniques permirent d'obtenir des informations sur la structure tridimensionnelle des objets et de pénétrer la couverture nuageuse, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'étude des forêts, des glaciers et des zones urbaines. Aujourd'hui, la télédétection est devenue un outil indispensable dans de nombreux domaines, de la surveillance environnementale à l'urbanisme, en passant par l'agriculture de précision et la gestion des catastrophes naturelles. L'avènement des petits satellites et des constellations de microsatsellites, ainsi que le développement de plateformes aériennes sans pilote (drones), ont encore démocratisé l'accès aux données de télédétection (Dash et Ogutu, 2016).

L'évolution future de la télédétection promet d'être tout aussi passionnante, avec l'intégration croissante de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pour l'analyse des données, le développement de capteurs toujours plus performants, et l'exploration de nouvelles applications dans des domaines tels que la santé publique et la gestion des ressources en eau (Hanafi et al., 2024).

L'histoire de la télédétection est marquée par une progression constante des technologies et des applications, reflétant notre désir croissant de comprendre et de gérer notre environnement à l'échelle globale. À mesure que nous faisons face à des défis mondiaux tels que le changement climatique et la perte de biodiversité, le rôle de la télédétection dans la

prise de décision éclairée et la gestion durable des ressources ne fera que croître en importance.

1.3. Energie électromagnétique (les ondes et les photons)

L'énergie électromagnétique (EM) est essentielle à la télédétection (Figure 06), se manifestant sous forme d'ondes et de photons. L'énergie électromagnétique se propage en ondes à la vitesse de la lumière, caractérisées par leur longueur d'onde et leur fréquence (Campbell et Wynne, 2011). Cette énergie, qui oscille entre les composantes électrique et magnétique, permet d'interagir avec les surfaces de la Terre. Les photons, quanta d'énergie électromagnétique, transportent des quantités discrètes d'énergie proportionnelles à leur fréquence (Jensen, 2009). Grâce à cette compréhension des propriétés de l'EM, les scientifiques peuvent interpréter les données de télédétection pour extraire des informations significatives sur l'environnement terrestre (Richards et Jia, 2006).

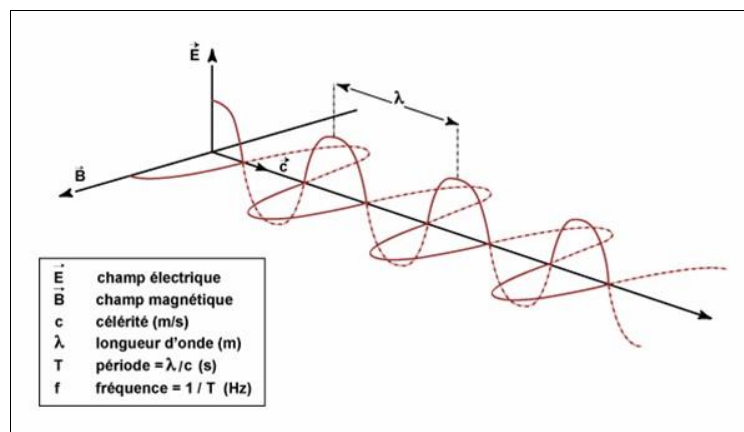


Figure 06 : Nature et propagation d'une onde électromagnétique (un champ électrique et un champ magnétique) (Jensen, 2009).

1.4. Spectre électromagnétique (rayonnement électromagnétique)

Le Spectre électromagnétique, fondement de la télédétection, se caractérise par un continuum d'énergies s'étendant des ondes radio aux rayons gamma (Figure 7). Le spectre électromagnétique englobe toutes les formes de rayonnement, chacune définie par sa longueur d'onde et sa fréquence spécifiques (Jensen, 2009). Cette diversité spectrale permet l'observation de phénomènes variés à la surface terrestre. Lillesand et al. (2015) soulignent que "chaque région du spectre offre des informations uniques sur les propriétés des objets observés". Par exemple, le visible révèle la couleur des surfaces, tandis que l'infrarouge thermique détecte les variations de température. Campbell et Wynne (2011) ajoutent que "la

compréhension des interactions entre le rayonnement et la matière est cruciale pour interpréter les données de télédétection". Les capteurs modernes exploitent diverses bandes spectrales, permettant une analyse multidimensionnelle de l'environnement. Cette approche multispectrale, Cette approche multispectrale améliore considérablement notre capacité à discriminer et caractériser les objets et phénomènes terrestres (Richards, 2013).

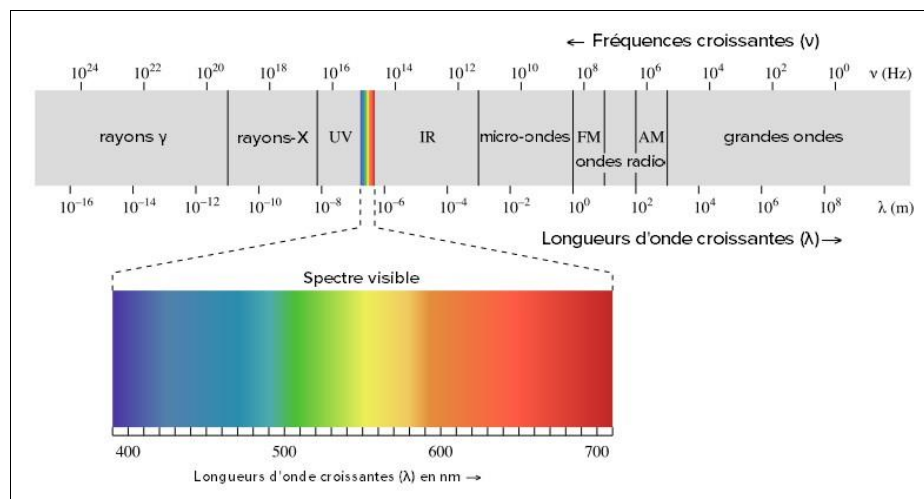


Figure 7 : Spectre électromagnétique (CCT, 2003).

Le spectre visible ne constitue qu'une infime partie du spectre électromagnétique total. Les longueurs d'onde du spectre visible se situent entre 0,4 et 0,7 μm (Tableau 01), correspondant aux couleurs perceptibles par l'œil humain. Cette gamme limitée est unique en ce sens qu'elle permet l'association directe des longueurs d'onde à des couleurs spécifiques, telles que le violet, le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge. le spectre visible est particulièrement important en télédétection car il permet de distinguer les divers types de végétation, de sols et d'autres caractéristiques en fonction de leurs couleurs (Lillesand et al., 2015). Cependant, pour une analyse plus complète, d'autres parties du spectre, comme l'infrarouge et les micro-ondes, sont également utilisées.

Tableau 01 : le Spectre visible et leur Longueurs d'onde

Spectre visible	Longueurs d'onde
Violet	0.400 - 0.446 μm
Bleu	0.446 - 0.500 μm
Vert	0.500 - 0.578 μm
Jaune	0.578 - 0.592 μm
Orange	0.592 - 0.620 μm
Rouge	0.620 - 0.700 μm

2. Processus de télédétection

Les processus de la télédétection impliquent plusieurs étapes clés pour collecter, traiter et analyser les données obtenues à distance (Figure 08) :

1. Source d'énergie ou d'illumination (A) : Tout processus de télédétection commence par une source d'énergie nécessaire pour illuminer l'objet ou la surface à observer. Le plus couramment, cette source d'énergie est le soleil, qui joue un rôle central dans la majorité des applications de télédétection. Toutefois, dans certains cas, comme pour la télédétection radar, la source d'énergie provient directement du satellite ou du capteur lui-même. Ce type de télédétection active permet d'émettre une énergie vers la cible, qui est ensuite réfléchi vers le capteur, offrant ainsi la possibilité d'acquérir des données, même en l'absence de lumière solaire.

2. Rayonnement et atmosphère (B) : Le flux électromagnétique, qu'il soit d'origine solaire ou artificielle, subit des modifications significatives lors de sa traversée bidirectionnelle de l'atmosphère terrestre. Dans sa phase descendante, le rayonnement incident est soumis à divers phénomènes de diffusion, d'absorption et de réfraction, modulant ainsi son intensité et sa distribution spectrale. De manière analogue, le rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre est à nouveau altéré lors de son parcours ascendant vers le capteur.

3. Interaction avec la cible (C) : Lorsqu'elle atteint la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci, et cette interaction varie en fonction des propriétés du rayonnement et des caractéristiques de la surface. Chaque objet sur Terre absorbe, émet ou réfléchit l'énergie de manière unique à travers différentes fréquences du spectre électromagnétique, un phénomène connu sous le nom de comportement spectral. En télédétection, on considère que chaque élément géographique possède une "signature spectrale", qui représente sa réponse spécifique à différentes longueurs d'onde.

4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) : Après que l'énergie a été diffusée ou émise par la cible, elle est captée à distance par un capteur qui se trouve à bord d'une plateforme, généralement un satellite, sans contact direct avec la cible. Cette énergie est ensuite convertie en signaux numériques, permettant son enregistrement et son traitement ultérieur. Ces données, collectées à distance, sont cruciales pour analyser les propriétés et les caractéristiques des objets observés sur la surface terrestre.

5. Transmission, réception et traitement (E) : Les données enregistrées par le capteur sont transmises par des moyens électroniques vers une station de réception terrestre. À ce stade, les informations reçues subissent une transformation pour être converties en images, qu'elles soient sous format numérique ou photographique. Ce processus de traitement est essentiel pour rendre les données brutes exploitables et permettre leur analyse détaillée dans divers domaines d'application.

6. Interprétation et analyse (F) : Après le traitement des images, il est indispensable d'effectuer une interprétation visuelle ou numérique des données obtenues. Cette étape permet d'extraire les informations pertinentes concernant la cible étudiée. L'analyse peut inclure l'identification de caractéristiques spécifiques, la classification des objets ou des phénomènes, ainsi que l'évaluation de changements ou d'anomalies observés dans les données.

7. Application (G) : La phase finale du processus de télédétection consiste à exploiter les informations extraites des images pour approfondir la compréhension de la zone étudiée, qu'il s'agisse d'une ville, d'une forêt ou d'une zone affectée par une catastrophe naturelle. Ces données permettent de révéler des aspects inédits de la région observée et sont souvent utilisées pour apporter des solutions à des problématiques spécifiques, telles que la gestion des ressources naturelles, la planification urbaine ou la réponse aux situations d'urgence.

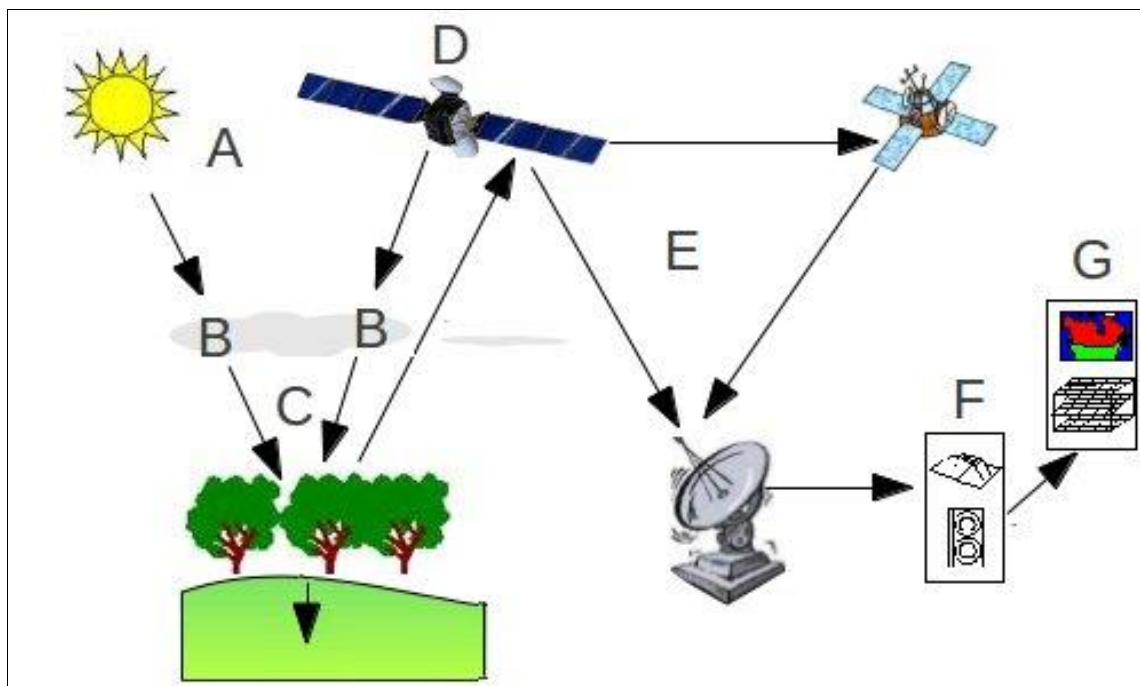


Figure 8: processus de télédétection (CCT, 2003).

2.1. Application de la télédétection à l'étude de la végétation

2.1.1. Principes de base de la télédétection de la végétation

L'analyse de la couverture végétale par télédétection repose principalement sur l'évaluation de l'activité chlorophyllienne. Le rayonnement électromagnétique solaire, partiellement réfléchi par le couvert végétal, est capté et interprété par les capteurs embarqués. Les organismes photosynthétiques présentent des caractéristiques spectrales distinctives, absorbant fortement dans le spectre visible tout en réfléchissant significativement dans le domaine du proche infrarouge (PIR). Cette signature spectrale unique permet de discriminer efficacement la végétation des autres éléments du paysage. Par conséquent, les bandes spectrales correspondant au rouge et au PIR sont privilégiées pour l'étude de la biomasse végétale (Xie et al., 2008). La réponse spectrale de la végétation se caractérise par une faible réflectance dans la région du rouge et une réflectance accrue dans le PIR (Figure 9) (Dusseux, 2014).

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) exploite ce contraste pour quantifier la densité et la vigueur de la végétation. Plus la biomasse est importante, plus l'écart entre la réflectance dans le PIR et le rouge s'accroît. Il convient de noter que la réflectance, définie comme le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente, est un paramètre clé dans l'interprétation des données de télédétection. L'imagerie satellitaire s'est imposée comme une source de données incontournable pour le suivi de l'occupation des sols et l'analyse des changements temporels (Käyhkö et al., 2011 ; Lunetta et al., 2006). Depuis l'avènement des premières images satellitaires civiles dans les années 1970, les progrès technologiques ont considérablement amélioré la qualité des données acquises, notamment en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle.

Les diverses plateformes d'imagerie satellitaire offrent des spécificités uniques pour l'analyse de la couverture végétale. Le programme LANDSAT, par exemple, propose une imagerie multispectrale couvrant un large éventail de bandes, permettant ainsi une caractérisation détaillée des surfaces terrestres. En revanche, les satellites SPOT, bien qu'offrant moins de bandes spectrales, compensent par une résolution spatiale supérieure, facilitant une discrimination plus fine des différents types d'occupation du sol. Il est intéressant de noter que, selon les travaux de Beaudoin et al. (1995), l'utilisation d'un nombre restreint de bandes spectrales judicieusement sélectionnées peut s'avérer aussi efficace qu'un

large éventail pour différencier les catégories d'occupation du sol. Cette observation souligne l'importance d'une sélection pertinente des données plutôt que leur simple accumulation. Bien que ces deux systèmes d'acquisition soient adaptés à l'étude de la végétation, les images LANDSAT jouissent d'une popularité accrue dans la communauté scientifique. Cette préférence s'explique non seulement par leur accessibilité gratuite, mais aussi par la profondeur temporelle de leurs archives, permettant des analyses rétrospectives sur plusieurs décennies. Il est également courant de voir des études combinant ces deux sources de données, tirant parti de leurs atouts respectifs en fonction de la disponibilité des images pour les périodes d'intérêt. Cette approche synergique permet d'optimiser la qualité et la pertinence des analyses de la dynamique végétale sur le long terme.

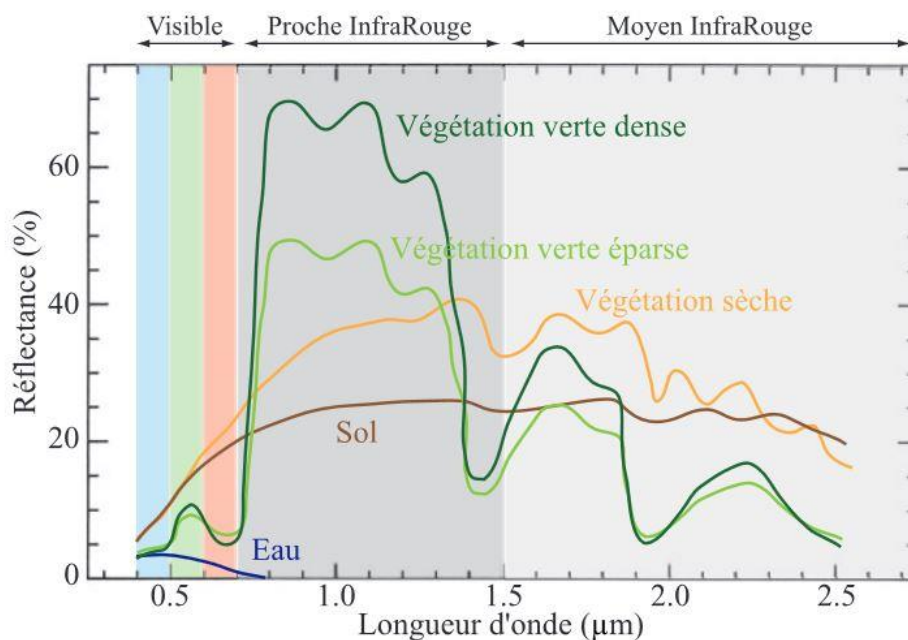


Figure 9 : Caractéristiques spectrales de la végétation, du sol et de l'eau (Dusseux, 2014).

2.1.2. Utilisation des indices de végétation

Les indices de végétation constituent des outils essentiels pour l'analyse quantitative de la couverture végétale à partir de données de télédétection. L'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et l'Indice de Végétation Ajusté au Sol Modifié (MSAVI) sont deux indicateurs largement utilisés dans ce domaine. Le NDVI, formulé comme l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Où NIR représente la réflectance dans le proche infrarouge et RED la réflectance dans le rouge, exploite le contraste spectral caractéristique de la végétation saine (Tucker, 1979).

Le MSAVI, quant à lui, est défini par l'équation (2) intégrant un facteur d'ajustement pour atténuer l'influence du sol (Qi et al., 1994).

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR + RED)}}{2} \quad (2)$$

Ces indices jouent un rôle prépondérant dans l'évaluation de la biomasse végétale à partir de données satellitaires. Le NDVI, fondé sur la différence de réflectance entre les bandes rouge et proche infrarouge, est couramment employé pour estimer la densité de végétation (Rouse et al., 1974). Néanmoins, son application dans les zones arides et désertiques, caractérisées par une végétation clairsemée, peut être compromise par l'interférence de la réflectance du sol, conduisant à des évaluations potentiellement biaisées (Huete, 1988). Pour pallier cette limitation, le MSAVI a été conçu comme une optimisation du NDVI, incorporant un coefficient d'ajustement visant à minimiser l'impact du sol nu sur les mesures (Qi et al., 1994). Des analyses comparatives ont mis en évidence la supériorité du MSAVI en termes de précision pour l'estimation de la couverture végétale dans les écosystèmes arides, offrant ainsi une approche plus robuste pour l'étude de la dynamique de la végétation dans ces milieux complexes (Senseman et al., 1996).

2.3. Avantages et limites de la télédétection

La télédétection, en tant que technologie d'observation de la Terre, présente un ensemble d'avantages et de limitations qui influencent son application dans divers domaines scientifiques et de gestion des ressources. Parmi ses atouts majeurs, on peut citer sa capacité à fournir une vision synoptique de vastes territoires, permettant ainsi une analyse intégrée des phénomènes à grande échelle (Lillesand et al., 2015). Cette approche globale facilite la mise en relation de différents processus environnementaux sur des étendues considérables, offrant

aux gestionnaires des ressources naturelles des informations précieuses pour la prise de décision (Lenco, 1979). La diversité spectrale des capteurs utilisés en télédétection constitue un autre avantage significatif. En effet, la possibilité d'acquérir des données dans une large gamme de longueurs d'onde, au-delà du spectre visible, permet d'obtenir des informations sur des zones autrement inaccessibles ou invisibles à l'œil humain (Cezard, 2021). Cette caractéristique, combinée à la répétitivité des observations satellitaires, offre des opportunités uniques pour l'étude de la dynamique des phénomènes terrestres à travers des analyses diachroniques (Mahrad et al., 2020).

L'intégration des données de télédétection dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) représente une valeur ajoutée considérable. Cette synergie permet une analyse holistique des composantes du paysage, prenant en compte leurs interactions éco-géographiques (Konecny, 2014). De plus, comparée aux méthodes traditionnelles de collecte de données, la télédétection offre souvent un meilleur rapport coût-efficacité et une rapidité accrue dans la production de résultats (Lenco, 1979). Néanmoins, la télédétection n'est pas exempte de limitations. La qualité des données peut être affectée par les conditions météorologiques, notamment la couverture nuageuse, qui peut entraver l'acquisition d'images optiques (Kaufman et al., 2002). La résolution des capteurs, qu'elle soit spatiale, spectrale ou temporelle, peut parfois s'avérer insuffisante pour certaines applications spécifiques, nécessitant des compromis (Woodcock et Strahler, 1987). De plus, la fiabilité des résultats est étroitement liée à la résolution des données, ce qui peut avoir des implications sur les processus de transmission, de stockage et de traitement de l'information (Chi, 2016). Enfin, l'interprétation des données de télédétection nécessite souvent une validation sur le terrain, ce qui peut s'avérer coûteux et chronophage (Foody, 2002). Le traitement et l'analyse des volumes massifs de données générées par les capteurs modernes requièrent également des infrastructures et des compétences spécialisées (Ma et al., 2015).

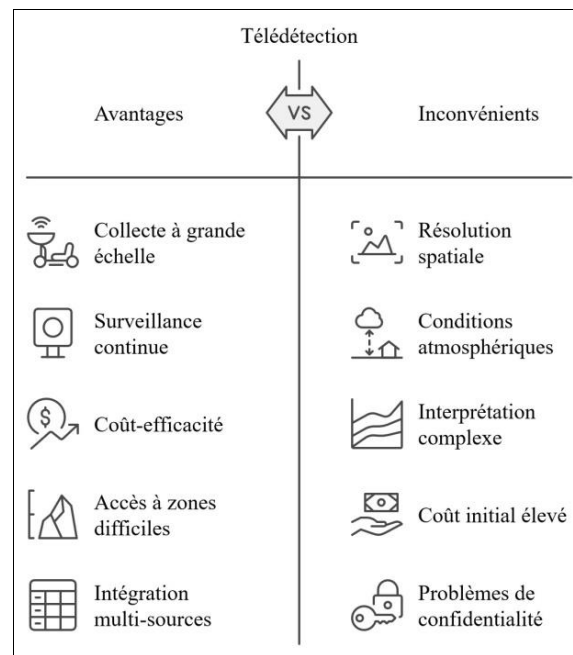


Figure 10 : Avantages et inconvénients de la télédétection.

3. Concepts de base des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

3.1. Définition et composantes des SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) représentent un ensemble sophistiqué d'outils et de technologies conçus pour la collecte, le stockage, le traitement, l'analyse et la visualisation de données géo spatiales (Longley et al., 2015). Selon ces auteurs, un SIG peut être défini comme "un système informatique pour capturer, stocker, vérifier, intégrer, manipuler, analyser et afficher des données relatives à des positions sur la surface terrestre". Cette définition souligne la nature multidimensionnelle des SIG, qui transcendent la simple cartographie pour englober un large éventail de fonctionnalités d'analyse spatiale. Les SIG intègrent diverses composantes interdépendantes, incluant le matériel informatique, les logiciels spécialisés, les bases de données géographiques, ainsi que les méthodes et procédures d'analyse (Ott et Swiaczny, 2001). Burrough et al. (2015) mettent en avant la capacité unique des SIG à manipuler des informations géoréférencées, offrant ainsi une perspective spatiale distinctive sur les phénomènes étudiés. La polyvalence de ces systèmes se manifeste à travers leur application dans des domaines variés, de la gestion des ressources naturelles à l'aménagement urbain (Malczewski et Rinner, 2015). L'évolution constante des technologies géospatiales enrichit continuellement les fonctionnalités des SIG, renforçant leur rôle crucial dans la prise de décision basée sur des données spatiales (Li et al., 2016).

3. 2. Les composantes essentielles d'un SIG

SIG comprennent généralement cinq éléments principaux (Figure 11) :

1. Le matériel (hardware) : Il s'agit des ordinateurs et des périphériques utilisés pour exécuter le logiciel SIG et stocker les données.
2. Le logiciel (software) : C'est le cœur du SIG, fournissant les outils nécessaires pour stocker, analyser et afficher l'information géographique.
3. Les données : Elles constituent la base de tout SIG et peuvent inclure des données vectorielles, raster, et des attributs associés.
4. Les méthodes : Ce sont les procédures et les modèles utilisés pour analyser les données et en extraire des informations utiles.
5. Les personnes : Les utilisateurs et les experts qui conçoivent, implémentent et utilisent le SIG sont essentiels à son fonctionnement efficace.

L'intégration de ces composantes permet aux SIG de fournir une plateforme robuste pour la gestion et l'analyse des données spatiales, jouant un rôle crucial dans divers domaines tels que l'urbanisme, la gestion des ressources naturelles, et la santé publique (Fotheringham et Rogerson, 2013).



Figure 11 : Composantes essentielles d'un SIG (Burrough et al., 2015).

3.3. Fonctionnalités des SIG (analyse spatiale, géostatistique, etc.)

Les SIG offrent une gamme étendue de fonctionnalités qui permettent une analyse approfondie des données spatiales. Parmi les principales fonctionnalités, on peut citer :

1. L'analyse spatiale : C'est l'une des fonctionnalités les plus puissantes des SIG. Elle permet d'examiner les relations spatiales entre les entités géographiques. Selon O'Sullivan et Unwin (2010), l'analyse spatiale englobe "un ensemble de techniques quantitatives pour analyser les données spatiales". Ces techniques incluent la superposition de couches, l'analyse de proximité, et l'analyse de réseau (Figure 12).

2. La géostatistique : Cette branche de la statistique spatiale est largement utilisée dans les SIG pour l'interpolation et la modélisation spatiale. Selon Chiles et Delfiner (2012), la géostatistique permet de "prédire la distribution spatiale d'une variable à partir d'un échantillon de points de mesure". Des techniques telles que le krigeage sont couramment utilisées pour créer des cartes continues à partir de données ponctuelles.

3. La modélisation spatiale : Les SIG permettent de créer des modèles complexes qui simulent des processus spatiaux. Par exemple, des modèles hydrologiques peuvent être développés pour prédire les inondations, ou des modèles de changement d'utilisation des terres pour anticiper l'évolution du paysage (Wainwright et Mulligan, 2013).

4. La cartographie et la visualisation : Les SIG excellent dans la production de cartes et de visualisations de données spatiales. Ils offrent des outils avancés pour la conception cartographique, permettant de créer des cartes thématiques, des cartes choroplèthes, et des cartes 3D (Kraak et Ormeling, 2020).

5. La gestion de bases de données spatiales : Les SIG intègrent des systèmes de gestion de bases de données spécialement conçus pour stocker et interroger des données spatiales. Ces systèmes, comme PostgreSQL avec l'extension PostGIS, permettent des requêtes spatiales complexes et une gestion efficace de grandes quantités de données géographiques (Sveen, 2019).

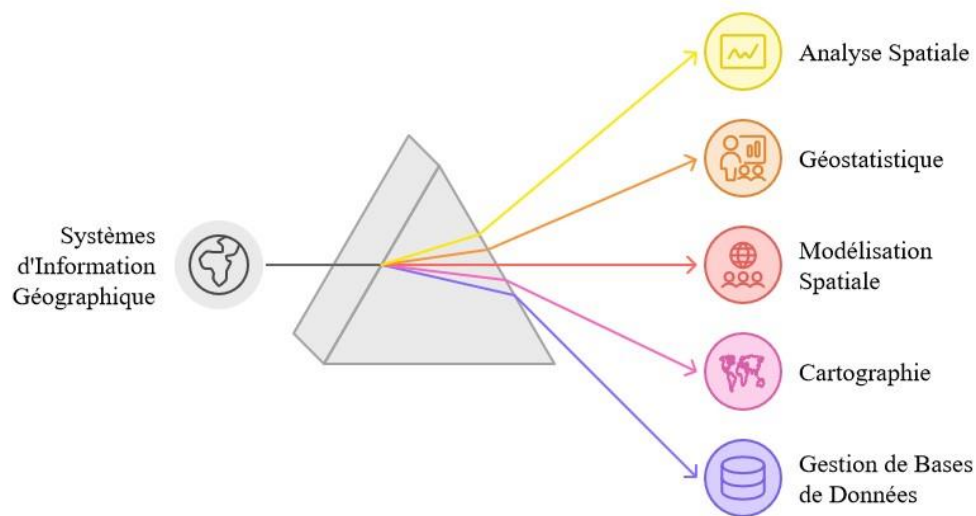


Figure 12 : Fonctionnalités des SIG (Sveen, 2019).

4. Application des SIG dans l'étude de la végétation

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont devenus des outils indispensables dans l'étude de la végétation, offrant des capacités avancées pour l'analyse spatiale, la cartographie et la gestion des données écologiques. Leur utilisation a révolutionné notre compréhension des écosystèmes végétaux et a grandement contribué à la conservation de la biodiversité. Cette partie de ce chapitre explore les applications diverses des SIG dans l'étude de la végétation, en mettant l'accent sur l'analyse spatiale, la cartographie des espèces, la gestion de la biodiversité et l'intégration des données de télédétection.

4.1. Analyse spatiale et modélisation des habitats

L'analyse spatiale et la modélisation des habitats constituent l'un des domaines les plus importants de l'application des SIG dans l'étude de la végétation. Les SIG permettent aux chercheurs de créer des modèles complexes qui prédisent la distribution des espèces végétales en fonction de variables environnementales.

La modélisation de la distribution des espèces (SDM - Species Distribution Modeling) est une technique largement utilisée qui combine des données d'occurrence d'espèces avec des variables environnementales pour prédire les habitats potentiels. Guisan et Thuiller (2005) soulignent que les SDM sont essentiels pour comprendre les patterns de biodiversité et prédire les impacts potentiels du changement climatique sur la distribution des espèces. Les SIG

facilitent l'intégration de diverses couches de données, telles que la topographie, le climat et les types de sol, permettant ainsi une analyse multifactorielle des habitats.

L'analyse de connectivité des habitats est un autre domaine où les SIG excellent. En utilisant des techniques d'analyse de réseau, les chercheurs peuvent évaluer la fragmentation des habitats et identifier les corridors écologiques cruciaux pour la dispersion des espèces végétales. McRae et al. (2009) ont développé des outils SIG spécifiques, comme Circuitscape, qui modélisent les mouvements potentiels des espèces à travers les paysages, en tenant compte de la résistance du terrain.

Les SIG permettent également la création de modèles prédictifs de changement de végétation. Par exemple, Pearson et Dawson (2003) ont utilisé des SIG pour modéliser les impacts potentiels du changement climatique sur la distribution des espèces végétales en Europe. Ces modèles intègrent des scénarios climatiques futurs avec des données sur les exigences écologiques des espèces pour prédire les changements dans leur aire de répartition.

4.2. Cartographie des espèces endémiques et rares

La cartographie précise des espèces endémiques et rares est prépondérante pour leur conservation, et les SIG jouent un rôle central dans ce processus. Les SIG permettent non seulement de représenter la distribution actuelle de ces espèces, mais aussi d'analyser les facteurs qui influencent leur répartition.

L'utilisation des SIG pour la cartographie des espèces rares a été démontrée par Williams et al. (2009), qui ont cartographié la distribution d'espèces végétales menacées en Californie. Leur approche combinait des données d'occurrence d'espèces avec des variables environnementales pour créer des cartes de distribution potentielle, identifiant ainsi des zones prioritaires pour la conservation.

Les SIG facilitent également l'analyse des patterns de richesse en espèces endémiques. Crisp et al. (2001) ont utilisé des techniques SIG pour cartographier et analyser les centres d'endémisme végétal en Australie, révélant des corrélations importantes entre l'endémisme et certains facteurs environnementaux.

La cartographie des espèces rares à l'aide des SIG permet aussi de suivre l'évolution de leurs populations au fil du temps. En intégrant des données historiques et actuelles, les

chercheurs peuvent visualiser les changements dans la distribution des espèces et identifier les tendances à long terme. Cette approche a été utilisée par Bakkenes et al. (2002) pour prédire les impacts du changement climatique sur la biodiversité végétale en Europe.

4.3. Utilisation des SIG pour la gestion et la conservation de la biodiversité

Les SIG sont devenus des outils essentiels dans la gestion et la conservation de la biodiversité végétale. Ils permettent aux gestionnaires et aux décideurs de visualiser, analyser et interpréter des données complexes pour prendre des décisions éclairées en matière de conservation.

L'une des applications majeures des SIG dans ce domaine est la planification systématique de la conservation. Margules et Pressey (2000) ont démontré comment les SIG peuvent être utilisés pour identifier des zones prioritaires pour la conservation, en intégrant des données sur la distribution des espèces, les menaces et les coûts de conservation. Cette approche permet d'optimiser l'allocation des ressources limitées pour la conservation.

Les SIG jouent également un rôle crucial dans la gestion des aires protégées. Ils permettent de surveiller les changements dans la couverture végétale, d'évaluer l'efficacité des mesures de conservation et de planifier des interventions ciblées. Par exemple, Nagendra et al. (2013) ont utilisé des SIG pour évaluer l'efficacité des parcs nationaux dans la conservation de la biodiversité forestière en Inde, en combinant des données de télédétection avec des relevés de terrain.

La modélisation des impacts du changement climatique sur la biodiversité est un autre domaine où les SIG sont largement utilisés. Hannah et al. (2002) ont employé des techniques SIG pour modéliser les changements potentiels dans la distribution des espèces végétales sous différents scénarios climatiques, fournissant ainsi des informations cruciales pour la planification de la conservation à long terme.

5. Intégration des données de télédétection dans les SIG

L'intégration des données de télédétection dans les SIG a considérablement amélioré notre capacité à étudier et à surveiller la végétation à grande échelle. Les images satellites et aériennes fournissent des informations détaillées sur la structure et la composition de la végétation, qui peuvent être analysées et interprétées dans un environnement SIG.

L'utilisation de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est un exemple classique de l'intégration de la télédétection dans les SIG pour l'étude de la végétation. Pettorelli et al. (2005) ont montré comment le NDVI peut être utilisé pour surveiller la productivité de la végétation, détecter les changements phénologiques et évaluer la santé des écosystèmes à l'échelle du paysage.

Les SIG permettent également d'intégrer des données LiDAR (Light Detection and Ranging) pour étudier la structure tridimensionnelle de la végétation. Lefsky et al. (2002) ont démontré comment les données LiDAR peuvent être utilisées dans un environnement SIG pour estimer la biomasse forestière, la hauteur de la canopée et d'autres paramètres structuraux importants.

L'analyse de séries temporelles d'images satellites dans les SIG est particulièrement utile pour suivre les changements à long terme dans la végétation. Kennedy et al. (2010) ont développé des méthodes pour détecter et caractériser les perturbations et la repousse forestière en utilisant des séries temporelles Landsat dans un environnement SIG, permettant ainsi une surveillance détaillée des dynamiques forestières.

Enfin, l'intégration de données hyperspectrales dans les SIG offre de nouvelles possibilités pour la cartographie détaillée des espèces végétales et l'évaluation de leur état de santé. Ustin et al. (2004) ont montré comment l'imagerie hyperspectrale peut être utilisée pour distinguer différentes espèces végétales et détecter le stress des plantes, ouvrant de nouvelles voies pour la surveillance de la biodiversité et la détection précoce des menaces pour les écosystèmes.

L'application des SIG dans l'étude de la végétation a considérablement amélioré notre compréhension des écosystèmes végétaux et notre capacité à les gérer et à les conserver. De l'analyse spatiale et la modélisation des habitats à la cartographie des espèces rares, en passant par la gestion de la biodiversité et l'intégration des données de télédétection, les SIG offrent des outils puissants pour aborder les défis complexes de l'écologie végétale. À mesure que la technologie continue d'évoluer, l'intégration de nouvelles sources de données et le développement de méthodes d'analyse plus sophistiquées promettent d'ouvrir de nouvelles perspectives passionnantes dans ce domaine.

6. Cas d'études et exemples d'application de la télédétection et des SIG

L'utilisation combinée de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) a permis des avancées significatives dans de nombreux domaines de recherche et d'application en écologie et en gestion environnementale. Cette section revêt une importance capitale car elle expose des cas d'études et des exemples concrets d'application, mettant en évidence l'efficacité de ces technologies dans divers contextes environnementaux.

6.1. Applications en zones arides et désertiques

Les zones arides et désertiques, qui couvrent environ 41% de la surface terrestre (Gaur et Squires, 2018), présentent des défis uniques pour l'étude et la gestion des écosystèmes. La télédétection et les SIG se sont révélés particulièrement utiles dans ces environnements, où les méthodes traditionnelles de collecte de données sur le terrain peuvent être difficiles et coûteuses.

Une étude menée par Xiao et al. (2006) dans le désert du Taklamakan en Chine a démontré l'efficacité de l'utilisation combinée d'images Landsat et de SIG pour cartographier et surveiller la dynamique de la végétation désertique. Les chercheurs ont utilisé une série temporelle d'images Landsat couvrant une période de 30 ans, combinée à des données climatiques et topographiques dans un SIG, pour analyser les changements dans la couverture végétale. Cette approche a permis d'identifier des tendances à long terme dans la distribution de la végétation et de relier ces changements aux variations climatiques et aux activités humaines.

Dans une autre étude, Ramírez-Juidias et al (2023) ont utilisé des données de télédétection multispectrale et hyperspectrale, intégrées dans un SIG, pour évaluer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes des zones arides en Espagne. En combinant des indices de végétation dérivés de la télédétection avec des modèles climatiques dans un environnement SIG, les chercheurs ont pu prédire les changements futurs dans la distribution et la composition des communautés végétales (hanafi et al., 2024). Cette approche a fourni des informations précieuses pour la gestion adaptative des écosystèmes dans un contexte de changement climatique.

L'utilisation de la télédétection radar, en particulier, s'est avérée précieuse dans les zones arides. Par exemple, Ubeid et Albatta (2014) ont utilisé des données InSAR

(Interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture) pour étudier la dynamique des dunes de sable dans le désert du Négev en Palestine. En intégrant ces données dans un SIG avec des informations sur la direction du vent et la topographie, ils ont pu modéliser et prédire les mouvements des dunes, fournissant ainsi des informations cruciales pour la gestion des infrastructures et la conservation des écosystèmes dunaires.

6.2. Études de la répartition des Fabaceae par télédétection et SIG

La famille des Fabaceae, ou légumineuses, est l'une des plus grandes familles de plantes à fleurs et joue un rôle écologique capital dans de nombreux écosystèmes. L'utilisation de la télédétection et des SIG a considérablement amélioré notre compréhension de la distribution et de l'écologie de ces espèces.

Une étude remarquable menée par Rusňák et al (2022) a utilisé des images hyperspectrales aéroportées combinées à des techniques de SIG pour cartographier la distribution de l'espèce invasive *Robinia pseudoacacia* (Fabaceae) dans le sud-ouest de la Slovaquie. Les chercheurs ont développé un indice spectral spécifique pour identifier cette espèce et ont utilisé des analyses SIG pour modéliser sa distribution potentielle en fonction de facteurs environnementaux. Cette approche a permis une détection précoce et une gestion plus efficace de cette espèce invasive.

Dans une autre étude, Oldeland et al. (2017) ont utilisé des données hyperspectrales et LiDAR (Light Detection and Ranging) pour étudier la distribution des espèces de Fabaceae dans la savane namibienne. En combinant les informations spectrales avec les données de structure de la canopée obtenues par LiDAR dans un environnement SIG, ils ont pu distinguer différentes espèces de légumineuses et analyser leur distribution en relation avec les facteurs topographiques et édaphiques. Cette approche a fourni des informations précieuses sur l'écologie des Fabaceae dans les écosystèmes de savane.

L'intégration synergique de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) offre un paradigme puissant pour l'analyse et la cartographie de la distribution spatiotemporelle de la végétation, particulièrement dans les écosystèmes arides et désertiques. L'utilisation combinée de données multispectrales et hyperspectrales, couplée à des indices de végétation avancés tels que le NDVI et MSAVI, permet une caractérisation précise de la structure et de la phénologie des communautés végétales, y compris les Fabaceae endémiques. Les capacités analytiques des SIG, notamment l'analyse multicritères et la

modélisation écologique, facilitent l'interprétation contextuelle des patterns de distribution observés. Cette approche géospatiale intégrée améliore significativement notre compréhension des dynamiques écosystémiques et des facteurs biotiques et abiotiques influençant la répartition des espèces. Néanmoins, les défis persistants, tels que la résolution des capteurs et la complexité des algorithmes de classification, soulignent la nécessité d'innovations continues dans le domaine de la géomatique appliquée à l'écologie végétale. L'évolution vers des méthodes d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle promet d'affiner davantage la précision et la portée de ces analyses, ouvrant de nouvelles perspectives pour la conservation de la biodiversité et la gestion durable des écosystèmes fragiles.

PARTIE II : EXPERIMENTALES

**CHAPITRE III : DIVERSITE ET
REPARTITION DES ESPECES
SPONTANEEES ET ENDEMIQUES
DANS LA REGION D'ETUDE**

Afin de mieux comprendre les facteurs qui influencent la répartition de la végétation. Cette section commence par une description générale de la région, en précisant sa localisation géographique et ses caractéristiques principales. L'étude des milieux abiotiques est essentielle, car des éléments tels que la géologie, la géomorphologie, la pédologie, l'hydrologie et le climat jouent un rôle fondamental dans la distribution et l'adaptation des espèces végétales. En abordant ces aspects, nous examinerons notamment les conditions géologiques et pédologiques spécifiques à la région d'El Oued, ainsi que la dynamique des eaux souterraines et de surface qui influence le développement de la végétation. Le climat aride, avec ses précipitations limitées et ses températures extrêmes, est un facteur clé dans la structuration des écosystèmes locaux. Par la suite, l'étude du milieu biotique permettra de décrire la végétation caractéristique de cette région, en mettant l'accent sur les espèces endémiques et les Fabaceae, qui constituent des éléments représentatifs de la biodiversité locale. Cette approche holistique offre une base solide pour comprendre l'interaction entre les facteurs abiotiques et biotiques dans la dynamique des écosystèmes arides.

1. Présentation de la région d'étude

La wilaya d'El Oued, située dans le Sud-Est algérien, est une région unique caractérisée par son paysage saharien et son importance géostratégique. S'étendant sur une superficie de 35 751,80 km², elle se trouve à environ 500 km au sud-est d'Alger (Abdelmonem et al., 2024).

Cette wilaya est bordée au nord par les wilayas de Khenchela, Biskra et Tébessa, à l'ouest et au sud-ouest par El Meghaier, Touggourt et Ouargla, et partage une frontière d'environ 300 km avec la Tunisie à l'est (Figure 13). La région, connue sous le nom de "Souf", se distingue par ses dunes de sable caractéristiques et son climat aride, avec des températures moyennes annuelles élevées et des précipitations rares, typiquement inférieures à 100 mm par an (Martins, 1864). L'écosystème d'El Oued est dominé par une végétation adaptée aux conditions désertiques, incluant des espèces halophytes et psammophiles. La palmeraie, couvrant une superficie importante, joue un rôle crucial dans l'économie locale et l'équilibre écologique de la région (Coté, 2005). La population, estimée à 873 000 habitants en 2018 (Khezzani et al., 2021), est répartie dans 22 communes en 2019, reflétant une densité relativement faible caractéristique des zones sahariennes. Cette configuration géographique et écologique unique fait d'El Oued un site d'intérêt majeur pour les études sur la biodiversité saharienne et l'adaptation des écosystèmes aux conditions extrêmes.

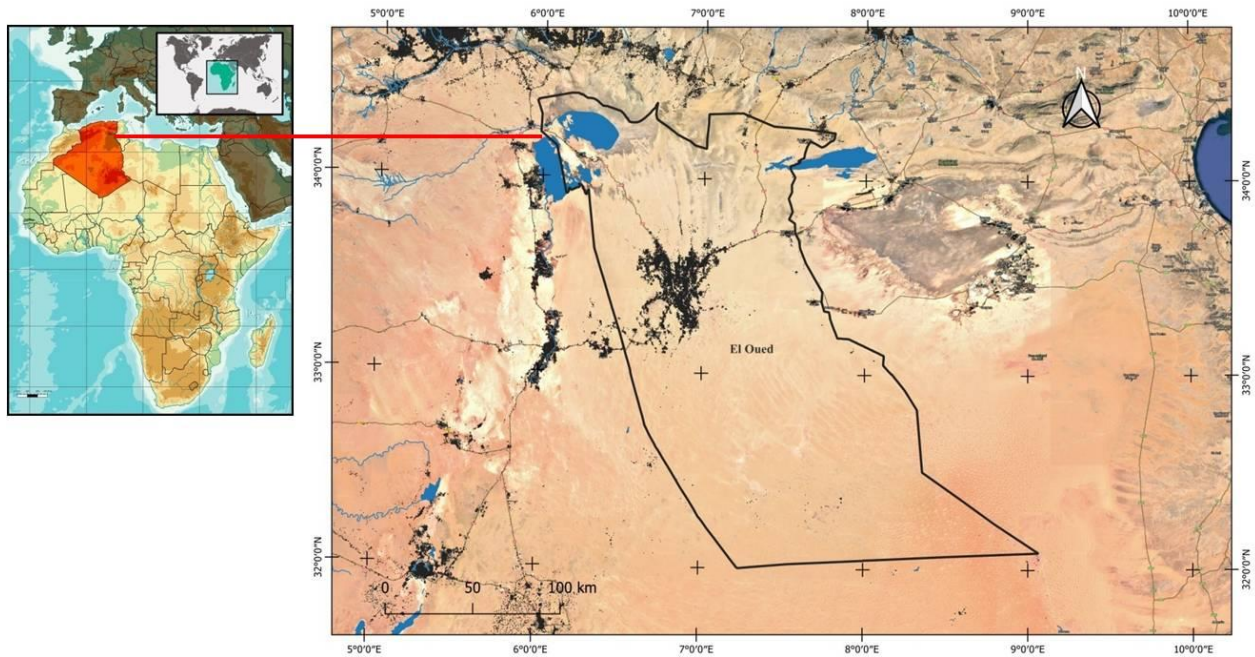


Figure 13: Carte de Localisation de la wilaya d'El Oued

1.1. Localisation géographique

La zone d'étude se situe dans le nord-est de Sahara Algérienne, entre les coordonnées géographiques $34^{\circ}30' N$ et $05^{\circ}45' S$, couvrant les régions d'El Oued et de Biskra (Figure 14). Cette zone fait partie du vaste écosystème saharien, l'un des plus grands déserts chauds du monde. Cette région est classée dans un climat hyper-aride chaud, caractérisé par de fortes variations des précipitations annuelles et intra-annuelles, qui restent généralement très faibles. Les températures y sont élevées, avec des amplitudes thermiques importantes, des taux d'évapotranspiration élevés et de longues périodes de sécheresse. De plus, la région est soumise à des événements climatiques extrêmes, tels que des vagues de chaleur et des vents violents, accentuant les contraintes environnementales sur la végétation (Bradai et al., 2015a).

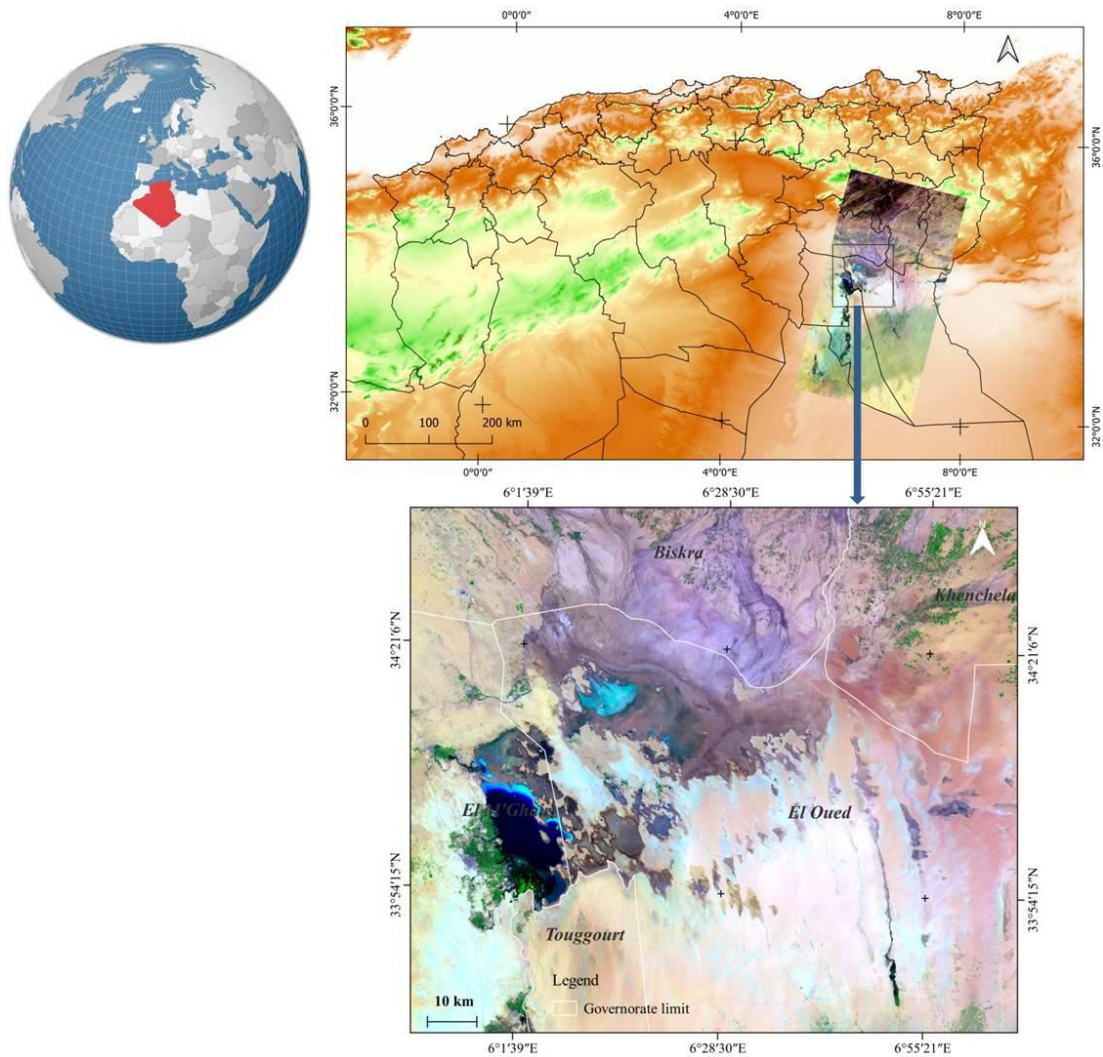


Figure 14: Carte de localisation géographique de la région d'étude (Système de coordonnées WGS 1984 UTM Zone 32N)

2- Milieu abiotique

2.1. Géologie de la région d'étude

L'analyse géologique constitue un outil d'investigation essentiel pour toute étude hydrogéologique, car elle permet d'identifier les horizons géologiques favorables au stockage des ressources en eau et d'expliquer les variations des concentrations chimiques observées dans les nappes phréatiques (Kouider et al., 2023).

2.1.1. Géologie régionale

La zone d'étude se situe dans le Bas Sahara, une vaste dépression topographique de faible altitude (variant entre 200 m et -30 m dans les zones des chotts), délimitée à l'ouest par

la dorsale du M'Zab, au sud par les Hamadas de Tademaït et Tinghert, à l'est par les plateaux du Dahar tunisien et au nord par les monts de l'Aurès et des Nemenchas. Cette région est caractérisée par une inclinaison progressive des reliefs vers une dépression centrale marquée par les axes SSW-NNE des oueds Mya et Righ (Figure 15). Au nord, on observe une dépression longitudinale occupée par les chotts, dont le fond se trouve en dessous du niveau de la mer, soulignant une topographie unique (Satouh et al., 2022; Touahri et al., 2023).

La zone fait partie de la plateforme saharienne, dominée par un socle précambrien affleurant dans les massifs du Hoggar au Sahara central et des Eglab au Sahara occidental (UNESCO, 1972). Ce socle est recouvert de sédiments plissés datant du Paléozoïque, traversés par des structures de l'orogénèse hercynienne, eux-mêmes surmontés par des sédiments marins et continentaux du Secondaire et du Tertiaire, atteignant une épaisseur totale de 3000 mètres (Figure 15). Le socle profond, situé à environ 3000 mètres, est couvert de grès primaires érodés et plissés, formant d'importants réservoirs d'hydrocarbures ainsi que des aquifères notables tels que celui du Continental Intercalaire. Une discordance céno-manoturonienne sépare ces couches des sédiments marins du Sénonien et de l'Éocène, surmontés par la couverture continentale du Mio-Pliocène, qui forme l'aquifère du Complexe terminal (Bouselsal 2017).

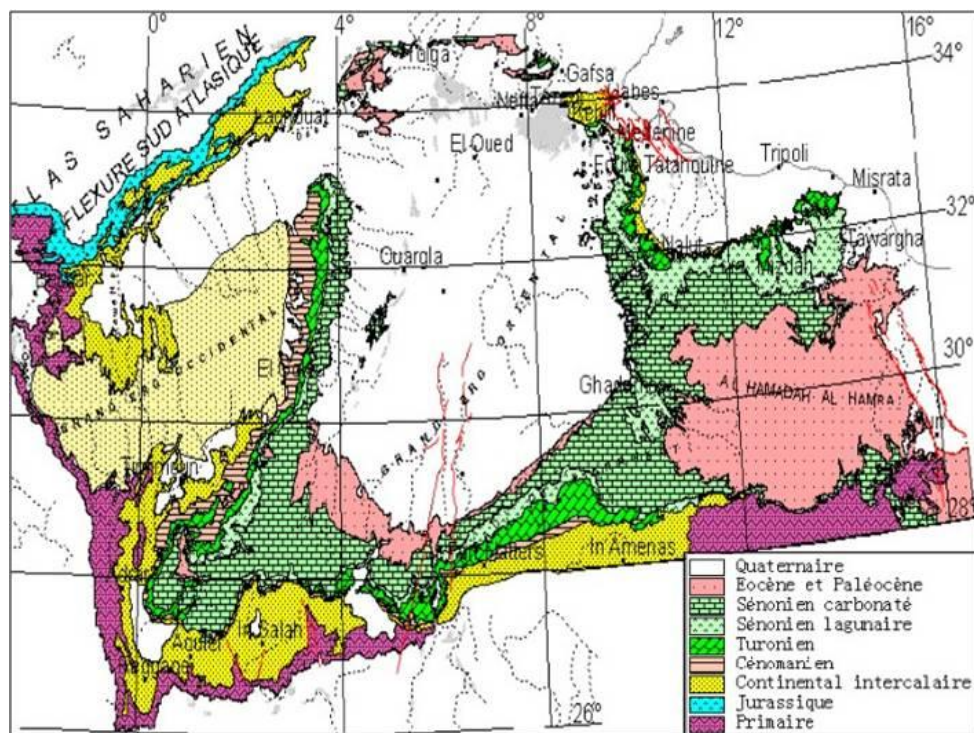


Figure 15 : Carte géologique régionale (Grand Erg Oriental), (Baba Sy.M, 2005).

2.1.2. Géologique local

La région d'étude, située dans le Sahara septentrional, est caractérisée par une couverture sédimentaire post-paléozoïque qui renferme des aquifères majeurs du désert saharien. La carte géologique de la zone d'El Oued montre une prédominance des dépôts quaternaires et miopliocènes à la surface. Les formations dunaires, parfois atteignant des hauteurs considérables, recouvrent une grande partie de la zone étudiée (Figure 16). L'analyse litho stratigraphique des forages hydrauliques dans cette région révèle plusieurs formations géologiques clés, décrites ci-dessous.

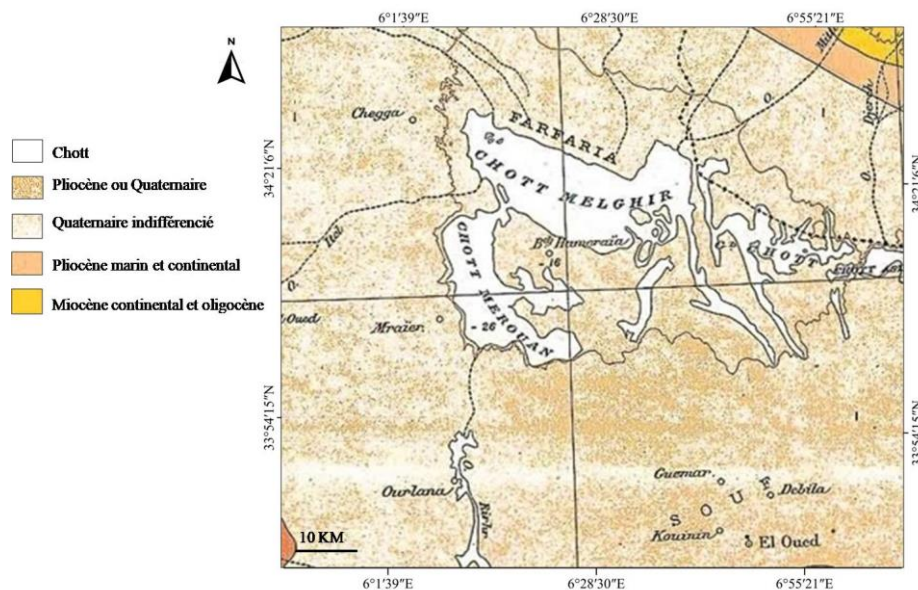


Figure 16 : Carte géologique local de la région d'étude, (extrait de la carte géologique géologique d'Algérie Édition 1951).

2.1.2.1. Formations de l'ère secondaire

I- Crétacé inférieur

- **Le Barrémien** : Cette unité géologique, d'une épaisseur oscillant entre 237 et 270 mètres, est marquée par une alternance de grès et d'argiles, accompagnée de quelques niveaux de calcaires dolomitiques. Ce niveau est fréquemment intercepté lors des forages du Continental Intercalaire. Par ailleurs, des dépôts sableux avec des fragments de silex y sont aussi présents (Bel & Demargne, 1966).
- **L'Aptien** : Associé au Barrémien, l'Aptien est une couche lithologique importante dans les forages. Il se compose de dolomies microcristallines à cristallines, avec des

intercalations d'argiles, de marno-calcaires et de lignites, indiquant une sédimentation lagunaire. Cette formation présente des caractéristiques semi-perméables (Figure 16).

- **L'Albien** : Cet horizon est dominé par des grès et des sables fins à très fins, avec des inclusions d'argiles, de marnes et de calcaires. Il s'agit d'une unité à forte sédimentation terrigène. La limite inférieure de l'Albien est formée par le sommet de la barre aptienne, tandis que la limite supérieure est définie par l'apparition de faciès argilo-carbonatés. L'épaisseur de cette couche varie entre 100 et 150 mètres.
- **Le Vraconien** : Cette formation, intermédiaire entre l'Albien sableux et le Cénomanien argilo-carbonaté, est composée d'une alternance d'argiles sableuses et de niveaux dolomitiques. Son épaisseur est estimée entre 250 et 300 mètres, et cette unité est imperméable, jouant ainsi un rôle protecteur pour les formations sous-jacentes.
- **Le Cénomanien** : Ce stade marque le retour des conditions marines dans le Sahara depuis le Paléozoïque. Il est constitué de dépôts argilo-carbonatés alternant avec des dolomies et des calcaires dolomitiques. L'épaisseur de cette formation dans la région étudiée varie entre 250 et 300 mètres.
- **Le Turonien** : Il représente la base du Complexe Terminal et se compose principalement de calcaires et de dolomies compactes avec des intercalations de marnes. L'épaisseur de ce niveau fluctue en fonction des zones, atteignant jusqu'à 95 mètres.
- **Le Sénonien** : Cette période est divisée en deux formations distinctes : l'une lagunaire et l'autre carbonatée, reflétant un environnement de dépôt évoluant à partir de conditions marines vers des environnements plus continentaux.

2.1.2.2. Formations de l'ère tertiaire

- **1-L'Éocène**

Avant la fin de l'Éocène, le retrait définitif de la mer du Sahara a conduit à une sédimentation continentale. L'Éocène carbonaté est difficile à différencier du Sénonien en raison de leurs similitudes lithologiques, bien que cette formation soit constituée de dolomies et de calcaires dolomitiques avec des niveaux de marnes, d'argiles et d'anhydrites. Dans la région d'El Oued, cette couche peut atteindre une épaisseur de 340 mètres (Figure 17).

- **2-Mio-Pliocène**

Le Mio-Pliocène est un ensemble hétérogène de sables et d'argiles, reposant en discordance sur des formations plus anciennes comme le Crétacé ou l'Éocène. Il est

souvent appelé "Continental Terminal" et constitue l'un des principaux aquifères du Sahara (Bel & Demargne, 1966). Il se compose de plusieurs niveaux successifs :

- **Niveau argileux** : Présent uniquement dans la partie centrale du Sahara Oriental, il joue un rôle de barrière peu perméable entre les aquifères carbonatés sous-jacents et les nappes sableuses supérieures.
- **Niveau grès-sableux** : Ce niveau, particulièrement intéressant d'un point de vue hydrogéologique, peut atteindre une épaisseur de 400 mètres, formant ainsi l'un des principaux réservoirs d'eau souterraine de la région.

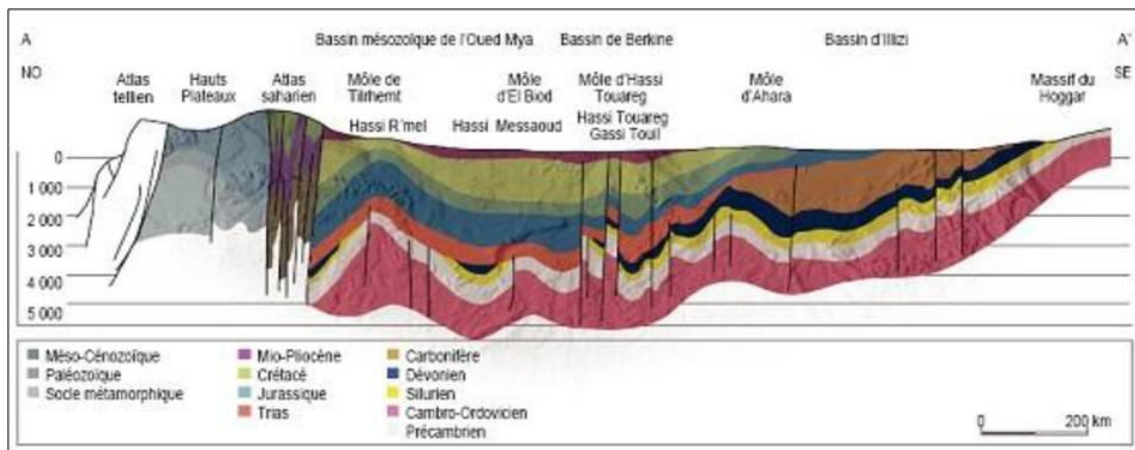


Figure 17 : Coupe géologique transversale régionale du Sahara (WEC, 2007).

2.2. Géomorphologie

La région d'étude se situe dans le Grand Erg Oriental, également appelé Bas-Sahara, en raison de son relief relativement bas et de son positionnement au sein d'une vaste dépression orientée du sud vers le nord. Cette dépression atteint une altitude moyenne de 80 mètres, avec une diminution progressive en direction du nord, jusqu'à atteindre 50 mètres en dessous du niveau de la mer dans les zones des chotts. Le point le plus élevé, à 29 mètres d'altitude, se trouve dans la commune de Foulia, près de Réguiaba. La région est délimitée au nord par les grands chotts, vastes plaines salées, et au sud par le massif de dunes du Grand Erg Oriental, qui façonne une grande partie du paysage.

La géomorphologie de cette zone présente trois types de paysages distincts (Aissa, 2001) : les dunes de sable (Erg), les sebkhas, et les régions plates et déprimées connues sous le nom de Sahane. Ces caractéristiques géomorphologiques définissent la topographie particulière de la région du Souf.

a) Le premier type de paysage, l'**Erg**, est constitué de vastes étendues de dunes de sable, dont certaines atteignent des hauteurs impressionnantes, parfois jusqu'à 200 mètres. Ces dunes, souvent appelées "Ghroudes", se sont formées par l'accumulation de sables transportés par les vents dominants, créant ainsi des formations dynamiques qui évoluent avec le temps.

b) Les **sebkhas** sont des zones caractérisées par une nappe phréatique proche de la surface, favorisant la salinisation excessive des sols. Ces conditions géologiques aboutissent à la formation de sols sodiques où des dépôts de sels divers se forment à la surface. Selon l'origine de l'eau, qu'elle soit superficielle ou provenant de la nappe phréatique, ces formations salines peuvent évoluer en chotts ou sebkhas, deux types de dépressions salines largement présents dans la région.

c) Le troisième paysage, le **Sahane**, est une zone plate et légèrement déprimée, souvent caillouteuse et caractérisée par des dépressions fermées entourées de dunes. Le sol y est souvent recouvert d'une croûte gypseuse, et seules quelques espèces végétales adaptées parviennent à y pousser. Cette zone est marquée par un environnement désertique très aride, où l'eau est rare, limitant ainsi la couverture végétale.

2.3. Hydrologie et hydrogéologie

La région d'étude, située dans le Bas-Sahara algérien, présente des caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques spécifiques, en grande partie influencées par ses formations géologiques et climatiques arides. L'hydrologie de cette région est marquée par une absence quasi totale de cours d'eau permanents, en raison des faibles précipitations annuelles, généralement inférieures à 100 mm par an (Chehma & Djebbar, 2008). La principale ressource en eau provient des nappes souterraines, particulièrement des aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal, qui s'étendent sous une grande partie du Sahara septentrional (Barkat et al., 2021). Ces aquifères sont d'une importance vitale pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation dans cette région désertique.

L'aquifère du Continental Intercalaire, qui remonte au Crétacé inférieur, est l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine du Sahara. Il est constitué de grès perméables avec des intercalations d'argiles et de calcaires, permettant une capacité de stockage élevée. En revanche, l'aquifère du Complexe Terminal, d'âge Miocène à Quaternaire, est formé de sédiments plus récents, incluant des couches de sables et de graviers, ce qui le rend

particulièrement important pour l'agriculture irriguée (Saibi et al., 2009). Cependant, ces nappes sont profondément enfouies, et leur exploitation repose sur des forages profonds.

La nappe phréatique, quant à elle, se trouve souvent à une faible profondeur dans certaines zones, notamment dans les sebkhas, où la proximité avec la surface entraîne une forte évaporation et la formation de sols salins (Chenchouni, 2017). Ces caractéristiques hydrogéologiques complexes nécessitent une gestion durable et efficace des ressources en eau, car la surexploitation des aquifères, combinée à l'augmentation de la demande en eau, pourrait entraîner une dégradation de la qualité des eaux souterraines et un abaissement des nappes (Bouselsal et Saibi, 2022).

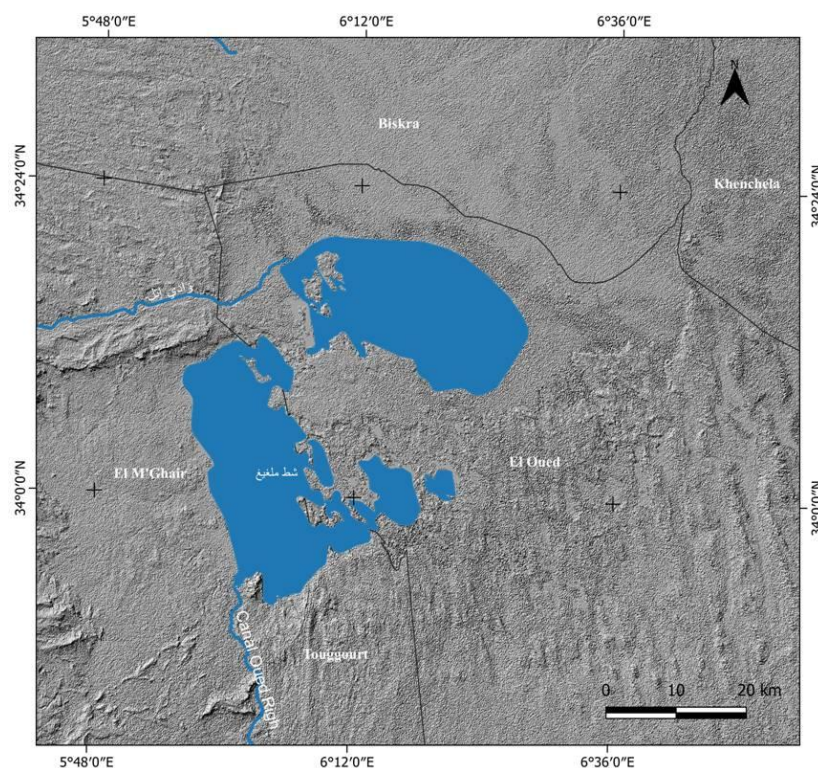


Figure 18 : Carte du réseau hydrographique de la région d'étude

2.4. Pédologie

La pédologie de la région d'étude est caractérisée par des sols arides et désertiques, façonnés par des conditions climatiques extrêmes et une hydrologie particulière. Les sols de cette région se développent principalement sur des formations de sables éoliens et des dépôts alluviaux anciens, constituant des sols pauvres en matière organique, peu développés et souvent sujets à l'érosion éolienne (Dubief, 1952). La texture dominante est sablonneuse, ce

qui entraîne une faible rétention en eau, et rend la région particulièrement vulnérable à la désertification et à la dégradation des terres (Ozenda, 1991).

Les sols salins sont également très présents, notamment dans les zones de sebkhas et chotts, où l'évaporation intense conduit à l'accumulation de sels à la surface, formant des croûtes salines (Monod, 1992). Ces sols, appelés (solonchaks), sont caractérisés par une salinité élevée, qui limite leur fertilité et leur utilisation agricole (Mehda et al., 2021). Cependant, dans certaines zones, les pratiques agricoles intensives, telles que l'irrigation avec des eaux souterraines riches en sels, exacerbent encore la salinisation des sols, compromettant ainsi la durabilité des terres cultivées (Boualem et al., 2024).

Sur le plan pédogénétique, la formation des sols dans cette région est limitée par les faibles précipitations et la forte évaporation, ce qui restreint le lessivage des minéraux et le développement de sols profonds (Chehma et Djebbar, 2008). Les sols de la région présentent souvent une faible activité biologique en raison des conditions arides, ce qui se traduit par une lente décomposition de la matière organique et une faible fertilité naturelle (Pérez-Ramos, 2024).

2.5. Climat

2.5.1. Les précipitations mensuelles et annuelles

Les données climatiques utilisées sont les données de l'Office National de la Météorologie (ONM) de la station de Biskra et EL Oued (Guemar) pour une période allant de 1987 jusqu'à 2022. Les précipitations annuelles moyennes dans la région d'étude sont marquées par de faibles quantités, avec 144,30 mm à Biskra et 79 mm à El Oued. Plus précisément, à Biskra et El Oued, les valeurs les plus basses sont enregistrées en août avec 2,84 mm à Biskra (Figure 19) et en juillet avec 0,52 mm à El Oued (Figure 20), tandis que les valeurs les plus élevées sont observées en septembre avec 22,85 mm à Biskra et en novembre avec 20,27 mm à El Oued (Annexe 1).

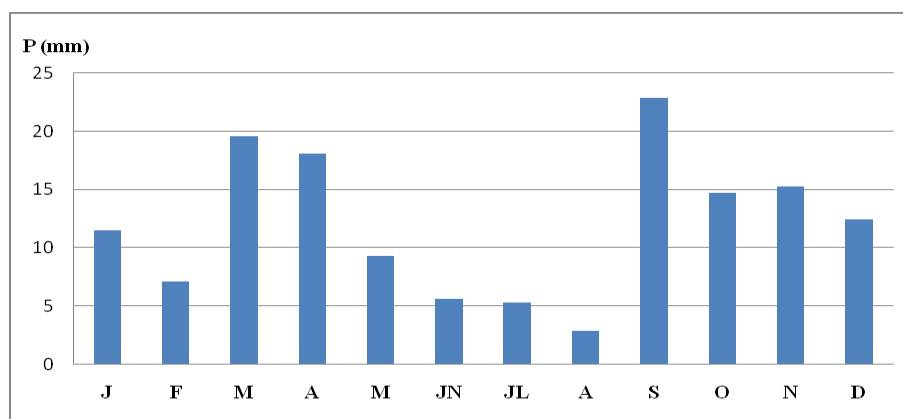


Figure 19 : Variations moyennes mensuelles des précipitations, station de Biskra (1987-2022)

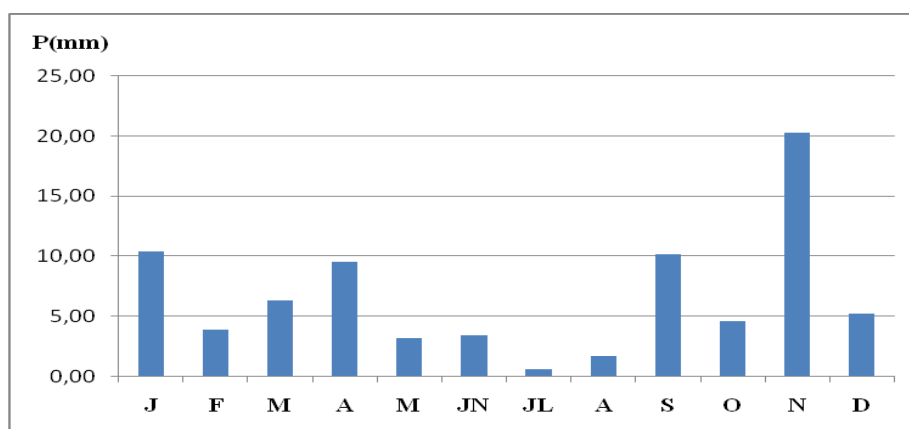


Figure 20 : Variations moyennes mensuelles des précipitations, station d'El Oued (1987-2022)

2.5.2. Variations interannuelles des précipitations

Les précipitations annuelles enregistrées à la station de Biskra varient considérablement, allant de 41,20 mm en 2002 à un maximum de 342,74 mm en 1994 (Figure 21), avec une moyenne annuelle de 144,31 mm. Quant à la station d'El Oued, les précipitations minimales ont été observées en 1989 avec 16,24 mm, tandis que le maximum a été atteint en 2004 avec 350 mm. En moyenne, la station d'El Oued enregistre environ 78,43 mm de précipitations par an (Figure 22).

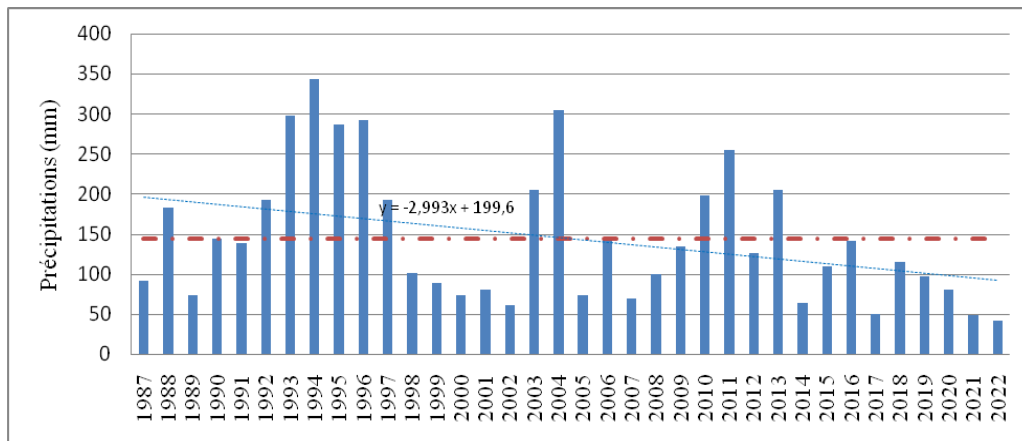


Figure 21 : Variations interannuelles des précipitations de Biskra (1987-2022)

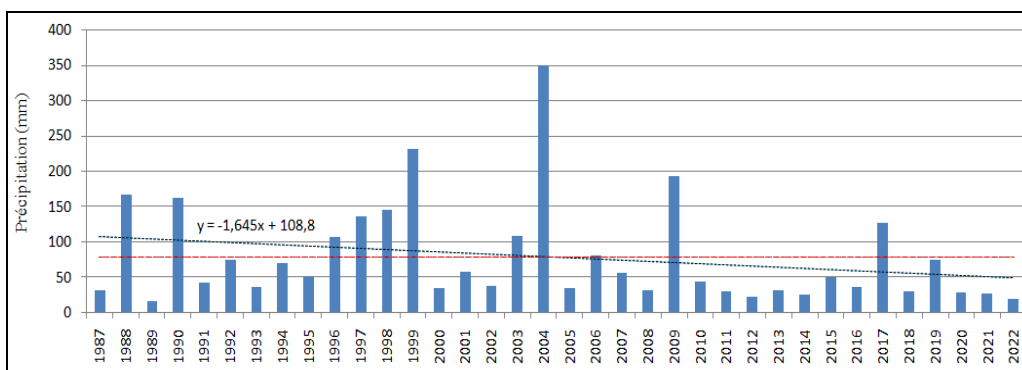


Figure 22 : Variations interannuelles des précipitations d'El Oued (1987-2022)

2.5.3. Les températures

Les données confirment que les conditions climatiques de la région sont caractérisées par une saison sèche persistante tout au long de l'année (Figure 23). Les températures moyennes varient de 12,03 °C en janvier à 34,62 °C en juillet dans la région de Biskra, tandis qu'elles oscillent entre 10,97 °C en janvier et 33,98 °C en juillet dans la région d'El Oued.

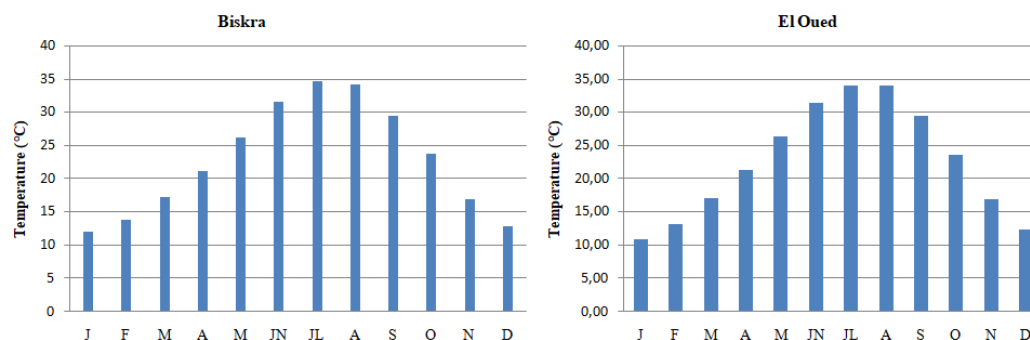


Figure 23 : Variation des moyennes mensuelles des températures, stations de Biskra et El Oued (1987-2022)

2.5.4. Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique de Gaussen est un outil fondamental pour représenter et analyser les périodes de sécheresse dans une région donnée, en fonction de la relation entre les précipitations et les températures mensuelles. Selon Gaussen, une période est considérée comme sèche lorsque les précipitations mensuelles (P) sont inférieures à deux fois la température moyenne mensuelle ($P < 2T$). Ce critère permet d'identifier visuellement les mois de sécheresse sur un diagramme ombrothermique, où l'axe des abscisses représente les mois de l'année, et les ordonnées affichent d'une part les précipitations et d'autre part les températures, avec une échelle doublée pour la température. Dans des régions arides telles que celles d'El Oued et Biskra, caractérisées par de faibles précipitations annuelles et des températures élevées, ce type de représentation met en évidence une saison sèche qui s'étend sur presque toute l'année (Figure 24). Ce diagramme est donc particulièrement utile pour illustrer le déséquilibre hydrique propre à ces régions, et pour mieux comprendre l'impact de la sécheresse sur la végétation et l'écosystème local (Aidoud et al., 2006).

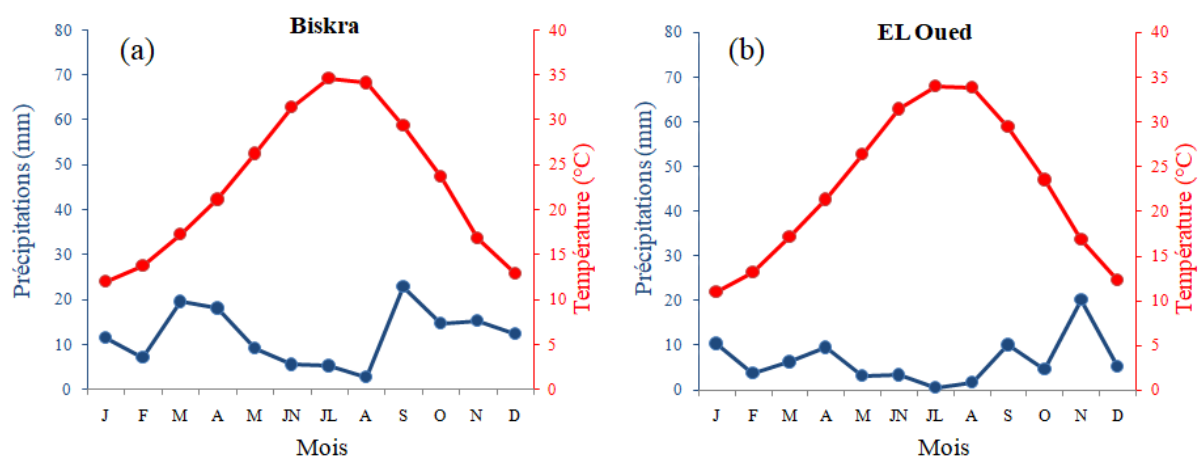


Figure 24 : Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de (a) Biskra et (b) EL Oued

2.5.5. Climagramme d'EMBERGER

Le climagramme d'Emberger est un outil scientifique conçu pour caractériser les climats méditerranéens en tenant compte des précipitations annuelles et des températures extrêmes de la région. Cette approche se base sur le quotient pluviométrique d'Emberger (Q), qui est calculé en fonction des précipitations totales, de la température moyenne maximale du mois le plus chaud (M) et de la température moyenne minimale du mois le plus froid (m). Le quotient Q_2 est défini par la formule :

$$Q_2 = \frac{100P}{(M + m)(M - m)} \quad (3)$$

Où P représente les précipitations annuelles, M la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud et m la moyenne des températures minimales du mois le plus froid. Ce quotient permet de classer une région dans un étage climatique spécifique (Tableau 02), allant des climats arides aux climats humides.

Tableau 02 : Etages climatiques en fonction des valeurs du Q_2 (Daget et al., 1988)

Etages bioclimatiques	Q_2
Saharienne	$Q_2 < 10$
Aride	$10 < Q_2 <$
Semi-aride	$45 < Q_2 <$
Sub-humide	$70 < Q_2 <$
Humide	$110 < Q_2 <$
Per-humide	$Q_2 > 150$

Une fois le quotient calculé, la valeur de Q_2 est reportée sur le climagramme d'Emberger, qui intègre également la variante hivernale en fonction de la température minimale (m), pour mieux cerner les nuances climatiques saisonnières de la région étudiée.

Sur la base des données climatiques recueillies pour les périodes allant de 1987 à 2022, il est possible de situer les régions de Biskra et d'El Oued dans l'étage bioclimatique aride et saharien respectivement, caractérisé par une aridité prononcée. Pour la région de Biskra, les précipitations annuelles moyennes (P) sont de 144,31 mm, avec une température moyenne maximale (M) de 34,63 °C en été et une température moyenne minimale (m) de 6,91 °C en hiver. Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q_2), calculé à partir de ces paramètres, atteint une valeur de 12,53, confirmant l'appartenance de Biskra à cet étage aride. De même, dans la région d'El Oued, les précipitations annuelles sont encore plus faibles, avec une moyenne de 79 mm, et les températures extrêmes enregistrent une moyenne maximale (M) de 34 °C et une moyenne minimale (m) de 10,17 °C. Le quotient pluviométrique calculé pour El Oued ($Q_2 = 7,50$) classe également cette région dans l'étage bioclimatique saharien.

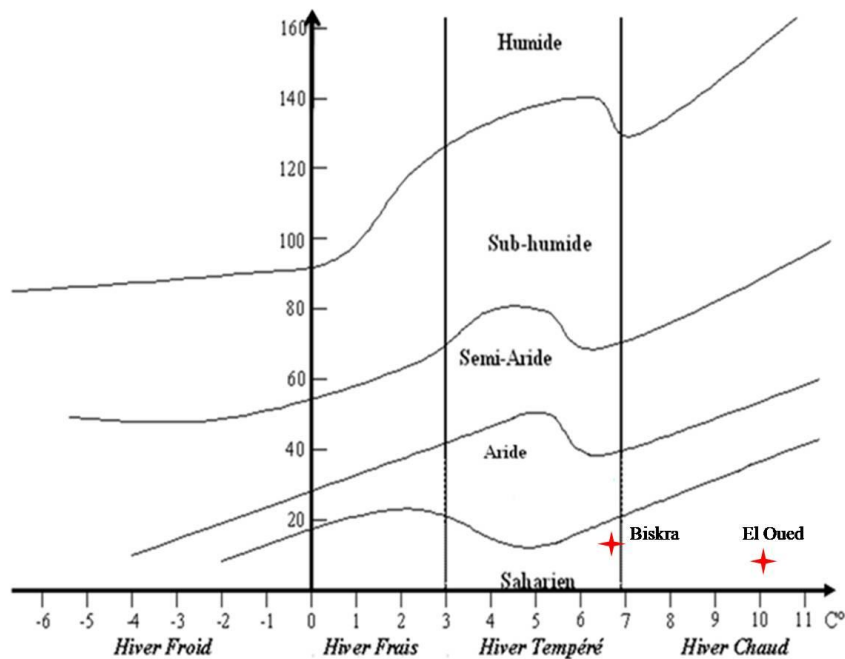


Figure 25 : Climagramme d'Emberger de la région d'étude (1987- 2022)

3. Milieu biotique

3.1. La végétation

La région d'étude, située dans la partie nord-est du Sahara algérien, présente un paysage végétal typique des zones sahariennes, marqué par une végétation clairsemée adaptée aux conditions climatiques arides. La flore y est principalement composée de plantes xérophytes, capables de résister à des périodes prolongées de sécheresse et de températures extrêmes. Les espèces végétales dominantes appartiennent à des familles telles que les Fabaceae, les Asteraceae et les Chenopodiaceae, qui se sont adaptées à la salinité des sols et à la rareté des ressources en eau (Chenchouni, 2012; Macheroum et al., 2021). Parmi ces espèces, *Retama retam*, *Anabasis articulata*, et *Traganum nudatum* sont fréquemment observées dans les dépressions sablonneuses et les sebkhas, où l'humidité du sol est légèrement plus élevée. La végétation halophile est également présente dans les zones salines, avec des espèces comme *Salsola vermiculata* et *Atriplex halimus*, qui prospèrent dans des sols riches en sels (Bradai et al., 2015b).

Le paysage végétal de la région est également caractérisé par des formations de dunes appelées ergs, ainsi que par des sebkhas et des chotts, qui forment des écosystèmes uniques. Ces formations géomorphologiques influencent fortement la répartition de la végétation, en créant des microhabitats où certaines espèces sont mieux adaptées (Ozenda, 2004). Par

ailleurs, la végétation dans ces zones est souvent clairsemée et limitée à des poches de sol plus favorables à la croissance des plantes. L'aridité extrême et la faible couverture végétale influencent non seulement la biodiversité locale, mais aussi la stabilité des sols et la régénération naturelle des écosystèmes (Quézel et Santa, 1962).

3.2. Etat et phytogéographie de la végétation

La région d'étude, présente une végétation caractéristique des zones sahariennes, où les conditions climatiques arides et les sols pauvres influencent directement la distribution et la composition des espèces végétales. La végétation y est majoritairement clairsemée, constituée de plantes xérophytes et halophytes, adaptées aux sols salins et aux faibles précipitations annuelles (Chehma et al., 2008a; b). L'état de la végétation dans cette région reflète l'intensité des pressions environnementales, notamment le surpâturage, l'érosion des sols, et les changements climatiques, qui ont contribué à la dégradation progressive des écosystèmes végétaux (Hanafi, 2024).

La phytogéographie se distingue par l'appartenance à la zone saharienne, avec des espèces végétales souvent endémiques ou ayant une large distribution dans les écosystèmes arides. Les espèces dominantes comprennent des genres tels que *Anabasis*, *Tamarix*, *Traganum* et *Retama*, qui jouent un rôle crucial dans la structuration de l'écosystème local (Quézel et Santa, 1963; Quézel, 1978). Ces espèces sont bien adaptées aux conditions hydriques difficiles et à la salinité accrue des sols, formant des communautés végétales distinctes selon les micro-habitats, tels que les sebkhas, les ergs et les oueds (Azizi et al., 2021).

La végétation endémique de la région saharo-arabique, bien que peu diversifiée, est cruciale pour la conservation de la biodiversité et la résilience des écosystèmes locaux. Ces espèces, adaptées aux conditions climatiques arides, stabilisent les sols, réduisent l'érosion et régulent les flux hydriques, jouant ainsi un rôle écologique essentiel (Le Houérou, 2001). Parmi elles, la famille des Fabaceae, comprenant des genres comme *Retama* et *Astragalus*, se distingue par sa capacité à fixer l'azote, contribuant ainsi à améliorer la fertilité des sols pauvres de la région. En outre, elles fournissent un habitat à la faune locale et servent de fourrage pour le bétail, renforçant leur importance écologique et économique (Sprent et al., 2017).

Cependant, les Fabaceae font face à des défis liés au changement climatique, notamment la modification des régimes de précipitations et l'augmentation des températures. Ces pressions, aggravées par des pratiques non durables comme le surpâturage, pourraient réduire leur répartition et aggraver la désertification (Jauffret, 2001).

4. Méthodologie et Choix des stations

Avant la sélection des sites d'échantillonnage, la région d'étude a été visitée à plusieurs reprises tout au long de l'année afin d'examiner la diversité des communautés végétales spontanées. Sept (7) sites ont été sélectionnés en fonction de la géomorphologie du paysage, de l'altitude et de l'homogénéité des conditions écologiques (Figure 26).

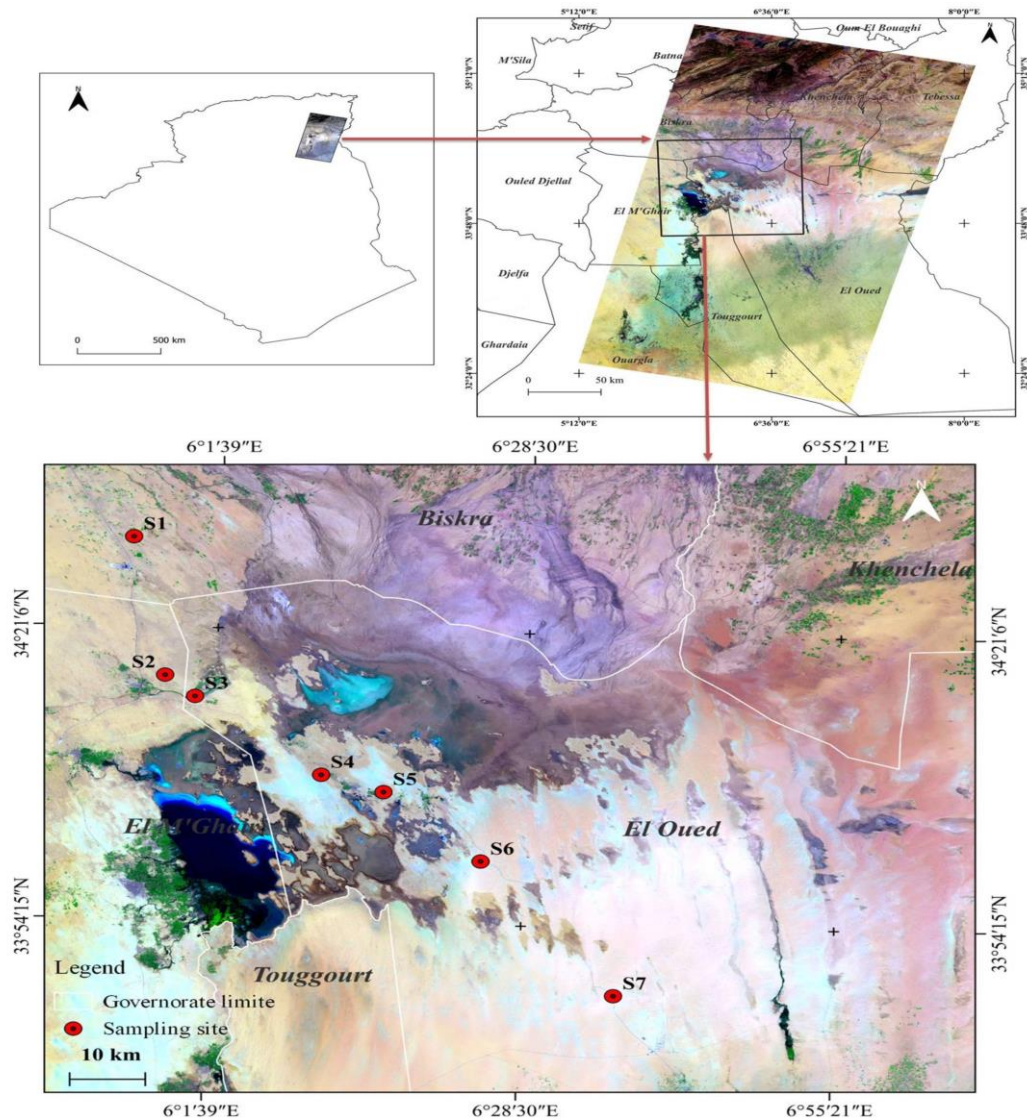


Figure 26 : Carte de géolocalisation montrant la localisation des sites d'échantillonnage dans la partie Nord-Est du Sahara algérien (EL Oued).

Site 1 (altitude = 27 m au-dessus du niveau de la mer) correspond à une micro-dune dominée par *Anabasis articulata*. Le site 2 (altitude = 21 m au-dessus du niveau de la mer) est également une micro-dune où *A. articulata*, *Salsola tetragona* et *Zygophyllum album* constituent les espèces végétales distinctives. Le site 3 (altitude = 8 m en dessous du niveau de la mer) est un lit de oued sablonneux où dominent *A. articulata* et *Traganum nudatum*. Le site 4 (altitude = 22 m en dessous du niveau de la mer) est un sol salin dominé par *A. articulata*, *S. tetragona* et *T. nudatum*. Le site 5 (altitude = 18 m en dessous du niveau de la mer) est un sol sableux caractérisé par la présence de *A. articulata* et *T. nudatum*. Le site 6 (altitude = 16 m en dessous du niveau de la mer) correspond à des dunes de sable dominées par *T. nudatum* et *Limoniastrum guyonianum*. Enfin, le site 7 (altitude = 2 m au-dessus du niveau de la mer) est composé de dunes de sable où *A. articulata* et *Retama retam* sont abondants.

Compte tenu du contexte pédoclimatique, les caractéristiques physiques et chimiques des sols des sites d'échantillonnage révèlent une forte salinité, particulièrement aux sites 2 et 4 (conductivité électrique (1/5) = 2,6 dS/m). Ces sols présentent souvent une texture sableuse et un pH alcalin (pH = 7,44–8,08), avec une teneur très faible en matière organique (inférieure à 2 %) et un taux de calcaire variant de légèrement à modérément élevé (CaCO₃ compris entre 1,44 % et 12 %) (Lozet et Mathieu, 1990).

5. Méthode d'échantillonnage et collecte de données

La collecte des données a été réalisée de mai 2022 à fin avril 2023, période correspondant à la pleine croissance des plantes et permettant de recenser un maximum de plantes spontanées malgré les conditions de sécheresse qui touchent la zone d'étude. Nous avons sélectionné sept (7) sites d'échantillonnage pour effectuer nos mesures, en veillant à ce que les conditions environnementales sont presque les mêmes pour chacun d'entre eux. La méthode de relevé linéaire (transect) (Goodall, 1952) a été utilisée pour évaluer la végétation, avec cinq (05) transects orientés Nord-Sud dans chaque site, ce qui nous donne un total de 35 transects dans toute la zone d'étude. Pour estimer l'abondance et la richesse des plantes, nous avons utilisé la méthode des points quadras (Point-Intercept Method). Tous les 20 cm le long de chaque transect, les espèces végétales ont été identifiées, et leur densité a été déterminée. La reconnaissance des espèces végétales a été réalisée en consultant les ouvrages d'identification de la flore algérienne (Quézel et Santa, 1963 ; Ozenda, 2004).

6. Analyse de la diversité végétale

6.1. Indices de diversité

Plusieurs descripteurs de diversité alpha (richesse spécifique, indice de diversité de Shannon et équitabilité), ainsi que des descripteurs de la diversité bêta (indice de Jaccard et distance de Bray-Curtis), ont été utilisés pour évaluer la richesse floristique et la diversité à chaque site échantillonné. Lors du calcul de la diversité alpha, les données collectées sur les parcelles d'échantillonnage ont été traitées séparément ; cependant, pour les indices de diversité bêta, les abondances des espèces dans les parcelles ont été combinées. De plus, la richesse spécifique mesurée sur les sites échantillonnés a été comparée à une échelle de richesse spécifique adaptée aux environnements sahariens (Daget et Poissonet, 1991). En conséquence, l'état de la flore a été établi pour chaque site en fonction du nombre d'espèces (S) comme suit : très faible richesse spécifique ($S < 11$), faible richesse spécifique ($11 < S < 20$), richesse spécifique modérée ($21 < S < 30$), richesse assez importante ($31 < S < 40$), richesse spécifique ($41 < S < 50$), et richesse très élevée ($S > 50$) (Azizi et al., 2021). L'indice de diversité de Shannon (H') a été utilisé pour mesurer la diversité des plantes alpha. Cet indice est particulièrement influencé par la diversité des espèces communes (Shannon et Weaver, 1949).

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \right) \quad (4)$$

La richesse spécifique (S) désigne le nombre total d'espèces présentes sur le site d'échantillonnage (Magurran, 2021), N représente le nombre total d'individus des espèces S, et n_i correspond au nombre d'individus de l'espèce i sur le site échantillonné. L'indice de diversité de Shannon, en rapport avec la diversité théorique maximale, a été utilisé pour calculer l'indice d'équitabilité "E".

$$E = H' / \log_2 S \quad (5)$$

$$H'_{\max} = \log_2 S \quad (6)$$

L'équitabilité (E) permet de mesurer la répartition des individus au sein d'une espèce. Sa valeur varie entre 0 et 1, avec une équitabilité maximale ($E = 1$) atteinte lorsque toutes les espèces végétales présentent des densités relativement proches les unes des autres. L'évaluation de l'équitabilité est utile pour identifier la structure d'une communauté, car elle permet de détecter les modifications anthropiques (Neffar et al., 2018). Les structures

taxonomiques de chaque site d'échantillonnage ont été utilisées pour analyser la diversité phylogénétique en se basant sur les ratios de richesse générique ou familiale à la richesse spécifique (G/S ou F/S). Les structures taxonomiques des communautés varient en fonction des conditions environnementales et de l'habitat. Nous avons supposé que la richesse des catégories taxonomiques hiérarchiques (famille, genre et espèce) pourrait augmenter en fonction des conditions écologiques plus favorables dans les zones d'échantillonnage. Des modèles de puissance, linéarisés après des transformations logarithmiques naturelles (ln), ont été utilisés pour étudier les corrélations entre la richesse spécifique et la richesse générique ou familiale (Fan et al., 2017). Des recherches antérieures ont déjà démontré l'efficacité de ces modèles pour reproduire ces types de relations.

$$\ln(G) = a \times \ln(S) \quad (7)$$

$$\ln(F) = a \times \ln(S) \quad (8)$$

En ce qui concerne les relations entre les genres, familles et espèces, les nombres (G), (F), et (S) représentent respectivement le nombre de genres, de familles et d'espèces. La variance des ratios (G/S) et (F/S) entre les sites d'échantillonnage a été examinée à l'aide d'une analyse de variance à un facteur (ANOVA unidirectionnelle). Cette approche statistique permet de déterminer si les différences observées dans les ratios de genres et de familles par rapport aux espèces sont significatives entre les différentes localisations, ce qui pourrait refléter des variations dans les conditions écologiques et la structure des communautés végétales.

6.2. Beta diversité

L'indice de Jaccard, qui utilise les données de présence/absence des espèces par site, a été utilisé pour examiner la similarité spatiale qualitative, ou « beta diversité », de la diversité végétale entre les sites d'échantillonnage. De plus, la distance de Bray-Curtis, qui se base sur les densités moyennes d'espèces par site, a été utilisée pour évaluer la similarité spatiale quantitative (beta diversité). Afin de séparer les groupes homogènes de sites d'échantillonnage en fonction de leur composition et de leur abondance en espèces, une analyse de regroupement (méthode de Ward) a été effectuée sur les résultats de l'analyse de similarité. Le logiciel R a été utilisé pour réaliser toutes les analyses statistiques mentionnées ci-dessus (R Core Team, 2022).

6.3. Types morphologiques

Selon Quézel et Santa (1963) et Ozenda (2004), la classification d'une espèce en tant que pérenne ou annuelle dépend de la durée de la persistance de la partie végétative aérienne pendant la saison défavorable (Bouallala et al., 2020).

6.4. Forme de vie des plantes

Selon Raunkiaer (1934), les espèces peuvent être classées en fonction de leur forme biologique, ou "forme de vie", qui est déterminée par la morphologie de l'espèce et représente l'expression de son adaptation à l'environnement, en lien avec la préservation du méristème. Quatre types de formes de vie sont considérés : les Chamaephytes, les Phanérophytes, les Hémicryptophytes et les Térophytes.

6.5. Types phytogéographiques

La flore d'Algérie et des régions désertiques (Quézel et Santa, 1963 ; Quézel, 1978) a permis d'établir les propriétés phytogéographiques des espèces végétales recensées ; Plusieurs regroupements chorologiques ont été créés à partir de la division des systèmes phytogéographiques : Endémiques au Sahara, Saharo-Arabiques, Méditerranéens, Cosmopolites, etc.

7. Résultats

7.1. Composition floristique

Au cours de la période de recherche, un total de 3 885 individus appartenant à 44 espèces a été regroupé en 36 genres et 16 familles. La famille des Chenopodiaceae représente 22,73 % du total des espèces ; les Fabaceae suivent avec 18,18 %, les Asteraceae avec 11,36 %, les Brassicaceae, Caryophyllaceae et Zygophyllaceae avec 6,82 % chacun, et les Cucurbitaceae et Poaceae avec 4,55 % des espèces. Les 8 autres familles restantes ne représentent que 18,18 % du total des espèces (Tableau 3). De plus, une densité maximale a été observée au site 3 (670 individus/50 m), suivie du site 4 (618 individus/50 m), et la densité minimale a été notée au site 7 (388 individus/50 m). Parmi les espèces observées, *Anabasis articulata* et *Traganum nudatum* ont affiché les densités les plus élevées avec un total de 859 et 514 individus/50 m, respectivement. *Anabasis articulata* était dominante dans les sites 1, 3, 4 et 7 avec des densités moyennes variant de $22,00 \pm 1,58$ à $41,40 \pm 2,07$ individus par relevé,

tandis que le site 6 a enregistré la densité minimale avec $12,80 \pm 1,92$ individus par relevé. *Traganum nudatum* a dominé au site 6 avec $18,40 \pm 2,79$ individus par relevé.

7.2. Structures taxonomiques

En général, le rapport de la richesse générique (G/S) à la richesse spécifique dans la partie nord-est du Sahara algérien (El Oued) était de $0,94 \pm 0,05$, tandis que le rapport de la richesse familiale (F/S) à la richesse spécifique était de $0,56 \pm 0,13$ (Figure 27). Les valeurs des rapports (G/S) étaient élevées dans tous les sites d'échantillonnage ; le site 4 a enregistré un total de 1,00, tandis que la valeur minimale a été observée au site 4 (F/S = $0,39 \pm 0,05$).

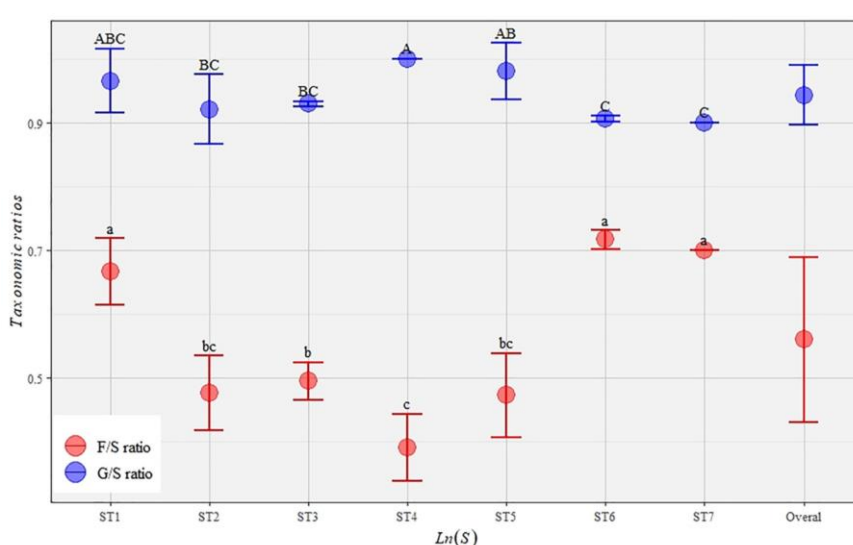


Figure 27 : Ratios richesse familiale/richeesse spécifique (F/S) et richesse générique/richeesse spécifique (G/S) pour différents sites d'étude dans la partie Nord-Est du Sahara algérien (EL Oued). Suite au test post hoc HSD de Tukey, les lettres identiques relatives aux moyennes des ratios F/S (lettres minuscules) et G/S (lettres majuscules) ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$) entre les sites d'échantillonnage. Les écarts types sont représentés par les barres d'erreur verticales.

Tableau 3 : Liste de la diversité taxonomique et de la densité végétale à plusieurs sites différents dans la partie nord-est du Sahara algérien (El Oued). La densité végétale est présentée sous forme de moyenne ($\pm$ écart type) du nombre d'individus (par 50 m) comptés dans cinq transects à l'intérieur de chaque site ; tandis que la densité végétale exprimée en abondances totales des espèces à travers tous les sites d'échantillonnage est indiquée dans la colonne « Total ». La fréquence relative de la richesse spécifique constituant chaque famille est indiquée par des pourcentages associés aux noms des familles.

Familles	Espèces	Sites d'échantillonnage							
		Site 1	Site2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Total
Apiaceae (2.27%)	<i>Ferula vesceritensis</i> Coss. & Dur.	—	0.80 ± 1.79	—	—	—	—	—	4
Asclepiadaceae (2.27%)	<i>Pergularia tomentosa</i> L.	5.00 ± 1.41	1.20 ± 2.68	—	—	—	—	—	31
Asteraceae (11.36%)	<i>Atractylis flava</i> L.	—	8.60 ± 7.98	2.40 ± 0.55	—	—	—	—	55
	<i>Atractylis serratuloides</i> Sieber.	16.00 ± 8.6	0.40 ± 0.89	4.40 ± 1.52	—	—	2.20 ± 1.09	2.60 ± 0.55	128
	<i>Cotula cinerae</i> Del.	—	0.80 ± 1.09	—	—	—	—	—	4
	<i>Launaea resedifolia</i> O.K.	3.00 ± 1.41	—	—	—	—	—	—	15
	<i>Rhantherium suaveolens</i> Desf.	4.40 ± 3.21	—	—	—	—	—	—	22
Boraginaceae (2.27%)	<i>Heliotropium bacciferum</i> Forsk.	1.80 ± 1.79	—	—	—	—	—	—	9
Brassicaceae (6.82%)	<i>Diplotaxis harra</i> (Forssk.) Boiss.	2.40 ± 3.05	1.20 ± 2.68	—	2.20 ± 2.68	—	—	—	29
	<i>Malcolmia aegyptiaca</i> Spr.	0.20 ± 0.45	—	—	—	—	—	—	1
	<i>Matthiola livida</i> (Del.) DC.	0.40 ± 0.89	—	—	—	—	—	—	2
Caryophyllaceae (6.82%)	<i>Gymnocarpus decander</i> Forsk.	8.80 ± 3.27	—	—	—	—	1.40 ± 1.67	—	51
	<i>Herniaria fontanesii</i> J. Gay	1.00 ± 1.41	0.40 ± 0.89	—	—	—	—	—	7
	<i>Polycarpaea repens</i> (Forsk.) Asch. et Schw.	6.20 ± 2.17	—	—	—	—	—	—	31
Chenopodiaceae (22.73%)					41.40 ±		12.80 ±	22.00 ±	
	<i>Anabasis articulata</i> (Forsk) Moq.	26.00 ± 2.74	13.00 ± 3.54	31.80 ± 2.28	2.07	24.80 ± 1.92	1.92	1.58	859
	<i>Atriplex halimus</i> L.	—	8.80 ± 5.31	4.00 ± 2.55	—	—	—	—	64
	<i>Cornulaca monacantha</i> Del.	—	4.80 ± 3.42	2.20 ± 0.45	—	4.80 ± 2.28	5.00 ± 1.00	3.00 ± 0.71	99
	<i>Haloxylon articulatum</i> Boiss.	—	—	9.80 ± 2.77	—	—	—	—	49
	<i>Salsola foetida</i> Del.	—	—	3.20 ± 1.92	—	—	—	—	16
					25.00 ±				
	<i>Salsola tetragona</i> Del.	—	13.00 ± 9.41	—	3.94	17.60 ± 3.05	—	—	278
	<i>Salsola vermiculata</i> L.	—	5.80 ± 7.82	—	—	—	—	—	29
	<i>Suaeda mollis</i> (Desf.) Del.	—	11.00 ± 10.00	1.40 ± 1.34	—	0.40 ± 0.89	—	—	64
					10.00 ±				
	<i>Suaeda fruticosa</i> L.	—	1.60 ± 3.58	—	3.08	2.40 ± 2.30	—	—	70
					21.80 ±		18.40 ±		
	<i>Traganum nudatum</i> Del.	1.80 ± 2.68	10.00 ± 9.56	22.40 ± 3.05	1.30	21.60 ± 1.14	2.79	6.80 ± 1.30	514

Cistaceae (2.27%)	<i>Helianthemum lippii</i> (L.) Pers.	2.60 ± 2.79	0.40 ± 0.89	—	—	—	—	—	15
Cucurbitaceae (4.55%)	<i>Citrullus colocynthis</i> Schrad.	2.60 ± 2.61	0.60 ± 1.34	—	—	—	—	—	16
	<i>Ecballium elaterium</i> Rich.	—	—	0.40 ± 0.89	—	—	—	—	2
Ephedraceae (2.27%)	<i>Ephedra alata</i> DC.	—	—	7.00 ± 1.58	—	—	7.20 ± 1.64	7.40 ± 1.34	108
Fabaceae (18.18%)	<i>Astragalus crenatus</i> Schult.	1.60 ± 2.30	—	—	—	—	—	—	8
	<i>Astragalus mareoticus</i> Del.	0.40 ± 0.89	—	—	—	—	—	—	2
	<i>Argyrolobium uniflorum</i> (Decne.) Jaub&Spach.	—	1.20 ± 2.68	—	—	—	—	—	6
	<i>Astragalus armatus</i> Willd.	1.00 ± 1.41	1.60 ± 3.58	—	—	—	—	—	13
	<i>Astragalus gombiformis</i> Pomel.	—	—	2.20 ± 1.48	—	—	—	—	11
	<i>Genista saharae</i> Coss.& Dur.	2.40 ± 1.67	—	—	—	—	—	—	12
	<i>Lotus halophylus</i> Boiss. et Spr.	0.60 ± 1.34	—	—	—	—	—	—	3
	<i>Retama retam</i> Webb.	—	0.80 ± 1.79	13.60 ± 3.51	—	7.80 ± 2.68	11.20 ± 10.60	±	220
							0.84 ± 1.14	±	
Plombaginaceae(2.27%)	<i>Limoniastrum guyonianum</i> Boiss.	—	6.20 ± 7.89	12.60 ± 1.67	—	14.00 ± 1.87	2.49 ± 1.79	±	299
Poaceae (4.55%)	<i>Aristida acutiflora</i> Trin. et Rupr.	—	6.00 ± 5.87	—	—	—	8.40 ± 2.30	2.80 ± 0.84	86
	<i>Aristida pungens</i> Desf.	10.6 ± 3.78	6.00 ± 8.25	—	—	—	9.00 ± 1.87	7.20 ± 1.64	164
Rutaceae (2.27%)	<i>Haplophyllum tuberculatum</i> (Forsk.) Juss	2.40 ± 2.51	—	—	—	—	—	—	12
Tamaricaceae (2.27%)	<i>Tamarix gallica</i> L.	—	—	3.80 ± 2.28	—	—	—	—	19
Zygophyllaceae (6.82%)	<i>Fagonia glutinosa</i> Del.	—	2.20 ± 2.05	—	—	—	—	—	11
	<i>Zygophyllum album</i> L.	—	11.60 ± 2.51	12.80 ± 3.35	14.60 ± 3.36	± 18.80 ± 2.95	10.60 ± 1.82	± 5.00 ± 1.00	367
	<i>Peganum harmala</i> L.	0.80 ± 1.30	1.20 ± 1.64	—	8.60 ± 3.21	5.40 ± 3.97	—	—	80
Total		510	596	670	618	588	515	388	3885

Conformément à l'ANOVA à un facteur, il y avait des différences substantielles dans les valeurs des deux ratios entre les sites d'échantillonnage, où le ratio F/S ($F_{(6, 34)} = 41,88$, $P < 0,001$) a montré une variabilité considérablement plus grande par rapport au ratio G/S ($F_{(6, 34)} = 6,98$, $P < 0,001$). Les corrélations entre la richesse spécifique et la richesse des taxons supérieurs (c'est-à-dire le genre et la famille) sont évaluées à l'aide de fonctions de puissance linéarisées, présentées dans la Figure 28. Les exposants du modèle de puissance de (a) « $\ln(F) = a \times \ln(S)$ » ont montré des variations dans les relations famille-especes et genre-especes. Sur la base des valeurs R^2 pour les indices de qualité d'ajustement des modèles, en revanche, le modèle linéarisé des relations entre les genres et les espèces a montré un niveau de stabilité élevé par rapport à la relation famille-especes. Les relations entre les familles d'espèces et les genres d'espèces étaient toutes favorables et statistiquement significatives dans tous les sites d'échantillonnage (régressions linéaires : $P < 0,01$).

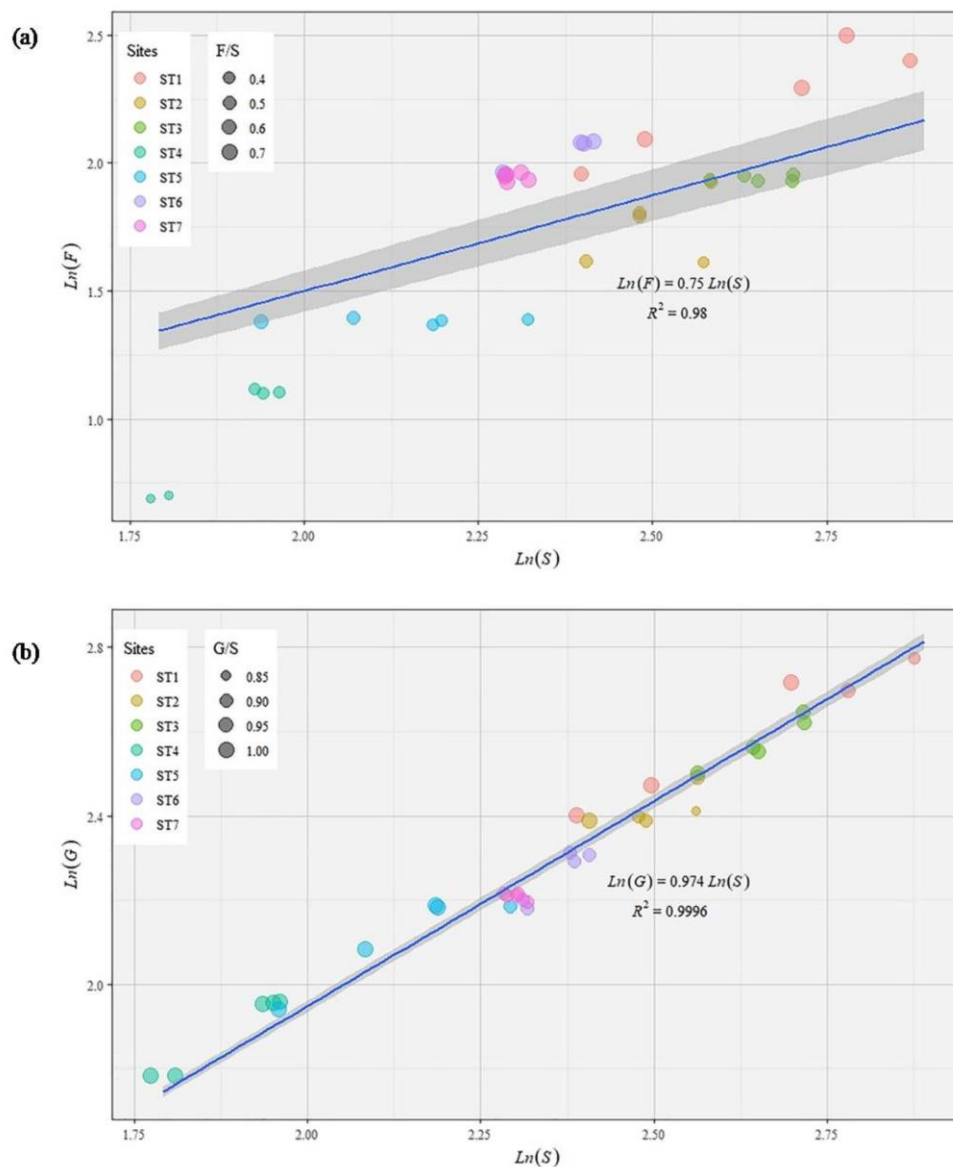


Figure 28 : Relations entre la richesse spécifique (S) et la richesse familiale (F) / générique (G) aux différents sites d'échantillonnage dans la partie nord-est du Sahara algérien (El Oued). Les couleurs des points correspondent aux sites d'échantillonnage, et les ratios taxonomiques sont représentés avec des valeurs de taille réglées sur (a) F/S et (b) G/S. La régression linéaire simple est indiquée par les lignes bleues solides, avec des zones de confiance à 95 % en gris clair. Une mesure de la qualité d'ajustement du modèle de régression linéaire est le R-carré.

7.3. Diversité des espèces

La richesse en espèces dans les sites d'échantillonnage variait entre 7 et 26 espèces, en fonction du paysage. En général, la diversité floristique était relativement faible. La richesse spécifique variait entre faible dans les sites 3 et 6 ($S = 16$ espèces et $S = 11$ espèces, respectivement), ou très faible (< 11 espèces) dans les sites 4, 5 et 7, où la richesse spécifique se situait entre 7 et 10 espèces. En revanche, dans les sites 1 et 2, la richesse spécifique était modérée (Tableau 4). Selon la mesure de la biodiversité, le site 2 affichait la valeur la plus élevée de l'indice de Shannon ($H = 2,81$), tandis que le site 4 présentait la valeur la plus basse ($H = 1,70$). Dans les sites 1, 3, 5 et 7, les valeurs de l'indice de Shannon variaient entre 2,02 et 2,51. Les sites 6 et 7 avaient les communautés végétales les plus équilibrées ($E = 0,80$ à $0,84$), suivis des sites 4 et 5 ($E = 0,75$ – $0,78$). Le site 1 affichait la valeur d'équitabilité la plus basse ($E = 0,53$). Le site 2 présentait les valeurs les plus élevées de richesse spécifique et d'indice de Shannon, bien qu'il affichât également une équitabilité relativement faible en raison de la présence de plusieurs espèces rares.

Tableau 4 : Paramètres de diversité des communautés végétales dans différents sites du nord-est du Sahara algérien (El Oued)

Paramètres de diversité	Sites d'échantillonnage						
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7
Richesse spécifique	23***	26***	16**	7*	10*	11**	10*
Indice de Shannon	2.51	2.81	2.34	1.70	2.02	2.22	2.09
Indice de Shannon maximal	2,60	2,86	2.40	1.75	2.06	2.27	2.15
Indice d'Équitabilité	0.53	0.63	0.65	0.78	0.75	0.84	0.80

*: flore très pauvre en espèces, **: flore pauvre en espèces, ***: flore moyennement riche en espèces.

7.4. Analyse de la similarité de la diversité végétale entre les sites phytoécologiques

La répartition des espèces entre les sites d'échantillonnage est représentée par le diagramme de Venn à la Figure 29. Selon le diagramme, deux espèces (*Anabasis articulata* et *Traganum nudatum*) sont réparties et communes à tous les sites d'étude. Le site 1 a le plus grand nombre d'espèces partagées. Le site 1 possède onze espèces différentes qui lui sont exclusivement propres, tandis que le site 2 et le site 3 comptent chacun cinq espèces. Cependant, les sites 4 à 7 ne possèdent aucune espèce unique, ce qui signifie que toutes leurs espèces sont également présentes à d'autres endroits (Figure 29). Pour le site 1, ces espèces étaient : *Launaea resedifolia*, *Rhantherium suaveolens*, *Heliotropium bacciferum*, *Malcolmia aegyptiaca*, *Matthiola livida*, *Polycarpea repens*, *Astragalus crenatus*, *Astragalus mareoticus*, *Genista saharae*, *Lotus halophylus* et *Haplophyllum tuberculatum* ; pour le site 2 : *Ferula vesceritensis*, *Cotula cinerae*, *Salsola vermiculata*, *Argyrolobium uniflorum* et *Fagonia glutinosa* ; et pour le site 3 : *Haloxylon articulatum*, *Salsola foetida*, *Ecballium elaterium*, *Astragalus gombiformis* et *Tamarix gallica* (Tableau 3).

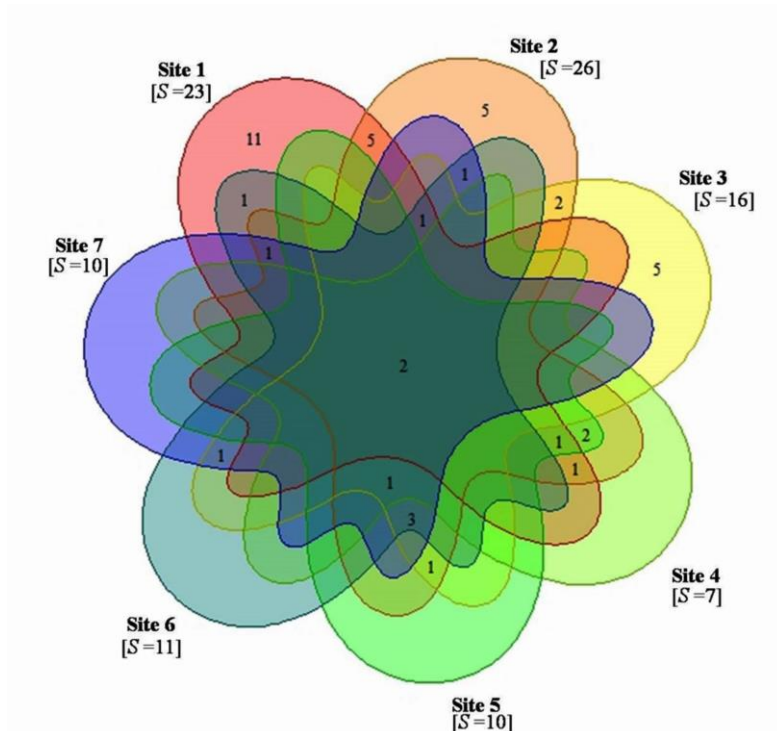


Figure 29 : Le diagramme de Venn à sept ensembles montrant la richesse spécifique des espèces (S) collectées dans différents sites du nord-est du Sahara algérien (El Oued). Le

nombre d'espèces dans chaque site d'échantillonnage est indiqué par la valeur de S mentionnée entre crochets, tandis que les nombres du diagramme représentent les espèces présentes exclusivement dans les sites concernés.

L'analyse qualitative de similarité des communautés végétales entre les sites, en utilisant l'indice de Jaccard, a montré les résultats de ressemblance les plus élevés entre les sites 6 & 7 (ressemblance = 60,10 %) et les sites 4 & 5 (ressemblance = 55,80 %). Ces quatre sites, ainsi que les sites 2 & 3, ont été regroupés en un cluster homogène présentant de fortes similarités dans la composition des espèces (Figure 30).

En ce qui concerne la similarité quantitative calculable, mesurée à l'aide de la distance de Bray-Curtis basée sur les données d'abondance des espèces, les sites 6 & 7 (similarité = 99,80 %), les sites 4 - 5 (similarité = 91,30 %) et les sites 3 - 7 (similarité = 85,20 %) ont montré les valeurs de similarité les plus élevées. L'analyse de regroupement a démontré que les sites 4, 5, 6 et 7 possédaient une structure végétale quantitativement similaire, tandis que les sites 3, 6, 7 et 2, 4 et 5 étaient également homogènes. Les similarités intergroupes entre les sites appartenant aux deux groupes étaient faibles.

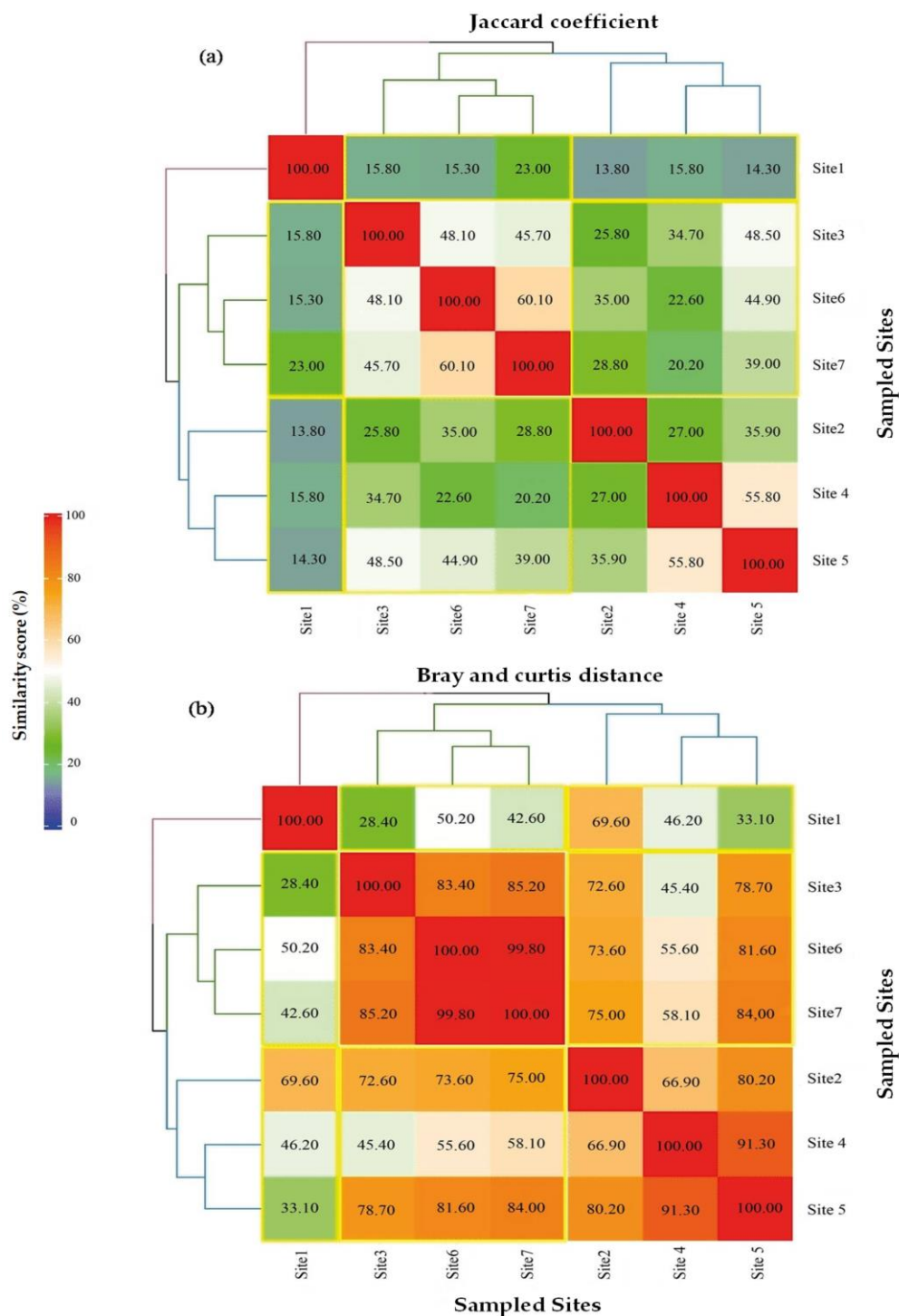


Figure 30 : Cartes thermiques et dendrogrammes (graphiques colorés latéraux) de l'analyse de regroupement hiérarchique (méthode de Ward), représentant la matrice de similarité des espèces entre les sites d'échantillonnage dans la partie nord-est du Sahara algérien (EL Oued). Selon les scores de similarité, l'intensité de la couleur reflète la similarité : (a) coefficient de Jaccard et (b) distance de Bray et Curtis. Sur la base de la composition des espèces, des groupes homogènes de sites sont représentés par des rectangles jaunes à l'intérieur de la matrice de la carte thermique.

7.5. Caractéristiques fonctionnelles des plantes

7.5.1. Formes de vie

Selon la Figure 31, les espèces chaméphytes (62,14 %), qui incluent les espèces 9, 15, 12, 5, 8 et 7, ont présenté les valeurs les plus élevées dans le spectre biologique des formes de vie à travers tous les sites. Il n'y a que 5 espèces chaméphytes et 2 espèces thérophytes au Site 4. Les espèces hémicryptophytes (13,59 %) se retrouvent dans l'ensemble du spectre biologique des formes de vie, à l'exception des sites 4 et 5. Elles sont présentes aux sites 1, 2, 3, 6 et 7, avec respectivement 4, 5, 1, 2 et 2 espèces. Seuls les sites 1, 2, 3, 4 et 5 contiennent des thérophytes (17,48 %), qui incluent 9, 5, 1, 2 et 1 espèces. À l'exception du site 4, les phanérophytes (6,80 %) de tous les sites étaient représentés par trois espèces : *Retama retam* aux sites 2, 3, 5, 6 et 7, *Tamarix gallica* au site 3, et *Genista saharae* au site 1.

7.5.2. Types morphologiques

La flore est composée de 5 espèces annuelles (6,80 %) et de 39 espèces pérennes (93,20 %), en ce qui concerne les caractéristiques morphologiques. Seuls les sites 1, 2 et 4 abritent des espèces annuelles, tandis que tous les sites abritent des espèces pérennes, le site 2 en abritant le plus grand nombre (25 espèces), avec une large répartition des espèces pérennes (Figure 31).

7.5.3. Types chorologiques

La catégorie saharo-arabe était fortement représentée dans toute la région de recherche en fonction des types chorologiques, avec le niveau le plus élevé dans le site 2 (14 espèces) et le site 1 (12 espèces) (Figure 31). L'élément chorologique méditerranéen a été observé dans tous les sites, avec quatre espèces au niveau le plus élevé et une espèce au niveau le plus bas dans les sites 4 à 7. Nous avons identifié l'élément endémique saharien et l'élément méditerranéen dans tous les sites.

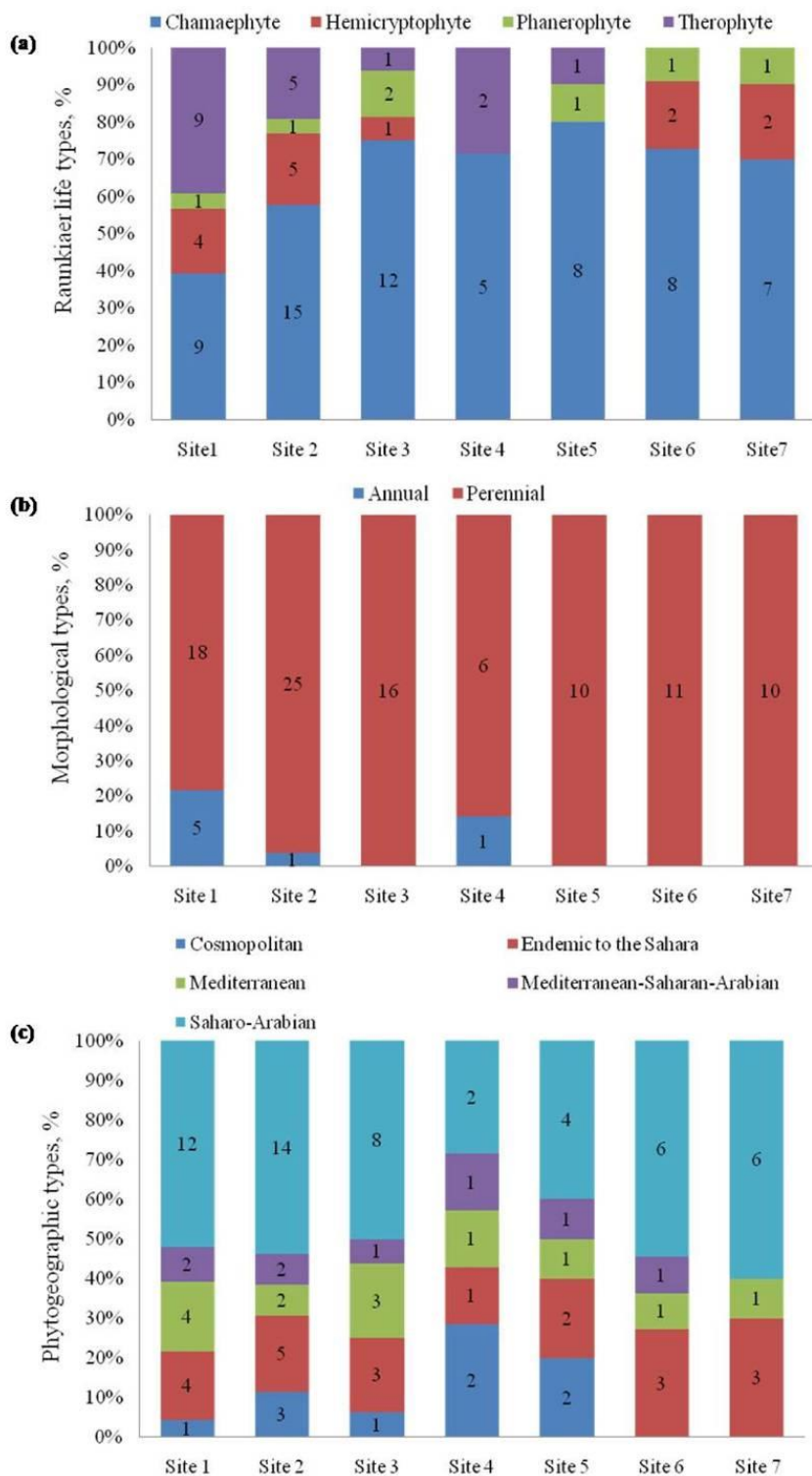


Figure 31 : (a) Formes de vie, (b) types morphologiques et (c) types chorologiques
Distribution pour différents sites d'échantillonnage de la partie Nord-Est du Sahara algérien
(El Oued) ; Les histogrammes contiennent des nombres qui représentent le nombre d'espèces
végétales.

7.5.4. Répartition des Fabaceae dans les sites d'Etudes

La famille des Fabaceae, représentant 18,18% des espèces recensées, manifeste une distribution hétérogène à travers les sept sites d'étude avec huit espèces identifiées : *Astragalus crenatus*, *A. mareoticus*, *A. armatus*, *A. gombiformis*, *Argyrolobium uniflorum*, *Genista saharae*, *Lotus halophylus* et *Retama retam*. La richesse spécifique varie considérablement selon les sites, avec une présence maximale dans le Site 1 (cinq espèces) et une absence totale dans le Site 4 (Figure 32). *Retama retam* émerge comme l'espèce dominante, présente dans les Sites 3, 5, 6 et 7, avec une abondance relative maximale de $13,60 \pm 3,51\%$ dans le Site 3 (Tableau 3).

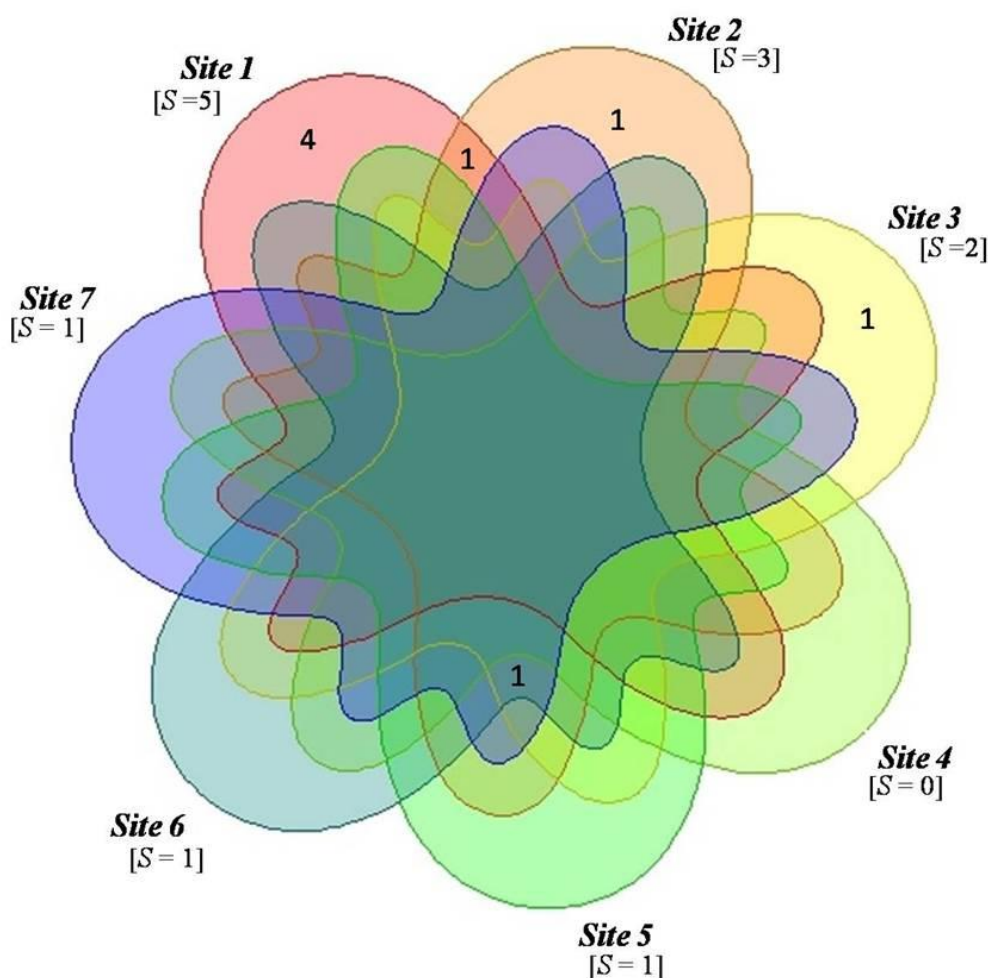


Figure 32 : le diagramme de venn à sept ensembles montrant la richesse spécifique des espèces (S) des familles de Fabaceae de la région d'étude, le nombre d'espèces dans chaque site d'échantillonnage est indiqué par la valeur de S mentionnée entre crochets, tandis que les nombres du diagramme représentent les espèces présentes exclusivement dans les sites concernés.

8. Discussion

La présente étude s'est concentrée, pour la première fois, sur un examen approfondi de la diversité des communautés végétales présentes dans le nord-est du Sahara algérien (El Oued). Identifier la diversité des espèces végétales et les caractéristiques biologiques des communautés végétatives dans les habitats naturels est crucial pour assurer la survie et la préservation des espèces, des communautés, des habitats et des écosystèmes (Gamoun, 2013).

La flore de la zone d'étude comprenait 44 espèces réparties en 16 familles et 36 genres. Les familles les plus représentées étaient les Chenopodiaceae (10 espèces), les Fabaceae (8 espèces) et les Asteraceae (5 espèces), représentant respectivement 22,73 %, 18,18 % et 11,36 %. Ces familles botaniques dominent dans les environnements sahariens, ce qui est en accord avec les résultats obtenus en Tunisie (Gamoun et al., 2018), en Algérie (Chenchouni, 2012 ; Macheroum et al., 2021) et dans l'Oasis du Sahara égyptien (Salama et al., 2018).

Selon les données d'abondance des plantes, les espèces pérennes représentent le groupe fonctionnel prédominant dans la région d'étude. Chehma et Huguenin (2017) ont indiqué que la végétation pérenne est essentielle pour fournir de la nourriture aux chameaux dans un système de pâturage extensif. En termes de densité végétale, *Anabasis articulata* et *Traganum nudatum* sont les plus abondantes, représentant respectivement 22 % et 13 % du total. Les variations de densité, de fréquence et d'abondance des espèces peuvent être expliquées par les différents habitats et les caractéristiques d'adaptation (Zhang et al., 2021 ; Ullah et al., 2022).

L'étude a révélé que 50 % des 16 familles botaniques examinées ne contenaient qu'une seule espèce. Il s'agit d'un trait commun des plantes désertiques, suggérant leur capacité à s'adapter et à survivre dans des conditions arides (Azizi et al., 2021 ; Bouallala et al., 2023). Seules quelques espèces appartenant à des familles végétales plus larges parviennent à s'adapter et à survivre, tandis que d'autres s'éteignent. Des études antérieures menées par Abd El-Khalik et al. (2017), El-Sheikh (2021) et Meddour et al. (2023) ont démontré que les zones abritant une plus grande diversité d'espèces présentent une répartition plus étendue des espèces parmi plusieurs genres, par rapport aux zones où la majorité des espèces appartiennent au même genre. Les valeurs élevées du coefficient reflètent les caractéristiques principales de la flore désertique, qui présente une faible diversité. Cela indique que les espèces sont bien adaptées aux conditions xériques (Chenchouni, 2012 ; Abdel Khalik et al., 2017). Dans les zones arides, la plupart des familles végétales sont représentées par un ou deux genres et la plupart des genres par une ou deux espèces (Kouba et al., 2021).

Les tests de corrélation ont montré que les différences dans la structure taxonomique peuvent varier considérablement entre les communautés végétales en fonction des conditions environnementales (Fan et al., 2017). Cela est cohérent avec nos résultats, où le ratio G/S a dépassé 89 % et le ratio F/S a dépassé 43 %. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Oitsius et al. (2020) en Ukraine. La richesse en espèces est faible dans tous les sites d'échantillonnage, ce qui reflète la faible diversité végétale de ces environnements. Ces constatations sont conformes aux études précédentes qui ont examiné la végétation des pâturages dans le nord du pays. Bouallala (2013) a constaté une diversité floristique modérée dans les pâturages arides du désert algérien. Bien que le désert couvre plus de 84 % de son territoire, l'Algérie se distingue parmi les pays méditerranéens en termes de diversité taxonomique. Selon Quézel (1995), elle occupe la septième position en termes d'abondance des espèces végétales dans la région. Selon Abdelaal et al. (2018), elle est la deuxième plante indigène la plus commune en Afrique du Nord, avec 3951 taxa. L'Algérie compte également 248 taxa de espèces endémiques, représentant 6,3 % de sa flore totale. Ce niveau de strict endémisme est légèrement supérieur à ceux observés dans d'autres pays arides d'Afrique du Nord tels que la Libye (6 %), la Tunisie (2,6 %) et l'Égypte (2,3 %).

La dominance des chaméphytes dans la zone d'étude semble être due à leurs adaptations à un environnement chaud et sec, aux différences topographiques, ainsi qu'aux impacts anthropiques et animaux (El-Demerdash et al., 1995). De plus, ces espèces exercent un contrôle stomatique rigoureux (Bradai et al., 2015b). Les thérophytes présentent une faible diversité en espèces dans l'ensemble de la zone de recherche, avec neuf espèces présentes aux sites 1, 5 et 2. Selon Abdel Khalik et al. (2017), le manque de précipitations dans le climat saharien est probablement responsable de la faible représentation des thérophytes, qui sont sous forme de graines pendant leur période végétative. En outre, les sols de cette région sont caractérisés par une faible capacité de rétention d'eau (Barkoudah et Van Der Sar, 1982 ; Monod, 1992). La présence des thérophytes dans les sites 1 et 2 peut être attribuée à leur rôle en tant que zone de transition entre les régions nord et sud du pays. Les climats semi-arides et arides observés dans ces sites créent une séparation entre les environnements humides et subhumides du nord et les climats arides et hyperarides du sud (Alliouche et Kouba, 2023). Les hémicryptophytes sont présents dans tous les sites, à l'exception de ceux qui manquent complètement de sable. Selon Bouallala (2013), les psammophytes représentent le type de végétation hémicryptophyte le plus courant dans les sols sableux et les dunes. Les phanérophytes recensés dans la zone d'étude comprennent trois espèces : *Genista saharae*,

Retama retam, et *Tamarix gallica*. Il est rare de trouver des phanérophytes dans les environnements arides, sauf dans les oueds et les vallées, qui constituent leurs habitats les plus adaptés (Bradai et al., 2015b).

L'analyse des données floristiques a révélé que les éléments saharo- arabes sont plus abondants que les autres éléments floristiques dans la zone d'étude. Cela peut être attribué à la localisation de l'étude dans le Sahara algérien, qui fait partie de la région phytogéographique saharo-arabienne (Azizi et al., 2021 ; Bouallala et al., 2023). En outre, l'analyse des formes de vie des espèces végétales peut révéler des informations importantes sur la manière dont la végétation réagit aux changements environnementaux (Huseynova, 2022 ; Ullah et al., 2022). Dans cette étude, les chaméphytes se sont avérés être la forme de vie dominante. Leur présence répandue peut être attribuée à leur capacité à résister à la sécheresse et à la salinité (Bouallala et al., 2023).

Les interactions interspécifiques entre les espèces des familles de Fabaceae se manifestent notamment dans le Site 1, où coexistent *A. crenatus*, *A. mareoticus*, *A. armatus*, *G. saharae* et *L. halophylus*, indiquant une possible complémentarité écologique (Quézel et Santa, 1962). Les patrons de distribution suggèrent une stratification écologique, avec certaines espèces comme *A. gombiformis* limitées au Site 3 et *Argyrolobium uniflorum* au Site 2. Cette répartition pourrait être liée aux adaptations spécifiques aux conditions édaphiques et climatiques locales, caractéristiques des écosystèmes arides (Ozenda, 2004). La dominance de *Retama retam* dans les sites 5, 6 et 7 suggère un rôle écologique crucial de cette espèce dans la structuration des communautés végétales de ces zones, potentiellement lié à sa capacité de fixation d'azote et à sa résistance à la sécheresse (Le Floc'h et al., 2010). L'analyse de la distribution spatiale révèle un gradient de diversité décroissant du Site 1 vers les autres sites, possiblement influencé par des facteurs environnementaux tels que la disponibilité en eau, la nature du sol et les interactions biotiques (Chaieb et Boukhris, 1998).

L'analyse écologique des Fabaceae dans les sept stations de la région d'El Oued révèle une structure de distribution marquée par une hétérogénéité spatiale et des interactions interspécifiques complexes, correspondant aux schémas de distribution des écosystèmes arides tels que décrits par Whittaker et al. (2001). La Station 1, qui présente la plus haute richesse spécifique ($S=5$), apparaît comme un foyer de biodiversité, probablement en raison de conditions édaphiques et microclimatiques favorables (Gamoun, 2013), tandis que la Station 4 ($S=0$) représente une zone d'exclusion potentiellement due à des contraintes

environnementales sévères, phénomène fréquent en région saharienne (Ozenda, 2004). Les intersections observées entre les stations 1, 2 et 3, révélant des espèces partagées, suggèrent des corridors biologiques fonctionnels en accord avec les théories de métapopulation d'Hanski (1999). Ce modèle de distribution pourrait indiquer un gradient environnemental sous-jacent, influencé par l'aridité et la composition du sol, qui filtre les espèces selon leurs traits adaptatifs (Bouallala et al., 2022). La présence d'espèces uniques dans certaines stations suggère des processus de spécialisation écologique et d'adaptation locale (Thompson, 2005). La préservation de la flore menacée nécessite la mise en œuvre de mesures de gestion spécifiques qui garantissent leur survie à long terme.

Cette chapitre met en lumière la composition floristique, les formes de vie, les types morphologiques, les catégories chorologiques et la structure des communautés de la végétation spontanée dans le nord-est du Sahara algérien. La richesse spécifique dans ces habitats a atteint 44 espèces, généralement représentées par des plantes pérennes. Parmi les 16 familles répertoriées, les Chenopodiaceae, Fabaceae et Asteraceae sont les plus dominantes. Sur la base des paramètres climatiques et des caractéristiques géomorphologiques, la partie nord-est du Sahara algérien représente des environnements hyper-arides avec une faible diversité végétale et un couvert végétal limité. Cette végétation pérenne offre divers avantages qui peuvent répondre aux besoins de la population locale, notamment en tant que source de médecine traditionnelle et de fourrage pour les dromadaires tout au long de l'année. Cette étude souligne l'importance des traits des plantes pour comprendre l'organisation des communautés végétales dans des environnements désertiques difficiles comme le nord-est du Sahara algérien. La végétation de la zone d'étude est dominée par des chaméphytes et des thérophytes, indiquant leur vulnérabilité aux conditions arides et leurs techniques évolutives uniques. Les thérophytes sont moins fréquents car ils constituent la principale source de pâturage libre immédiatement après les épisodes pluvieux. L'élément chorologique (phytogéographique) saharo-arabien est un bon indicateur du climat saharien. Cependant, la présence de l'élément endémique saharien reflète l'unicité de certaines plantes qui habitent et préfèrent l'environnement saharien.

**CHAPITRE IV : ANALYSE
SPATIO-TEMPORELLE ET
PREDICTION DES
CHANGEMENTS DE
COUVERTURE VEGETALE PAR
TELEDETECTION**

La végétation, essentielle aux écosystèmes terrestres, contribue au cycle des matériaux et de l'énergie dans l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère. La surveillance spatio-temporelle des dynamiques végétales et des facteurs de changement est cruciale pour comprendre les transformations écologiques et élaborer des stratégies de conservation. Dans la région d'étude, les écosystèmes pastoraux subissent une dégradation sévère due aux pressions climatiques et anthropiques, menaçant leur fonctionnalité écologique et augmentant les risques de désertification, notamment dans les zones arides. Les avancées en télédétection et l'accessibilité croissante aux données haute résolution ont permis des analyses à large échelle de la couverture végétale par le biais d'indices comme le NDVI, souvent appliqué pour suivre les changements de la biomasse végétale. Cette chapitre se concentre sur la région d'étude, évaluant les dynamiques de couverture végétale de 2015 à 2023 à l'aide d'images Landsat. En intégrant des techniques comme le NDVI et des modèles de prédiction LULC avec le plugin MOLUSCE dans QGIS, elle simule les scénarios futurs de changement d'utilisation du sol jusqu'en 2031. Il est également pertinent de mentionner l'utilisation de techniques d'interpolation spatiale pour cartographier la répartition des espèces endémiques (Fabaceae) dans la région d'étude. Ces approches renforcent notre capacité à prédire et gérer les transitions de paysage, contribuant à une gestion durable des ressources naturelles.

1. Matériels et méthodes

1.1. Collecte des données

Pour réaliser un suivi à long terme des dynamiques de la végétation spontanée et des surfaces agricoles dans la zone d'étude, une série d'images satellites multi-temporelles a été acquise. Plus précisément, nous avons utilisé quatre scènes d'images Landsat de résolution moyenne (30 m) : deux de Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) datées d'avril 2015 et deux de Landsat 9 Operational Land Imager (L9-OLI) datées d'avril 2023 (Tableau 5). La sélection de ces images s'appuie sur plusieurs critères : (1) la disponibilité des données ; (2) l'utilisation fréquente de bases de données de couverture terrestre haute résolution ; et (3) des considérations saisonnières, car le mois d'avril coïncide avec le pic des précipitations et la fin de la saison printanière, offrant ainsi une couverture végétale et une activité agricole optimales pour une discrimination et une extraction renforcées. Ces images sont librement accessibles via l'United States Geological Survey (www.usgs.gov), géolocalisées aux

passages/lignes 193/36 et 193/37, et sont de haute qualité, présentant une distorsion atmosphérique minimale (0%-0,03% de couverture nuageuse).

Tableau 5 : Les scènes obtenues pour les deux dates 2015 et 2023 (<http://glovis.usgs.gov/>)

Période	Date d'acquisition	Identité de l'image	Satellite	Catégorie de collection	Path/row
Date1/ Scène1	10-04-2015	LC81930362015100LGN01	Landsat 8	T1	193/36
Date1/ Scène2	10-04-2015	LC81930372015100LGN01	Landsat 8	T1	193/37
Date2/ Scène1	08-04-2023	LC91930362023098LGN00	Landsat 9	T1	193/36
Date2/Scène2	08-04-2023	LC91930372023098LGN00	Landsat 9	T1	193/37

Pour représenter la répartition de la végétation endémique pour la famille de Fabaceae dans la région d'étude, une technique d'interpolation spatiale a été utilisée sur les données géographiques obtenues aux sites d'échantillonnage. Cette méthode permet de prédire la répartition de la végétation dans des zones non-échantillonnées en s'appuyant sur les données observées (Palacio et al., 2021).

Dans cette étude, nous avons opté pour l'interpolation par krigeage, qui est couramment employée en écologie pour sa capacité à modéliser la variabilité spatiale des données (Hijmans et Elith, 2019). En utilisant les coordonnées géographiques et la présence d'espèces, le krigeage permet de générer une carte continue illustrant la densité des espèces de Fabaceae dans la région d'étude.

1.2. Traitement d'images

La correction atmosphérique des images satellites Landsat a été réalisée à l'aide de QGIS (version 3.26.3 ou plus récente) et du plugin de Classification Semi-Automatique (SCP). Les étapes initiales comprenaient le chargement et l'empilement des bandes multispectrales pour créer des images composites. Une correction radiométrique a ensuite été appliquée à l'aide de l'outil de Calibration Radiométrique de SCP, permettant d'ajuster les valeurs de réflectance et de réduire l'influence atmosphérique, comme les particules de

nuages et de poussière. La correction atmosphérique a ensuite été effectuée à l'aide de l'outil FLAASH de SCP, traitant la radiance de parcours pour garantir des données spectrales précises.

1.3. Modified Soil Adjusted Index (MSAVI)

Modified Soil Adjusted Index (MSAVI) présente plusieurs avantages notables lorsqu'il est appliqué dans les régions arides et désertiques. En intégrant un facteur d'ajustement du sol, le MSAVI atténue efficacement l'influence de la réflectance de fond du sol, améliorant ainsi la précision du suivi de la végétation dans ces environnements difficiles (Qi et al., 1994). Cette capacité est particulièrement utile dans les paysages arides peu végétalisés, où les indices traditionnels, tels que le NDVI, peinent souvent à différencier la végétation du sol nu (Al-Quraishi et al., 2021). De plus, la capacité du MSAVI à minimiser le bruit spectral provenant des zones non végétalisées permet une identification précise de la végétation clairsemée et fragmentée (Chen et Gillieson, 2009), essentielle pour évaluer la santé, la couverture et le stress des plantes dans les régions désertiques, contribuant ainsi à une gestion et une conservation plus efficaces.

Par ailleurs, le MSAVI démontre une performance robuste à travers différentes conditions de sol dans les terrains arides et semi-arides, soulignant sa polyvalence en tant qu'outil de télédétection (Vermeulen et al., 2021). La sensibilité accrue et la fiabilité du MSAVI apportent une contribution significative à l'avancement de la compréhension écologique et à l'amélioration de la gestion des ressources dans ces zones sensibles (Al-lami et al., 2021).

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'indice MSAVI, proposé par Qi et al. (1994), pour analyser et surveiller la dynamique de la végétation des parcours dans l'espace et dans le temps. La formule du MSAVI est:

$$MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})}}{2}$$

Pour Landsat 8 et Landsat 9, les bandes spectrales pertinentes sont :

- NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge, bande 5 (0,85–0,88 μm).

- RED est la réflectance dans la bande rouge, bande 4 (0,64–0,67 μm).

Cet indice varie entre -1 et 1, avec des valeurs plus élevées indiquant une végétation en meilleure santé. Les satellites Landsat 8 et Landsat 9, équipés de l'Operational Land Imager (OLI), acquièrent des images multispectrales essentielles pour le calcul de l'indice de (MSAVI). Landsat 8 OLI couvre neuf bandes spectrales, allant des longueurs d'onde visibles à l'infrarouge à ondes courtes, comprenant des bandes comme le bleu (0,45-0,51 μm), le vert (0,53-0,59 μm), le rouge (0,64-0,67 μm), le NIR (0,85-0,88 μm) et le SWIR (1,57-1,65 μm). Landsat 9 OLI, conçu comme une amélioration de Landsat 8, conserve des configurations et des résolutions spectrales similaires, assurant la continuité des applications de télédétection pour l'évaluation de la santé de la végétation via le MSAVI.

Ces bandes spectrales permettent une détection précise et une différenciation des caractéristiques de réflectance de la végétation et du sol dans les environnements arides et désertiques, essentielles pour le suivi et la gestion rigoureuse des dynamiques de végétation dans ces paysages complexes.

À travers des vérifications sur le terrain s'étendant sur deux ans (2022-2023) et l'analyse des imageries, nous avons établi des intervalles spécifiques de MSAVI corrélées avec différents types et densités de végétation. La classification des valeurs MSAVI est détaillée dans le tableau 6.

Tableau 6 : Classes de MSAVI et types de végétation correspondants

Classes de MSAVI	Végétation densité / type
-1– 0	Zone sans végétation /chott, sebkha, plan d'eau
0 – 0.10	L'absence totale de végétation / sol nu
0.10 – 0.15	Végétation très faiblement dense/ Parcours dégradé
0.15 – 0.20	Végétation peu dense/ Parcours moins dégradé
0.20 – 0.30	Végétation moyennement dense (Modéré) / Terres cultivées (Agriculture)
≥ 0.30	Végétation très dense / palmier dattier

1.4. Prédiction et validation du modèle

Nous avons utilisé le plugin Modules for Land-Use Change Simulation (MOLUSCE) dans QGIS pour réaliser des analyses exhaustives de changements de couverture terrestre et prévoir des scénarios futurs. Ce plugin intègre des indices spectraux tels que NDVI et NDBI ainsi que des méthodes comme la classification par maximum de vraisemblance et la classification supervisée, permettant la classification des images satellitaires en différentes catégories de couverture terrestre (Singha et al., 2022).

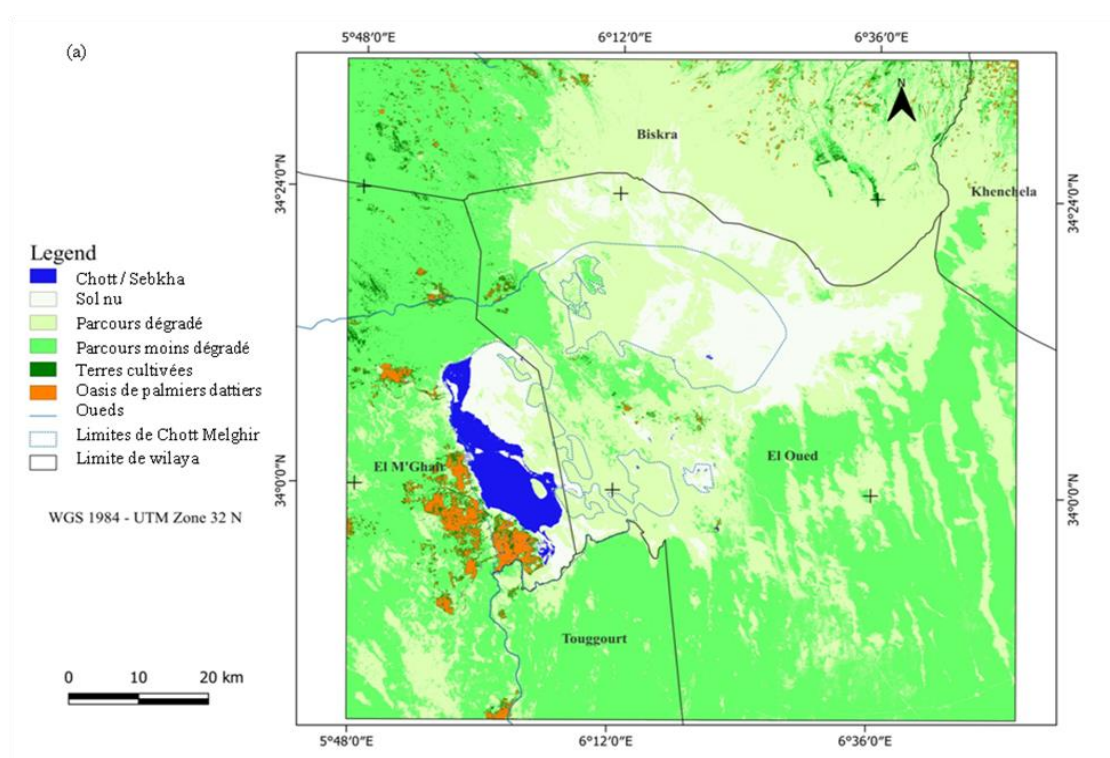
Pour prévoir la couverture terrestre future, nous avons employé l'outil de simulation Automates Cellulaires (CA) intégré dans le plugin MOLUSCE après avoir effectué une modélisation du potentiel de transition par régression logistique (Edosa et al., 2024). Cette approche nous a permis de projeter les changements futurs du paysage en fonction des tendances et facteurs actuels. Pour valider le modèle, nous avons comparé la carte de référence avec la carte simulée en utilisant la page de Validation de MOLUSCE et calculé les valeurs du coefficient Kappa afin d'évaluer la précision de la simulation.

2. Résultats et discussion

En utilisant des cartes MSAVI issues des images Landsat 8 (2015) et Landsat 9 (2023), combinées à des investigations de terrain approfondies, nous avons identifié et cartographié six principales classes de végétation. Une analyse spatio-temporelle de la région, couvrant la période de 2015 à 2023 et projetée jusqu'en 2031, fournit des informations précieuses sur les dynamiques d'occupation et d'usage des sols au sein dans la région d'étude. L'utilisation du plugin MOLUSCE de QGIS nous a permis de détecter des changements distincts parmi les diverses classes de couverture terrestre, soulignant les processus écologiques et les influences anthropiques affectant cet environnement fragile (Tableau 7 et Figure 33).

Tableau 7 : Analyse multi temporelle des types de couverture végétale basés sur les classes MSAVI

Classes de MSAVI	Type de végétation	2015		2023		2031	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
-1 – 0	Chott / Sebkha	15189,93	1,59	14106,6	1,48	14132,34	1,48
0 – 0.10	Sol nu	90843,39	9,52	4773,24	0,5	4304,88	0,45
0.10 – 0.15	Parcours dégradé	380358,9	39,85	420 901,08	44,11	417 430,78	43,74
0.15 – 0.20	Parcours moins dégradé	441101,16	46,22	484 818,51	50,78	484 504,95	50,76
0.20 – 0.30	Terres cultivées (Agriculture)	14041,53	1,47	13506,93	1,42	15 872,42	1,66
≥ 0.30	Oasis de palmiers dattiers	12873,42	1,35	16301,97	1,71	18162,96	1,91
		954408,33	100	954408,33	100	954408,33	100



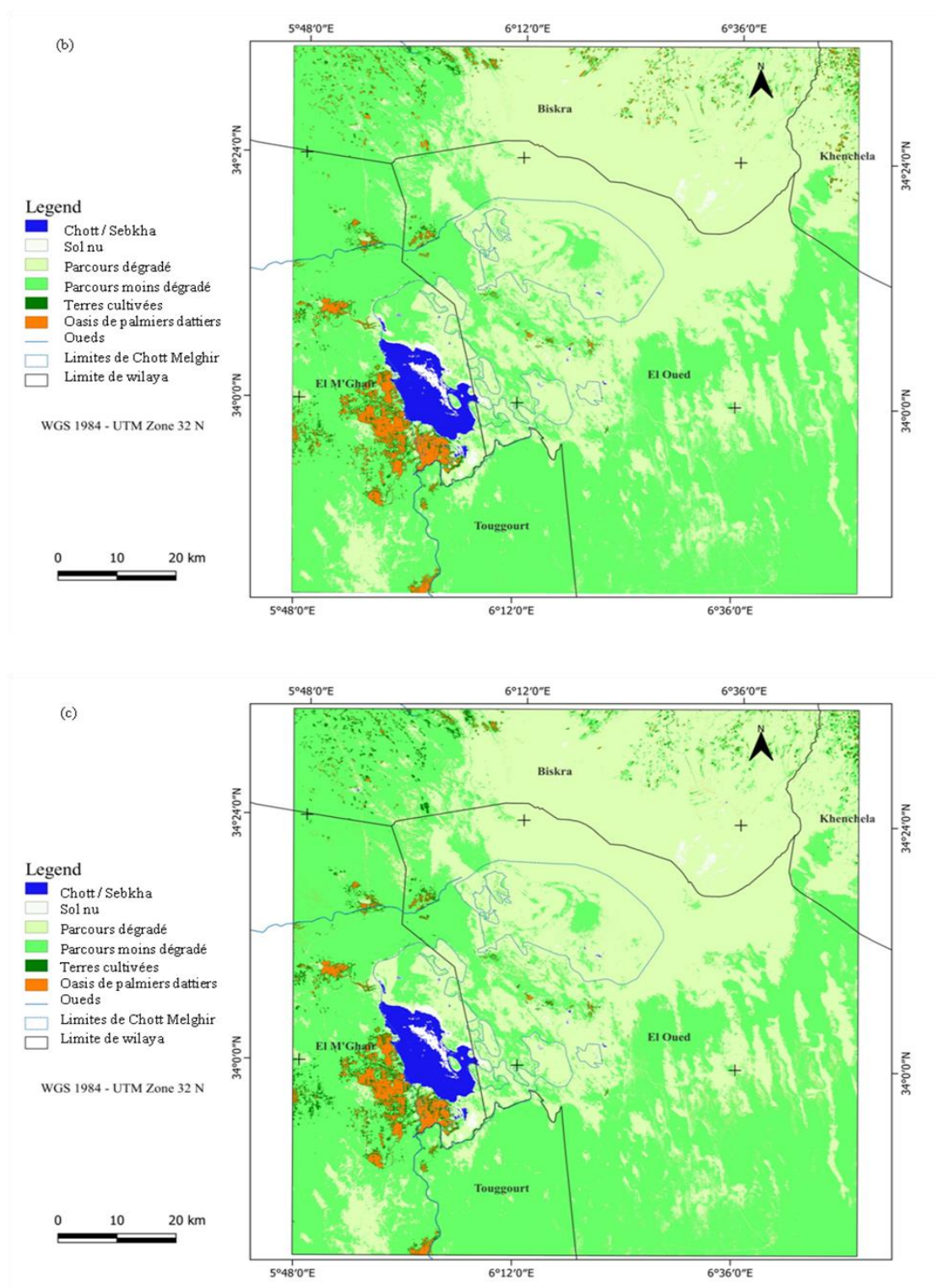


Figure 33 : Cartes des changements de couverture végétale de la région d'étude, illustrant la répartition spatiale de toutes les classes de végétation pour les années 2015 (a), 2023 (b), et l'année projetée 2031 (c).

La superficie couverte par le Chott a connu une diminution significative, passant de 1 518 993 hectares (1,59 %) en 2015 à 141 066 hectares (1,48 %) en 2023. Cependant, les projections pour 2031 indiquent une augmentation substantielle à 1 413 234 hectares (25,74 %). Cette fluctuation pourrait être attribuée à des changements hydrologiques, à des conditions climatiques (Figure 34) et aux activités anthropiques affectant ces plaines salines. Les tendances observées mettent en évidence l'interaction complexe entre les facteurs abiotiques et les influences humaines dans la détermination de l'étendue spatiale et des dynamiques écologiques des régions de Chott dans les environnements arides et désertiques (Lemenkova, 2023).

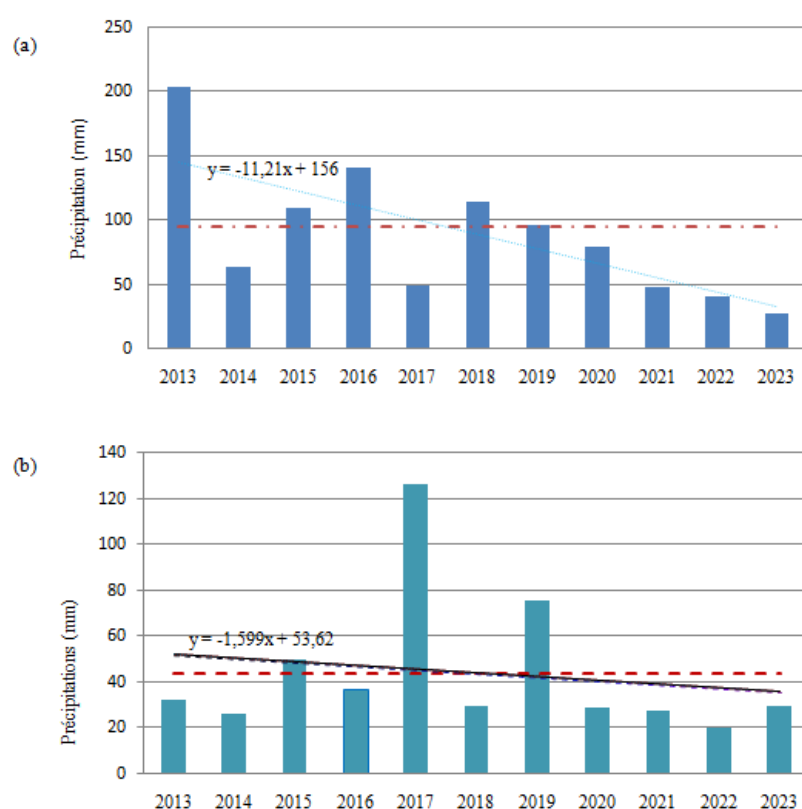


Figure 34 : Variation temporelle des précipitations à Biskra (a) et El Oued (b) de 2013 à 2023

Les zones de sol nu ont connu une réduction spectaculaire, passant de 9 084 339 hectares en 2015 à 477 324 hectares en 2023 (de 9,52 % à 0,5 %), avec une diminution supplémentaire prévue à 430 488 hectares d'ici 2031 (0,45 %). Cette tendance indique un changement important de la couverture terrestre, dû à l'augmentation de la couverture végétale et aux efforts de conservation des sols qui réduisent l'étendue des sols nus.

Les parcours dégradés ont considérablement augmenté, passant de 3 803 589 hectares (39,85 %) en 2015 à 42 090 108 hectares (44,11 %) en 2023, avec une légère baisse prévue à 41 743 078 hectares d'ici 2031. Cette croissance significative met en lumière les processus de dégradation persistants, probablement dus au surpâturage (Bouzekri et al., 2023), à la désertification, aux facteurs climatiques et à une mauvaise gestion des terres (Bradai et al., 2015a).

Les parcours moins dégradés ont également augmenté, passant de 44 110 116 hectares en 2015 (46,22 %) à 48 481 851 hectares en 2023 (50,78 %), avec une légère baisse prévue à 48 450 495 hectares d'ici 2031. Cela suggère que les efforts de réhabilitation des terres et de gestion durable des parcours portent leurs fruits, bien qu'il reste des améliorations possibles pour la conservation de la biodiversité et des services écosystémiques (Cheng et al., 2019).

Les terres agricoles ont connu une légère diminution, passant de 1 404 153 hectares en 2015 (1,47 %) à 1 350 693 hectares en 2023 (1,42 %). Cependant, une augmentation modeste à 1 587 242 hectares est prévue d'ici 2031 (1,66 %), reflétant des fluctuations dans les pratiques agricoles, influencées par les exigences du marché et les changements de politique affectant l'utilisation des terres (Angus et al., 2009).

Les superficies des oasis de palmiers dattiers se sont étendues, passant de 1 287 342 hectares en 2015 (1,35 %) à 1 630 197 hectares en 2023 (1,71 %), avec une croissance prévue à 1 816 296 hectares d'ici 2031 (1,91 %). Cette augmentation signale un essor de la culture des palmiers dattiers dans les régions arides et désertiques, probablement stimulée par des incitations économiques, des avancées dans les politiques de gestion de l'eau (Hamamouche et al., 2015) et une demande accrue pour les produits dérivés des dattes, soutenue par le Programme National de Développement Agricole (PNDA) lancé en 2000 (Figure 35).

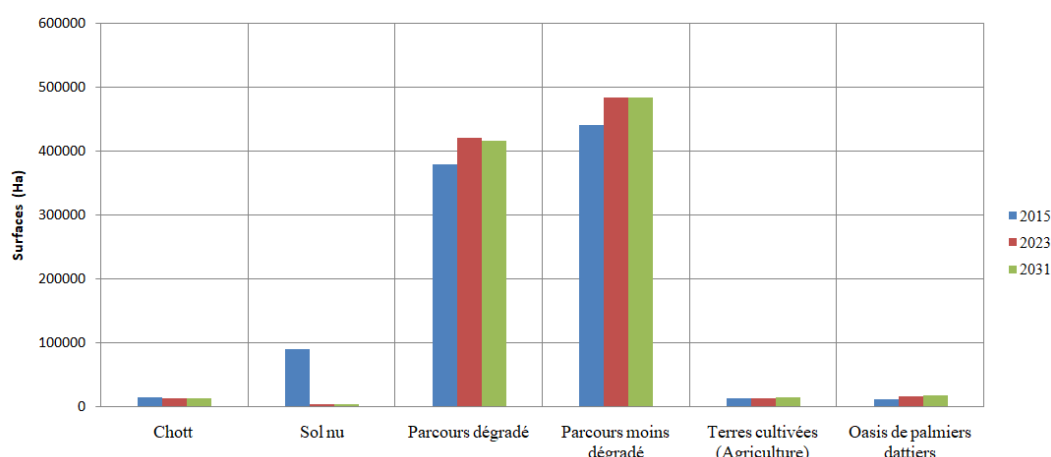


Figure 35 : Classes d'occupation du sol de 2015 à 2031

2.1. Changement de couverture végétale (2015-2023)

Entre 2015 et 2023, la zone d'étude a connu des modifications importantes de la de couverture végétale (Figure 36). Les parcours dégradés ont augmenté de 40 542,18 hectares, tandis que les parcours moins dégradés se sont accrus de 43 717,35 hectares, reflétant des changements dynamiques dans les conditions des parcours (Belhadj et al., 2023). Les terres agricoles ont enregistré une légère réduction de 534,6 hectares, mais la culture de palmiers dattiers dans les oasis a augmenté de manière significative, avec une expansion de 3 428,55 hectares, stimulée par des incitations économiques et une gestion améliorée de l'eau (Hamamouche et al., 2015). En revanche, la végétation naturelle, notamment la flore désertique clairsemée, a montré une tendance à la baisse (Amrouni et al., 2022), attribuable aux sécheresses prolongées et aux activités anthropiques telles que le surpâturage. L'augmentation des terres dénudées est particulièrement préoccupante, car elle reflète des processus de désertification aggravés par la variabilité climatique et une gestion non durable des terres (Merdas et al., 2015). Ces changements sont en accord avec les observations mondiales des régions arides, où la dégradation des terres est fréquente (Al-Quraishi et al., 2021).

2.2 Prédiction des changements futurs (2031)

La prédiction pour 2031 indique la poursuite des tendances observées dans les données historiques. Les terres agricoles devraient s'étendre de 2 365,49 hectares, en raison de l'amélioration de l'irrigation et de la demande accrue pour les produits agricoles. La culture de

palmiers dattiers dans les oasis devrait également augmenter de manière significative avec 1,860.99 hectares supplémentaires (Figure 36), soulignant l'importance de cette culture dans les régions arides (Alotaibi et al., 2023). Cette expansion des cultures de dattiers et des terres agricoles risque de pénétrer les habitats naturels, accentuant les pressions environnementales existantes (Amrouni et al., 2022).

Cette augmentation prévue des terres agricoles et des plantations de palmiers dattiers pose des défis majeurs pour les ressources en eau, étant donné la disponibilité limitée dans les régions arides (Xia et al., 2017). L'expansion peut exercer une pression accrue sur les ressources hydriques déjà rares, affectant à la fois la consommation humaine et la durabilité écologique. De plus, la poursuite de l'extension des terres agricoles, si elle n'est pas gérée de manière durable, pourrait exacerber l'érosion et la dégradation des sols (Lal, 2012), réduisant davantage la productivité des terres et perturbant l'équilibre écologique, ce qui entraînerait une diminution de la biodiversité végétale et de la santé des écosystèmes.

En revanche, les parcours dégradés devraient diminuer de 3 470,3 hectares, tandis que les parcours moins dégradés connaîtraient une légère réduction de 313,56 hectares (Figure 36), reflétant les efforts de réhabilitation des terres et les changements dans les pratiques d'utilisation des terres.

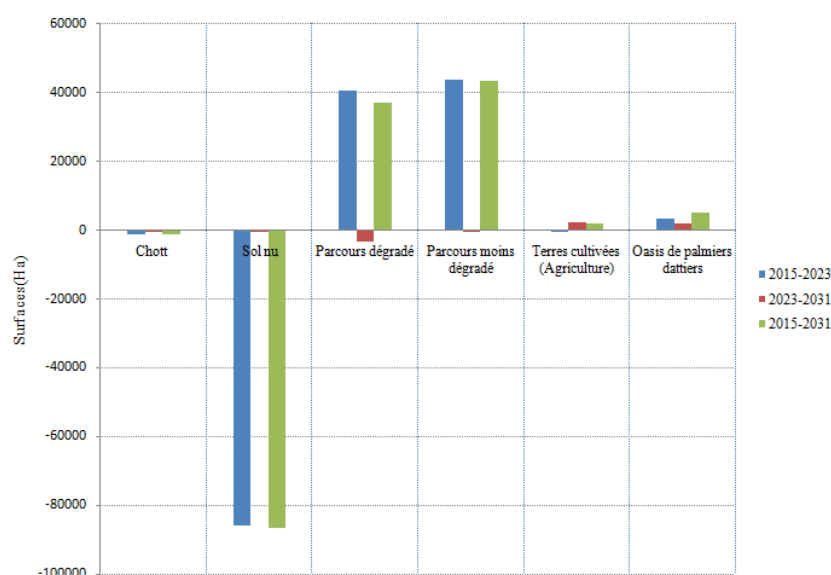


Figure 36: Types d'utilisation des terres dans la zone d'étude de 2015 à 2031

2.3. Interpolation spatiale pour l'étude de répartition de la végétation endémique (Famille :Fabaceae)

En complément des analyses basées sur les indices de MSAVI et les modèles de prédiction de l'utilisation des terres, l'interpolation, et plus particulièrement le krigeage, est appliquée pour estimer la densité des espèces dans des zones non échantillonnées à partir de points de présence géolocalisés. Cette méthode permet de visualiser avec précision les zones de forte concentration des Fabaceae et de mettre en évidence les habitats critiques (Figure 37).

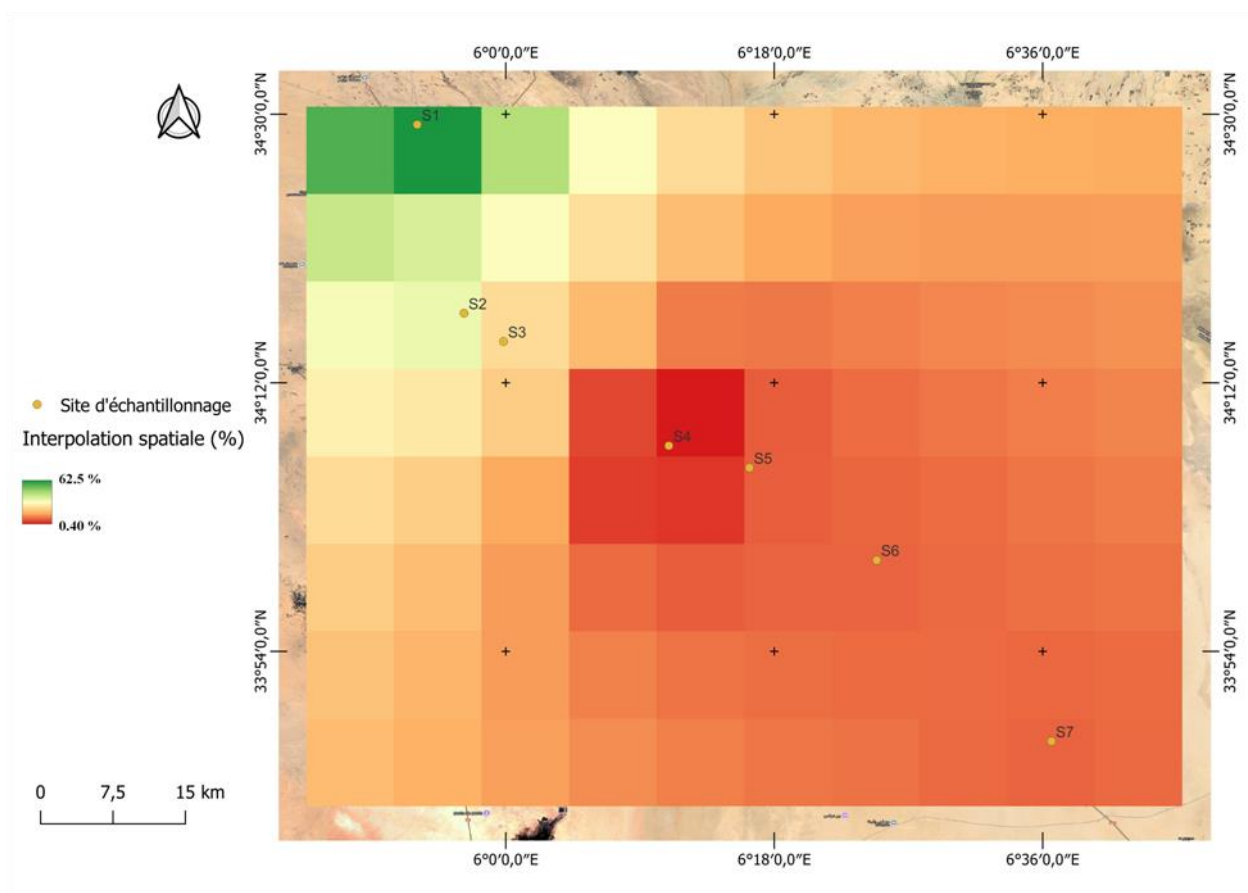


Figure 37 : Interpolation spatiale de la végétation endémique de la région d'étude (Famille :Fabaceae)

La répartition des Fabaceae endémiques dans la région d'El Oued et les zones désertiques dépend de multiples facteurs climatiques, édaphiques et anthropiques. Les conditions arides, avec des températures élevées et des précipitations irrégulières, imposent aux plantes des adaptations, telles que des racines profondes pour survivre au stress hydrique

(Ozenda, 2004). La salinité des sols limite également la répartition des espèces, bien que certaines Fabaceae présentent une tolérance qui leur permet de prospérer dans ces milieux pauvres en nutriments (Sprent, 2009). En parallèle, les pressions anthropiques, telles que le surpâturage et l'exploitation des ressources en eau, accentuent la dégradation de ces écosystèmes, menaçant la biodiversité (Kouba et al., 2021).

Ce chapitre démontre l'importance cruciale de la télédétection pour surveiller la dynamique de la végétation dans les régions arides. En utilisant l'indice MSAVI dérivé des images Landsat 8 et 9, nous avons cartographié les changements de couverture végétale dans le nord-est de l'Algérie entre 2015 et 2023, avec des projections jusqu'en 2031. Les résultats mettent en évidence le rôle essentiel de la végétation pour la stabilité des écosystèmes en zones arides, montrant une dégradation due aux pressions naturelles et humaines, telles que la sécheresse et le surpâturage. La diversité des habitats, des oasis de palmiers-dattiers aux communautés végétales spontanées, a été capturée par les valeurs de MSAVI, révélant des variations dans la densité et la santé de la végétation. La télédétection a prouvé sa valeur en fournissant des données précises et exhaustives, impossibles à obtenir par les méthodes traditionnelles. Les projections indiquent une poursuite des changements d'occupation des terres, accentuant la nécessité de stratégies de gestion durable.

Conclusion

Conclusion

La région d'El Oued, zone de transition entre les biomes méditerranéen et saharien, abrite un patrimoine biologique unique et constitue un modèle pour l'étude de la biodiversité dans les environnements désertiques. Cette zone saharienne connaît d'importants bouleversements, notamment des transformations de la couverture végétale et des modifications profondes des paysages. Les processus d'érosion et de dégradation y sont particulièrement marqués. Ces évolutions soulèvent des questions quant à la capacité de résilience des écosystèmes de la région face à ces dégradations. Pour explorer ces interrogations, cette étude vise à analyser la diversité et la répartition de la végétation endémique, en particulier celle de la famille des Fabaceae.

Cette recherche contribue au développement de stratégies de conservation et de gestion durable des espèces endémiques, en mettant l'accent sur les Fabaceae, un groupe végétal essentiel pour la région d'El Oued. Elle approfondit notre compréhension de la diversité floristique locale à travers une évaluation quantitative et qualitative. Pour ce faire, un inventaire floristique des formations végétales de la région a été réalisé, complété par des techniques de télédétection via l'analyse d'images satellitaires et l'application d'indices de végétation.

Les résultats de l'inventaire ont révélé un total de 3 885 individus, répartis en 44 espèces, 36 genres et 16 familles. Les familles les plus abondantes sont les Chenopodiaceae (10 espèces), les Fabaceae (8 espèces) et les Asteraceae (5 espèces), représentant respectivement 22,73 %, 18,18 % et 11,36 % de la diversité. Par ailleurs, les données d'abondance montrent que les espèces pérennes constituent le groupe fonctionnel dominant dans la zone d'étude.

Les tests de corrélation démontrent que les variations dans la structure taxonomique des communautés végétales dépendent fortement des conditions environnementales, avec un ratio G/S dépassant 89 % et un ratio F/S supérieur à 43 %. La dominance des Chaméphytes (18 espèces) dans la zone d'étude s'explique par leur adaptation aux environnements chauds et secs, aux différences topographiques, ainsi qu'aux influences anthropiques. Parmi les éléments floristiques, les espèces saharo-arabes prédominent dans cette région.

L'analyse des formes de vie des espèces végétales offre des perspectives précieuses sur la manière dont la végétation s'adapte aux changements environnementaux. Dans cette étude, les chaméphytes se distinguent comme la forme de vie dominante, grâce à leur résistance à la sécheresse et à la salinité.

Les interactions interspécifiques entre les espèces de la famille des Fabaceae se manifestent particulièrement dans le Site 1, où coexistent des espèces telles que *Astragalus crenatus*, *A. mareoticus*, *A. armatus*, *Genista saharae* et *Lotus halophilus*, révélant une complémentarité écologique significative.

La dominance de *Retama retam* dans la région d'étude souligne son rôle écologique crucial dans la structuration des communautés végétales. Cette dominance est liée à ses capacités de fixation d'azote et de résistance à la sécheresse. L'analyse de la distribution spatiale révèle un gradient de diversité décroissant du Site 1 vers les autres sites, influencé par des facteurs environnementaux tels que la disponibilité en eau, la nature des sols et les interactions biotiques.

L'analyse écologique des Fabaceae dans les sept stations de la région d'étude met en évidence une structure de distribution caractérisée par une forte hétérogénéité spatiale et des interactions interspécifiques complexes, reflétant les schémas typiques de distribution de la végétation des écosystèmes arides.

L'évaluation de la dynamique spatio-temporelle de la végétation entre 2015 et 2023, via l'indice MSAVI appliqué aux images Landsat 8 et 9, révèle une dégradation marquée des écosystèmes due à des pressions naturelles (sécheresse) et anthropiques (surpâturage). Les zones de parcours dégradés ont augmenté de 40 542,18 hectares, tandis que les zones moins dégradées ont gagné 43 717,35 hectares. D'ici 2031, les projections prévoient une expansion des terres agricoles (+2 365,49 hectares) et des oasis de palmiers dattiers (+1 860,99 hectares), parallèlement à une réduction des parcours dégradés (-3 470,3 hectares). L'étude des Fabaceae dans la région d'El Oued montre que leur répartition est influencée par des facteurs climatiques, édaphiques et anthropiques, avec des espèces tolérantes à la salinité des sols pauvres. Ces résultats enrichissent les connaissances sur les Fabaceae et guideront les stratégies de conservation et de restauration. Les recommandations issues de ces résultats incluent :

- Un suivi régulier de la végétation par télédétection est crucial pour détecter précocement les effets de la sécheresse et des pressions anthropiques.
- L'implication des communautés locales dans la conservation des Fabaceae, combinée au développement de zones protégées, renforcerait la durabilité des actions entreprises.
- L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'analyse des données SIG affinerait les prévisions de changements environnementaux, soutenant une gestion proactive et efficace de l'écosystème saharien.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abdel Khalik, K., Al-Gohary, I., & Al-Sodany, Y. (2017). Floristic composition and vegetation: environmental relationships of Wadi Fatimah, Mecca, Saudi Arabia. *Arid Land Research and Management*, 31(3), 316-334. <https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1318188>
2. Abdelaal, M., Fois, M., Fenu, G., & Bacchetta, G. (2018). Critical checklist of the endemic vascular plants of Egypt. *Phytotaxa*, 360(1), 19-34. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.360.1.2>
3. Abdelmonem, M., Nadjet, Z., Badra, A., Abderrahmane, K., & Boualem, R. (2024). Geostatistical methods for mapping groundwater nitrate concentrations: a case study of the El-Oued region. *Water Supply*, 24(9), 3238-3252. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.205>
4. Aidoud, A., Le Floc'h, E., Noel Le Houerou, H., 2006. Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sécheresse* 17, 19-30.
5. Aidoud, A., Slimani, H., & Rozé, F. (2011). La surveillance à long terme des écosystèmes arides méditerranéens: quels enseignements pour la restauration? Cas d'une steppe d'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) en Algérie. *Ecologia Mediterranea*, 37(2), 17-32.
6. Aissa, B. H. (2001). Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 12(3), 198-0.
7. Al-lami, A. K., Abbood, R. A., Al Maliki, A. A., & Al-Ansari, N. (2021). Using vegetation indices for monitoring the spread of Nile Rose plant in the Tigris River within Wasit province, Iraq. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100471. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100471>
8. Alliouche, A., & Kouba, Y. (2023). Modelling the spatiotemporal dynamics of land susceptibility to desertification in Algeria. *Catena*, 232, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107437>
9. Alotaibi, K. D., Alharbi, H. A., Yaish, M. W., Ahmed, I., Alharbi, S. A., Alotaibi, F., & Kuzyakov, Y. (2023). Date palm cultivation: A review of soil and environmental conditions and future challenges. *Land Degradation & Development*, 34(9), 2431-2444. <https://doi.org/10.1002/ldr.4619>
10. Al-Quraishi, A., Razvanchy, H., & Gaznayee, H. (2021). A comparative study for performance of five Landsat-based vegetation indices: their relations to some ecological and terrain variables. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(01), 58-67. <https://doi.org/10.38094/jgier.119>
11. Amrouni, Y., Berrayah, M., Gelabert, P., Vega-Garcia, C., Hellal, B., & Rodrigues, M. (2022). Recent land cover trends in the transition region of Tiaret, Algeria. *Catena*, 210, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105861>
12. Angus, A., Burgess, P. J., Morris, J., & Lingard, J. (2009). Agriculture and land use: Demand for and supply of agricultural commodities, characteristics of the farming and food industries, and implications for land use in the UK. *Land use policy*, 26, S230-S242. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.020>
13. Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., & Tsoar, H. (2017). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. *Climatic Change*, 112(3-4), 901-923.

14. Azizi, M., Chenchouni, H., Belarouci, M. E. H., Bradai, L., & Bouallala, M. H. (2021). Diversity of psammophyte communities on sand dunes and sandy soils of the northern Sahara Desert. *Journal of King Saud University-Science*, 33(8), 101656. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101656>
15. Baameur, M., Benabdeli, K., & Benabadji, N. (2021). Contribution à l'étude de la biodiversité végétale dans la région d'El Oued (Sahara septentrional algérien). *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 76(3), 304-318.
16. Baba Sy, M. (2005). *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional, région Algérie, Tunisie et la Lybie* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat d'état. Université El Manar, Tunisie. 261p).
17. Bakkenes, M., Alkemade, J. R. M., Ihle, F., Leemans, R., & Latour, J. B. (2002). Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global change biology*, 8(4), 390-407. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00467.x>
18. Barkat, A., Bouaicha, F., Bouteraa, O., Mester, T., Ata, B., Balla, D., Rahal, Z & Szabó, G. (2021). Assessment of complex terminal groundwater aquifer for different use of Oued Souf Valley (Algeria) using multivariate statistical methods, geostatistical modeling, and water quality index. *Water*, 13(11), 1609. <https://doi.org/10.3390/w13111609>
19. Barkoudah, Y., & Van Der Sar, D. (1982). L'Acacia raddiana dans la région de Béni-Abbès (Algérie). *Bull Soc Hist Nat Afr du Nord*, 70(1), 79-121.
20. Battandier, J.A. and Trabut, L. (1888-1890). *Flora of Algeria (Dicotyledons)* Typography Adolphe Jourdan, Algiers. 860 p.
21. Beaudoin Y., Cavayas F. & Marois C. (1995). Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour de l'occupation/utilisation du sol en milieu urbain. *Journal Canadien de Télédétection*, 21(1): 28-42. <https://doi.org/10.1080/07038992.1995.10874594>
22. Bel, F., & Demargne, F. (1966). Etude géologique du Continental terminal. *DEC, ANRH, Alger, Algérie*, 24, 22.
23. Bel, G., & Ashkenazy, Y. (2014). The effects of psammophilous plants on sand dune dynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(7), 1636-1650. <https://doi.org/10.1002/2014JF003170>
24. Belhadj, A., Boulghobra, N., & Demnati Allache, F. (2023). Multi-temporal Landsat imagery and MSAVI index for monitoring rangeland degradation in arid ecosystem, case study of Biskra (southeast Algeria). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 656.
25. Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01743.x>
26. Bena, G., Lejeune, B., Prosperi, J. M., & Olivieri, I. (1998). Molecular phylogenetic approach for studying life-history evolution: the ambiguous example of the genus *Medicago* L. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 265(1401), 1141-1151. <https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0410>

27. Benabadji, N., Aboura, R., & Benchouk, F. (2007). La régression des steppes méditerranéennes: le cas d'un faciès à *Lygeumspartum* L. dans l'Oranie (Algérie). *EcologiaMediterranea*, 35, 75-90.
28. Benguerba, Y., Bousba, S., & Boudalia, S. (2019). Biodiversity conservation challenges in Algeria. *Journal of Environmental Management*, 237, 182-190.
29. Boualem, B., & Egbueri, J. C. (2024). Graphical, statistical and index-based techniques integrated for identifying the hydrochemical fingerprints and groundwater quality of In Salah, Algerian Sahara. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(5), 158. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01931-6>
30. Bouallala, M. H., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2020). Vegetation traits are accurate indicators of how do plants beat the heat in drylands: Diversity and functional traits of vegetation associated with water towers in the Sahara Desert. *Ecological Indicators*, 114, 106364. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106364>
31. Bouallala, M. H., Neffar, S., Bradai, L., & Chenchouni, H. (2023). Do aeolian deposits and sand encroachment intensity shape patterns of vegetation diversity and plant functional traits in desert pavements?. *Journal of Arid Land*, 15(6), 667-694. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0014-7>
32. Bouallala, M., Bradai, L., & Chenchouni, H. (2022). Effects of Sand Encroachment on vegetation diversity in the Sahara Desert. *New Prospects in EnvironmentalGeosciences and Hydrogeosciences*: 133-138.
33. Bouallala, M., Chehma, A., & Hamel, F. (2013). Evaluation of the nutritional value of some herbaceous plants grazed by Camel in the Sahara North-Western Algerian Sahara. *Lebanese Science Journal*, 14(1), 33-39.
34. Bouazza, M. Benabadji, N. Loisel, R. & Metge, G. 2004. Evolution de la végétation steppique dans le sud-ouest de l'Oranie (Algérie). *Rev. Ecol.* Tome 30, Fasc. 2: pp. 219-233.
35. Boufennara, S., Lopez, S., Bousseboua, H., Bodas, R., & Bouazza, L. (2012). Chemical composition and digestibility of some browse plant species collected from Algerian arid rangelands. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(1), 88-98. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012101-554-11>
36. Boulos, L., Le Floc'h, E., Véla, E., 2010. Catalogue synonymique commenté de la flore de Tunisie. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Tunisie, 509 pp.
37. Bouselsal, B. (2017). Groundwater quality in arid regions: the case of Hassi Messaoud region (SE Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(1), 528-541. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i1.30>
38. Bouselsal, B., & Saibi, H. (2022). Evaluation of groundwater quality and hydrochemical characteristics in the shallow aquifer of El-Oued region (Algerian Sahara). *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100747>
39. Bouzekri, A., Alexandridis, T. K., Toufik, A., Rebouh, N. Y., Chenchouni, H., Kucher, D., ... & Mohamed, E. S. (2023). Assessment of the spatial dynamics of sandy desertification using remote sensing in Nemamcha region (Algeria). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(3), 642-653. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.07.006>

40. Bradai, L., Bissati, S., Chenchouni, H., & Amrani, K. (2015)a. Effects of climate on the productivity of desert truffles beneath hyper-arid conditions. *International journal of biometeorology*, 59, 907-915. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0891-8>.
41. Bradai, L., Bouallala, M. H., Bouziane, N. F., Zaoui, S., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2015)b. An appraisal of eremophyte diversity and plant traits in a rocky desert of the Sahara. *Folia Geobotanica*, 50, 239-252. <https://doi.org/10.1007/s12224-015-9218-8>
42. Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, USA.
43. Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.
44. Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., ...& Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59-67.
45. CCT (2003). Notions fondamentales de télédétection. Centre canadien de télédétection, Canada, 266 p
46. Cezard, N. (2021). *Systèmes LIDAR pour la caractérisation à distance des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère* (Doctoral dissertation, Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées).
47. Chaieb, M., & Boukhris, M. (1998). Flore succincte et illustrée des zones arides et sahariennes de Tunisie. L'Or du Temps, Tunis, 292 p.
48. Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., ... & Hobbie, S. E. (8). others (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405(6783), 234-242.
49. Chehma, A., & Djebbar, M. R. (2008). Les espèces médicinales spontanées du Sahara septentrional algérien: distribution spatio-temporelle et étude ethnobotanique. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 17, 36-45.
50. Chehma, A., & Huguenin, J. (2017). Le" DRINN", *Stipagrostis pungens*. Caractéristiques floristiques et modes d'usages. *Rev. BioRessources* 7, 59–66
51. Chehma, A., 2005. Etude floristique et nutritive spatio-temporelle des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. Cas des régions de Ouargla et Ghardaia. Thèse de Doctorat. Université d'Annaba, 178 p.
52. Chehma, A., Bouzegag, I., & Chehma, Y. (2008)a. Productivité de la phytomasse éphémère des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. *Fourrages*, 194, 253-256.
53. Chehma, A., Faye, B., & Djebbar, M. R. (2008)b. Productivité fourragère et capacité de charge des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. *Sécheresse*, 19(2), 115-121.
54. Chen, Y., & Gillieson, D. (2009). Evaluation of Landsat TM vegetation indices for estimating vegetation cover on semi-arid rangelands: a case study from Australia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(5), 435-446. <http://dx.doi.org/10.5589/m09-037>
55. Chenchouni, H. (2012). Diversité floristique d'un lac du bas-sahara algérien. Flora diversity of a lake at algerian low-sahara. *Acta Botanica Malacitana*, 37, 33-44. <https://doi.org/10.24310/abm.v37i0.2664>

56. Chenchouni, H. (2017). Edaphic factors controlling the distribution of inland halophytes in an ephemeral salt lake "Sabkha ecosystem" at North African semi-arid lands. *Science of the total environment*, 575, 660-671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.071>
57. Cheng, F., Liu, S., Hou, X., Wu, X., Dong, S., & Coxixio, A. (2019). The effects of urbanization on ecosystem services for biodiversity conservation in southernmost Yunnan Province, Southwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 29, 1159-1178.
58. Chi, M., Plaza, A., Benediktsson, J. A., Sun, Z., Shen, J., & Zhu, Y. (2016). Big data for remote sensing: Challenges and opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 104(11), 2207-2219. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2598228>
59. Chiheb, L., Ettayib, B., Yassine, N., & Ramzi, H. (2021). Spatio-Temporal Variation Patterns of Bird Community in the Oasis Ecosystem of the North of Algerian Sahara, *Journal of Bioresource Management*, 8 (1), 2. <https://doi.org/10.35691/JBM.1202.0161>
60. Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty* (Vol. 713). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9429-y>
61. Chriqui, A., Benkhniue, O., El Khadir, I., Mouniane, Y., Alaoui, S.M.H., Zidane, L., & Hmouni, D. (2024). Floristic Diversity and Potential of Site of Biological and Ecological Interest Brikcha, Prérif (North-West Morocco). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 72(3-4), 99-128. <https://doi.org/10.11118/actaun.2024.008>
62. Convention on Biological Diversity (CBD). (1992). *Convention on Biological Diversity*. United Nations. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
63. Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ...& Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change, human and policy dimensions*, 26, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
64. Coté, M. (Ed.). (2005). *La ville et le désert: le Bas-Sahara algérien*. Karthala Éditions.
65. Crisp, M. D., Laffan, S., Linder, H. P., & Monro, A. N. N. A. (2001). Endemism in the Australian flora. *Journal of Biogeography*, 28(2), 183-198. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00524.x>
66. Daget, P. H., Ahdali, L., & David, P. (1988). Le bioclimat méditerranéen et ses modalités dans les pays arabes. *Bull. Ecol. Terr. Biocé*, 3(12), 73-93.
67. Daget, P., & Poissonet, J. (1991). Permanent meadows and pastures: study methods. Institute of Botany, Montpellier, France. 354p.
68. Dash, J., & Ogutu, B. O. (2016). Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 322-351. <https://doi.org/10.1177/0309133316639403>
69. Davis, T. J. (1996). Le Manuel de la Convention de RAMSAR: Guide de la Convention relative aux zones humides d'importance portance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eaux. In *Bureau de la Convention RAMSAR*. Gland, Suisse.

70. Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., Brauman, K. A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P. W., van Oudenhoven, A. P. E., van der Plaat, F., Schröter, M., Lavorel, S., . . . Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
71. Dobignard, A., & Chatelain, C. (2010-2013). *Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord*. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.
72. Dubief J., (1952): Le vent et le déplacement du sable au Sahara. Ed : Ed: Inst. Rech. Sah., Alger. Tome VIII. pp. 123-163.
73. Dusseux, P. (2014). Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. Thèse de doctorat, l'Université de Rennes, 283p.
74. Edosa, B. T., Erena, M. G., Wolteji, B. N., Werati, G. T., & Nagasa, M. D. (2024). Urban growth assessment using machine learning algorithms, GIS techniques, and its impact on biodiversity: The case of Sululta sub-city, Central Oromia, Ethiopia. *City and Environment Interactions*, 23, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100151>
75. El-Demerdash, M. A., Hegazy, A. K., & Zilay, A. M. (1995). Vegetation-soil relationships in Tihamah coastal plains of Jazan region, Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 30(2), 161-174. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80067-9](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80067-9)
76. El-Sheikh, M. A., Thomas, J., Arif, I. A., & El-Sheikh, H. M. (2021). Ecology of inland sand dunes “nafuds” as a hyper-arid habitat, Saudi Arabia: Floristic and plant associations diversity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1503-1513. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.002>
77. Fan, C., Tan, L., Zhang, C., Zhao, X., & Gadow, K. (2017). Analysing taxonomic structures and local ecological processes in temperate forests in North Eastern China. *BMC ecology*, 17, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12898-017-0143-y>
78. Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
79. Fotheringham, S., & Rogerson, P. (Eds.). (2013). *Spatial analysis and GIS*. Crc Press.
80. Frankham, R., Briscoe, D. A., & Ballou, J. D. (2002). *Introduction to conservation genetics*. Cambridge University Press. Cambridge. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511808999>
81. Gamoun, M. (2013). Vegetation change in variable rangeland environments: the relative contribution of drought and soil type in arid rangelands. *Ekológia (Bratislava)*, 32(1), 148-157. <https://doi.org/10.2478/eko-2013-0013>
82. Gamoun, M., Belgacem, A. O., & Louhaichi, M. (2018). Diversity of desert rangelands of Tunisia. *Plant diversity*, 40(5), 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2018.06.004>
83. Gaston, K. J. (2000). Global patterns in biodiversity. *Nature*, 405(6783), 220-227.
84. Gaur, M. K., & Squires, V. R. (2018). Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. In M. K. Gaur & V. R. Squires (Eds.), *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands* (pp. 3-20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8_1

85. Girod, C. (2010). *Conséquences génétiques des variations climatiques du Quaternaire et distribution des espèces forestières Néotropicales: L'exemple du palmier *Astrocaryum sciophilum** (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
86. Goetz, A. F. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote sensing of environment*, 113, S5-S16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>
87. Goodall, D. W. (1952). Some considerations in the use of point quadrats for the analysis of vegetation. *Australian Journal of Biological Sciences*, 5(1), 1-41. <https://doi.org/10.1071/B19520001>
88. Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, 131(3), 872-877. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.017004>
89. Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8(9), 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
90. Hamamouche, M. F., Kuper, M., & Lejars, C. (2015). Émancipation des jeunes des oasis du Sahara algérien par le déverrouillage de l'accès à la terre et à l'eau. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0777>
91. Hamel T., Seridi R., de Bélair G., Slimani A.R., Babali B. (2013) Flore vasculaire rare et endémique de la péninsule de l'Edough (Nord-Est algérien), *Revue Synthèse des Sciences et de la Technologie*, 26: 65-74.
92. Hamilton, A. (2006). *Plant Conservation: An Ecosystem Approach* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849772181>
93. Hanafi, M. T., Amara, D. G., Bounar, R., Mayouf, R., Ali, H., & Ouamane, A. T. (2024). Artificial intelligence and remote sensing for spatiotemporal analysis and prediction of vegetation changes: a case study of El Oued, northeastern Algeria. *studies in engineering and exact sciences*, 5(2), e6349 . <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-072>
94. Hannah, L., Midgley, G. F., & Millar, D. (2002). Climate change-integrated conservation strategies. *Global Ecology and Biogeography*, 11(6), 485-495. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2002.00306.x>
95. Hanski, I. (1999) *Metapopulation Ecology*. Oxford University Press, New York.
96. Hautereau-Boutonnet, M., & Truilhé, E. (2017). *Quelle (s) valeur (s) pour la biodiversité?* (pp. 325-p). Mare Martin.
97. Hijmans, R. J., & Elith, J. (2019). Spatial distribution models. Retrieved from <https://rsportal.org/> <https://doi.org/10.1007/s10661-02311191-z>
98. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6(2), 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
99. Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
100. Huseynova, H. Z. (2022). Vegetation of the southern part of the Caspian Coast and its nutritional value. *Biosystems Diversity*, 30(3), 205-212. <https://doi.org/10.15421/012222>
101. Irzagh, A., Bounaceur, F., Antar, D., Benrima, A., & Aulagnier, S. (2020). New information on mammals of the Algerian Tassili.

102. Jauffret, S. (2001). *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long term dans les écosystèmes méditerranéens arides: application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien* | Theses. fr (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
103. Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Pearson Education India.
104. Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223. <https://doi.org/10.1038/nature01091>
105. Käyhkö, N., Fagerholm, N., Asseid, B. S. & Mzee, A. J. (2011). Dynamic land use and land cover changes and their effect on forest resources in a coastal village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania. *Land Use Policy*, 28 : 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.04.006>
106. Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897-2910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
107. Khezzani, B., Aouachria, A. N., Khechekhouche, E. A., Djaballah, S., Djedidi, T., & Bosilkovski, M. (2021). Caractéristiques épidémiologiques de la brucellose humaine dans la province d'El-Oued, sud-est algérien. *Santé Publique*, 33(2), 275-284.
108. Konecny, G. (2014). *Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*. cRc Press.
109. Kouba, Y., Merdas, S., Mostephaoui, T., Saadali, B., & Chenchouni, H. (2021). Plant community composition and structure under short-term grazing exclusion in steppic arid rangelands. *Ecological indicators*, 120, 106910. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106910>
110. Kouider, M. H., Dahou, M. E. A., Nezli, I. E., Dehmani, S., Touahri, A., Séverin, P., & Antonio, P. B. (2023). Fractures and lineaments mapping and hydrodynamic impacts on surface and groundwater occurrence and quality in an arid region, Oued M'ya basin–Southern Sahara, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 82(22), 538. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11128-2>
111. Kraak, M.-J., & Ormeling, F. (2020). *Cartography: Visualization of Geospatial Data*, Fourth Edition (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429464195>
112. Lal, R. (2012). Climate change and soil degradation mitigation by sustainable management of soils and other natural resources. *Agricultural Research*, 1, 199-212. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0031-9>
113. Le Houérou, H. N. (2001). Biogeography of the arid steppeland north of the Sahara. *Journal of Arid Environments*, 48(2), 103-128. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0679>
114. Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1), 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2)

115. Lemenkova, P. (2023). A GRASS GIS scripting framework for monitoring changes in the ephemeral salt lakes of Chotts Melrhir and Merouane, Algeria. *Applied System Innovation*, 6(4), 61. <https://doi.org/10.3390/asi6040061>
116. Lenco, M. (1979). La télédétection: une nouvelle source d'information pour l'environnement. *Journal de la Société de statistique de Paris*, 120(1), 32-50.
117. Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B., & Lock, M. (Eds.). (2005). Legumes of the World. Royal Botanic Gardens, Kew. 577 pp. <https://doi.org/10.1017/S0960428606190198>
118. Li, S., Dragicevic, S., Castro, F. A., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Pettit, C., Jiang, B., Haworth, J., Stein, A., & Cheng, T. (2016). Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 119-133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.012>
119. Liang, S., Li, X., & Wang, J. (Eds.). (2012). Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications. Academic Press.
120. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). John Wiley & Sons.
121. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
122. Loreau, M., Hector, A., & Isbell, F. (2024). *Les conséquences écologiques et sociétales de la perte de biodiversité*. ISTE éditions, London.
123. Lozet, J., & Mathieu, C. (1991). *Dictionary of soil science*. Technique et Documentation-Lavoisier. (No. Ed. 2, pp.348).
124. Lunetta, R. S., Knight, J. F., Ediriwickrema, J., Lyon J. G. & Worthy, L. D. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105:142-154.
125. Ma, Y., Wu, H., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A., & Jie, W. (2015). Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 51, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.future.2014.10.029>
126. Macheroum, A., Kadik, L., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2021). Environmental drivers of taxonomic and phylogenetic diversity patterns of plant communities in semi-arid steppe rangelands of North Africa. *Ecological Indicators*, 132, 108279. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108279>
127. Maestre, F. T., Salguero-Gómez, R., & Quero, J. L. (2012). It is getting hotter in here: determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1606), 3062-3075. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0323>
128. Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing, Oxford, 256 p.
129. Magurran, A. E. (2021). Measuring biological diversity. *Current Biology*, 31(19), R1174-R1177. [10.1016/j.cub.2021.07.049](https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.049)
130. Mahrads, B. E., Newton, A., Icely, J. D., Kacimi, I., Abalansa, S., & Snoussi, M. (2020). Contribution of remote sensing technologies to a holistic coastal and marine environmental management framework: a review. *Remote Sensing*, 12(14), 2313. <https://doi.org/10.3390/rs12142313>

131. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.
132. Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169-172. <https://doi.org/10.1126/science.1146961>
133. Marcon, E. (2015). *Mesures de la biodiversité*. Master Thesis, Kourou, France. 268 p
134. Margules, C. R., & Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405(6783), 243-253. <https://doi.org/10.1038/35012251>
135. Martins, C. (1864). LE SAHARA: SOUVENIRS D'UN VOYAGE D'HIVER. I. LA RÉGION MÉDITERRANÉENNE.—LE SAHARA ORIENTAL ET LA VÉGÉTATION DU DÉSERT. *Revue des Deux Mondes* (1829-1971), 52(2), 295-322. <https://www.jstor.org/stable/44726321>
136. McRae, B. H., Shah, V. B., & Mohapatra, T. K. (2009). Circuitscape user's guide. *The University of California, Santa Barbara*.
137. Mechaala, S., Bouatrous, Y., & Adouane, S. (2022). Traditional knowledge and diversity of wild medicinal plants in El Kantara's area (Algerian Sahara gate): An ethnobotany survey. *Acta Ecologica Sinica*, 42(1), 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.01.007>
138. Médail, F., & Quézel, P. (1997). Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84(1), 112-127.
139. Médail, F., & Quézel, P. (1999). Biodiversity hotspots in the Mediterranean Basin: Setting global conservation priorities. *Conservation Biology*, 13(6), 1510-1513. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98467>.
140. Meddour, R., Sahar, O., & Jury, S. (2023). New analysis of the endemic vascular plants of Algeria, their diversity, distribution pattern and conservation status. *Willdenowia*, 53(1-2), 25-43. <https://doi.org/10.3372/wi.53.53102>
141. Mehda, S., Muñoz-Martín, M. Á., Oustani, M., Hamdi-Aïssa, B., Perona, E., & Mateo, P. (2021). Microenvironmental conditions drive the differential cyanobacterial community composition of biocrusts from the Sahara Desert. *Microorganisms*, 9(3), 487. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030487>
142. Miara M. D., Ait Hammou M., Rebbas K. & Bendif H. 2017: Flore endémique, rare et menacées de l'Atlas tellien occidental de Tiaret (Algérie). – *Acta Bot. Malacit.* 42: 271–285. <https://doi.org/10.24310/abm.v42i2.3590>
143. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis*. World Resources Institute.
144. Monod, T., 1992. Du désert. *Sécheresse* 3(1), 7–24.
145. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1), 6-43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
146. Mouysset, L. (2021). La valeur de la biodiversité dans les débats scientifiques: entre pluralisme et opérationnalité. *Penser la protection de l'environnement à partir de l'écologie*. E. Mermans & A. Dussault (eds).

147. Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.
148. Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jongman, R. H., Tarantino, C., Adamo, M., & Mairota, P. (2013). Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
149. Neffar, S., Menasria, T., & Chenchouni, H. (2018). Diversity and functional traits of spontaneous plant species in Algerian rangelands rehabilitated with prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) plantations. *Turkish Journal of Botany*, 42(4), 448-461. <https://doi.org/10.3906/bot-1801-39>
150. O'Sullivan, D., & Unwin, D. J. (2010). The pitfalls and potential of spatial data. *Geographic information analysis*, 33-53.
151. Ogle, K., & Reynolds, J. F. (2004). Plant responses to precipitation in desert ecosystems: Integrating functional types, pulses, thresholds, and delays. *Oecologia*, 141(2), 282-294. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1507-5>
152. Oitsius, L. V., Volovyk, H. P., Lysytsya, A. V., & Doletskyi, S. P. (2020). Distribution of adventive species *Solidago canadensis*, *Phalacrolooma annuum*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Heracleum sosnowskyi* in phytocenoses of Volyn'Polissya (Ukraine). *Biosystems Diversity*, 28(4), 343-349. <https://doi.org/10.15421/012043>
153. Oldeland, J., Große-Stoltenberg, A., Naftal, L., & Strohbach, B. J. (2017). The Potential of UAV Derived Image Features for Discriminating Savannah Tree Species. In R. Díaz-Delgado, R. Lucas, & C. Hurford (Eds.), *The Roles of Remote Sensing in Nature Conservation: A Practical Guide and Case Studies* (pp. 183-201). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64332-8_10
154. Olsen, R. C. (2007). Remote sensing from air and space. SPIE Press.
155. Ott, T., & Swiaczny, F. (2001). *Time-integrative geographic information systems: management and analysis of spatio-temporal data*. Springer Science & Business Media.
156. Ozenda, P. (1991). Flore de Sahara (3e édition mise à jour et augmentée). Paris, Éditions du CNRS, 662.
157. Ozenda, P. (2004). Flore et végétation des sahara. 3 édition. Ed. CNRS Paris. 662 p.
158. Palacio, R. D., Negret, P. J., Velásquez-Tibatá, J., & Jacobson, A. P. (2021). A data-driven geospatial workflow to map species distributions for conservation assessments. *Diversity and Distributions*, 27(12), 2559-2570. <https://doi.org/10.1111/ddi.13424>
159. Panzeri, D., Guidi Nissim, W., Labra, M., & Grassi, F. (2022). Revisiting the domestication process of african vigna species (fabaceae): background, perspectives and challenges. *Plants*, 11(4), 532. <https://doi.org/10.3390/plants11040532>
160. Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global ecology and biogeography*, 12(5), 361-371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>

161. Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., ... & Wegmann, M. (2013). Essential biodiversity variables. *Science*, 339(6117), 277-278. DOI: [10.1126/science.1229931](https://doi.org/10.1126/science.1229931)
162. Pérez-Ramos, P. (2024). The Oasis Loop: Vernacular Agricultural Landscapes in Arid Conditions. *International Journal of Islamic Architecture*, 13(2), 441-463.
163. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510. [10.1016/j.tree.2005.05.011](https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011)
164. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.
165. Quézel, P. (1978). Analysis of the flora of Mediterranean and Saharan Africa. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 65 (2), 479–534.
166. Quézel, P. (1995). La flore du bassin méditerranéen: origine, mise en place, endémisme. *Ecologia mediterranea*, 21(1), 19-39. <https://doi.org/10.3406/ecmed.1995.17>
167. Quezel, P., Santa, S. (1962). *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Vol 1. CNRS Paris.
168. Quézel, P., & Santa, S. (1963). *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. CNRS, Paris.
169. R Core Team, R. (2022). R: A language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna, Austria: R foundation for statistical computing. <https://www.r-project.org/>
170. Rahdari, M. R., Rodríguez-Seijo, A. (2021). Monitoring sand drift potential and sand dune mobility over the last three decades (Khartouran erg, Sabzevar, NE Iran). *Sustainability*, 13(16), 9050. <https://doi.org/10.3390/su13169050>
171. Ramade, F. (2008). Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité. Ed. Dunod, Paris. 727 p.
172. Ramade, F. (2009). *Éléments d'écologie: Écologie fondamentale*. Dunod, Paris.
173. Ramírez-Juidias, E., Madueño-Luna, A., Madueño-Luna, J. M., López-Gordillo, M. C., & Leiva-Piedra, J. L. (2023). Applying Remote Sensing Methods to Estimate Alterations in Land Cover Change and Degradation in the Desert Regions of the Southeast Iberian Peninsula. *Remote Sensing*, 15(16), 3984. . <https://doi.org/10.3390/rs15163984>
174. Raunkiaer, C. (1934). The life forms of plants and statistical plant geography; being the collected papers of C. Raunkiaer.
175. Richards, J. A. (2013). Remote sensing digital image analysis (5th ed.). Springer-Verlag.
176. Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote sensing digital image analysis: An introduction (4th ed.). Springer-Verlag.
177. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. & Deering D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, proceedings, 3rd ERTS Symposium, 1 : 48-62.
178. Rusňák, T., Halabuk, A., Halada, L., Hilbert, H., & Gerhátová, K. (2022). Detection of invasive black locust (*Robinia pseudoacacia*) in small woody features using spatiotemporal

- compositing of Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 14(4), 971. <https://doi.org/10.3390/rs14040971>
179. Saibi, H., Semmar, A., Mesbah, M., & Ehara, S. (2009). Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer, northeastern part of the Algerian Sahara. *Arabian journal of geosciences*, 2, 83-93. <https://doi.org/10.1007/s12517-008-0021-1>
180. Saifi, M., Boulghobra, N., & Fattoum, L. (2015). The green Dam in Algeria as a Tool to Combat Desertification. Planet@ Risk, vol. 3. In *Davos: Global Risk Forum) MEED Insight. Middle East Rail and Metro Projects Report* (pp. 1-4).
181. Sakraoui, N., Boussouak, R., Metallaoui, S., Chefrou, A., & Hade, A. (2020). La flore endémique du Nord-Est algérien face à la menace des espèces envahissantes. *Acta Botanica Malacitana*, 45, 67-79. <https://doi.org/10.24310/abm.v45i0.6138​>
182. Salama, F. M., Abd El-Ghani, M. M., Amro, A. A. E. R., Gaafar, A. E. S., & Abd El, A. A. E. M. (2018). Vegetation dynamics and species diversity in a Saharan Oasis, Egypt. *Notulae Scientia Biologicae*, 10(3), 363-372. <https://doi.org/10.15835/nsb103102>
183. Sánchez-Mercado, A. Y., Ferrer-Paris, J. R., & Franklin, J. (2010). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. *Oryx*, 44(4), 615. <https://doi.org/10.1017/S0030605310001201>
184. Satouh, A., Boualem, B., Chellat, S., & Benaabidate, L. (2021). Determination of groundwater vulnerability using the drastic method in Ouargla shallow aquifer (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 12-19. <https://doi.org/10.12911/22998993/137680>
185. Schlesinger, W. H., Reynolds, J. F., Cunningham, G. L., Huenneke, L. F., Jarrell, W. M., Virginia, R. A., & Whitford, W. G. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247(4946), 1043-1048. DOI: [10.1126/science.247.4946.1043](https://doi.org/10.1126/science.247.4946.1043)
186. Senseman, G.M., Bagley, C.F., Tweddle, S.A. (1996). Correlation of rangeland cover measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. *Geocarto International*, 11(3), 29-38.
187. Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). The theory of mathematical communication. *International Business*, 131, 164-174.
188. Singha, C., Sahoo, S., Singh, S. P., & Chowdhuri, B. R. (2022). Predicting the Relationship between Lulc Changes and Their Impact on Lst by Molusce and Gee Environment in Urban Catchment of Kolkata City. Available at SSRN 4272465. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4272465>
189. Sprent, J. I. (2009). Legume Nodulation: A Global Perspective. *Wiley-Blackwell*.doi: 10.1002/9781444316384
190. Sprent, J. I., Ardley, J., & James, E. K. (2017). Biogeography of nodulated legumes and their nitrogen-fixing symbionts. *New Phytologist*, 215(1), 40-56. <https://doi.org/10.1111/nph.14474>
191. Svein, A. F. (2019). Efficient storage of heterogeneous geospatial data in spatial databases. *Journal of Big Data*, 6(1), 102. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0262-8>
192. Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R.E. et al. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>

193. Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. (2014). Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 471-493. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>
194. Touahri, M., Belksier, M. S., Bouselsal, B., & Kebili, M. (2022). Groundwater quality assessment of hassi messaoud region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*, 23(11). <https://doi.org/10.12911/22998993/153396>
195. Tucker, C. J., Elgin Jr, J. H., McMurtrey Iii, J. E., & Fan, C. J. (1979). Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 8(3), 237-248.
196. Ubeid, K. F., & Albatta, A. S. (2014). Sand dunes of the Gaza Strip (southwestern Palestine): morphology, textural characteristics and associated environmental impacts. *Earth Sciences Research Journal*, 18(2), 131-142. <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v18n2.37238>
197. Ullah, H., Khan, S. M., Jaremko, M., Jahangir, S., Ullah, Z., Ali, I., Ahmad, Z & Badshah, H. (2022). Vegetation assessments under the influence of environmental variables from the Yakhtangay Hill of the Hindu-Himalayan range, North Western Pakistan. *Scientific Reports*, 12(1), 20973. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21097-4>
198. UNESCO. (1972). *Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional (Algérie et Tunisie)*. Rapport sur les Résultats du Projet (Conclusions et Recommandations), Report of the General Direction of Water Resources. Paris.
199. Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Asner, G. P., & Green, R. O. (2004). Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *BioScience*, 54(6), 523-534. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0523:UISTSE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0523:UISTSE]2.0.CO;2)
200. Verger, I. S. (2021). La place de l'Europe au sein des puissances spatiales. *L'espace extra-atmosphérique et le droit international*. <https://hal.science/hal-03513360v2>
201. Vermeulen, K., Aerts, J. M., Dekock, J., Bleyaert, P., Berckmans, D., & Steppe, K. (2012). Automated leaf temperature monitoring of glasshouse tomato plants by using a leaf energy balance model. *Computers and electronics in agriculture*, 87, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105980>
202. Wainwright, J., & Mulligan, M. (Eds.). (2013). *Environmental modelling: finding simplicity in complexity*. John Wiley & Sons.
203. Wang, L., D'Odorico, P., Evans, J. P., Eldridge, D. J., McCabe, M. F., Caylor, K. K., & King, E. G. (2012). Dryland ecohydrology and climate change: Critical issues and technical advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2585-2603. - <https://doi.org/10.5194/hess-16-25852012>
204. Ward, D., Wiegand, K., & Getzin, S. (2013). Walter's two-layer hypothesis revisited: Back to the roots! *Oecologia*, 172(3), 617-630. doi:10.1007/s00442-012-2538-y
205. WEC, (2007). La géologie pétrolière de l'Algérie. In Sonatrach – Schlumberger Well Evaluation Conference - Algérie 2007, p. 1.6 – 1.8, Édité par Schlumberger, 2007.
206. Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21(2-3), 213-251. doi: 10.2307/1218190
207. Williams, J. N., Seo, C., Thorne, J., Nelson, J. K., Erwin, S., O'Brien, J. M., & Schwartz, M. W. (2009). Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Diversity and distributions*, 15(4), 565-576. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2009.00567.x>

208. Willis, K. J. (2017). *State of the World's Plants 2017. Report* (Kew: Royal Botanic Gardens).
209. Woodcock, C. E., & Strahler, A. H. (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 21(3), 311-332. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90015-0)
210. Xia, J., Ning, L., Wang, Q., Chen, J., Wan, L., & Hong, S. (2017). Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change. *Climatic Change*, 144, 549-563. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1709-y>
211. Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Li, C., Babu, J. Y., Salas, W., & Moore III, B. (2006). Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote sensing of Environment*, 100(1), 95-113. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.004>
212. Xie, Y., Sha, Z., & Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of plant ecology*, 1(1), 9-23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>
213. Zedam, A. (2015). Étude de la flore endémique de la zone humide du Chott El Hodna: Inventaire et préservation (*Thèse de doctorat*). Université de Sétif, Algérie.
214. Zedam, A., Khoudour, D., & Mimeche, F. (2022). A ramsar wetland's endemic flora inventory and conservation of chott el hodna's plants (NORTHEASTERN ALGERIA). *Pak. J. Bot*, 54(3), 1025-1032. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-3\(13\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2022-3(13))
215. Zhang, C., Li, L., Guan, Y., Cai, D., Chen, H., Bian, X., & Guo, S. (2021). Impacts of vegetation properties and temperature characteristics on species richness patterns in drylands: Case study from Xinjiang. *Ecological Indicators*, 133, 108417. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108417>

PUBLICATIONS



Diversity and distribution of spontaneous plant communities and species in the northeast Algerian Sahara. Diversidade e distribuição de comunidades e espécies de plantas espontâneas no nordeste do Sahara Argelino.

[Mohamed Tahar Hanafi](#)^{1,2*}, [Djilani Ghemam Amara](#)¹, [Rabah Bounar](#)³, [Rabah Mayouf](#)⁴, [Ali Hachemi](#)⁵, [Abdelmoneim Tarek Ouamane](#)²

^{1*} Laboratory of Biology, Environment and Health, Department of Biology, Faculty of Life and Natural Sciences, Echahid Hamma Lakhdar University, El Oued, 39000, Algeria. Corresponding author. E-mail: hanafi-mohamedtaher@univ-eloued.dz

² Scientific and Technical Research Center on Arid Regions (CRSTRA), University *Campus*, Biskra, 07000, Algeria.

³ Laboratory of Biodiversity and Biotechnological Techniques for the Valorization of Plant Resources (BTB-VRV), Department of Nature and Life Sciences, Faculty of Sciences, Mohamed Boudiaf University, M'sila, 28000, Algeria.

⁴ Faculty of Life and Natural Sciences, Department of Agronomy, Echahid Hamma Lakhdar University, El Oued, 39000, Algeria.

⁵ Ecology of Arid Ecosystems and Climate Risks Division, Scientific and Technical Research Center on Arid Regions (CRSTRA), University *Campus*, Biskra, 07000, Algeria.



Artificial intelligence and remote sensing for spatiotemporal analysis and prediction of vegetation changes: a case study of El Oued, northeastern Algeria

Inteligência artificial e sensoriamento remoto para análise espaciotemporal e predição de mudanças na vegetação: um estudo de caso de El Oued, nordeste da Argélia

Inteligencia artificial y teledetección para el análisis espaciotemporal y la predicción de cambios en la vegetación: un estudio de caso de El Oued, noreste de Argelia

DOI: 10.54021/seesv5n2-072

Originals received: 07/01/2024

Acceptance for publication: 07/22/2024

Mohamed Tahar Hanafi

PhD Student in Biodiversity and Plant Ecology

Institution: Laboratory of Biology, Environment and health, Department of Biology, Faculty of Life and Natural Sciences, Echahid Hamma Lakhdar University

Address: El Oued, Algeria

E-mail: hanafi-mohamedtaher@univ-eloued.dz

Djilani Ghemam Amara

PhD in Plant's biology

Institution: Laboratory of Biology, Environment and health, Department of Biology, Faculty of Life and Natural Sciences, Echahid Hamma Lakhdar University

Address: El Oued, Algeria

E-mail: djilani-ghemamamara@univ-eloued.dz

Rabah Bounar

PhD in Ecology and Environment

Institution: Laboratory of Biodiversity and Biotechnological Techniques for the Valorization of Plant Resources (BTB-VRV), Faculty of Sciences, Mohamed Boudiaf University

Address: M'sila, Algeria

E-mail: rabah.bounar@univ-msila.dz

ANNEXES

Annexe 1

1. Variations moyennes mensuelles des précipitations, stations de Biskra et El Oued pour la période (1987-2022)

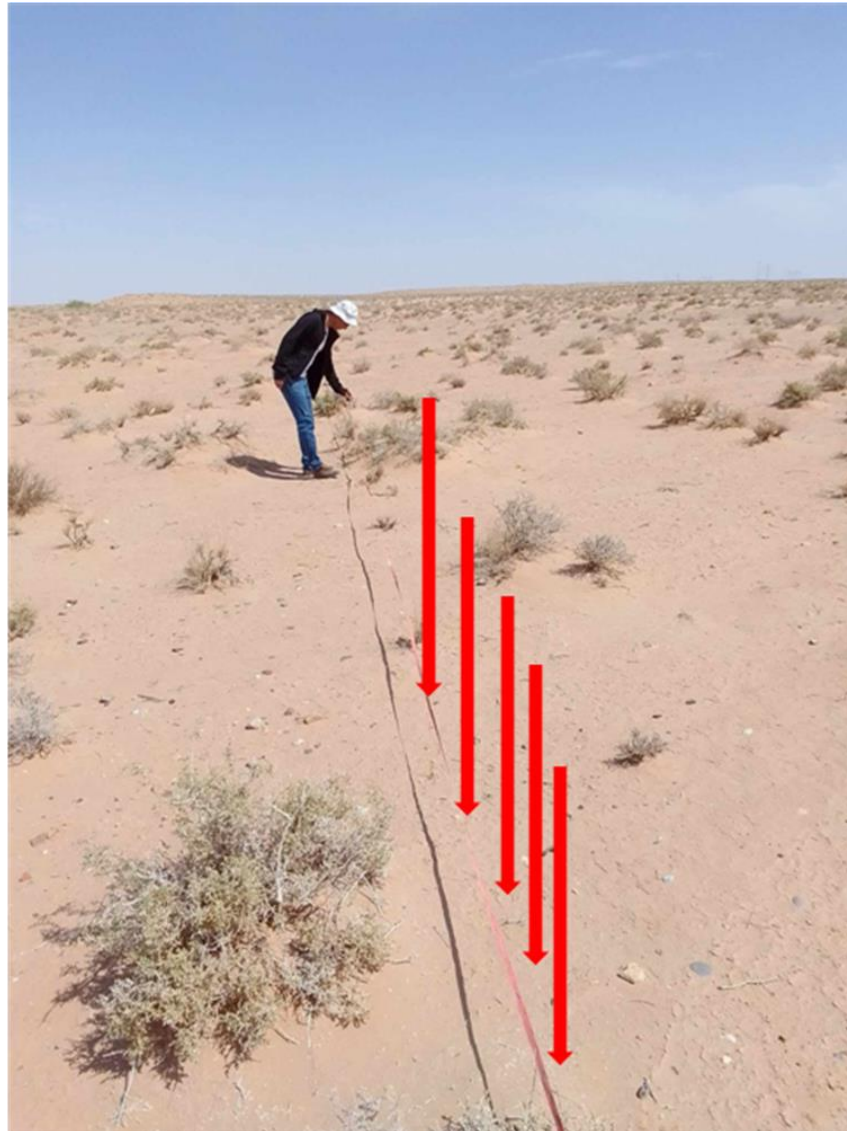
	Mois	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
Biskra	Précipitations	11,45	7,08	19,56	18,06	9,28	5,58	5,27	2,84	22,85	14,66	15,24	12,38
El Oued	Précipitations	10,40	3,88	6,27	9,49	3,18	3,38	0,52	1,69	10,13	4,60	20,27	5,18

2. Variations moyennes mensuelles des températures, stations de Biskra et El Oued pour la période (1987-2022)

	Mois	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
Biskra	températures	12,03	13,79	17,28	21,13	26,24	31,47	34,63	34,11	29,35	23,71	16,90	12,90
El Oued	températures	10,97	13,22	17,15	21,35	26,34	31,43	33,98	33,91	29,50	23,53	16,84	12,36

Annexe 2

La méthode du point-intercept. À chaque 20 cm (Flèches rouges), une lecture est réalisée à l'aide d'un ruban fin, soit en enregistrant l'identité de la plante, ou de la couverture du sol.



Annexe 3

1. Précipitation moyennes de la station de Biskra (1987-2022) exprimées en (mm)

Années	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
1987	12,96	21,09	12,45	1,01	6,61	1,02	1,02	0,25	0,51	11,43	11,43	11,17
1988	1,52	0,25	5,09	119,38	1,53	23,62	0,01	0,01	5,08	4,32	15,49	6,35
1989	3,05	6,35	1,02	10,92	0,01	21,84	0,01	0,01	19,56	1,02	5,84	3,30
1990	27,96	0,01	1,53	26,17	30,48	2,79	2,03	26,16	5,33	0,01	22,10	0,01
1991	2,03	14,99	47,24	2,28	5,08	1,02	0,01	2,54	16,00	32,51	4,06	10,68
1992	18,80	4,31	22,35	9,65	9,91	0,51	8,12	0,51	25,40	1,02	89,40	2,54
1993	0,01	43,43	29,21	0,01	7,11	0,01	0,01	0,01	56,14	0,01	17,53	143,77
1994	0,01	0,01	128,28	0,01	0,01	2,03	55,12	3,05	104,16	49,03	1,02	0,01
1995	4,06	2,03	7,62	4,06	0,01	2,54	0,01	1,27	227,33	4,06	16,25	17,02
1996	61,47	23,36	56,14	0,51	2,04	6,10	97,03	8,64	9,40	1,02	23,88	3,05
1997	15,24	5,08	9,15	71,63	0,01	7,87	0,01	0,51	7,38	13,21	43,95	18,03
1998	0,01	15,76	1,53	47,50	17,27	11,94	0,01	1,02	2,03	3,05	0,01	1,02
1999	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	12,19	41,40	35,31
2000	0,01	0,01	3,05	10,16	16,50	0,01	0,01	0,01	27,18	5,59	4,07	6,60
2001	34,54	0,25	0,01	0,01	0,76	0,01	0,01	8,89	3,04	0,50	17,27	15,24
2002	1,27	0,01	0,51	2,03	0,51	3,81	12,70	5,85	0,51	12,19	20,56	0,76
2003	68,33	1,53	57,15	4,58	3,30	2,03	0,01	0,01	6,10	47,24	1,27	12,95
2004	1,02	1,02	107,90	67,06	38,61	1,02	0,01	14,99	4,07	4,31	33,02	30,99
2005	0,01	18,04	6,86	0,01	0,01	24,89	3,05	2,03	3,06	0,51	0,01	14,73
2006	16,00	28,71	0,01	14,23	2,79	7,87	0,01	0,76	16,00	0,01	48,01	10,41
2007	0,01	2,03	10,92	12,95	1,27	0,51	0,01	0,01	36,06	3,30	0,01	2,03
2008	3,05	0,01	1,02	0,01	9,15	0,01	0,01	0,01	19,30	22,35	17,02	28,20
2009	38,10	7,12	13,20	8,89	15,20	0,01	3,56	0,01	32,00	0,01	0,25	15,24
2010	15,70	17,70	23,80	30,20	7,11	27,40	0,01	4,06	12,10	13,90	44,45	2,03
2011	6,35	0,01	38,10	38,60	54,60	1,01	3,05	0,01	29,20	79,00	2,79	2,03
2012	0,01	1,27	6,35	4,57	0,01	0,01	0,51	0,01	3,05	84,07	24,13	2,03
2013	64,77	2,03	18,28	24,89	1,02	20,07	0,01	11,19	7,11	40,14	0,01	14,99
2014	8,13	4,06	16,00	0,01	2,03	3,81	0,01	0,01	25,60	1,02	2,53	0,51
2015	1,26	17,50	27,90	0,01	2,03	1,27	0,01	2,03	18,20	35,30	4,06	0,01
2016	0,01	0,51	3,05	53,86	1,52	19,05	0,01	0,76	31,50	1,77	22,60	6,35
2017	3,05	0,01	4,31	13,45	0,51	3,04	1,02	0,01	9,14	10,16	0,01	4,57
2018	0,25	8,39	11,67	0,50	49,53	0,01	0,01	2,29	13,21	27,68	0,76	0,50
2019	1,52	0,25	9,14	32,52	16,51	0,01	0,76	4,31	20,06	0,51	8,38	2,28
2020	1,7	0	12,8	25,2	16,4	2,4	0,4	0	16	0	0,2	5
2021	0,2	0	2,2	10,4	14,8	1,4	0	1,2	7,1	4	5,2	2
2022	0	8	8,4	3,2	0	0	1,2	0	4,8	1,4	0	14,2

2. Précipitation mensuelles de la station d'El Oued (1987-2022) exprimées en (mm)

Années	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
1987	10,92	4,07	5,08	0,25	0,51	1,02	0,25	0	0	5,34	1,02	4,32
1988	1,02	2,03	7,36	89,92	1,02	25,66	0	0	0,76	5,33	22,11	11,8
1989	8,37	0,51	0	0	0	2,03	0	0,25	0	2,28	2,8	0
1990	68,08	0	2,03	10,16	42,16	0	1,02	9,15	1,02	1,02	15,5	12,95
1991	0,51	2,03	10,16	7,37	2,03	0,51	0	0	6,1	6,6	3,3	3,56
1992	13,72	1,02	19,06	24,9	0,25	0	3,05	0	0	0	9,91	3,81
1993	0	12,95	5,08	0	1,02	0	0	0	1,02	6,1	7,11	3,56
1994	1,02	0	13,21	3,56	1,02	0	0	1,02	39,62	11,68	0	0
1995	4,07	0	1,02	0	0	0	0	1,53	31,24	7,12	2,04	4,58
1996	41,92	19,31	25,9	0	3,5	0,25	1,02	5,08	9,66	0	0	1,02
1997	0	0	0	19,05	0	0	1,02	0,51	88,15	4,08	7,87	16
1998	2,03	7,12	1,53	5,08	0	77,97	0	0	8,13	41,92	2,03	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	232,15	0
2000	0	0,5	4,83	0	25,91	0	0	0	0	4,75	0	0
2001	23,26	0	6,1	0	1,02	0	0	0	1,01	0,76	0,76	25,41
2002	3,05	2,04	0	1,01	4,02	0	9,64	7,88	1,78	2,03	7,62	0
2003	20,07	9,9	1,02	20,32	4,06	0	0	0	11,17	20,07	5,84	17,02
2004	31,24	0	7,36	5,84	0,25	1,02	0	0	0	0	292,1	12,2
2005	0	2,03	1,53	0,51	0	6,1	0	1,02	19,05	0	0	5,08
2006	9,14	5,08	0	6,1	1,02	0,25	0	24,9	10,93	3,05	4,06	16
2007	0	0	5,59	24,14	0	0	0	2,03	4,06	3,05	0	18,04
2008	2,03	0	0	0	0	0	0	0	1,27	9,4	7,11	12,2
2009	105,91	0,76	39,62	7,11	7,12	0	0	0	32,1	1,02	0	0
2010	13,97	2,03	0	8,89	1,01	5,08	0	0	4,06	8,63	6,1	0,51
2011	0,51	2,04	9,14	9,39	3,05	0	2,03	0	0	4,75	0	0
2012	4,06	0	2,03	10,92	0	0	0	0	4,06	2,55	0	0
2013	3,05	0	4,06	4,07	0	0	0	1,27	0	0,51	11,17	8,4
2014	4,06	2,03	9,91	0	0	0,76	0	0	2,04	0	7,62	0,25
2015	0,51	40,64	4,57	0	0	0	0	3,05	1,02	0,25	0	0
2016	0	1,53	4,82	2,03	0	1,02	0	0	24,89	1,02	0,76	0,76
2017	0	0	10,67	41,15	0	0	0	0	28,19	7,62	39,12	0
2018	0	22,1	2,28	0	1,02	0	0	3,05	0	1,02	0,51	0
2019	0	0	11,17	31,21	9,66	0	0	0	10,93	3,05	8,38	1,02
2020	0,25	0	3,05	6,61	0	0	0,51	0	18,03	0	0,5	0
2021	0,76	0	2,03	0	3,56	0	0	0	3,05	0	18,03	0
2022	1,02	0	5,6	2,03	1,27	0	0,25	0	1,27	0,51	0	8,13

3. Températures moyennes de la station de Biskra (1987-2022)

Années	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
1987	10,3	13,6	16,1	21,9	24,7	31	34	34,8	31,1	24,9	16,6	15,1
1988	14	14,1	17	21,4	27,6	29,7	35,1	33,9	27,6	24,7	17,9	12,2
1989	11,7	13,7	18,8	20,1	25,5	28,1	33,1	34,4	29,3	23,1	17,8	15,7
1990	13,2	16,5	18	19,5	23,5	31,5	32,9	31,2	31,9	25,1	17,6	11
1991	11,2	12,8	17,7	18,8	22,5	30,4	34,2	33,8	29,1	22,6	16,1	11,8
1992	9,8	12,9	16,2	20	24,7	28,6	32	33,6	29,5	23,5	17,4	12,9
1993	11	12,5	15,5	20,5	26,5	32,5	34,2	34,1	28,7	24,1	16,8	12,6
1994	13,8	15	18,6	19,1	28,7	31,8	34,4	35,1	28,6	22	17,8	12,5
1995	11,3	15,9	16,3	19,2	26,4	30,6	34,2	32,7	27,6	22,8	16,8	13,5
1996	13,3	12,1	15,8	20,1	25,4	28,3	32,4	34,1	27	20,8	16,6	12,8
1997	12,9	15,5	16,7	19,3	26,3	33,1	34,8	33,3	28,3	23	16,5	13
1998	12,1	14	16	21,4	24,6	31,3	34,1	33,7	30,1	21,1	16,2	11,1
1999	11,7	12,2	16,8	21,8	29,1	33,8	34,1	36,2	30,3	25,3	15,8	11,5
2000	9,3	13,7	17,7	22,1	28,7	30,6	34,1	33,1	29	21,8	16,8	13
2001	11,6	13,3	21	21,1	26,3	32,5	35,9	34,1	29,9	26,5	17	11
2002	10,5	14,5	19	21,4	26,3	31,8	34,2	33,2	28,8	23,1	17,3	13,9
2003	11,8	11,9	16,3	21,4	26,9	32,4	36,4	34,4	28,9	24,3	17,3	11,9
2004	12,8	14,8	17,3	19,6	23	30,1	33,3	34,7	28,3	24,5	15,5	12,3
2005	10	10,7	17,8	21,8	27,9	31,7	35,9	33,6	28,5	24	16,7	10,8
2006	9,9	12	17,7	23,2	28,4	31,6	34,4	33,8	27,3	24,6	16,9	13
2007	12,2	15,5	16,4	20,3	26,6	34	33,6	34,2	29,1	24	10,9	12,6
2008	12,1	13,7	17,8	22,5	26,5	30,7	36,1	34,4	29,4	22,3	15,2	10,8
2009	11,9	12	15,9	18,5	26,2	32	35,8	34,7	27,1	22,9	16,8	13,1
2010	12,6	14,5	18,3	22	24,2	31	35,1	34,4	28,6	22,3	16,6	12,4
2011	12,1	13,1	15,8	22	24,8	29,7	34,8	34	30,3	22,2	17,3	13,2
2012	12	10,7	17,4	21,4	27,1	34,3	36,5	35,7	29,8	24,5	18,1	13
2013	14,6	12,7	18,3	22	26	29,3	34	32,1	29,8	26,2	17,5	12,7
2014	13,1	15,2	16,4	22,8	26,5	30	34,2	34,5	31,2	25,6	18,7	13,2
2015	11,6	12,6	16,2	22,5	27,5	30,9	33,7	34,2	29,5	23,6	18,1	12,9
2016	13,4	15,2	17,3	22,7	26,4	31,5	34,5	33,1	29,1	25,8	17,5	14,6
2017	11,3	15,7	19,1	21,7	28,3	32,1	35	34,3	28,3	22,8	16,4	12,5
2018	13,9	12,4	17,6	22	25,1	29,9	37,1	32	31,3	22,8	17	13,8
2019	12,1	13,3	16,9	20,9	24,4	33,9	35,5	35,1	29,9	24,7	15,9	15,4
2020	12,8	16,7	17,9	22,2	27,7	31,8	34,8	35,5	29	22,8	19,1	13,6
2021	13,3	16,5	17	22,2	27,2	35	36,1	36,7	32	23,7	16,8	13,2
2022	11,9	15,1	17,4	21,4	27,3	35,3	36	35,3	32,5	25,6	19,1	15,7

4. Températures moyennes de la station d'El Oued (1987-2022)

Années	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
1987	9,8	13,5	15,8	21,5	24,2	31	33,8	33,7	30,1	24,1	15,5	13,1
1988	12,3	13,1	16,5	21,7	28	29,9	34,4	33,4	27,1	24,2	16,6	10
1989	9,5	12,7	17,6	20,2	24,9	28,5	32,7	34,3	30,2	22,4	17,4	14,2
1990	12	15	16,9	19,9	22,9	31,9	32,7	31,3	32,3	24,8	16,8	10,3
1991	9,8	12,1	17,7	18,8	22	29,3	33,3	33,2	29,1	22,7	14,8	10
1992	9,1	12	15,6	19,7	24,2	28,9	31,4	33,5	29,7	23,4	16,4	11,5
1993	9,2	12	15,2	20,9	26,4	32,1	33,8	33,6	28,9	24,1	16,4	11,3
1994	12,1	14,1	17,6	18,9	28,6	31,6	34	34,6	29,5	22,7	27,2	11,1
1995	9,7	15,1	16,2	19,2	26,5	30,9	33,7	33,9	27,8	22,4	16,2	13,5
1996	13	12,4	16,3	20,4	25,4	28,7	32,4	34,6	27,3	20,4	16,4	13,2
1997	12,2	14,1	15,8	19	26	33,2	34,4	32,7	28,1	23,1	16,1	12,6
1998	11	13,6	16	21,7	25	31	33,8	33,6	30,1	20,6	15,2	10,4
1999	10,8	11,5	16,4	22	29,2	33,7	34	36,2	30,5	25,4	15,6	10,9
2000	8,3	12,5	17,8	22,9	28,7	30,3	33,6	33	29,5	21,9	16,9	13
2001	11,7	12,9	21,7	21,6	26,7	32,2	35,9	34,1	29,8	26,8	16,2	10,04
2002	9,9	13,8	18,6	22	25,7	31,6	34,4	33,4	29	22,8	17	31,1
2003	12	11,8	16,1	21,5	27,4	31,7	36,1	33,9	28,7	25,2	16,7	10,08
2004	11,1	14,4	17,2	20,9	23,7	30	33,2	34,7	28,2	25	14,8	11,9
2005	9,1	10,9	17,9	21,4	28	31,4	35,6	33,4	28,6	24	22,3	10,1
2006	9,1	12,3	18,6	23,6	28	31,5	34,3	33	26,8	24,4	16,3	12,3
2007	11,6	14,9	16,5	20,3	26,7	32,7	32,7	33,9	30,01	23,3	14,9	10,7
2008	11,3	13	17,6	22,8	27	30,2	36	34,1	30	23,2	15,3	10,6
2009	11,8	12,5	16,4	19,4	25,7	31,5	35,4	34,4	27,5	22	16,2	13,9
2010	12,8	15,7	18,9	22,6	24,9	31,8	22,6	34,6	28,8	22,6	16,7	12,4
2011	11,5	12,7	16,2	22,5	25,3	30,2	35	34	31,1	21,1	16,7	11,9
2012	10,4	10,1	16,9	21,7	26,7	33,8	36,3	35	29,6	24,6	18,5	11,2
2013	12	12,3	19,1	22,4	26,1	29,7	34,1	32,6	29,8	26,6	16,3	11,5
2014	12,2	14,8	16,6	22,9	26,9	30,4	33,8	34,6	31,7	24,7	18,7	11,8
2015	10,4	11,6	16,2	22,2	28	31	33,7	34,1	29,7	24	16,6	11,1
2016	12,7	14,6	16,9	23,3	27,6	32,1	34	33	29,9	25,4	16,9	13,5
2017	9,7	14,9	18,2	21,2	28,2	32	34,4	33,9	28,1	22,3	15,5	10,9
2018	12,7	12,4	18,8	22,6	26	31,1	37,5	32,2	30,6	22,8	16,4	12
2019	10,4	12,5	16,9	21,5	24,9	34,2	35,7	35,1	30,8	24	15,7	13,9
2020	11,11	15	17,3	22,5	28,5	32,1	34	34,9	28,8	22	17,7	12,9
2021	12,8	15,5	16,5	22,2	27,3	34,3	35,5	36,2	32,1	23,2	15,8	11,2
2022	9,9	13,6	17	20,8	27	34,9	35,1	34,1	32,2	24,8	17,6	14,7

Annexe 4

Liste des espèces rencontrées dans la région d'étude

Espèces	familles	Formes de vie	types morphologiques
<i>Anabasis articulata</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Argyrobium uniflorum</i>	Fabaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Aristida acutiflora</i>	Poaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Aristida pungens</i>	Poaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Astragalus armatus</i>	Fabaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Astragalus crenatus</i>	Fabaceae	Perennial	Therophyte
<i>Astragalus gombiformis</i>	Fabaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Astragalus mareoticus</i>	Fabaceae	Annual	Therophyte
<i>Atractylis flava</i>	Asteraceae	Perennial	Therophyte
<i>Atractylis serratuloides</i>	Asteraceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Atriplex halimus</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Citrullus colocynthis</i>	Cucurbitaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Ecballium elaterium</i>	Cucurbitaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Cornulaca monacantha</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Cotula cineræ</i>	Asteraceae	Perennial	Therophyte
<i>Diploaxis harra</i>	Brassicaceae	Annual	Therophyte
<i>Ephedra alata</i>	Ephedraceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Fagonia glutinosa</i>	Zygophyllaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Ferula vesceritensis</i>	Apiaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Genista saharae</i>	Fabaceae	Perennial	phanerophyte
<i>Gymnocarpos decander</i>	Caryophyllaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>haloxylon articulatum</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Haplophyllum tuberculatum</i>	Rutaceae	Perennial	hemicryptophyte
<i>Helianthemum lippii</i>	Cistaceae	Perennial	Therophyte
<i>Heliotropium bacciferum</i>	Boraginaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Herniaria fontanesii</i>	Caryophyllaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Launaea resedifolia</i>	Asteraceae	Annual	Therophyte
<i>Limoniastrum guyonianum</i>	Plombaginaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Lotus halophylus</i>	Fabaceae	Annual	Therophyte
<i>Malcolmia aegyptiaca</i>	Brassicaceae	Perennial	Therophyte
<i>Mathiola livida</i>	Brassicaceae	Annual	hemicryptophyte
<i>Peganum harmala</i>	Zygophyllaceae	Perennial	Therophyte
<i>Pergularia tomentosa</i>	Asclepiadaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Polycarpaea repens</i>	Caryophyllaceae	Perennial	Therophyte
<i>Retama retam</i>	Fabaceae	Perennial	phanerophyte
<i>Rhanterium suaveolens</i>	Asteraceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Salsola foetida</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Salsola tetragona</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Salsola vermiculata</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Suaeda mollis</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Suaeda fruticosa</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Tamarix gallica</i>	Tamaricaceae	Perennial	phanerophyte
<i>Traganum nudatum</i>	Chenopodiaceae	Perennial	Chamaephyte
<i>Zygophyllum album</i>	Zygophyllaceae	Perennial	Chamaephyte