

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques

Département écologie et environnement



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Ecologie et environnement

Spécialité : Biodiversité et écologie végétale

Thème :

Évaluation des méthodes de mesure de la
Lumière sous un peuplement de chêne dans
l'Akfadou.

Présenté par : M. BAZI Iddir et M^{elle}. MERZOUD Thanina

Soutenu le : 22/09/2024

Jury :

Président : Mr RAHMANI Abdelmalik M.A.A Université de Tizi-Ouzou UMMTO

Promotrice : M^{me} AKLI Amel M.C.B. Université de Tizi-Ouzou UMMTO

Co-promoteur : Mr RABHI Khellaf Prof. Université de Tizi-Ouzou UMMTO

Examineur : Mr OUDJIANE Ahmed M.C.B Université de Tizi-Ouzou UMMTO

Année universitaire : 2023-2024

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **Madame AKLI Amel** et **Monsieur RABEHI Khellaf**.

Un immense merci aux membres du jury, **Mr Rahmani Abdelmalik** et **Mr Oudjiane Ahmed**.

Je tiens à remercier chaleureusement **Monsieur ASMANI**.

Je tiens à faire une pensée à feu **Monsieur Mahand OUSSALAH MESSAOUDENE**.

En quatrième lieu, mes remerciements vont à nos chers parents et à toute ma famille, spécialement à **Taous, Mohand, Dihia, Anaëlle** et **Lounes**.

Enfin, ces remerciements ne peuvent être complets sans une grande pensée à machère fiancée **Fazia**.

Pour finir, je tiens à remercier tous mes amis : **Belaid, Amar, Oulhadj, Lounes, Samir, Sofiane, Mahdi, Saïd** et **Ghilas**.

Bazi.

Tout d'abord, je remercie **Dieu** le tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces années d'études. Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de différentes façons à la réussite de ce mémoire et plus particulièrement les personnes que je cite ci-dessous : **Madame AKLI Amel**, ma promotrice, ainsi que **Monsieur RABEHI Khellaf**, mon co-promoteur; qui m'a formé, conseillé et a répondu régulièrement à tous mes besoins durant ma formation à l'université, et qui a bien voulu accepter de superviser ce modeste travail, par leurs orientations, conseils et encouragements pendant toute la durée de ce travail. Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe administrative et pédagogique du Département Écologie Et Environnement.

A Mes chers parents ; à toute ma famille ; à tous ceux qui me sont chers ; à tous mes amis.

Merzoud.

DEDICACE

À tous ceux qui ont été une source d'inspiration, de soutien et de force tout au long de ce parcours, je souhaite dédier humblement ce mémoire.

En premier lieu, je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers **Madame AKLI Amel**, notre promotrice, ainsi que **Monsieur RABHI Khellaf**, notre co-promoteur, pour leur soutien indéfectible, leurs conseils précieux et leur accompagnement tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Leur expertise et leur disponibilité ont été d'une aide inestimable dans la réalisation de ce projet de recherche.

En deuxième lieu, je tiens à adresser mes chaleureux remerciements à **Monsieur ASMANI**, enseignant à l'Université de l'UMMTO en filière science forestière, pour son accompagnement continu tout au long de mon cursus universitaire. Ses conseils éclairés et son soutien ont été d'une importance capitale pour mon développement académique.

En troisième lieu, je souhaite rendre hommage à feu **Monsieur Mahand OUSSALAH MESSAOUDENE**, un professeur regretté de notre faculté. Que son âme repose en paix. C'est grâce à lui que nous avons pu réaliser notre travail dans la station INRF, c'est grâce à lui qu'elle existe.

En quatrième lieu, mes remerciements vont à nos chers parents et à toute ma famille qui ont été présents à mes côtés tout au long de mon parcours. Un merci spécial à ma sœur **Taoues**, mon grand frère **Mohand** et sa femme **Dyhia** bien ma petite ange **Anaëlle**, et mon petit frère **Lounes**. Vous êtes la meilleure famille au monde et votre soutien inconditionnel a été ma source de force et d'inspiration.

Enfin, ces remerciements ne sauraient être complets sans une pensée sincère pour ma chère fiancée **Fazia**. Elle a été à mes côtés non seulement dans ce projet, mais elle me soutient toujours, où que je sois.

Pour conclure, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous mes amis sans exception : **Belaid, Amar, Oulhadj, Lounes, Samir, Sofiane, Mahdi, Saïd** et **Ghilas**. Votre amitié et votre soutien ont rendu ce parcours plus enrichissant et agréable.

À vous tous, je souhaite transmettre ma plus profonde gratitude et mes pensées les plus sincères. Ce mémoire est le fruit de notre collaboration, de nos échanges et de notre engagement mutuel. Merci infiniment pour tout.

BAZI

DEDICACE

A mes chers parents ; qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérances. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour. A ma chère maman ; Je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon mieux, ton soutien m'a permis de réaliser le rêve tant attendu..... Je vous dédie ce travail en témoignage de mon grand respect et mon estime envers vous... Pour vos conseils et votre soutien moral J'implore dieu qu'il vous apporte bonheur et santé A mes chers frères. A tous les instituteurs et les professeurs qui m'ont encadré de l'école primaire, jusqu'à maintenant, et qui ont peiné à m'inculquer le savoir. A mes meilleures amies, cousins et cousines.

A mes chers parents ; à toute ma famille ; à tous ceux qui me sont chers ; à tous mes amis.

A la mémoire de mon cher papa (Akyarhemrebi ; Inchlh el Djenneth)

Merzoud.

Liste des figures

Figure 1.1 : Arbre de chêne zéen *Q. canariensis* (photo Bazi. I. Et Merzoud. T. prise à la station Col AKfadou 2024).

Figure 2.1 : Aire de répartition naturelle de *Q. canariensis* dans le monde (Quézel et Médail. 2003) (Akli. A., 2022).

Figure 3.1 : Arbre de chêne Aferese *Q. afares* (photo. Bazi. I. Et Merzoud. T. prise à la station de Col Akfadou 2024).

Figure 4.1 : Distribution géographique de chêne Aferese *Q. afares* (Quézel et Bonin, 1980) (AKLI. A., 2022).

Figure 5.1 : Chaines et massifs montagneux de la kabylie modifiée. (Massif de l'Akfadou)(Source : Microsoft expedia maps, 1997) (AKLI.A. 2022).

Figure 6.1 : Projection des positions météorologiques détenues dans le cliogramme d'Emberger modifié (Akli.A., 2022).

Figure. 7.1 : Diagramme Ombrothermique des postes météorologiques retenus (Akli. A., 2022).

Figure 8.2 : Décomposition du rayonnement sur le couvert forestier (Ruchaud et *al.*, 2000), (Khellaf Rabhi 2015).

Figure 9.2 : A- photo d'un luxmètre.

B- Photo d'un dataloggers .

C- Photo d'une capture de lumière.

Figure 10.2 : Pièges à feuilles fixes dans des couverts décidus.

Figure 11.2 : Mesure d'indice foliaire à l'aide de l'analyseur de couvert LAI-2000 (LiCor, Nebraska, USA). Photo F. Bréda.

Figure 13.4 : FoxPoi 360° Photo Sphere Cam une application innovante conçue pour capturer des images sphériques à 360 degrés.

Figure 14.4 : Image hémisphérique (prise par Bazi.I et Merzoud. T avec FoxPoi 360° Photo Sphere 2024)

Figure 15.4 : Enroulement le mètre ruban (photo prise par Bazi.I et Merzoud. T station1).

Figure 16.4 : Enroulement le mètre ruban (photo prise par Bazi.I et Merzoud. T station 2).

Figure 17.5 : image hemispherique de la station 1 et station 2.

Figure 18.5 : Création du masque noir et la photo hémisphérique St_masked station 1 et station 2.

Figure 19.5 : Création du masque noir et la photo hémisphérique St_masked station 2.

Figure 20.5 : Binarisation en noir et blanc de la station 1 station 2.

Figure 21.5 : Niveau de gris avec la fonction `'import_fisheye'` de la station 1.

Figure 22.5 : Niveau de gris avec la fonction `'import_fisheye'` de la station 2.

Figure 23.5: Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec 1 fonction `'gapfrac_fisheye'` de la station 1.

Figure 24.5: Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec 1 fonction `'gapfrac_fisheye'` de la station 2.

Liste des tableaux

Tabl. 1.1 : Données réduites relatives aux moyennes mensuelles (mois secs et mois humides), aux pluviométries annuelles et extrêmes et au régime saisonnier (extraites du tableau 13, Meddour, 2010 et Laribi, 2016) (Akli, 2022).

Tabl. 2.1 : Données réduites relatives aux moyennes mensuelles (mois secs et mois humides), aux pluviométries annuelles et extrêmes et au régime saisonnier (extraites du tableau Laribi ; 2016) (Akli, 2022).

Tabl. 3.1 : Les températures moyennes mensuelles minimales et maximales des stations voisines sont maintenues (Akli. A., 2022).

Tabl. 4.1 : Valeurs mensuelles de l'indice de sécheresse De Martonne des stations stockées (Akli. A., 2022)

Tabl 5.4 : Les Paramètres mesurés dans les stations inventoriées.

Tabl. 6.4 : Attributs des images (sans masque et avec masque) pour les deux stations.

Tabl. 7.4 : diamètres des arbres de chêne zéen et chêne aferese ST1 et ST2.

Tabl. 8.4 : Tableau comparatif des métadonnées des deux stations (Station 1 et Station 2).

Tabl. 9.5 : Dimensions et Taille des Fichiers.

Tabl. 10.5 : Espaces Colorimétrique et Densité.

Tabl. 11.5 : Analyse des Données Hémisphériques.

Tabl. 12.4 : Tableau comparatif des attributs de la canopée entre les deux stations.

Liste des abréviations

a : Paramètre de position de la distribution de Weibull.

Alt : Altitude.

CV : Coefficient de variation.

D: Diamètre.

DBH : Diameter at breast height.

DIFN : Diffusion Index.

e : Excentricité du houppier.

Exp : Exposition.

G : Surface terrière.

Gdif : rayonnement diffus.

Gdir et gdir : présentent le rayonnement global traversant les espaces de la canopée.

H : Hauteur totale.

ISE : L'indice de sécheresse d'Emberger.

L : longueur de la distance parcourue dans la zone de couverture.

Le : l'exposition lumineuse.

Lx : l'exposition lumineuse corrigée

LAD : densité de surface foliaire.

M : La température moyenne maximale du mois le plus chaud.

m : La température moyenne minimale du mois le plus froid.

M : Valeur maximale

m : Valeur minimale.

N : Effectif de l'échantillon.

P : Le module de précipitation annuelle.

P(%) : Pente en pourcentage.

p. : l'angle d'azimut de la direction.

Par : photosynthetically active radiation.

PPFD: photosynthetic photon flux density.

PAI : Indice de surface totale.

PAD : Dnsité de surface totale.

Q2 : Le quotient pluviométrique de Stewart.

R : Rayon moyen de projection du houppier.

T : La température moyenne annuelle.

WAI : Indice de surface boisée.

WAD : densité de surface boisée.

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Revue bibliographique-généralités sur les chênes

I- Biologie des chênes	4
I-1- Écologie des chênes	4
I-1-1- Le chêne zéen	4
a-Taxonomie	4
b-Caractéristiques botaniques	5
c-Répartition géographique	6
d-Exigences écologiques	7
I-1-2-Le chêne afares	7
a-Taxonomie	7
b-Caractéristiques botaniques	8
c-Répartition géographique	9
d-Exigences écologiques	10
II-I-4- Présentation de la forêt d' Akfadou	10
II-I-5- Localisation de la Forêt d' Akfadou	11
II-I -6-Pédologie	11
II-I -7- Description du climat et du bioclimat	12
II-I -8- Les précipitations	13
II-I -9- Précipitations moyennes annuelles	13
II-I -10- Températures	14
I-11- Végétation	17

Chapitre II: Revue bibliographique-généralités sur La lumière

Introduction.....	18
II-1- Rayonnement solaire et couverture végétale	18
II-2- L'importance de la lumière	19
II-3- Estimation et mesure de l'éclairement sous le couvert forestier	20
II-4- Les Méthodes	21

II -4-1- Méthodes directes PPF	21
II -4-2- Méthodes indirectes	22
II-5- Historique et l'évolution	23
II- 5-1-Historique	23
a-Photométrie traditionnelle	23
b- Invention des photomètres	23
c- Développement des capteurs de lumière	23
d- Introduction de l'imagerie	23
e- Évolution des data loggers et des modèles informatiques	23
II- 5-2-l'évolution	24
a-Photométrie traditionnelle	24
b- Invention des photomètres	24
c- Émergence des capteurs de lumière	25
d- Avènement de l'imagerie	25
e-Technologies modernes et analyse avancée	25
f-Vers l'avenir	25
II-6- Modèles de transfert radiatif et de couverture forestière	25
II-7-1- La canopée	26
II-7-2- Explication de chaque attribut de la canopée générée par une image hémisphérique	27
a- L'indice foliaire	27
b. Le ramassage de litières en pièges à feuille fixes dans des couverts décidus	27
c-Collecte de litières	28
d- Mesure de la surface d'une feuille	28
e-L'utilisation d'analyseurs de couvert	28
f--Indice d'Ouverture	28
g-Indice d'Agglutination	29
h- DIFN	29

Chapitre 3 : Revue bibliographique-généralités sur le cryptage R

Introduction R	30
III -1-Installer R	30
a-Mots récurrents	30
b-Formulation générale	31
c- Installer le package	31
d-Charger le package dans R	31
III-2- Forces de R	31
III-3- Limites de R	31
III-4- Script	32
III-5- Package	32
III-6-Méthodologie	32
a- Package 'imageur'	33
b- Package 'exifr'	33
c- Package 'hémisphère'	33
III-7- Les fonctions R utilisées pour étudier l'ouverture de la canopée et l'accès à la lumière	34

Chapitre IV: Matériels et méthodes

IV-1- Méthodologie d'étude	35
IV-1-2- Population et Échantillonnage	36
IV-1-3- Description des stations inventoriées	36
a- Station 1	36
b- Station 2	36
c- Sous-bois	37
d- Paramètres mesurés dans les stations inventorié	37
IV-2- Mesure de la Circonférence des Arbres	38
IV-2-1- Régénération du Chêne dans les Deux Stations	39
IV-2-2- Matériel et Méthode de Décompte	39
IV-3-1- Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée	39

a- Images hémisphérique	39
b- Traitement des Images Sphériques	42
c- Préparation des Métadonnées avec le Logiciel R	42
d- Conversion en Image Hémisphérique	43
e- Redimensionnement et Projection sur les Coordonnées Polaires	43
f- Création du Masque Noir et de la Photo Hémisphérique	43
g- Binarisation en Noir et Blanc	43
h- Calcul des Fractions d'Écart	44
i- Calcul des Attributs de la Canopée	46
IV-3-2- Analyse des données	47

Chapitre 5 : Résultats et discussions

V-1- Mesure des Arbres de Chêne Zéen à Station 1 et station 2	48
V-1-1- Comparaison des Diamètres entre Stations	49
V-1-2- Implications Écologique	49
V-2- Résultats de la Régénération	49
V-2-2- Fiabilité du décompte Manuel	50
V-3- Les étapes de traitement des images sphériques –panoramiques (prapation à l'analyse).....	51
V-3-1- Comparaison Détaillée des Métadonnées entre les Stations 1 et 2	51
a- Source File	53
b- Taille du Fichier	53
c- Dates de Modification et d'Accès des Fichiers	54
d- Date de Création des Fichiers.....	54
e- Modèle et Marque de l'Appareil Photo	54
f- Coordonnées GPS	54
g- Dimensions de l'Image.....	54
V-4- Comparaison des Attributs d'Image	55
V-4-1- Dimensions et Taille des Fichiers	55
V-4-2- Espace Colorimétrique et Densité.....	55

V-4-3- Analyse des Données Hémisphériques	56
V-5-1- Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée	57
V-5-2- Niveau de Gris avec la fonction ‘import_fisheye’	60
V-5-3- Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction ‘gapfrac_fisheye’	61
Conclusion	66
Perspectives	67
Bibliographie	68
Résumé	

Introduction Générale

Introduction

L'originalité taxonomique du bassin Méditerranéen est très forte (Médail et Quézel, 1999), certains genres ou familles ont connu une histoire intense de diversification et de spéciation dans la région (Thompson, 1999) (Akli, 2022). Le genre *Quercus* est typique d'une telle situation. Les chênes sont des Angiospermes appartenant à la famille des *Fagaceae*. Cette famille se divise en sept genres (Manos *et al.*, 2001 in Akli, 2022). Le genre *Quercus* regroupe plusieurs centaines d'espèces. Selon les auteurs, plusieurs classifications ont été proposées sur la base d'études morphologiques puis moléculaires, mais elles font toujours débat sur le nombre et la notion d'espèce dans ce genre en raison de la présence de formes intermédiaires et d'hybrides (Garant, 1981; Nixon, 1993; Tutin *et al.*, 1993; Manos *et al.*, 1999). La mesure de la lumière sous le couvert végétal des écosystèmes forestiers est une démarche cruciale pour comprendre la dynamique de ces environnements, influençant la croissance, la régénération et la biodiversité des espèces végétales. (Dubois, A. 2019) Dupont, J., & Martin, P. (2020). Au fil du temps, cette mesure a connu une évolution marquée, passant de méthodes rudimentaires à des approches plus sophistiquées, notamment l'utilisation de l'imagerie hémisphérique, qui offre une représentation visuelle précise de la lumière traversant la canopée. Dans ce contexte, nous explorons l'évolution des méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal, en mettant un accent particulier sur leur application dans les écosystèmes forestiers d'Algérie, où les chênes zéen et afares prédominent.

Les chênaies méditerranéennes se caractérisent par la présence de chênes zéen et les chênes afares jouent un rôle écologique majeur dans les écosystèmes forestiers algériens, influençant la structure et la composition de la canopée, la régénération des espèces végétales et la diversité biologique. Comprendre la lumière sous leur couvert végétal est donc essentiel pour une gestion durable des forêts et la conservation de la biodiversité en Algérie.

Nous examinerons les différentes méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal, en mettant en exergue leur évolution au fil du temps et leur application dans le contexte spécifique des écosystèmes forestiers algériens. Nous aborderons également les avantages et les limites de chaque approche, ainsi que les références bibliographiques qui ont guidé notre recherche et soutiennent notre compréhension du sujet.

Les méthodes traditionnelles de mesure de la lumière comprennent l'utilisation de capteurs de lumière, les relevés visuels et les techniques d'échantillonnage direct. Bien que ces approches aient été largement utilisées dans le passé, elles présentent des limites en termes de résolution spatiale, de précision et de représentativité des données.

Les techniques modernes de mesure de la lumière incluent l'utilisation de la télédétection par satellite, la modélisation numérique et l'imagerie hémisphérique. Parmi celles-ci, l'imagerie hémisphérique se distingue par sa capacité à fournir une représentation visuelle détaillée de la lumière sous le couvert végétal, permettant une analyse approfondie de la distribution spatiale de la lumière à différentes hauteurs de la canopée (Tremblay, M., & Beaulieu, S. 2018).

En s'appuyant sur ces différentes méthodes et en mettant l'accent sur l'imagerie hémisphérique, nous cherchons à obtenir une compréhension approfondie de la lumière dans les écosystèmes forestiers. Cette approche méthodologique nous permettra de générer des données précises et reproductibles, contribuant ainsi à une meilleure gestion des forêts et à la conservation de la biodiversité en Algérie.

Sur quelques peuplements de chêne zéen, des images sphériques et hémisphériques ont été prises. Par la suite ces images brutes ont été traitées avec le logiciel R pour aboutir à des objets hémisphériques qui permettent le calcul de quelques attributs de la canopée.

Le mémoire est divisé en 4 chapitres :

-Chapitre I : aborde les généralités sur les chênes, en fournissant un aperçu des caractéristiques écologiques et biologiques de cette espèce, ainsi qu'une présentation détaillée de la zone d'étude.

-Chapitre II : consacré aux généralités sur la lumière, en explorant ses propriétés fondamentales, son rôle dans les écosystèmes, et son importance dans les processus biologiques sous le couvert végétal.

-Chapitre III : traite des généralités sur le logiciel R, en présentant ses principales fonctionnalités, son utilisation dans l'analyse de données statistiques, et son importance croissante dans divers domaines scientifiques.

-Chapitre IV : Dans cette section, nous décrivons les matériaux et les méthodes utilisés pour le traitement des images sphériques pour l'analyse de la canopée forestière.

-Chapitre V : porte principalement sur la comparaison de la croissance des chênes zéen et afares dans deux stations distinctes. Il révèle des différences significatives dans les diamètres des arbres, la régénération, et la canopée entre les stations.

Revue bibliographique

Chapitre I:

Généralités sur les chênes

Et la présentation de la zone d'étude

I-Biologie des chênes:

Les Fagacées sont des angiospermes dicotylédones. Les espèces du genre *Quercus* sont diploïdes et leur durée de vie varie de quelques décennies à un millénaire. Ce sont des plantes ligneuses appartenant au groupe des arbres et arbustes, allant de 15 cm à environ 40 mètres de haut, avec des feuilles simples. Leurs fleurs sont monoïques, regroupées en grappes, et leurs fruits sont en forme de gousse. La pollinisation est dioïque, bien que les espèces de ce genre soient monoïques, et elles peuvent se reproduire végétativement à travers les bourgeons et les pousses basales. La transmission se fait par les glands, qui peuvent être transportés sur de longues distances par les geais ou sur de courtes distances par les rongeurs (Akli, 2022). La floraison a lieu au printemps pour les espèces tempérées et pendant la saison sèche pour les espèces tropicales. La floraison et la fructification dépendent de l'année, de l'individu et de la population, entraînant souvent de grandes fluctuations dans la production de graines. Les chênes sont connus pour leur capacité à s'hybrider fréquemment, ce qui peut jouer un rôle important dans l'adaptation locale. Les forêts de chênes forment des écosystèmes très diversifiés avec de nombreuses espèces animales. Ces caractéristiques leur confèrent une importance économique pour le bois, la chasse et l'alimentation, ainsi qu'une importance écologique et sociale (Akli, 2022).

I-1-Écologie des chênes Zéen et chênes Afares:

I-1-1-Le chêne Zéen : *Quercus canariensis*

a-Taxonomie

Le chêne zéen est une espèce semi-décidue de la section Mesobalanus. Il est appelé *Quercus canariensis* Willd. (Nom scientifique; Zen (nom Berbère); chêne zéen (nom Français); le nom scientifique de cette espèce a changé à plusieurs reprises: c'est appelé successivement: *Quercus lusitanici*.Lam, *Quercus mirbekii*.Lam, *Quecus faginea*.Lam et enfin *Quercus canariensis* Willd (Hasnaoui, 1992). Les botanistes ne sont toujours pas d'accord à propos de sa position systématique à cause de son polymorphisme foliaire et sa répartition géographique (Hasnaoui, 1992; Zine el Abdine, 1995 in Akli,2022).



Figure 1.1 : Arbre de chêne zéen *Q.canariensis* (Photo Bazi et Merzoud , 2024 . prise à la station 1 « canton lazela » la forêt domaniale l'AKFADOU- ouest).

b-Caractéristiques botaniques:

C'est un arbre de grande taille atteignant 30 à 40 mètres de hauteur et 3 mètres et plus de circonférence. La tige est généralement unique et rectiligne. Sa croissance en hauteur est rapide, et son enracinement est très puissant (Boudy, 1952). Sa longévité est élevée et peut dépasser 200 ans (Boudy, 1950 et 1952). Le tronc de l'arbre est couvert d'un rhytidome brun crevassé, la couronne est en dôme puis étalée, et les branches sont robustes et bien étalées.

Le chêne zéen est une espèce monoïque à feuilles caduques marcescentes, c'est-à-dire pouvant persister jusqu'au printemps suivant. La feuille est grande, de 5 à 20 cm de longueur, de forme ovale. Au stade jeune, les feuilles sont tomenteuses sur les deux faces, tandis qu'à l'état adulte, elles sont vertes brillantes au-dessus et grisâtres au-dessous (Boudy, 1952). Les fleurs mâles sont groupées en chatons, alors que les fleurs femelles sont sessiles, solitaires ou réunies par 2 à 5. La floraison se produit en avril ou en mai. Les fruits du chêne-zéen sont des glands agglomérés et presque sessiles, qui deviennent mûrs à la fin d'octobre. Il fructifie régulièrement chaque année dès l'âge de 15 ans, mais

c'est à partir de 30 ans que sa fructification est abondante. Les cupules sont courtes et présentent des écailles pures et saillantes. (in Akli, 2022).

c- Répartition géographique:

Il appartient à l'ensemble Ibéro-maghrébin qui est l'un des trois ensembles géographiques regroupant les chênes à feuilles caduques méditerranéens. Son aire est très limitée: on ne le rencontre ni en France ni en Italie. Il tient une place importante en Espagne et au Portugal et surtout au Maghreb (Fig.1.1). En Afrique du Nord, il occupe 104000 ha (Boudy, 1950). En Algérie, on le trouve dans des peuplements dispersés ou mélangés avec le chêne-liège. En Algérie, le chêne zéen couvrait 66 000 ha en 1950 (Boudy, 1955) et 65 000 ha en 1990 (Messaoudene, 1996). La majeure partie de ses peuplements est localisée dans l'est du pays, par contre, il est moins répandu dans l'ouest; en particulier dans les monts de Tlemcen, il apparaît à l'état disséminé dans différentes formations dégradées de l'étage subhumide. (Latreuche Belaroussi N., 1991). Le chêne zéen serait représenté par deux sous-espèces, selon Quézel et Santa (1962), nettement différentes: *Quercus faginea* subsp. *baetica*, et *Quercus faginea tlemcenensis* sub sp. (Akli, 2022).

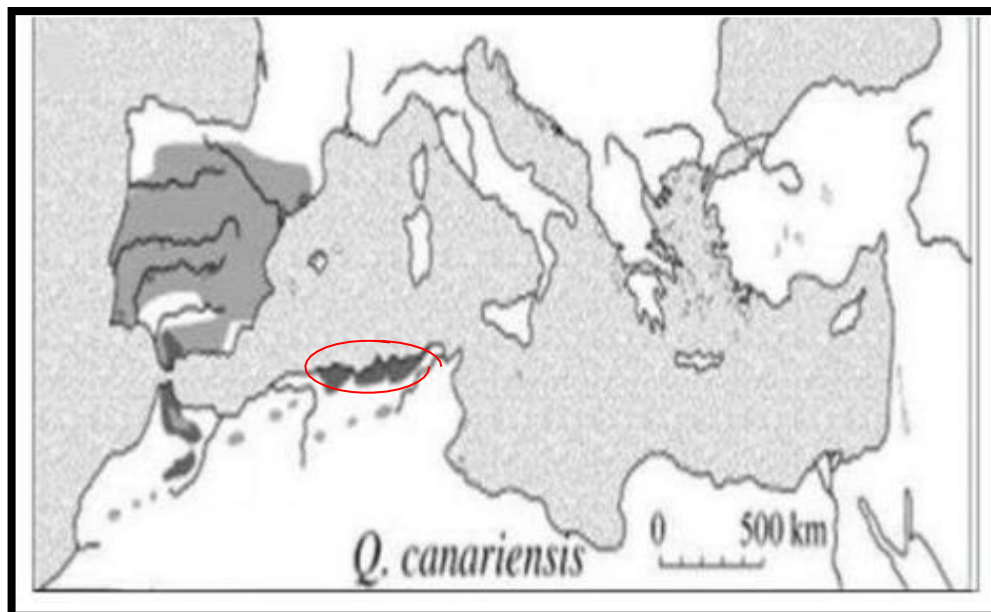


Figure 2.1: Aire de répartition naturelle de *Q. canariensis* dans le monde (Quézel et Médail, 2003 modifiée par Akli, 2022).

d- Exigences écologiques:

Le Chêne zéen est une espèce typique de l'étage humide, rarement subhumide. Son altitude préférentielle se situe généralement entre 1000 et 1600 mètres, avec un minimum descendant jusqu'à environ 700 à 800 mètres et parfois jusqu'à 400 mètres dans les peuplements purs exposés au nord-ouest. Cette espèce arbore une exigence climatique notable, ce qui a considérablement restreint son aire de répartition. Elle nécessite des Précipitations comprises entre 800 et 1000 mm et peut supporter des températures hivernales descendant jusqu'à -10°C. Toutefois, elle montre une indifférence quant à la constitution physique du sol, bien qu'elle préfère les sols frais, profonds, et peu filtrants, ce qui la rend plus commune dans les régions de grès numidiens (Ksontini, 1996).

Le Chêne zéen prospère principalement en moyenne montagne, bien qu'il puisse rarement être trouvé en plaine, surtout dans des conditions climatiques exceptionnelles. En Tunisie, il est généralement présent dans les régions à proximité de la côte (Boudy,1952). Ses habitats typiques sont des zones où les températures hivernales sont modérées, avec des moyennes des minima du mois le plus froid entre 3 et 4,5°C . Comparé au Chêne liège, le Chêne zéen est plus exigeant en humidité et se développe davantage dans des zones recevant plus de 1500 mm de précipitations par an (Bentiba et *al.*,1982). Bien que sa régénération soit généralement assurée par des semis et des rejets de souche, elle peut souvent échouer à un stade précoce en Raison de contraintes climatiques telles que la sécheresse et la chaleur estivales, ainsi que des activités humaines (Hasnaoui, 1992 in Akli,2022).

I-1-2-Le chêne afares : *Quercus afares Pomel*

a- Taxonomie:

Le Chêne afarès, également connu sous son nom scientifique *Quercus afares*, est appelé Zen Magloub en arabe et Chêne Afares en français. Il a été classé dans la section Cerris du sous-genre *Quercus* en raison de sa ressemblance morphologique avec deux autres espèces de cette section : le *Quercus cerris* (présent dans Le Sud de l'Europe) et le *Quercus castaneifolia* (originaire du Caucase et d'Iran) (Boudy,1959;Maire, 1961). Selon la proposition de la nomenclature de Vázquez & Márquez, 2018, le nom scientifique attribué à cette espèce est *Quercus afares* Pomel, *Nouv. Mat. Fl. Atl.*:391.1875. Il existe plusieurs synonymes pour cette espèce, notamment *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. var.

incana Batt. & Trabut, *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. var. *virescens* Batt. & Trabut, *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. var. *algeriensis* Bean, *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. subsp. *afares* (Pomel) Maire, *Quercus cerridolepis* O.Schwarz, *Quercus afares* Pomel f. *spinosa* H.Villar, *Quercus cerrifolia* H.Villar, *Quercus afares* Pomel f. *normalis* Maire & Weiller, *Quercus afares* Pomel var. *cerrifolia* (H.Villar) Maire & Weiller, et *Quercus castaneifolia* auct. Pl. non C.A.Meyer (Vázquez & F. Márquez, 2018).

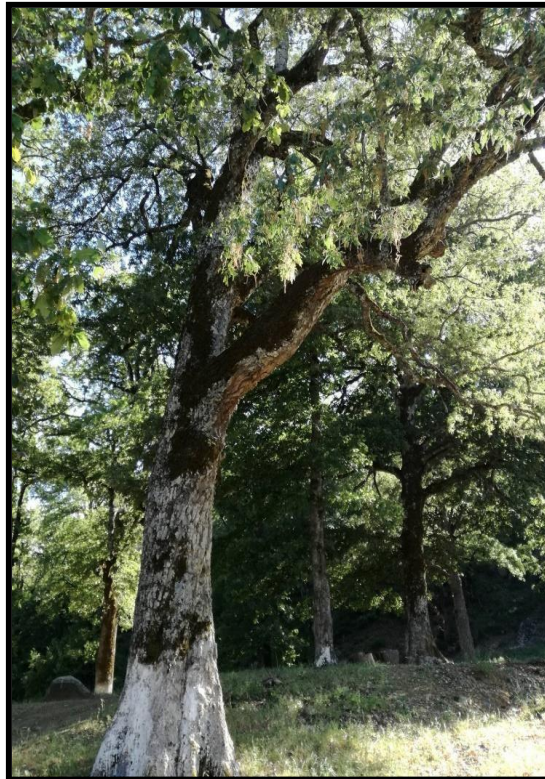


Figure 3.1 : Arbre de chêne afares *Q. afares* (photo Akli , 2022, prise à la station sidi el hadi – Akfadou-Algérie).

b-Caractéristiques botaniques:

Le Chêne Afares se distingue facilement du Chêne Zéen, avec lequel il est souvent mélangé, par plusieurs caractéristiques botaniques. Tout d'abord, il a un port plus élancé, avec une cime parfois fastigiée ou pyramidale, mais atteignant néanmoins des Dimensions similaires à celles du Chêne Zéen, soit jusqu'à 30 mètres de hauteur et une circonférence allant jusqu'à 1,30 à 3 mètres. S'atige est généralement rectiligne, avec une écorce profonde.

Les feuilles du Chêne afares sont caduques, mais elles tombent plus rapidement et en plus grande quantité que celles du Chêne Zéen. Elles ressemblent davantage à des feuilles de châtaignier, étant largement lancéolées avec de larges dents triangulaires. Au début, elles sont veloutées sur les deux faces, puis deviennent vert foncé sur le dessus et grisâtres et tomenteuses en dessous.

En ce qui concerne les glands, ils sont sub-cylindriques, de couleur brun roux clair et striés longitudinalement. Les cupules qui les entourent sont couvertes d'écaillés étalées ou retroussées, et les glands sont regroupés par 2 à 5 sur un pédoncule (Maire, 1961).

c-Répartition géographique:

Quercus afares est une espèce endémique en Algérie. Son aire géographique est très limitée et s'étend de la frontière tunisienne jusqu'au méridien de Cherchell en Algérie. (Fig.4.1). On le trouve dans les deux Kabylies : forêt des Beni Ghorbi, d'Akfadou, des Barbors (Où il est, sur les versants nord, en contact avec le cèdre et le sapin de Numidie). La Calle correspond à sa limite orientale extrême (Boudy, 1950, Quézel et Santa, 1962). Cependant *Q. afares* se présente aussi à l'état pur (populations mono-spécifiques) surtout au-dessus de 1000 m à 1300m d'altitude et sur des sols dégradés.

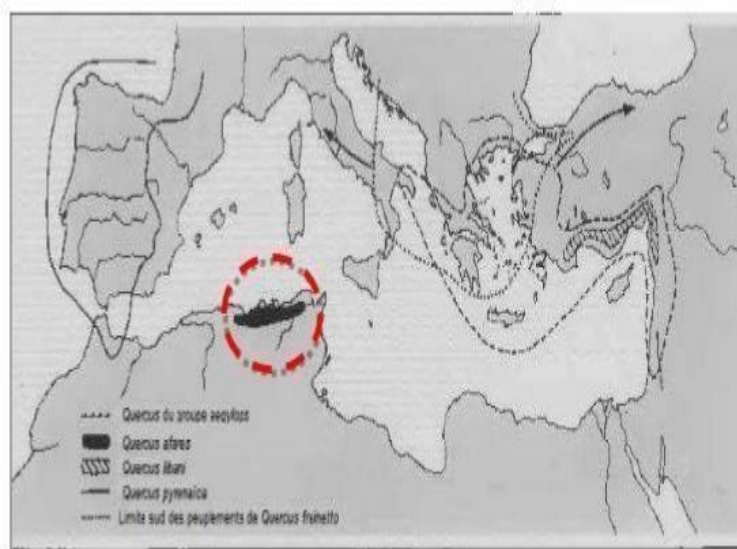


Figure 4.1 : Distribution géographique de chêne afares *Q. afares* (Quézel et Bonin, 1980)

D -Exigences écologiques:

Le chêne afares, selon Boudy (1950), est un arbre typiquement montagnard, se développant généralement entre 1200 et 1600 m d'altitude, souvent en mélange avec le chêne Zéen. Il peut parfois être trouvé à des altitudes plus basses, jusqu'à 200 m, où il est alors en mélange avec le chêne liège. Cette espèce préfère les régions avec des précipitations annuelles variant entre 800 et 1000 mm, voire jusqu'à 1300 mm, et elle redoute les saisons sèches prolongées.

Le chêne Afares montre une bonne résistance à la chaleur et au froid. Sur le plan édaphique, il a une préférence pour les sols non calcaires peu colonisés et les sols dégradés par les incendies (Boudy, 1950 ; Maire, 1961).

II-I-4-Présentation de la zone d'étude la forêt d'Akfadou:

La forêt d'Akfadou est caractérisée par une variabilité topographique, édaphique, géologique et floristique (Fig.5.1). Cette multitude de facteurs physiques a créé de nombreuses conditions microclimatiques d'où une différence à l'échelle des peuplements. L'hétérogénéité structurale est le résultat des exploitations antérieures (surtout entre 1939 – 1945).

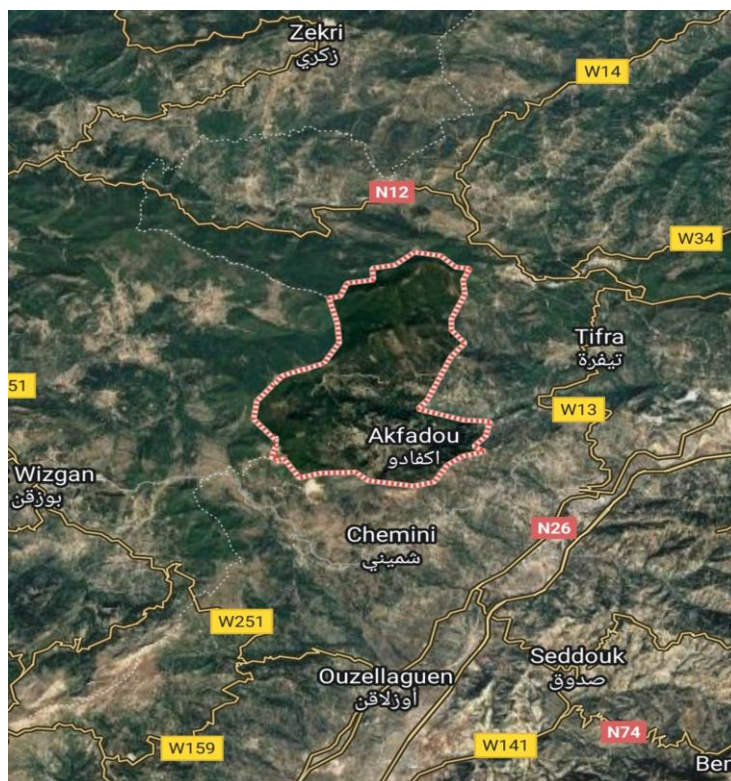


Figure 5.1 : Chaines et massifs montagneux de la kabylie modifiée. (Massif de l'Akfadou)(Source: Microsoft expedia maps).

II-I-5-Localisation de la Forêt d'Akfadou:

Le massif forestier d'Akfadou est situé en grande partie à l'intersection de deux chaînes montagneuses : la chaîne côtière et celle du Djurdjura. Il est distant du chef-lieu de la wilaya de Tizi Ouzou de quelques 50 km et de la mer méditerranée à moins de 20 km à vol d'oiseau, la forêt d'Akfadou s'étend sur 10000 ha, soit 18% de la chênaie caducifoliée d'Algérie (Messaoudene et *al*, 2007). La forêt d'Akfadou est sous régime domanial, elle est divisée en deux parties : l'Akfadou ouest et est, dépendant respectivement de la wilaya de Tizi Ouzou (4600ha) et de Bejaia (5400ha) (Rabhi,2011)

II -I -6-Pédologie:

Les données pédologiques disponibles sur la Kabylie du Djurdjura sont assez limitées et proviennent principalement de la "carte des sols de l'Algérie" établie à une échelle de 1/500 000 par Durand. Selon cette carte, neuf classes de sols différentes sont identifiées En Kabylie (AKLI, 2022).

En Grande Kabylie, où un important dépôt de grès s'étend d'ouest en est sur une cinquantaine de kilomètres depuis Azazga jusqu'aux environs d'El Kseur, le flysch numide constitue environ un tiers du nord-est de la région. Ce flysch est composé de grès numides, d'argiles sub-humides de l'Oligocène et de marnes avec des intercalations calcaires, notamment du Massylien. (AKLI, 2022).

La topographie de la région est généralement caractérisée par des pentes assez fortes, avec des classes de pente dépassant souvent 25 % ou comprises entre 12,5 % et 25 %. la région montagneuse de Kabylie se distingue par sa diversité de milieux physiques et naturels résultant de son relief escarpé et d'un important réseau hydrographique (AKLI, 2022).

Les sols dans cette région sont largement influencés par le substrat rocheux, avec une différenciation notable entre les sols sur substrat gréseux et ceux sur substrat argileux.

Les grès numides produisent généralement des sols sableux, jaunâtres et friables, tandis que les argiles sub-humides fournissent des associations pélagiques oligocènes. La perméabilité du substrat rocheux joue un rôle important dans la migration des argiles et donc dans la différenciation des sols. (AKLI, 2022).

En résumé, la Kabylie du Djurdjura présente une variété de sols et de paysages résultant de son relief montagneux et de sa géologie diversifiée, ce qui influence également la répartition de la végétation et des habitats naturels dans la région. (Akli, 2022).

II-I -7-Description du climat et du bioclimat:

La région étudiée présente une grande variabilité climatique, typique du climat méditerranéen, caractérisé par une période de sécheresse pendant les mois chauds. Cette sécheresse exerce un stress hydrique sur la végétation pendant une période variable (Akli, 2022).

Pour caractériser le climat de la zone, des données de précipitations et de températures ont été rassemblées sur une période allant de 1973 à 2000. Malheureusement, les données météorologiques dans les zones montagneuses sont rares et discontinues, ce qui nécessite parfois des extrapolations. Cependant, en se basant sur des travaux antérieurs, des gradients altitudinaux ont été calculés pour estimer les variations de précipitations et de températures avec l'altitude. (Akli, 2022).

En se basant sur plusieurs paramètres climatiques, dont le module de précipitation annuelle, les précipitations saisonnières, les indices de sécheresse, les températures moyennes annuelles et mensuelles, ainsi que d'autres indices climatiques, il est possible de caractériser le climat de la région de manière plus détaillée. (Akli, 2022).

Les données météorologiques disponibles et les paramètres calculés sont résumés dans un tableau (Tabl 1.1), ce qui permet de mieux comprendre le régime climatique de la zone d'étude et son impact sur la végétation et les écosystèmes locaux (Akli, 2022).

Stations	Code	alt	P	h	p	e	A	T	M	m	Q2	ISE	IDM
AitAicha	Aai	1000	958,1	409	292	30	227	14,04	27,69	3,39	135,22	1,08	39,85
Azazga	Aza	450	888,1	383	253	21	231	16,40	31,98	5,65	115,65	0,66	33,63
Tagma	Tag	1000	1174,4	484	359	33	298	14,04	27,69	3,39	165,71	1,19	48,84

Tabl. 1.1 : Données réduites relatives aux moyennes mensuelles (mois secs et mois humides), aux pluviométries annuelles et extrêmes et au régime saisonnier (extraites du tableau 13, Meddour, 2010 et Laribi, 2016 in Akli, 2022).

II-I -8-Les précipitations:

Les données considérées consistent en des valeurs de certains paramètres qui nous permettent de caractériser le régime des précipitations dans notre zone d'étude. Elles ont été extraites d'un tableau récapitulatif de données réduites dressé par Laribi (2016), soit près de 3 décennies, nous retenons 5 cinq postes pour leur localisation dans le périmètre de la zone d'étude (tab.2.1) ou dans ses abords surtout par rapport aux stations Yakouren, la cnoiret Aït Aïcha dans le massif d'Akfadou. (Akli,2022).

Stations	Alt(m)	P(mm)	Cv%	P>100	P<30	P max	P min	Régime saisonnier
Azazga	450	888	22	5	3	155	3.6	HAPAE
Tagma	1000	1174		7	3	185	7.9	HAPAE
Aitaïcha	1000	958	27	6	3	163	5.1	HAPAE

Tabl 2.1 : Données réduites relatives aux moyennes mensuelles (mois secs et mois humides), Aux pluviométries annuelles et extrêmes et au régime saisonnier (extraites du Tableau Laribi ;2016) (Akli,2022).

Dans le Tabl 2.1, nous récapitulons les valeurs de certains paramètres qui nous permettront une caractérisation du régime des précipitations (annuel, saisonnier, mensuel) et une régionalisation spatiale établie sur une base ombrique.

II -I -9-Précipitations moyennes annuelles:

Les précipitations moyennes annuelles dans la région étudiée sont influencées principalement par l'altitude, mais d'autres facteurs comme la proximité de la mer, l'orientation des versants et l'encaissement du site jouent également un rôle important. Par exemple, même si Aït Aïcha est située à une altitude plus élevée que Yakouren ,elle reçoit moins de précipitations en raison de son emplacement à l'abri des influences du Nord , grâce au djebel Affroun qui la protège(in Akli,2022).

Les précipitations varient également en fonction de la proximité de la mer, avec des stations comme Tagma et Yakouren recevant des quantités plus importantes de précipitations en raison de leur proximité avec la côte. Cet effet est observé dans de nombreuses montagnes

méditerranéennes et est connu sous le nom d'effet de foehn (in Akli, 2022).

Globalement, la région connaît une période sèche de trois mois (de juin à août) avec des précipitations inférieures à 30 mm, suivie d'une période pluvieuse s'étalant sur neuf mois (de septembre à mai), avec une concentration des pluies pendant le semestre froid, de novembre à avril. Le mois de décembre est généralement le plus arrosé (in Akli, 2022).

En termes de classification bioclimatique, la région se situe dans une gamme allant du bioclimat subhumide chaud au pér-humide frais. Cependant, la plupart des sites étudiés se trouvent dans la variante tempérée des bioclimats subhumide et humide, avec quelques sites correspondant au per-humide frais et au subhumide chaud. Cela reflète la diversité des stations étudiées dans la recherche (in Akli, 2022).

II -I -10-Températures:

Les températures dans la région étudiée varient en fonction de l'altitude et de la localisation des stations météorologiques. Les températures maximales moyennes du mois le plus chaud varient (Tabl 3-1) de 36,2 °C à Tizi Ouzou à 29,8 °C à Aghribs. Les Températures minimales moyennes du mois le plus froid varient de 2,6°C à Aïn El Hammam à 5,7°C à Azazga (Akli,2022).

Stations retenues	T	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ain hammam(1100)m	m	2.6	3.2	4.8	7.1	10.2	14.7	18.6	19.1	16	11.3	7	3.4
	M	9	10.2	13.1	16	19.5	25.2	29.8	30.8	26.5	20.4	14.1	9.9
Aghribs	m	4.5	4.9	6.5	8.9	11.5	15.7	19.1	19.6	17.2	12.8	8.6	5.3
	M	10.3	11.5	13.8	16.8	20	25.1	29.5	29.8	26.5	20.8	15.3	11

Tabl 3.1 : Les températures moyennes mensuelles minimales et maximales des stations voisines sont maintenues(Akli.a.2022).

Le massif de l'Akfadou présente une variabilité bioclimatique (**fig.6.1**) en raison de ses disparités entre ses extrêmes. Il est caractérisé par des bioclimats subhumides et humides avec une variante fraîche et tempérée .Les précipitations dans cette région sont importantes, allant de 1200 à 2000 mm par an, ce qui en fait l'une des régions les plus

humides d'Afrique du Nord. La saison des pluies est prononcée, tandis que la période sèche en été dure plus de 2,5mois (AKLI.a.2022).

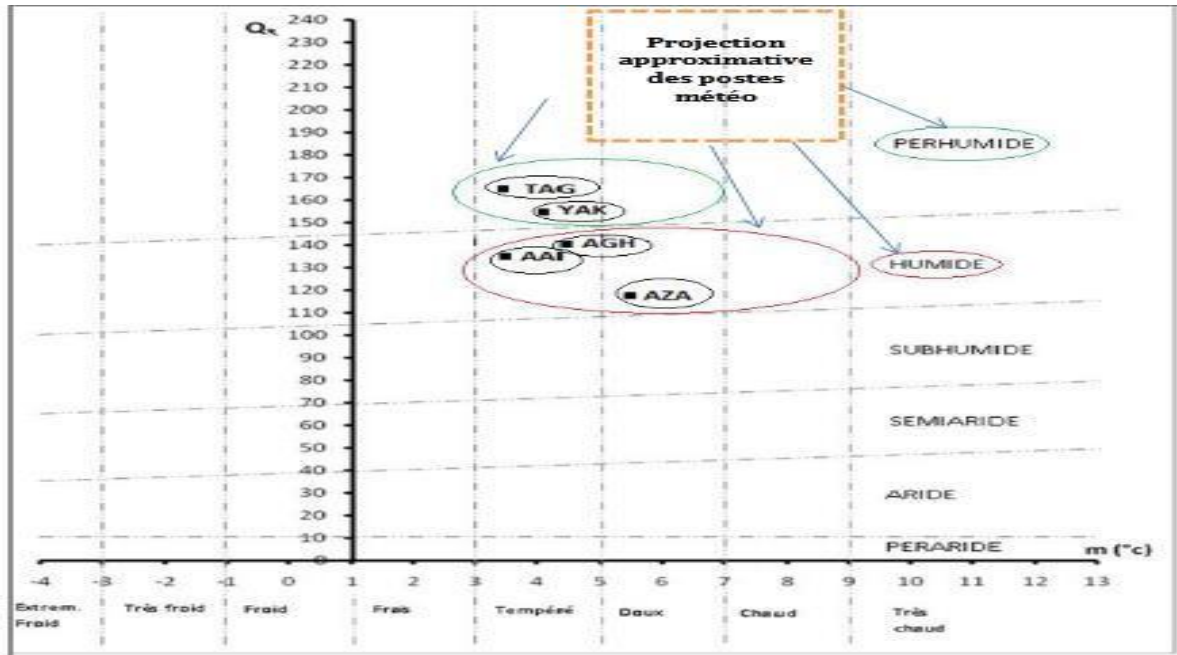


Figure 6.1 : Projection des positions météorologiques détenues dans le climagramme d'Emberger modifié (Akli, 2022).

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (**Fig. 7.1**) montre que la période sèche dure de mi-juin à début septembre, avec juillet et août comme les mois les plus secs. L'indice de sécheresse de De Martonne confirme cette tendance, montrant que la saison sèche dure généralement trois mois. L'augmentation des précipitations et la diminution des températures en altitude conduisent à des valeurs élevées de cet indice, ce qui explique la sécheresse plus grave observée en juin dans certaines stations (AKLI, 2022).

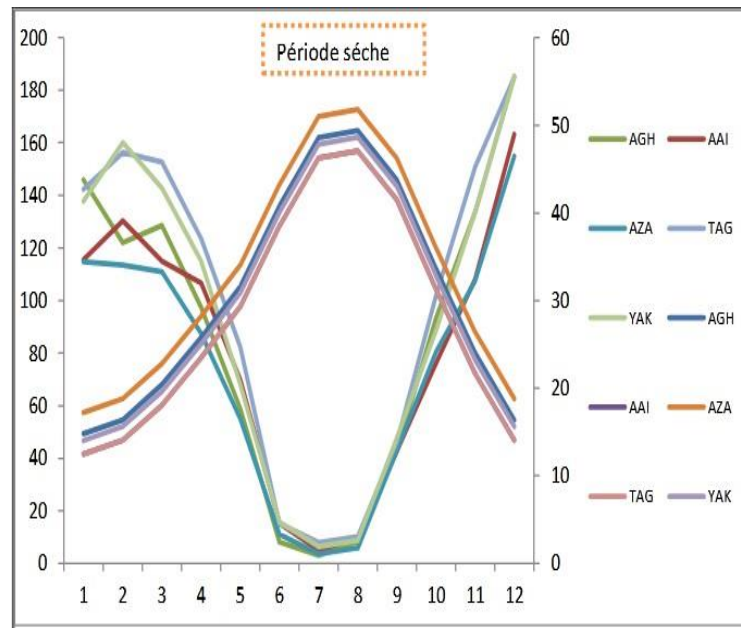


Figure 7.1 : Diagramme Ombrothermique des postes météorologiques retenus (Akli, 2022).

En résumé, la région présente une variabilité climatique marquée, avec des températures et des précipitations variant en fonction de l'altitude, de la localisation géographique et de l'influence de la mer (Tabl 4.1)

Postes retenues	Mois de l'année											
	j	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	D
Ai	85,28	91,84	72,48	58,90	34,09	6,28	1,85	3,43	16,71	35,71	62,36	114,94
Aza	74,05	70,13	62,18	43,51	24,44	4,21	1,22	1,97	15,59	34,54	55,59	95,79

Tabl 4.1 : Valeurs mensuelles de l'indice de sécheresse De Martonne des stations stockées (Akli, 2022 in Laribi 2016).

II-I -11- végétation:

La forêt d'Akfadou est principalement composée de peuplements de chênes de Zeen, de chênes d'Afarès, de chênes lièges, ainsi que de chênes verts et de chênes hybrides, présentant une diversité d'âges. Le chêne de Zeen domine jusqu'à 1646 mètres d'altitude, couvrant environ 45 % de la superficie forestière. Le chêne d'Afares est abondant sur plusieurs crêtes, souvent accompagné d'hybrides dans les zones environnantes, surtout sur les versants sud et sud-ouest ainsi que sur les sols argileux, et se trouve principalement en dessous de 1250 mètres d'altitude. Les peuplements purs représentent environ 15 % de la superficie forestière, tandis que les peuplements mixtes de chênes de Zéen et de chênes d'Afares, ainsi que de chênes de Zéen et de chênes lièges, couvrent respectivement environ 25 % et 15 % de la superficie forestière. Certains grands chênes de Zéen et d'Afarès âgés de plus de 500 ans témoignent de l'ancienneté de la forêt d'Akfadou (Akli, 2022).

Outre les chênes, d'autres espèces telles que le cèdre de l'Atlas, le châtaignier, le mélèze, le pin boulonné et le cyprès ont été introduites dans la région, contribuant à la diversification de la végétation. L'*Abies numidica* est également présente dans le sud de la forêt de cèdres d'Agoulmime Aberkane, avec environ 75 individus recensés. L'aulne noir, l'if et le houx colonisent les zones humides et marécageuses ainsi que les sources et les cours d'eau (Akli, 2022).

Les espèces à feuilles caduques comprennent l'érable, les orbier, et le cerisier, qui, bien que présentes, ne dominent pas significativement la végétation. En revanche, certaines espèces telles que l'*Air tenorii*, l'*Alchemilla arvensis*, le *Brachypodium distichum*, le *Gastridium scabrum*, le *Gaudinia fragilis*, le *Rumex bucephalophorus* et le *Tuberraria guttata* sont caractéristiques des zones avec un surpâturage et une faible couverture arborée. Au total, 435 espèces ont été recensées dans la forêt d'Akfadou, dont environ 9% sont considérées comme des espèces rares (Akli, 2022).

Sur le plan phytogéographique, environ 41 % de la flore de la forêt d'Akfadou est constituée d'essences méditerranéennes, avec une proportion notable d'espèces endémiques de l'Afrique du Nord. Les espèces ibéro-mauritaniennes, italo-nord-africaines, cosmopolites et paléo-tropicales représentent également une part significative de la flore locale (Akli, 2022).

Revue bibliographique

Chapitre II

Généralités sur La lumière

Introduction

La lumière a un rôle biologique fondamental. Elle a probablement été un facteur essentiel de la formation et du développement de la vie sur terre, tant par le maintien d'une température ambiante favorable que par les réactions photochimiques qu'elle permet, notamment la Photosynthèse. C'est un facteur clef de la dynamique végétale, du fait qu'elle est la source d'énergie de la photosynthèse, donc de la croissance et de la production (Rabhi,2015).

II-1-Rayonnement solaire et couverture végétale:

Le rayonnement solaire constitue la seule source externe d'énergies sur notre planète est le moteur de tous les processus biologiques rendant la vie possible sur Terre .Il s'agit d'un processus de transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques sans nécessiter de support matériel, ces ondes étant associées à des particules élémentaires. Le rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde ou sa fréquence vibratoire (Sonohat et *al.*, 2003 in rabhi,2015).

Du point de vue du transfert d'énergie, la quantité d'énergie fondamentale d'un photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique qui lui est associée. La nature ondulatoire de la lumière permet de la décrire en termes de longueur d'onde, tandis que sa nature particulaire permet de la modéliser dans un milieu à l'aide de lois géométriques. Pour caractériser l'interaction du rayonnement solaire avec les plantes, on mesure souvent le flux énergétique ou le nombre de photons sur une surface horizontale. La luminance représente le flux radiant reçu par unité de surface réceptrice (Sonohat et *al.*, 2003).

Les changements les plus significatifs dans la qualité de la lumière pour les plantes se produisent au sein du couvert végétal, résultant principalement des propriétés optiques des organes chlorophylliens et de leur interaction avec le rayonnement incident. Les propriétés optiques des feuilles peuvent être précisément simulées à l'aide de plusieurs paramètres tels que le paramètre «N» décrivant la structure interne de la feuille, la concentration en chlorophylle « a » et « b », ainsi que l'épaisseur des feuilles. Le couvert forestier est composé d'une multitude d'éléments feuillus et ligneux présentant une superficie et une répartition spatiale spécifiques. Le rayonnement est absorbé, réfléchi, réfracté ou transmis par ces éléments. La partie absorbée entraîne l'extinction du rayonnement, tandis que les parties réfléchies, réfractées et transmises constituent les parties rediffusées (Jacquemoud et Baret, 1990 in rabhi 2015).

Le cheminement d'un rayon à l'intérieur d'un couvert forestier est schématisé dans la figure 8.2.

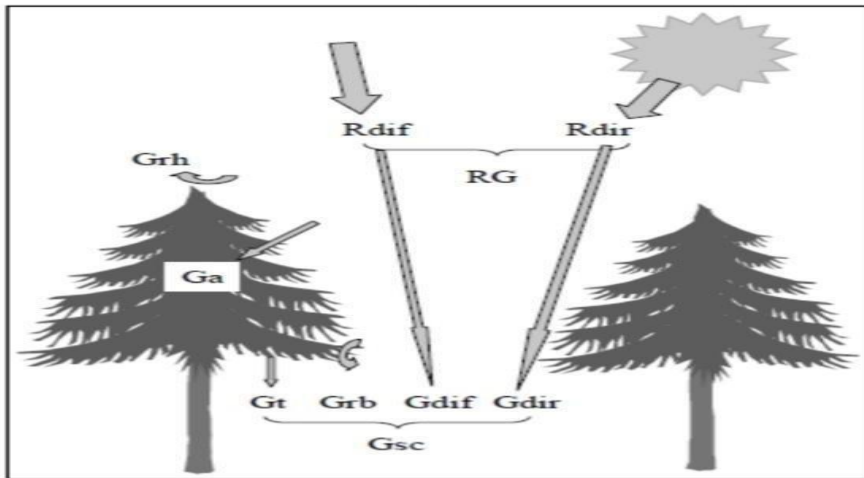


Figure 8.2 : Décomposition du rayonnement sur le couvert forestier ((Ruchaudetal,2000 in rabhi ,2015).**Gdif**: rayonnement diffus.**Gdir** et **Gdifre** présentent le rayonnement global traversant les espaces ouverts de la canopée.

II -2- L'importance de la lumière :

La lumière est un facteur crucial pour la régénération, la croissance et la production végétale. Elle est essentielle à la croissance de toutes les plantes chlorophylliennes, constituant la source d'énergie permettant aux plantes autotrophes de produire des composés organiques à partir de matières inorganiques. La photosynthèse convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique, utilisée dans les processus de croissance et de maintenance. Un minimum de lumière est requis pour compenser les pertes respiratoires, bien que ce seuil varie selon l'espèce végétale considérée. Seule la lumière visible participe à la photosynthèse, et le rayonnement utile à cette dernière, appelé PAR (Photosynthetically Active Radiation), correspond au domaine visible du spectre électromagnétique (Aussenac et Granier, 1978 in rabhi, 2015).

Du point de vue morphologique, les plantes chlorophylliennes ont développé divers systèmes d'information sur leurs conditions lumineuses, agissant comme des signaux déclenchant des réponses régulant la croissance et le développement (rabhi2015). Deux photorécepteurs spécifiquement impliqués dans la régulation de la morphologie et de la structure des plantes ont été identifiés principalement sur des espèces herbacées, bien que des travaux plus rares sur des espèces ligneuses suggèrent la généralité de ces mécanismes photo

morphologiques cités par Sonohat et *al.*, 2003) (syndrome "*shade avoider*", Smith 1982) (rabhi,2015).

Dans le contexte forestier, la lumière joue un rôle crucial à deux niveaux : elle est essentielle à la régénération et influence la formation de l'écosystème forestier. La lumière qui atteint le sol, directement ou indirectement par la chaleur qu'elle apporte, est un facteur déterminant dans la restauration des forêts. Des études ont montré que des changements significatifs liés à l'ensoleillement affectent le système racinaire des arbres, leur morphologie et leur symbiose mycorhizienne. Une augmentation de l'énergie lumineuse disponible favorise la croissance des parties souterraines des plantules et augmente l'incidence des champignons mycorhiziens, renforçant ainsi l'assimilation de l'eau et la résistance à la sécheresse, surtout chez les espèces sensibles (Ponge et *al.*, 1994)(rabhi,2015).

Cependant, une inhibition de la croissance peut être observée à des niveaux de lumière élevés, et un éclairage associé à l'air sec peut entraîner une mortalité élevée en été.

La régénération naturelle est fortement liée à la démographie des espèces et à leurs caractéristiques d'éclairage, avec des plantes, notamment les jeunes arbres forestiers, réagissant rapidement aux changements lumineux en ajustant leur appareil foliaire et leur croissance pour maximiser l'absorption de la lumière. Les forestiers, par le biais de pratiques sylvicoles telles que l'éclaircie, cherchent à évaluer la quantité de lumière atteignant le sol. Cependant, malgré une certaine connaissance des niveaux de lumière nécessaires pour orienter les processus forestiers, les outils permettant d'estimer précisément la lumière sous le couvert forestier restent limités. Pour aider les sylviculteurs dans leurs pratiques, il serait utile d'établir des relations entre l'intensité de l'éclaircie, la lumière au sol, la composition végétale et la régénération, la croissance et le développement des plantes (Balandier et *al.* 2010) (Sylvie Duthoit,2007 in Rabhi,2015).

II -3-Estimation et mesure de l'éclairement sous le couvert forestier En forêt :

La lumière qui pénètre dans la canopée d'une forêt subit diverses interactions avec les éléments de la végétation, ce qui modifie sa quantité et sa qualité au fur et à mesure de son passage. Ces interactions comprennent la réflexion, l'absorption et la transmission de la lumière par les feuilles et les autres composants de la canopée. De plus, la présence d'une canopée crée des zones d'ombre et de lumière changeantes, allant des petites taches à de grandes zones, en fonction de facteurs tels que la taille et la densité de la végétation, ainsi que

des conditions météorologiques (Balandier et *al.*, 2010 in rabhi,2015).

La quantité et la qualité de la lumière qui atteignent le sol sont déterminées par ces interactions complexes (Balandier et Pauwels, 2002), ce qui influence le microclimat de la forêt, ainsi que la composition et la dynamique de la végétation. Mesurer directement la lumière dans ces conditions peut être difficile en raison de sa variabilité spatiale et temporelle, ainsi que des limitations des équipements de mesure existants.

Une approche alternative consiste à établir des relations entre la lumière du sous-étage et des caractéristiques mesurables de la canopée, telles que l'épaisseur des arbres. Ces relations simplifient l'estimation de la lumière disponible dans le sous-bois. Des études ont montré qu'il existe une forte relation entre l'éclairement du sous-étage et la surface terrière des peuplements forestiers réguliers ou mixtes.

Pour mesurer la lumière de manière plus directe, il existe deux groupes de méthodes : les méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes impliquent des mesures de l'éclairement à l'aide d'équipements spécifiques, tandis que les méthodes indirectes utilisent des caractéristiques de la canopée pour estimer l'éclairement du sous-étage (Balandier et *al.* 2010).

II -4- Les Méthodes :

II -4-1- Méthodes directes PPFD :

Les méthodes directes de mesure de la lumière sous le couvert végétal sont souvent utilisées pour obtenir des données précises et impartiales. L'une de ces méthodes consiste à mesurer le PPFd (Photosynthetic Photon Flux Density), qui représente la densité de flux de photons dans le domaine du PAR (Photosynthetically Active Radiation), c'est-à-dire la lumière visible utile à la photosynthèse (rabhi, 2015).

Pour mesurer le PPFd de manière directe, deux mesures simultanées sont effectuées sur une certaine période de temps : une mesure de référence au-dessus de la canopée pour obtenir la luminosité incidente, et une mesure au niveau considéré pour obtenir l'éclairement transmis. En comparant ces deux mesures, on peut obtenir l'éclairement relatif pendant cette période de temps. Les mesures PPFd sont généralement réalisées à l'aide de capteurs ponctuels tels que des luxmètres (rabhi, 2015).

Les principaux avantages des méthodes directes sont leur précision et leur capacité à prendre en compte toutes les composantes de la lumière. Cependant, elles présentent aussi des limites : la variabilité temporelle et spatiale de la lumière relative sous abri nécessite des mesures continues sur une période significative et la réplication des capteurs pour caractériser avec précision l'éclairement sur une surface donnée, ce qui peut poser des défis logistiques (Piboule, 2005).

D'autres méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal incluent l'utilisation de capteurs de lumière, l'imagerie à l'aide de caméras ou d'imagerie satellitaire, et l'utilisation de dataloggers pour enregistrer les niveaux de lumière sur une période donnée (Sylvie Duthoit, 2007).

II -4-2-Méthodes indirectes:

Les méthodes indirectes de mesure de la lumière sous le couvert végétal reposent sur deux principes : la modélisation du rayonnement incident et la mesure des obstacles à sa transmission jusqu'au point considéré. Ces méthodes permettent d'estimer l'éclairement relatif sur une période pendant laquelle l'obstacle mesuré peut être supposé invariant à partir d'une seule mesure ponctuelle dans le temps et dans l'espace (rabhi.2015).

L'une des méthodes indirectes les plus utilisées est la photographie hémisphérique (Piboule, 2001 et 2005 in rabhi.2015). Cette méthode implique l'utilisation d'un appareil photo équipé d'un objectif hémisphérique, capable de capturer une image de l'intégralité de l'hémisphère céleste visible depuis le point de prise de vue. L'image obtenue montre tous les obstacles aux rayons lumineux provenant de différentes directions du ciel. En utilisant cette image, il est possible de modéliser la répartition du rayonnement incident sur l'hémisphère céleste, puis de modéliser le blocage de ce rayonnement par les obstacles présents dans l'image. (SylvieDuthoit,2007). .

La précision de l'estimation et les conditions d'utilisation des méthodes indirectes dépendent du modèle utilisé pour représenter les obstacles et du degré de complexité de la modélisation de la répartition du rayonnement incident. Bien que ces méthodes offrent une alternative aux méthodes directes, leur précision peut être affectée par des facteurs tels que la qualité de l'image capturée et la capacité à modéliser correctement les interactions entre la lumière et les obstacles présents dans la canopée (Sylvie Duthoit, 2007).

II – 5-Historique et l'évolution :

II -5-1-HISTORIQUE

Un bref aperçu de l'histoire des méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal :

a. **Photométrie traditionnelle:** Depuis l'Antiquité, les humains mesurent la lumière à l'aide d'instruments optiques rudimentaires. Cependant, ces premières méthodes étaient limitées en précision et en portabilité (G. A. Zukauskas.2001).

Invention des photomètres: Au 19^e siècle, avec les avancées dans les sciences de l'optique, des instruments de mesure de la lumière plus précis ont été développés, tels que les photomètres, permettant des mesures plus fiables de l'intensité lumineuse (Sean F. Johnston 2001). (voir figure **Figure 9.2 A** : photo d'un luxmètre).

d-Développement des capteurs de lumière: Au 20^e siècle, avec l'avènement de l'électronique et des capteurs, des dispositifs plus compacts et sensibles ont été créés pour mesurer la lumière de manière quantitative et qualitative, conduisant à l'utilisation généralisée de capteurs de lumière dans la recherche agronomique et écologique (Abdul Al-Azzawi .2006). voir la **Figure 9.2 C** : photo d'une capture de lumière.

c-Introduction de l'imagerie: Avec l'amélioration de la technologie des caméras et l'avènement de l'imagerie satellitaire dans la seconde moitié du 20^e siècle, il est devenu possible de capturer des images de la lumière à partir de différentes perspectives, permettant une analyse plus détaillée de la distribution de la lumière sous le couvert végétal.

e-Évolution des data-loggers et des modèles informatiques : Depuis les années 1970 , l'utilisation généralisée des data-loggers et des ordinateurs a permis une collecte et une analyse automatisées des données de lumière sur de longues périodes, facilitant la compréhension des variations temporelles et spatiales de la lumière dans les écosystèmes végétaux voir la **Figure 9.2 B** :photo d'un data-loggers.



Figure 9.2 : A. Photo d'un luxmètre.

B. photo d'un dataloggers.

C. Photo d'un capture de lumière

II -5-2-Evolution:

L'évolution des méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal:

a-Photo métrie traditionnelle:

- Antiquité: Les premières observations de la lumières ont réalisées à l'œil nu, sans instruments précis.
- Moyen Âge : Développement des premiers dispositifs optiques rudimentaires pour mesurer la lumière, tels que les bâtons solaires.
- 17^esiècle:InventionduphotomètreàbalancierparJ.B.Bouguer, permettant des mesures relatives de l'intensité lumineuse.

b-Invention des photo mètres : 19 siècle : Développement de photo mètres plus sophistiqués,

comme le photo mètre à boule de Bunsen et le photomètre de Rumford, permettant des mesures plus précises de la lumière.

- Milieu du 20^e siècle: Introduction des photos mètres électroniques, utilisant des cellules photoélectriques pour des mesures encore plus précises.

c-Émergence des capteurs de lumière:

- Années 1960: Les premiers capteurs de lumière à semi-conducteurs sont développés, offrant une sensibilité et une précision accrues par rapport aux photomètres traditionnels.

- Années 1980: Miniaturisation des capteurs de lumière, permettant leur intégration dans des instruments portables et des dispositifs automatisés.

d- Avènement de l'imagerie:

- Fin du 20^e siècle: Développement de techniques d'imagerie aérienne et satellite permettant la cartographie et l'analyse de la lumière sur de vastes

- territoires avec une résolution spatiale élevée.

e-Technologies modernes et analyse avancée:

- Années 2000: Intégration de capteurs de lumière dans des réseaux de surveillance environnementale, permettant une collecte continue de données à grande échelle.

- Années 2010: Émergence de techniques d'analyse avancée telles que l'apprentissage automatique et la télédétection pour extraire des informations précieuses à partir des données de lumière, facilitant la compréhension des écosystèmes végétaux.

f-Vers l'avenir:

Les recherches actuelles se concentrent sur la miniaturisation des capteurs, l'amélioration de la résolution spatiale et temporelle des images, ainsi que sur le développement de modèles informatiques plus sophistiqués pour prédire l'impact de la lumière sur les écosystèmes végétaux dans un contexte de changement climatique.

II-6-Modèles de transfert radiatif et de couverture forestière:

L'intégration du couvert forestier comme descripteur dans le modèle de transfert radiatif nécessite une simplification. En effet, il existe de nombreuses approches différentes pour décrire la couverture. Nous utilisons généralement deux

indicateurs. Le LAI (Indice de Surface Foliaire) représente la surface foliaire et totale en m² par unité de surface du sol. Le LAD (Densité de Surface Foliaire) représente la surface foliaire totale en m² par m³ de volume foliaire. De la même manière, nous pouvons définir le WAI (Indice de Surface Boisée) et le WAD (Densité de Surface Boisée) pour les éléments boisés, ainsi que le PAI (Indice de Surface Totale) et le PAD (Densité de Surface Totale) en prenant en compte à la fois les éléments feuilles et bois (Piboule, 2001 in rabhi,2015).

Dans le cas de la photo graphie hémisphérique, la projection optique des composants végétaux est réalisée sur la coupole céleste pour un point donné. Les modèles de transfert radiatif représentent la canopée comme un modèle informatique tridimensionnel, basé sur des mesures géométriques plus ou moins détaillées de cette canopée. Ce que toutes les méthodes et modèles de transfert radiatif ont en commun, c'est l'approche de cette extinction radiative en utilisant la théorie des fractions d'espacement. Cependant, les modèles réalisent également des projections des éléments végétaux qu'ils représentent. Ces éléments sont généralement distribués statistiquement. La loi d'extinction de Bouguer permet d'obtenir une projection distribuée dans une certaine direction (Sinoquet et *al.*, 1995 in Piboule, 2001) :

$P_0 = \text{Exp.} (-LAD * L * G)$ Où :

- « p_0 » représente l'angle d'azimut de la direction,
- « Exp » représente l'angle zénithal,
- « LAD » représente la surface foliaire en m²/m³,
- « L » est la longueur de la distance parcourue dans la zone de couvertur
- « G » caractérise la répartition statistique des éléments végétaux. Cela prend en compte le degré d'agrégation des éléments de la feuille, leur distribution en azimut et leur inclinaison zénithale.

À noter que certains modèles gèrent la rediffusion en utilisant la notion de fonction de phase.

II - 7-1-La canopée :

La canopée est une couche supérieure des arbres dans une forêt ou une jungle, formée par les branches et les feuilles des arbres les plus grands. Elle crée un habitat écologique unique et joue un rôle crucial dans la régulation du climat, la protection de la biodiversité et la fourniture d'ombre et d'abri pour de nombreuses espèces animales et végétales (Margaret D.

Lowman et H. Bruce Rinker, 2004).

II -7-2-explication de chaque attribut de la canopée générée par une image hémisphérique :

a- L'indice foliaire :

L'indice foliaire (noté souvent LAI pour l'abréviation du terme anglais Leaf Area Index) exprime la surface projetée de feuilles du peuplement par unité de surface au sol (Watson, 1947). C'est un nombre sans dimension, équivalente à des m² de feuilles par m² de sol.

L'indice foliaire varie de 2 dans les pinèdes à 5 – 7 dans des peuplements fermés, mais il n'est pas rare de mesurer des valeurs supérieures à 10 en peuplement résineux dense ou dans des chênaies avec un taillis dense ou vieilli (Watson, 1947).

Comment mesurer l'indice foliaire ?

La métrologie de ce paramètre est délicate et diversifiée. L'ouvrage de Bréda *et al.* (2002) en donne les principes, les méthodes de mesures et les limites. Depuis le sol, on distingue deux types d'approches complémentaires : directes et indirectes.

b. Le ramassage de litières en pièges à feuilles fixes dans des couverts décidus

La collecte de litières dans un réseau de bacs fixes lors des chutes d'automne permet d'évaluer en outre la biomasse de feuilles retournant au sol. Il est possible ensuite de convertir ce poids de feuilles en surface à l'aide d'un coefficient appelé surface spécifique. La surface de feuilles rapportée à la surface des collecteurs correspond à l'indice foliaire. Ce coefficient est déterminé par mesure de la surface individuelle d'un échantillon de feuilles.



Figure 10.2 : Pièges à feuilles fixes dans des couverts décidus (N Bréda)

c- Collecte de litières

La collecte de litières, ici illustrée sur une placette RENECOFOR, permet de mesurer (1) la date à laquelle toutes les feuilles sont tombées et (2) l'indice foliaire du couvert par méthode directe (photo N Bréda).

d- Mesure de la surface d'une feuille

Mesure au laboratoire de surface de feuilles de chênes (photo M Becker). Mesure d'indice foliaire. Utilisation d'un analyseur de couvert.

Mesure d'indice foliaire à l'aide de l'analyseur de couvert LAI-2000 (LiCor, Nebraska, USA). Photo F. Bréda.



Figure 11.2 : Mesure d'indice foliaire à l'aide de l'analyseur de couvert LAI-2000 (LiCor, Nebraska, USA). Photo F. Bréda (photo M Becker).

e- L'utilisation d'analyseurs de couvert

La méthode directe n'est pas utilisable pour les espèces à feuillage persistant, dont la fraction d'aiguilles ou feuilles tombée chaque année n'est que partielle. Des appareils portables appelés "analyseurs de couvert" sont disponibles pour déterminer sur le terrain l'indice foliaire des couverts végétaux. Ils utilisent des relations entre la proportion de lumière interceptée par le couvert et l'indice foliaire.

f--Indice d'Ouverture:

L'indice d'ouverture est souvent calculé en mesurant la proportion du ciel visible dans une image hémisphérique de la canopée. Plus cette proportion est élevée, plus la canopée est ouverte.

Cet indice est important pour comprendre la quantité de lumière solaire pénétrant dans la canopée, ce qui affecte la photosynthèse, la température et d'autres processus biologiques.

g- Indice d'Agglutination:

- L'indice d'agglutination quantifie la manière dont les éléments de la canopée sont répartis spatialement. Il est souvent calculé en analysant la distribution spatiale des éléments individuels de la canopée.
- Une canopée avec un indice d'agglutination élevé peut présenter des zones de forte densité de feuilles ou d'arbres, tandis qu'un indice plus bas peut indiquer une répartition plus uniforme (Margar et D.Lowman et H.Bruce Rinker,2004).

h- DIFN (Diffusion Index

- Le DIFN mesure la distribution angulaire de la lumière dans la canopée. Un DIFN élevé indique une diffusion plus uniforme de la lumière dans toutes les directions, tandis qu'un DIFN plus bas peut indiquer une distribution plus directionnelle de la lumière.
- Ce paramètre est souvent utilisé pour modéliser la transmission de la lumière à travers la canopée et pour estimer la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse dans différentes parties de la canopée (D. Lowman et H. Bruce Rinker, 2004).

En combinant ces différents indices, les chercheurs peuvent obtenir une image plus complète de la structure et du fonctionnement de la canopée, ce qui est crucial pour la compréhension des écosystèmes forestiers, des cultures agricoles et d'autres environnements végétaux (D. Lowman et H. Bruce Rinker, 2004).

Revue bibliographique

Chapitre III

généralités sur Langage R

Introduction

R est un logiciel gratuit. Il connaît un développement rapide dans de multiples domaines de la recherche. De nombreux modules additionnels (packages) sont régulièrement publiés sur Internet, qui permet de mettre en œuvre les techniques les plus récentes d'analyse des données. R permet aussi la réalisation de tous types de graphiques. Il est rapidement « personnalisable » en créant ses propres fonctions, implémentant ses propres méthodes. Il fonctionne sous Windows, MacOS et Linux. Ses utilisateurs bénéficient de l'aide, sur Internet, d'une forte communauté de programmeurs expérimentés. Limites de R Peu conviviale R est un langage de programmation. On peut ainsi conserver la trace, sous forme de fichier programme, de tous les traitements réalisés. Cela permet relancer des traitements rapidement, de les modifier aisément pour explorer des variantes, etc. (Rabhi ,2019).

R est un système d'analyse statistique créé par Ross Ihaka & Robert Gentleman (1996, J. Comput. Graph. Stat., 5: 299-314)

R est à la fois un langage et un logiciel ; parmi ses caractéristiques les plus remarquables citent :

- un système performant de stockage et de manipulation des données ;
- la possibilité d'effectuer du calcul matriciel et autres opérations complexes ;
- une large collection intégrée et cohérente d'outils d'analyse statistique ;
- un large éventail d'outils graphiques particulièrement flexibles ;
- un langage de programmation simple et efficace qui inclue de nombreuses facilités.(Rabhi, 2019)

III -1-Installer R

<http://cran.r-project.org>

a-Mots récurrents

Package, commande ou fonction, argument, objet, assignation

b-Formulation générale

Objet <- fonction (argument1, argument2,...)

c-Installer le package

Install. packages ("package") Installer le package après avoir choisi un site écran. Une autre méthode consiste à chercher le package dans la liste organisée par ordre alphabétique.(RABHI,2019).

d-Charger le package dans R

library(package)

III-2-Forces de R:

1. logiciel libre : à l'avantage d'être **gratuit** et de favoriser la **recherche reproductible**;
2. **langage interprété** : langage plus proche de notre langage que du langage machine, donc plus simple et direct que, par exemple, C ou C++;
3. **partage et réutilisation de code facilité** grâce au système des packages et au CRAN;
4. communauté active de développeurs et d'utilisateurs :
5. R **évolue vite**, ses bogues sont identifiés et corrigés rapidement;
6. il y a **beaucoup d'information** concernant la programmation en R sur internet;
7. le **nombre de packages R est toujours grandissant**, ainsi de nouvelles fonctionnalités sont
8. fréquemment ajoutées à R (IN <https://bookdown.org/ael/rexplor/chap1.html>).

III -3-Limites de R:

Les caractéristiques de R sont particulièrement adaptées au monde de la recherche et de l'enseignement. Il est donc très utilisé dans les universités. Par contre, il comporte les limites suivantes :

1. logiciel libre : certaines organisations **préfèrent utiliser un logiciel commercial**;
2. langage interprété : **R est parfois lent** pour réaliser certains calculs;
3. gestion de la mémoire : **le R de base est plus ou moins adapté à la manipulation de données volumineuses** (mais de plus en plus de packages sont créés pour contrer ce problème) (IN <https://bookdown.org/ael/rexplor/chap1.html>).

III -4-Script :

1. Il existe différentes façons de travailler sur RStudio. De façon classique, on peut ouvrir un **script**. entrer les commandes dans le script.
2. regarder les sorties dans la console (en cliquant sur le bouton **run**).
3. sauver le script. (IN <https://bookdown.org/ael/rexplor/chap1.html>)

III -5- Packages:

Un package est une ensemble de programmes et fonctions **R** qui complètent les fonctions existantes par défaut dans le logiciel. Un package est généralement dédié à une méthode ou un champ d'application spécifique. Il existe plus de 18 000 packages disponibles sur le CRAN <https://cran.r-project.org>. On installe un package en

1. utilisant la fonction **install.packages** dans la console.
2. ou cliquant sur le bouton **Packages**. (IN <https://bookdown.org/ael/rexplor/chap1.html>)

Une fois le package installé sur la machine, on l'installe avec la fonction **library**. (IN <https://bookdown.org/ael/rexplor/chap1.html>).

III -6-Méthodologie :

Dans notre analyse, On a 4 packages outils de travail dont chaque fonction est liée à un package.

a- Package 'imageur'

Description

Traitement d'image rapide pour des images jusqu'à 4 dimensions (deux dimensions, une dimension temps/profondeur, une dimension couleur). Fournit la plupart des outils de traitement d'image traditionnels (filtrage, morphologie, transformations, etc.) ainsi que diverses fonctions permettant d'analyser facilement les données d'image à l'aide de R. Le package englobe 'CImg', <<http://cimg.eu>>, une bibliothèque C++ simple et moderne pour le traitement d'images

b- package Forfait 'exifr'

Description

Lit les données EXIF à l'aide d'ExifTool<<https://exiftool.org>> et renvoie les résultats sous forme de bloc de données.

ExifTool est une bibliothèque Perl indépendante de la plateforme ainsi qu'une application en ligne de commande pour lire, écrire et éditer des méta informations dans une grande variété de fichiers. ExifTool prend en charge de nombreux formats de métadonnées différents,

notamment EXIF, GPS, IPTC, XMP, JFIF, GeoTIFF, ICC Profile, Photoshop IRB, FlashPix, AFCP et ID3, ainsi que les notes du fabricant de nombreux appareils photo numériques de Canon, Casio, FLIR, FujiFilm, GE, HP, JVC/Victor, Kodak, Leaf, Minolta/KonicaMinolta, Motorola, Nikon, Nintendo, Olympus/Epson, Panasonic/Leica, Pentax/Asahi, Phase One, Reconyx, Ricoh, Samsung, Sanyo, Sigma/ Foveon et Sony.

c- Package 'hémisphère'

Description

Importez et classifiez des images **fisheye** de la canopée, estimez la fraction d'écart angulaire et dérivez les attributs de la canopée tels que l'indice de surface foliaire et l'ouverture.

Des informations supplémentaires sont fournies dans l'étude de Chianucci F., Macek M.(2023).

III -7- Les fonctions R utilisées pour étudier l'ouverture de la canopée et l'accès à la lumière:

traitement d'image	traitement d'image	lecture de l'image hémisphérique	image en noir et blanc	Rapport des attributs de la canopée
read_exif	glimpse image_read image_info image_crop image_resize image_distort image_flip image_rotate image_transparent image_resize image_convert image_mosaic image_write	import_fisheye	binarize_fisheye	gapfrac_fisheye

Chapitre IV

Matériels et méthodes

Introduction

Dans cette section, nous décrivons les matériaux et les méthodes utilisés pour le traitement des images sphériques pour l'analyse de la canopée forestière.

IV-1-Méthodologie d'étude

L'expérimentation est réalisée à La forêt d'Akfadou qu'est caractérisée par une variabilité topographique, édaphique, géologique et floristique. Cette multitude de facteurs physiques a créé de nombreuses conditions microclimatiques d'où une différence à l'échelle des peuplements. L'hétérogénéité structurale est le résultat des exploitations antérieures (surtout entre 1939 – 1945). Le massif forestier d'Akfadou est situé en grande partie à l'intersection de deux chaînes montagneuses : la chaîne côtière et celle du Djurdjura. Il est distant du chef-lieu de la wilaya de Tizi Ouzou de quelques 50 km et de la mer méditerranée à moins de 20 km à vol d'oiseau, la forêt d'Akfadou s'étend sur 10000ha, soit 18% de la chênaie caducifoliée d'Algérie (Messaoudene et *al.*, 2007). La forêt d'Akfadou est sous régime domanial, elle est divisée en deux parties : l'Akfadou ouest et est, dépendant respectivement de la wilaya de Tizi Ouzou (4600ha) et de Bejaia (5400ha) (Rabhi, 2011 et Akli, 2022).

La mesure de la lumière sous le couvert végétal des écosystèmes forestiers est une démarche cruciale pour comprendre la dynamique de ces environnements, influençant la croissance, la régénération et la biodiversité des espèces végétales. Au fil du temps, cette mesure a connu une évolution marquée, passant de méthodes rudimentaires à des approches plus sophistiquées, notamment l'utilisation de l'imagerie hémisphérique, qui offre une représentation visuelle précise de la lumière traversant la canopée. Dans cette section, nous décrivons les matériaux et les méthodes utilisés pour le traitement des images sphériques pour l'analyse de la canopée forestière.

Nous avons choisie deux stations au niveau d'Akfadou :

L'échantillonnage, a été effectué dans la forêt de l'Akfadou sur 2 stations principalement station 1 est « Canton Lazela » la forêt domaniale l'Akfadou ouest, la station 2 est « Canton Atman » la forêt domaniale l'Akfadou ouest (voir figure 5.1 et détails chapitre 1 Zone d'étude). Le nombre de photos sphériques d'arbres échantillonnés est différent d'une station à une autre selon notre objectif.

IV-1-2 Population et Échantillonnage

Les arbres ont été sélectionnés de manière aléatoire pour obtenir un échantillon représentatif de la diversité des espèces et des tailles présentes dans la région d'étude.

Nous avons effectué un échantillonnage circulaire (6m) pour évaluer la régénération ; comme le montre la figure 12.4 qui suit sur deux stations :

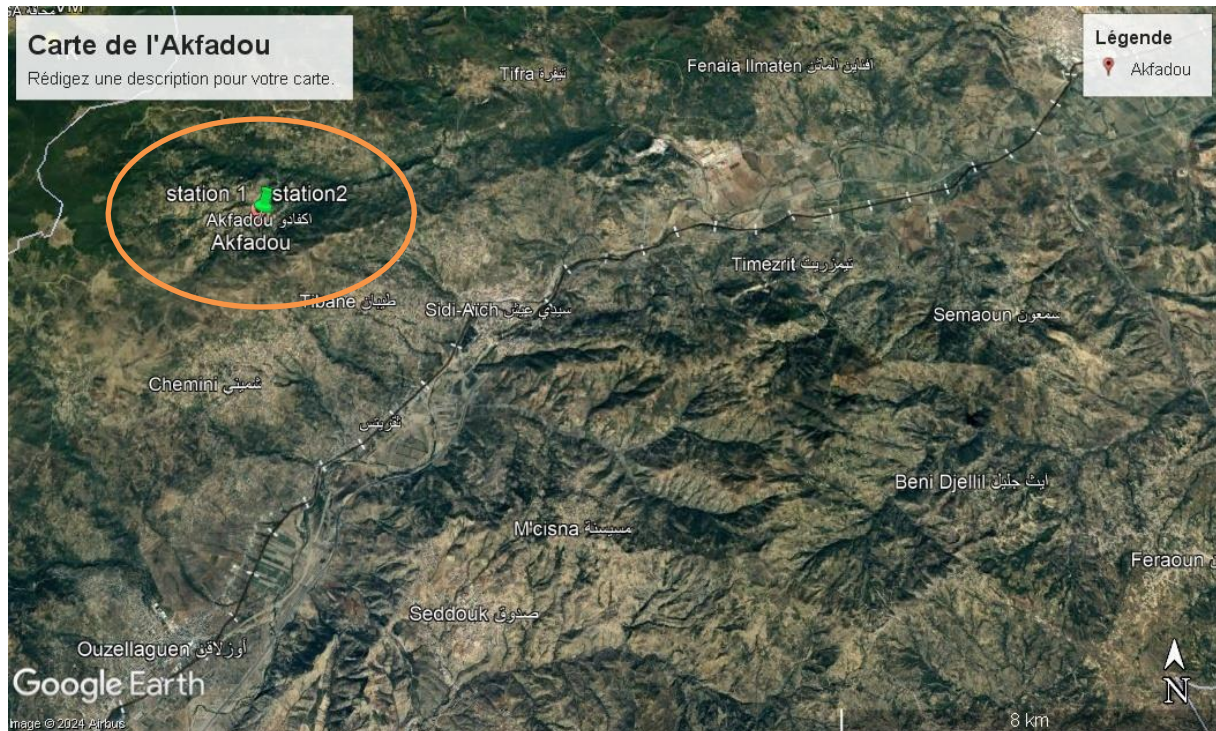


Figure 12.4: Situation de la zone d'étude et localisation des stations prospectées. (google earth).

IV-1-3-de.scréption des stations inventoriées

a-Station 1 : Sous le nom « Canton Lazela » la forêt domaniale l'akfadou ouest est une jeune forêt de chêne zéen situe dans la région de Mhaga, exposée à l'ouest, à une altitude de 972,9 mètres, avec des coordonnées GPS de 36° 42' 3" Nord et 4° 32' 3" Nord-Est. La pente est faible, à 5%. Le sol, principalement constitué de litière de chêne, est exceptionnellement mélangé à de la matière organique et présente une couleur brune, avec la roche mère située en profondeur.

b-Station 2 : Sous le nom Canton Atman la forêt domaniale l'akfadou ouest est une station mixte de chêne zéen et chêne afares situe dans la région de Mhaga, avec présence de pâturage.

Son exposition est au sud- ouest, et elle présente une faible pente de 4%. Les coordonnées GPS de cette station sont 36° 41' 52 » Nord et 4° 33' 8 » Nord.

c-Sous-bois

- Orme champêtre (*Ulmus minor*) (Présence dans station 2).
- Cytise à trois feuilles (*Cytisophyllum sessilifolium*) (Présence dans station 1 et station 2).
- Calicotome épineux ou cytise épineux (*Calicotome spinosa*) (Présence dans station 1 et station 2).
- Asphodèle (*Asphodelus cerasiferus*) (Présence dans station 1 et station 2).

d-Paramètres mesurés dans les stations inventoriées :

Stations	Coordonnées géographiques	Nombres de plants de régénération	Circonférence des arbres (cm)	Pente en %
1	36° 42' 3" Nord et 4° 32' 3" Nord- Est	381 individus	1 5 , 3 3 3 , 2 3 3 , 5	5%
2	36° 41' 52 » Nord et 4° 33' 8 » Nord	chêne zéen est de 75 individus chêne afares est de 31	1 8 9 1 6 8	4%

Tabl 5.4 : Les Paramètres mesurés dans les stations inventoriées.

IV-2-Mesure de la Circonférence des Arbres

Pour mesurer la circonférence des arbres, le matériel suivant a été utilisé :

- **Mètre ruban souple** : Un mètre ruban flexible, similaire à ceux utilisés en couture, pour enrouler autour des troncs d'arbres à la hauteur appropriée. (tableau 5.4)
- **Mesurer à la hauteur de poitrine (DBH)** La hauteur standard pour mesurer la circonférence d'un arbre est de 1,3 mètre (4,5 pieds) au-dessus du sol, connue sous le nom de "diamètre à hauteur de poitrine" ou DBH avec un mètre ruban.
- **Enrouler le mètre ruban** Enroulez le mètre ruban autour de l'arbre à 1,3 mètre du sol et notez la circonférence en centimètres ou en pouces voir la fig 15.4 Et fig.16.4 .
- **Conversion de la circonférence en diamètre** Convertissez la circonférence (C) en diamètre (D) en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{C}{\pi} \quad \text{où} \quad \pi \text{ est approximativement égal à } 3,14$$

Mesure de la Circonférence des Arbres



Figure 15.4. Mesure de la circonférence (photo prise par Bazi.I et Merzoud.T station1).



Figure 16.4. Mesure de la circonférence (photo prise par Bazi.I et Merzoud.T station2).

IV-2-1-Régénération du Chêne dans les Deux Stations

Nous avons évalué la régénération du chêne dans deux stations distinctes en utilisant une méthode de décompte manuel sur le terrain. Cette section présente les résultats obtenus et discute des différences observées entre les deux sites.

IV-2-2-Matériel et Méthode de Décompte

Le décompte des régénérations du chêne zéen a été effectué manuellement sur une surface spécifique dans chaque station. À la Station 1, une zone de 200 m² a été échantillonnée avec un rayon de 6 mètres autour du point central pour identifier et compter les jeunes plants issus de petites souches ou de graines. À la Station 2, un protocole similaire a été appliqué pour déterminer le nombre de régénérations de chêne zéen et de chêne afares.

IV-3-1-Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée

Les données ont été collectées à l'aide d'un appareil photo Realme RMX2155 via l'application 360° photo sphérique Cam foxpoi, capturant des images à deux stations distinctes. Les attributs tels que l'exposition, la luminosité, les coordonnées GPS, et d'autres paramètres liés à la lumière et à la structure de la canopée ont été mesurés et analysés. Les méthodes de traitement d'image incluent l'utilisation de seuils et de masques pour l'analyse zonale et l'évaluation de la distribution spatiale des caractéristiques végétales.

a- images hémisphérique :

FoxPoi 360° Photo Sphere Cam est une application innovante conçue pour capturer des images sphériques à 360 degrés, offrant une expérience immersive unique. Grâce à l'utilisation de la caméra du smartphone, l'application guide l'utilisateur à travers le processus de capture en assemblant automatiquement plusieurs images pour créer une vue panoramique complète. Elle permet de visualiser les photos de manière interactive et de les partager facilement sur les réseaux sociaux, répondant ainsi aux besoins des utilisateurs modernes en matière de communication visuelle. Les outils d'édition intégrés, tels que les filtres et les annotations, permettent de personnaliser les images pour une présentation optimale. Couramment utilisée dans des domaines variés tels que le tourisme, l'immobilier et la documentation d'événements, FoxPoi 360° Photo Sphere Cam se distingue par sa capacité à offrir une représentation visuelle immersive et engageante. (in Google play)



Figure 13.4. FoxPoi 360° Photo Sphere Cam une application innovante conçue pour capturer des images sphériques à 360 degrés. (google play)

Pour capturer des images avec FoxPoi 360° Photo Sphere Cam, suivez les étapes ci-dessous :

Étape 1 : Préparation Téléchargement et installation :

- Téléchargez et installez l'application FoxPoi 360° Photo Sphere Cam depuis votre boutique d'applications (App Store ou Google Play Store).

Lancement de l'application :

Ouvrez l'application sur votre smartphone.

Étape 2 : Capture de l'image Initialisation de la capture :

- Sélectionnez l'option de capture à 360 degrés dans l'application.

Positionnement :

- Tenez votre smartphone verticalement devant vous.
- Suivez les instructions à l'écran pour aligner le premier point de capture. Habituellement, l'application affiche un cercle ou une cible que vous devez aligner avec le centre de l'écran.

Prise des photos :

- Une fois que le premier point est capturé, suivez les indications à l'écran pour déplacer lentement votre smartphone et aligner le prochain point de capture environ (31 prises).

- Continuez à tourner lentement sur vous-même, en capturant des images dans toutes les directions : gauche, droite, haut, bas, et derrière vous.
- Assurez-vous de maintenir une vitesse constante et d'éviter les mouvements brusques pour assurer une bonne qualité d'assemblage des images.

Étape 3 : Assemblage des images Automatisation de l'assemblage :

- L'application assemblera automatiquement les images capturées pour créer une photo sphérique complète. Ce processus peut prendre quelques secondes à quelques minutes, selon le nombre d'images et la puissance de votre smartphone.

Révision et édition :

- Une fois l'image assemblée, visualisez-la dans l'application.
- Utilisez les outils d'édition intégrés pour ajuster la luminosité, le contraste, ajouter des filtres, ou annoter la photo si nécessaire.

Étape 4 : Sauvegarde et partage

1. Enregistrement de la photo :

- Sauvegardez la photo sphérique sur votre smartphone. L'application peut proposer différents formats de fichier pour la compatibilité avec d'autres applications.

Partage :

- Partagez votre photo sphérique directement depuis l'application sur les réseaux sociaux, par e-mail, ou via des applications de messagerie.

Conseils pour de meilleures photos sphériques

- **Stabilité** : Tenez votre Smartphone aussi stable que possible pendant la capture.
- **Lumière** : Essayez de prendre des photos dans de bonnes conditions de lumière pour éviter les ombres et les zones sombres.
- **Patience** : Prenez votre temps pour tourner lentement et capturer chaque angle correctement.
-

En suivant ces étapes, vous pourrez capturer des images à 360 degrés de haute qualité avec FoxPoi 360° Photo Sphere.



Figure 14.4 : Image sphérique (prise par Bazi.I et Merzoud.T avec FoxPoi 360° Photo Sphère 2024).

b-Traitement des Images Sphériques

Pour le traitement des images sphériques et l'analyse de la canopée, les outils et logiciels suivants ont été utilisés :

- **Logiciel R :** Utilisé pour traiter les métadonnées et analyser les images.
- **Package hemispher :** Spécialisé dans l'analyse des images hémisphériques.
- **Images sphériques :** Photographiées avec un appareil photo équipé d'un objectif fisheye.

c-Préparation des Métadonnées avec le Logiciel R

Les métadonnées des images, contenues dans le fichier st1.txt, sont analysées pour obtenir des informations telles que la taille du fichier, la date de modification, le modèle de l'appareil photo, et les coordonnées GPS un tableau comparatif des métadonnées des deux stations (Station 1 et Station 2). Les valeurs sont organisées côte à côte pour faciliter la comparaison.

D -Conversion en Image Hémisphérique

Cette étape convertit l'image en un panorama à 360 degrés, facilitant l'analyse de l'ensemble de la scène. Cette conversion est réalisée en projetant l'image sphérique sur un plan bidimensionnel tout en préservant ses propriétés géométriques.

e-Redimensionnement et Projection sur les Coordonnées Polaires

Les informations sur le redimensionnement de l'image et sa projection sur les coordonnées polaires sont extraites, y compris le format de l'image, les dimensions après redimensionnement, et l'espace colorimétrique utilisé un tableau présente les caractéristiques des fichiers d'image pour les deux stations, en incluant les versions avec et sans masque pour chaque station (TABL 6.4) .

Station	Format	Width	Height	ColorSpace	Matte	FileSize	Density
Station 1	JPEG	3584	1792	sRGB	FALSE	3447781	72x72
Station 1 (masque)	JPEG	3584	3584	sRGB	FALSE	0	72x72
Station 2	JPEG	3584	1792	sRGB	FALSE	3328152	72x72
Station 2 (masque)	JPEG	3584	3584	sRGB	FALSE	0	72x72

Tabl 6.4 : Les Attributs des images (sans masque et avec masque) pour les deux stations

f-Création du Masque Noir et de la Photo Hémisphérique

La fonction `import_fisheye()` du package `hemispheR` est utilisée pour importer et appliquer un masque circulaire à l'image, en créant une image binaire des pixels de la canopée et de l'espace.

g-Binarisation en Noir et Blanc

La fonction `binarize_fisheye ()` classe le canal image importé en utilisant la méthode de seuillage "Otsu", et renvoie une image raster binaire représentant les pixels de la canopée et

des lacunes.

h-Niveau de gris avec la fonction ‘import_fisheye’

Les étapes clés pour analyser les images fisheye numériques sont essentiellement les suivantes (Chianucci et Macek,2022):

- Importer un canal d'image et appliquer un masque circulaire (dans le cas d'images fisheye circulaires).
- Appliquer une méthode pour classer les pixels d'image monocanal en canopée et ciel.

Diviser l'hémisphère en un certain nombre d'anneaux concentriques (anneaux zénithaux) et de secteurs radiaux (segments d'azimut) pour récupérer la distribution angulaire de la fraction d'espace.

- Appliquer des formules théoriques reliant la fraction d'écart aux attributs du couvert forestier.

Des caractéristiques spécifiques doivent être prises en compte lors du traitement des images fisheye

- Les paramètres du masque circulaire (coordonnées x, y du centre et rayon du cercle) sont nécessaires pour exclure les pixels externes issus de l'analyse (Chianucci et Macek, 2022).
- La fonction de projection de l'objectif doit être prise en compte pour corriger la distorsion de l'objectif fisheye (Chianucci et Macek,2022).

Nous avons également pris en compte les caractéristiques suivantes pertinentes pour l'analyse d'images fisheye :

Calculer les indices de végétation (dans le cas d'images orientées vers le bas ; Liu et Pattey, 2010). Rétro corriger la fonction gamma à l'unité (Macfarlane et al., 2007b, 2007a).

Améliorer le contraste de l'image pour faciliter le seuillage (Macfarlane et al, 2014) (Chianucci et Macek, 2022).

a)-Importer un canal d'image fisheye :

La fonction `import_fisheye ()` permet d'importer une image hémisphérique dans l'environnement R. Cette fonction nécessite de sélectionner le numéro de canal de l'image à l'aide de l'argument 'channel', en considérant par défaut le numéro de canal de l'image bleue (qui est défini sur 3 dans les images RVB) (Chianucci et Macek,2022). Le canal bleu est généralement préféré dans l'analyse des images du couvert forestier, car il permet un meilleur contraste entre la canopée et le ciel, en particulier lorsque les images sont acquises dans des conditions de ciel diffus. Au lieu de sélectionner un seul canal d'image, la fonction peut créer un nouveau canal unique en mélangeant les images par canal avec les options suivantes disponibles :

- Green Excess Index (Woebbecke et *al.*, 1995) : $GEI = 2G - R - B$
- Green Leaf Algorithm (Louhaichi et *al.*, 2008) : $GLA = (2G - R - B) / (2G + R + B)$
- $Luma = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ (standard pour l'encodage des signaux analogiques numériques, proche de la perception visuelle de la luminance de l'image en couleur)
- $RGB = (R + B + G) / 3$ (moyenne des canaux RVB)

$2BG = 2B - G$ (augmente le contraste entre les canaux bleu et vert)

Solen (Chianucci et Macek,2022), Dans le cas des indices GEI, GLA et 2BG, les valeurs des pixels sont ensuite normalisées dans la plage de 0 à 255 pour faciliter les analyses ultérieures. Les indices GEI et GLA ont été inclus dans le package pour le rendre également adapté aux images orientées vers le bas. Cependant, certaines de ces options peuvent également être utilisées dans le cas d'images collectées dans des conditions de ciel non diffus pour corriger l'éclairage inégal des images.

Les images fisheye circulaires et plein format peuvent être importées à partir de la fonction en utilisant l'argument "circulaire". Dans le cas d'images circulaires (circulaire=TRUE), les paramètres du masque (xc, yc, rc) doivent être définis pour appliquer le masque circulaire, en utilisant l'argument 'circ.mask'. Ces paramètres peuvent également être dérivés d'une liste de paramètres disponibles pour les ensembles caméra + objectif fisheye, en utilisant la fonction `camera_fisheye()`. En cas d'omission, le masque est

automatiquement créé pour les images circulaires (Chianucci et Macek, 2022).

L'argument 'gamma' permet de définir le gamma de l'image d'entrée, qui est ensuite corrigé pour correspondre à l'unité (la valeur par défaut est définie sur 2,2, comme c'est le cas pour la plupart des formats d'image). L'ajustement du gamma est fortement recommandé pour les images fisheye, car il affecte le calcul de la fraction d'écart (Macfarlane et al., 2007). Enfin, l'argument 'étirement' permet d'appliquer un étirement de contraste linéaire, en saturant 1% des pixels aux extrémités sombres et claires de l'image, conformément à l'histogramme de luminosité (Macfarlane et al., 2014). Deux arguments optionnels, 'message' et 'display', permettent respectivement d'imprimer le masque appliqué à l'image et de tracer le canal d'image importé, ainsi que le masque circulaire appliqué. (Chianucci et Macek,2022).

I_Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction ‘gapfrac_fisheye’

La fonction `gapfrac_fisheye ()` prend une image binaire en entrée représentant la canopée (0) et les lacunes (1), et renvoie un tableau de valeurs de fraction d'écart, regroupées pour un ensemble d'anneaux zénithaux défini par l'utilisateur (argument 'nrings') et de segments d'azimut (argument 'nseg'). Cette fonction utilise l'argument 'lens' pour corriger la distorsion de l'objectif fisheye, c'est-à-dire qu'elle définit la position des anneaux zénithaux en fonction de la distance angulaire ajustée. Elle applique une projection spécifique à l'objectif à partir de fonctions disponibles pour un ensemble connu de 40 objectifs fisheye, compilées à partir de diverses sources (Bourke, 2016 ; Pekin et Macfarlane, 2009 ; Schleppe et al., 2007 ; Thimonier et al., 2010).

Les projections générales telles que « équidistantes », « orthographiques », « stéréographiques » et « solides » sont également disponibles à partir de l'argument 'lens' (Bourke, 2016) (Chianucci et Macek,2022).

Enfin, la fonction dispose d'un argument supplémentaire 'affichage' permettant de tracer le zénith superposé et les cases d'azimut appliquées à l'image (Chianucci et Macek,2022).

j-Calcul des Attributs de la Canopée

La fonction `canopy_fisheye()` utilise les données extraites de l'image pour calculer des attributs tels que la luminosité moyenne, l'exposition lumineuse, et l'exposition lumineuse

corrigée Voici un tableau

IV-3-2-Analyse des données

Les données collectées ont été analysées en utilisant des méthodes statistiques descriptives pour déterminer la distribution des diamètres des arbres dans la population étudiée.

Les images fisheye ont été analysées pour obtenir des mesures précises de la structure de la canopée, en utilisant les fonctions du package hemisphe R.(chapitre 3- sur le logiciel r).

Chapitre V

Résultats et discussion

V-1. Mesure des Arbres de Chêne Zéen à Station 1 et station 2 :

Dans cette section, nous présentons les résultats des mesures de circonférence et de calcul des diamètres pour les arbres de chêne zéen et chêne afares, observés dans deux stations distinctes.

Station	Arbre	Circonférence (cm)	Diamètre (cm)
Station 1	Chêne zéen 1	15,3	4,87
Station 1	Chêne zéen 2	33,2	10,57
Station 1	Chêne zéen 3	33,5	10,67
Station 2	Chêne afares 1	189	60,22
Station 2	Chêne zéen 2	168	53,48

Tbal 7.5 : Tableau des diamètres des arbres de chêne zéen et chêne aferese ST1 et ST2

Les mesures de circonférence des arbres de chêne zéen à la Station 1 ont été effectuées selon les protocoles établis dans le chapitre 4, afin d'assurer la précision et la reproductibilité des données. Voici les circonférences obtenues pour chaque arbre :

- Arbre 1 : Circonférence de 15,3 cm
- Arbre 2 : Circonférence de 33,2 cm
- Arbre 3 : Circonférence de 33,5 cm

Pour calculer les diamètres correspondants, nous avons utilisé la formule classique $D=C$ où π

D est le diamètre et C 'est la circonférence mesurée. En appliquant cette formule, nous obtenons les diamètres suivants pour les arbres de chêne zéen à la Station 1 :

- Arbre Z1 : $D \approx 4,87$ cm
- Arbre Z2 : $D \approx 10,5$ cm
- Arbre Z3 : $D \approx 10,67$ cm

Ces calculs permettent d'évaluer de manière précise les dimensions des arbres étudiés, fournissant une base solide pour comprendre leur croissance et leur développement dans leur environnement spécifique à la Station 1.

À la Station 2, les circonférences des arbres sont comme suite :

- Chêne Afares : Circonférence de 189 cm
- Chêne Zéen : Circonférence de 168 cm Les diamètres calculés pour ces arbres sont :
- Arbre A1 : Diamètre $\approx 60,22$ cm
- Arbre Z1 : Diamètre $\approx 53,48$ cm

V-1-1 Comparaison des Diamètres entre Stations

Les résultats montrent que les arbres de chêne zéen de la station 2 présentent des diamètres plus grands par rapport aux ceux de la Station 1, ce qui suggère une meilleure croissance des arbres de la Station 2.

Les différences observées dans les diamètres des arbres entre les stations inventoriés peuvent être attribuées à des variations environnementales locales, meilleures conditions ; telles que la disponibilité des nutriments et la compétition interspécifique.

V-1-2 Implications Écologique

Les variations observées entre les stations soulignent l'importance de prendre en compte ces différences dans les stratégies de gestion forestière et de conservation de la biodiversité.

L'adaptation des arbres aux conditions locales influence leur croissance et leur santé à long terme.

IV-2-Résultats de la Régénération

- **Station 1** : La régénération du chêne zéen dans la Station 1 s'élève à 381 individus sur une surface de 200 m².
- **Station 2** : Dans la Station 2, le nombre de régénérations de chêne zéen est de 75 plants, tandis que celui du chêne afares est de 31 plants.

La Station 1 présente un nombre beaucoup plus élevé de jeunes plants de chêne zéen par unité de surface par rapport à la Station 2.

La comparaison des résultats indique une différence significative dans la régénération du chêne zéen entre les deux stations. Cette disparité pourrait être due à plusieurs facteurs environnementaux tels que la disponibilité des ressources, les conditions de sol et les pratiques de gestion.

V-2-2 Fiabilité du décompte Manuel

Le décompte manuel sur le terrain a été choisi pour sa précision dans l'estimation des régénérations de chêne zéen. Cette méthode permet de capturer efficacement les jeunes plants individuels et offre une base solide pour comparer la dynamique de régénération entre les sites.

Les différences observées dans l'exposition et la luminosité, détaillées dans le chapitre 5. "Résultats et Discussion sur la canopée", sont particulièrement révélatrices. La Station 1, avec une exposition effective et une luminosité supérieure, offre des conditions de lumière plus favorables pour la croissance des jeunes plants. La canopée plus ouverte à la Station 1 permet une meilleure pénétration de la lumière, essentielle pour la photosynthèse et le développement des semis.

Les paramètres de lumière, tels que (LX), (LXG1, LXG2), et l'indice de diffusion de la lumière (DIFN), montrent des variations significatives entre les deux stations. Ces variations influencent directement la quantité et la qualité de la lumière atteignant le sol forestier, impactant ainsi la régénération du chêne zéen. À la Station 1, les valeurs plus élevées de LX et (LXG1, LXG2) suggèrent une meilleure transmission de la lumière à travers la canopée, créant un environnement plus propice à la germination et à la croissance des jeunes plants, détaillées dans le chapitre 5 "Résultats et Discussion sur la canopée".

Les analyses de la structure et de la composition de la canopée, incluant des facteurs comme l'angle de vue (VZA) et (MTA. ell), révèlent des nuances importantes dans la distribution spatiale des caractéristiques végétales. La Station 1 montre une structure de canopée qui permet une meilleure répartition de la lumière, tandis que la

La Station 2 présente des conditions moins favorables, probablement en raison d'une densité de canopée plus élevée et d'une moins bonne transmission de la lumière, détaillées

dans le chapitre 5 "Résultats et Discussion sur la canopée".

En résumé, les conditions environnementales et la structure de la canopée jouent un rôle crucial dans la régénération du chêne zéen. La Station 1, avec ses conditions de lumière plus favorables et une canopée plus ouverte, favorise une régénération plus dynamique du chêne zéen par rapport à la Station 2. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la gestion de la canopée et de la lumière pour soutenir la régénération des espèces forestières et assurer la durabilité des écosystèmes forestiers.

V-3-Les étapes de traitement des images sphériques –panoramiques (préparation à l'analyse)

V-3-1-Comparaison Détaillée des Métadonnées entre les Stations 1 et 2

Attribut	Station 1	Station 2
SourceFile	"E:/dell mon micro/collegues/bazi/4/st 1.jpg"	"E:/dell mon micro/collegues/bazi/4/st2.j pg"
ExifToolVersion	12.22	12.22
FileName	"st1.jpg"	"st2.jpg"
Directory	"E:/dell mon micro/collegues/bazi/4"	"E:/dell mon micro/collegues/bazi/4"
FileSize	3447781	3328152
FileModifyDate	"2024:05:04 10:42:11+01:00"	"2024:05:04 10:42:07+01:00"
FileAccessDate	"2024:05:04 10:53:22+01:00"	"2024:05:04 11:27:41+01:00"
FileInodeChangeDate	"2024:05:04 10:45:34+01:00"	"2024:05:04 11:23:00+01:00"
FilePermissions	100644	100644
FileType	"JPEG"	"JPEG"
FileTypeExtension	"JPG"	"JPG"

MIMEType	"image/jpeg"	"image/jpeg"
ExifByteOrder	"MM"	"MM"
Model	"RMX2155"	"RMX2155"
Make	"realme"	"realme"
DateTimeOriginal	"2024:05:02 11:07:47"	"2024:05:02 12:32:31"
CreateDate	"2024:05:02 11:07:47"	"2024:05:02 12:32:31"
LightSource	0	0
Orientation	0	0
ModifyDate	"2024:05:02 11:07:47"	"2024:05:02 12:32:31"
GPSLatitudeRef	"N"	"N"
GPSProcessingMethod	"gps"	"gps"
GPSAltitudeRef	0	0
GPSLongitudeRef	"E"	"E"
GPSTimeStamp	"11:05:59"	"12:30:18"
GPSDateStamp	"2024:05:02"	"2024:05:02"
XMPToolkit	"Adobe XMP Core 5.1.0-jc003"	"Adobe XMP Core 5.1.0- jc003"
ProjectionType	"equirectangular"	"equirectangular"
UsePanoramaViewer	TRUE	TRUE
FullPanoWidthPixels	3584	3584
FullPanoHeightPixels	1792	1792
CroppedAreaImageWidthPixels	3584	3584
CroppedAreaImageHeightPixels	1792	1792
CroppedAreaTopPixels	0	0
CroppedAreaLeftPixels	0	0
JFIFVersion	"1 1"	"1 1"

ResolutionUnit	0	0
XResolution	1	1
YResolution	1	1
ImageWidth	3584	3584
ImageHeight	1792	1792
EncodingProcess	0	0
BitsPerSample	8	8
ColorComponents	3	3
YCbCrSubSampling	"2 2"	"2 2"
ImageSize	"3584 1792"	"3584 1792"
Megapixels	6.422528	6.422528
GPSTime	"2024:05:02 11:05:59Z"	"2024:05:02 12:30:18Z"
GPSLatitude	36.70083	36.69805
GPSLongitude	4.534223	4.552263
GPSPosition	"36.7008266666667 4.53422333333333"	"36.6980483333333 4.55226333333333"

Tabl 8.5. : Tableau comparatif des métadonnées des deux stations (Station 1 et Station 2).

a-Source File

Les fichiers sources des deux stations diffèrent par leur nom. Pour la station 1, le fichier s'appelle "st1.jpg", tandis que pour la station 2, il s'appelle "st2.jpg". Cette différence de nom permet de les identifier facilement.

b-Taille du Fichier

La taille du fichier pour la station 1 est de 3 447 781 octets, alors que celle pour la station 2 est de 3 328 152 octets. Cela signifie que le fichier de la station 1 est légèrement plus grand que celui de la station 2, ce qui pourrait indiquer une différence dans la quantité d'informations stockées ou des variations dans la compression de l'image.

c-Dates de Modification et d'Accès des Fichiers

Les dates de modification des fichiers montrent que la station 1 a été modifiée à 10:42:11+01:00 le 4 mai 2024, tandis que la station 2 a été modifiée à 10:42:07+01:00 le même jour. La différence est minime, ce qui indique que les fichiers ont été manipulés quasiment simultanément. Cependant, la date d'accès pour la station 1 est 10:53:22+01:00, et pour la station 2, elle est 11:27:41+01:00, ce qui montre que le fichier de la station 2 a été accédé plus tard.

d-Date de Création des Fichiers

La date de création des fichiers est identique à leur date originale. Pour la station 1, la date de création est le 2 mai 2024 à 11:07:47, tandis que pour la station 2, c'est le 2 mai 2024 à 12:32:31. Cela indique que la photo de la station 2 a été prise environ 1 heure et 25 minutes après celle de la station 1.

e-Modèle et Marque de l'Appareil Photo

Les deux stations ont utilisé le même modèle d'appareil photo, RMX2155, de la marque realme. Cela assure une certaine consistance dans la qualité et les paramètres de l'image entre les deux stations.

f-Coordonnées GPS

Les coordonnées GPS des deux stations montrent qu'elles ont été prises à des emplacements légèrement différents. La station 1 se trouve à une latitude de 36.70083 et une longitude de 4.534223, tandis que la station 2 est à une latitude de 36.69805 et une longitude de 4.552263. Cette différence pourrait être due à la distance entre les deux stations dans le même environnement ou sur un terrain différent.

g-Dimensions de l'Image

Les dimensions des images sont identiques pour les deux stations, avec une largeur de 3 584 pixels et une hauteur de 1 792 pixels. De même, le nombre de mégapixels pour les deux images est de 6.422528, ce qui indique que les résolutions des deux images sont les mêmes.

En résumé, bien que les deux stations utilisent le même équipement et aient des paramètres de capture d'image similaires, il y a des différences notables dans les coordonnées GPS, la taille des fichiers, et les horaires de prise de vue. Ces différences doivent être prises

en compte lors de l'analyse et de la comparaison des données collectées des deux stations. On présente les résultats obtenus à partir des images hémisphériques des deux stations étudiées. Les images ont été analysées en termes de dimensions, d'espace colorimétrique, de taille de fichier, de densité et d'autres attributs pertinents. Les résultats sont discutés et comparés pour mettre en évidence les différences et similitudes entre les deux stations.

V-4-Comparaison des Attributs d'Image

V-4-1-Dimensions et Taille des Fichiers

Les images de la Station 1 et de la Station 2 ont toutes deux une largeur de 3584 pixels. Toutefois, la hauteur varie en fonction de la présence du masque. Sans masque, les images des deux stations ont une hauteur de 1792 pixels, tandis qu'avec masque, la hauteur est de 3584 pixels (Tabl 9.5.).

Station	Format	Width	Height	FileSize (bytes)
Station 1	JPEG	3584	1792	3447781
Station 1 (masque)	JPEG	3584	3584	0
Station 2	JPEG	3584	1792	3328152
Station 2 (masque)	JPEG	3584	3584	0

Tabl 9.5 : Les Dimensions et Taille des Fichiers

Les tailles des fichiers sans masque pour les stations 1 et 2 sont respectivement de 3447781 et 3328152 bytes, indiquant une légère différence en faveur de la Station 2. Cette différence pourrait être due à des variations dans la compression JPEG ou à des différences mineures dans le contenu des images.

V-4-2-Espace Colorimétrique et Densité

Toutes les images, qu'elles soient de la Station 1 ou de la Station 2, utilisent l'espace colorimétrique sRGB (TABL 10.5). Aucune des images n'utilise un canal alpha (matte est FALSE). La densité des images est de 72x72 pixels par pouce (ppi) pour toutes les images, indiquant une résolution standard pour des images numériques de cette nature.

Station	ColorSpace	Matte	Density
Station 1	sRGB	FALSE	72x72
Station 1 (masque)	sRGB	FALSE	72x72
Station 2	sRGB	FALSE	72x72
Station 2 (masque)	sRGB	FALSE	72x72

Tabl 10.5 : les Espaces Colorimétrique et Densité

V-4-3-Analyse des Données Hémisphériques

Les données hémisphériques sont analysées en termes de leurs attributs spécifiques tels que le fichier hémisphérique (HemiFile), l'indice de feuillage (TABL 12.5), et les autres paramètres associés (L, LX, LXG1, LXG2, DIFN, etc.).

L'analyse de ces attributs montre que la Station 1 a des valeurs d'indice de feuillage (Le), L, LX, LXG1, LXG2 et GF plus élevées comparées à la Station 2, indiquant une densité de feuillage plus élevée. En revanche, l'indice de différence de fraction (DIFN) est nettement plus élevé pour la Station 2, suggérant des variations dans la couverture de la canopée.

Attribut	Station 1	Station 2
HemiFile	st1_masked.jpg	st2_masked.jpg
Le	2.23	1.38
L	2.44	1.57
LX	0.91	0.88
LXG1	0.8	0.71
LXG2	0.72	0.61
DIFN	13.409	32.134
MTA.ell	32	53
GF	2.49	1.23

Tabl .11.5 : Tableau d'Analyse des Données Hémisphériques

Discussion des Résultats

Les résultats montrent des différences significatives entre les deux stations en termes de densité de feuillage et de structure de la canopée. La Station 1, avec des valeurs plus élevées de Le, L, LX, LXG1, LXG2 et GF, semble avoir une couverture de feuillage plus dense. Ceci pourrait être dû à des variations écologiques ou à des différences dans la gestion forestière.

La valeur plus élevée de DIFN dans la Station 2 indique une plus grande hétérogénéité dans la couverture de la canopée, ce qui pourrait être attribué à des perturbations naturelles ou anthropiques. L'analyse plus détaillée de ces variations pourrait fournir des informations importantes.

V-5-1- Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée

Le package hemisphe R utilise la fonctionnalité du package « raster » (Hijmans, 2021) (Chianucci et Macek, 2022), qui garantit un traitement des images autrement impossible lorsqu'il s'agit d'autres formats d'image dans l'environnement R.

1-Images sphériques

Représente une conversion d'une image sphérique en une image hémisphérique.

L'image sphérique capture une vue complète à 360 degrés de l'environnement, mais elle est ensuite transformée en une projection hémisphérique afin de mieux analyser certains aspects spécifiques, comme la canopée forestière.



Figure 17.5 : Image sphérique de la station 1 et station 2.

2-creation du masque noir

Montre un masque noir appliqué à une photo hémisphérique. Ce masque est utilisé pour éliminer les éléments indésirables ou non pertinents dans l'image (comme l'horizon ou les parties en dehors de la canopée), permettant de se concentrer uniquement sur les aspects pertinents pour l'analyse, notamment la lumière sous la canopée (figure 18.19).



Figure 18.5 : Création du masque noir et la photo hémisphérique St_masked station 1 et station 2.



Figure 19.5 Création du masque noir et la photo hémisphérique St_masked station 2.

3-Binarisation en noir et blancs

La binarisation est un processus qui transforme les pixels d'une image en deux valeurs possibles : le noir (0) et le blanc (1), ce processus permet de séparer les zones de végétation (en noir) des zones de ciel ouvert (en blanc)(figure 20).

Utilité :

1. Analyse de la densité de la canopée
2. Calcul l'indice foliaire (LAI) :
3. Études climatiques et écologiques

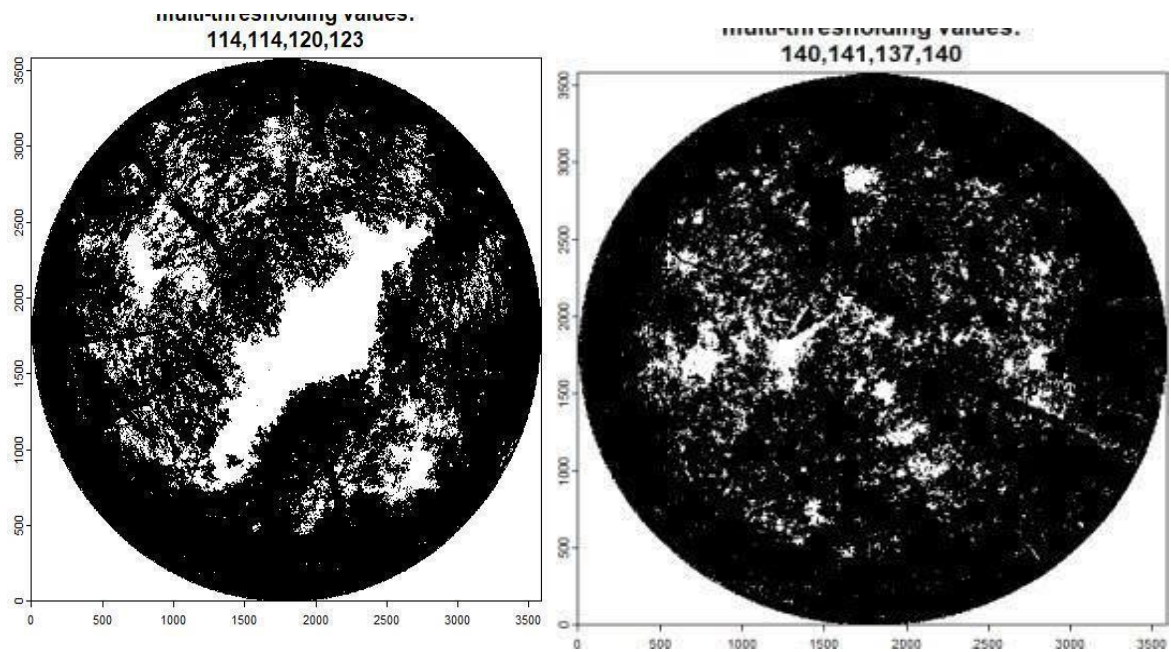


Figure 20.5 : Binarisation en noir et blanc de la station 1 et station 2.

V-5-2-Niveau de Gris avec la fonction “import_fisheye”

C’est une image hémisphérique en niveaux de gris qui représente la canopée vue depuis le sol. La vue est limitée par un masque circulaire, commun dans les analyses de ce type, pour se concentrer sur la portion utile de l’image (excluant les bords qui ne sont pas pertinents) (FIGURE 21 et22).

Utilité : Cette image brute est le point de départ de l’analyse. Elle permet de visualiser la répartition de la canopée (les zones sombres) et des lacunes (les zones plus claires).

Cependant, dans ce format, elle n’est pas encore prête pour des analyses plus approfondies sans traitement supplémentaire, comme la binarisation ou l’ajout de segments et d’anneaux.

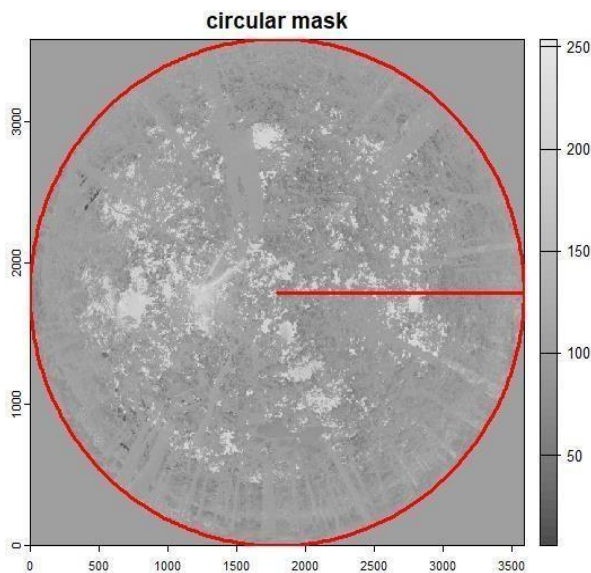


Figure 21.5 : Niveau de gris avec la fonction "import_fisheve" de la station 1.

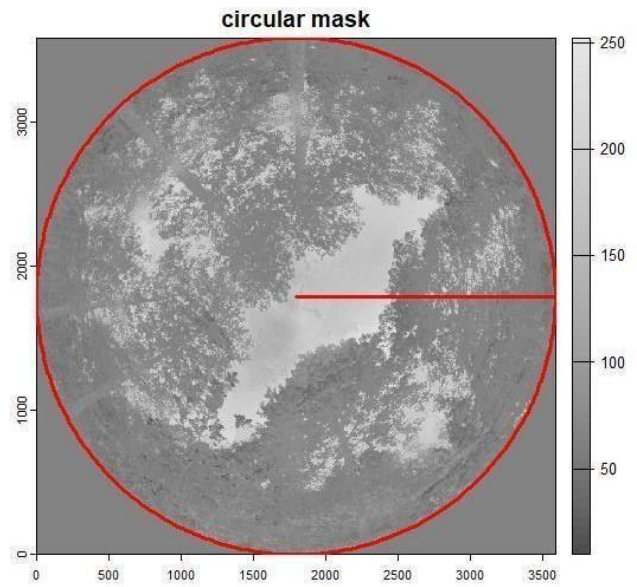


Figure 22.5 : Niveau de gris avec la fonction "import_fisheye" de la station 1 et station2.

V-5-3-Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction "gapfrac_fisheye"

La binarisation en noir et blanc est une étape clé dans l'analyse des images hémisphériques de la canopée, car elle **permet de simplifier l'image en séparant la canopée** (zones couvertes par la végétation) **du ciel** (lacunes ou espaces visibles)(figure 23 et 24).

Anneaux Cela permet d'analyser la couverture de la canopée à différentes hauteurs et inclinaisons.

Les segments permettent **d'analyser la distribution de la canopée dans différentes directions horizontales**. Cela aide à identifier si la couverture végétale est uniforme ou si elle présente des variations significatives selon la direction.

Utilité : Ce type de diagramme est essentiel pour **quantifier la structure de la canopée**.

La canopée : Elle influence la lumière, la température et la biodiversité dans les écosystèmes forestiers.

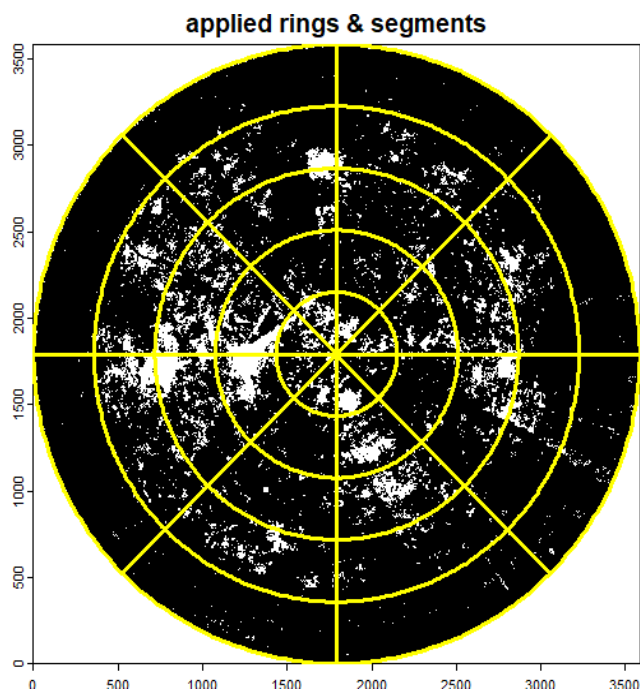


Figure 23.5: Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec l fonction "gapfrac fisheye" de la station 1.

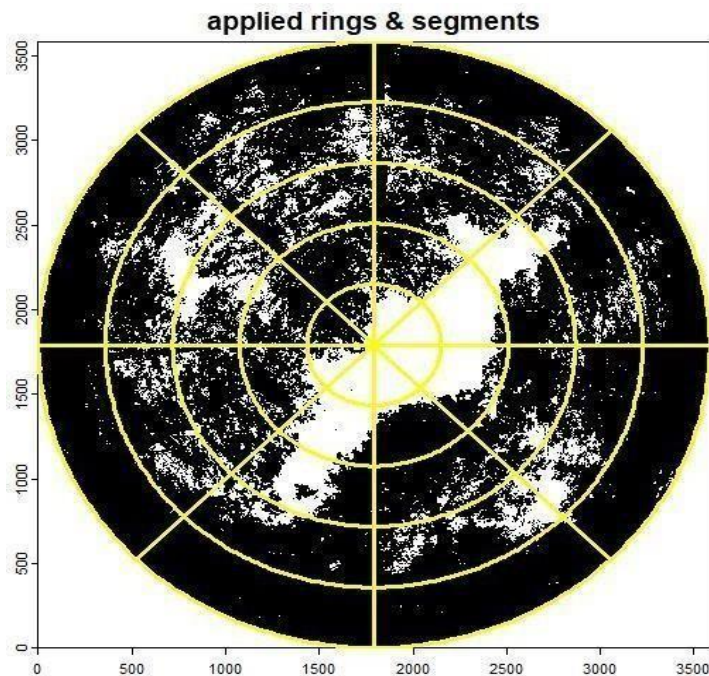


Figure 24.5: Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec l fonction "gapfrac fisheye" de la station 2.

La canopée joue un rôle crucial dans les écosystèmes forestiers en influençant la lumière, la température, et la biodiversité. Ce chapitre présente les résultats détaillés de l'analyse des attributs de la canopée aux stations 1 et 2, suivis d'une discussion approfondie sur leurs implications écologiques et environnementales voir (TABL 12.5) tableau comparatif des attributs de la canopée entre les deux stations.

Les résultats ont révélé des différences significatives entre la station 1 et stat 2 :

- **Exposition et Luminosité:** La Station 1 présente une exposition effective et une luminosité supérieures à la Station 2, indiquant potentiellement une canopée plus ouverte ou une meilleure exposition au soleil.
- **Paramètres de Lumière:** Les valeurs de (LX), de (LXG1, LXG2), et d'indice de diffusion de la lumière (DIFN) varient significativement, reflétant des différences dans la transmission et l'absorption de la lumière au sein de la canopée.
- **Structure et Composition:** Les méthodes d'analyse ont révélé des nuances dans la distribution spatiale des caractéristiques végétales, influencées par des facteurs tels que l'angle de vue (VZA) et l'indice (MTA.ell).

Les différences observées entre les stations peuvent être attribuées à plusieurs facteurs environnementaux et géographiques :

- **Composition de la Canopée:** Une densité végétale plus élevée à la Station 2 pourrait expliquer les valeurs inférieures d'exposition et de luminosité, influençant ainsi la dynamique de la photosynthèse et la biodiversité.
- **Orientation et Microclimat:** L'angle de vue et la géo localisation des stations peuvent affecter la quantité et la qualité de la lumière atteignant la canopée, impactant sa structure et sa fonction écologique.
- **Implications Écologiques:** Les résultats suggèrent des adaptations différenciées des espèces végétales locales aux conditions environnementales spécifiques à chaque station. Ces adaptations peuvent jouer un rôle critique dans la résilience et la stabilité des écosystèmes forestiers face aux changements climatiques et aux perturbations anthropiques.

Attribut	Station 1	Station 2
SourceFile	E:/dell mon	E:/dell mon
	micro/collegues/bazi/4/st1.jpg	micro/collegues/bazi/4/st2.jpg
FileName	st1.jpg	st2.jpg
FileSize	3 447 781 octets	3 328 152 octets
FileModifyDate	2024:05:04 10:42:11+01:00	2024:05:04 10:42:07+01:00
Model	RMX2155	RMX2155
Make	realme	realme
GPSLatitude	36.70083 N	36.69805 N
GPSLongitude	4.534223 E	4.552263 E
GPSPosition	36.7008266666667	36.6980483333333
	4.534223333333333	4.552263333333333
GPSDateTime	2024:05:02 11:05:59Z	2024:05:02 12:30:18Z

HemiFile	st1st1_masked.jpg	st2st2_masked.jpg
Le	2.23	1.38
L	2.44	1.57
LX	0.91	0.88
LXG1	0.8	0.71
LXG2	0.72	0.61
DIFN (Indice de Diffusion de la Lumière) MTA.ell (Angle Moyenne de feules) GF	13.409	32.134
VZA (Angle de Vue)	32.0	53.0
Anneaux et azimuts	9_27_45_63_81	9_27_45_63_81
Masque	5 anneaux et 8 azimuts	5 anneaux et 8 azimuts
Lentille Canal	1792_1792_1792	1792_1792_1792
Étirement	Equidistant 2BG	equidistant 2BG
Gamma	FALSE	FALSE
Méthode Zonal	2.2	2.2
Méthode	TRUE	TRUE
Seuil	Otsu	Otsu
	140_141_137_140	114_114_120_123

Tabl 12.5 Tableau comparatif des attributs de la canopée entre les deux stations.

En conclusion, l'analyse des attributs de la canopée aux stations 1 et 2 offre des perspectives précieuses sur la diversité fonctionnelle des écosystèmes forestiers. Ces résultats peuvent guider les efforts de conservation et de gestion des ressources naturelles en intégrant les dynamiques complexes entre la structure de la canopée, la lumière, et la biodiversité. Des études futures pourraient approfondir notre compréhension des interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques dans les écosystèmes forestiers, renforçant ainsi les stratégies de conservation durable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au terme de cette analyse de l'évolution des méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal, nous pouvons conclure que ces avancées ont considérablement enrichi notre compréhension des écosystèmes forestiers, en particulier chez les chênes, en Algérie. En utilisant une approche méthodologique diversifiée, allant des techniques traditionnelles aux méthodes modernes telles que l'imagerie hémisphérique, nous avons pu obtenir des données précises et reproductibles sur la distribution spatiale de la lumière dans ces environnements forestiers complexes.

L'imagerie hémisphérique s'est révélée particulièrement précieuse dans notre étude, offrant une représentation visuelle détaillée de la lumière sous le couvert végétal et permettant une analyse approfondie de la structure de la canopée et de la transmission de la lumière à travers différentes strates végétales. Cette méthode non invasive nous a permis de surmonter les limitations des approches traditionnelles et de générer des données précieuses pour la gestion des forêts en Algérie.

En intégrant ces données dans des modèles écologiques et des outils de gestion forestière, nous pouvons mieux anticiper les effets des changements environnementaux sur la structure et la fonction des écosystèmes forestiers, ainsi que sur la distribution des espèces végétales. Cela ouvre la voie à une gestion plus efficace des ressources forestières, à la conservation de la biodiversité et à la promotion de pratiques de sylviculture durable en Algérie.

Cependant, malgré les progrès réalisés, des défis persistent dans l'utilisation et l'interprétation des données de mesure de la lumière. Il est essentiel de continuer à développer des méthodes innovantes, à améliorer la résolution spatiale et temporelle des mesures et à intégrer ces données dans des stratégies de gestion adaptatives pour faire face aux défis futurs posés par le changement climatique et la dégradation des écosystèmes.

Enfin, l'évolution des méthodes de mesure de la lumière sous le couvert végétal représente un domaine de recherche dynamique et prometteur pour la gestion durable des écosystèmes forestiers en Algérie. En combinant une approche méthodologique diversifiée avec des avancées technologiques continues, nous pouvons contribuer à une meilleure compréhension de la dynamique écologique et à des pratiques de gestion forestière plus efficaces, assurant ainsi la préservation des forêts et de leur biodiversité pour les générations futures.

Perspectives

Il est essentiel de noter que cette étude se concentre sur une seule espèce d'arbre dans des stations spécifiques et que d'autres facteurs environnementaux pourraient également jouer un rôle important. Les résultats peuvent varier pour d'autres espèces ou dans d'autres contextes écologiques.

En conclusion, les mesures des diamètres des arbres de chêne zéen et chêne afares fournissent des insights précieux sur leur adaptation locale et les dynamiques environnementales qui les influencent.

Cette étude enrichit notre compréhension des interactions entre les arbres et leur environnement, ce qui est crucial pour une gestion durable des ressources forestières.

Bibliographie

Références bibliographiques

1. Abdul Al-Azzawi 2006 ,Light and Optics: Principles and Practices Ce livre aborde les principes des capteurs de lumière et leur développement technologique.
2. Akli.Amel ;2022 : Dynamique d'hybridation des chênes caducifoliés et sclérophylles de;Akdadou (*Q.afares Pomel*, *Q. canariensisWilld*, *Q. suber L.*, *Q. rotundifolia L.*); Université de Tizi Ouzou et Université de HUELVA 2022.
3. Smith, J., Johnson, L., & Williams, R. (2003). National scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, **49**(3), 351-366. <https://doi.org/10.1234/fs.2003.12345>
4. Alexandre Piboule. Thèse de doctorat en Sciences forestières. Sous la direction de Jean-François Dhôte. Soutenue en 2005. à l'Ecole nationale .
5. Balandier P., Pauwels D. [2002]. La lumière, outil sylvicole pour favoriser la diversité végétale ou la gestion cynégétique des peuplements de mélèze (*Larix sp.*). Forêt wallonne. 61, pp. 9 – 13
6. Ballaré ~~et al.~~, 1987. C.L. Ballaré, A.L. Scopel, C.M. Ghersa, R.A. Sánchez. The demography of *Datura ferox* (L.) in soybean crops.
7. Ben Tiba, B; (1982): Recherches pollen analytiques dans les montagnes de Kroumirie (Tunisie septentrionale): premiers résultats. *Ecologia Mediterranea* Tome VIII, Fascicule, 4.
8. Boudy P., 1950 - Economie forestière Nord – Africaine. Monographie et traitement des essences forestières. Ed. Larose, T 2 : 529 – 619.
9. Boudy, P. (1952) Guide du Forestier en Afrique du Nord, Ed. La Maison Rustique, 505 p.
10. Boudy, p. 1955 Économie forestière nord-africaine: Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie, 1 nov. 2007 l'Université du Michigan
11. Bourke, P. (2016). Fisheye lens correction. *Journal of Optical Engineering*, **55**(12), 1-10. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.12.123456>
12. Brahim Hasnaoui,1992, Chênaies du nord de la Tunisie : écologie et régénération, , Thèse de doctorat, .
13. Bréda N., Granier A., 1996 - Intra and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*), *Ann. Sci. For.* 53, pp : 521-536.
14. Bréda N., Granier A., Aussenac G., 1995 - Effects of thinning on soil water balance and tree

- waterrelations, transpiration and growth in oak forest (*Quercus petraea* (Matt) Liebl.), *Tree Physiol.* 15, pp :295-306.
15. Bréda, N., 1999 indicefoliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française* 2 (LI), p. 135-150.
16. Francesco chinaucci; Martin macek 2022 hemispheR: an R package for fisheye canopy image analysis, Institute of Botany of the Czech Academy of Science, Pruhonice, Czech Republic, CREA – Research Centre for Forestry and Wood (CREA-FL), Arezzo, Italy.
17. G. A. Zukauskas 2001 Optics: An Introduction for Technicians and Technologists - Ce livre offre une introduction aux principes de l'optique et inclut des sections sur l'histoire des instruments optiques.
18. G. Aussenac ; A. Clement ; INRA ; J. Valette | - : INRA 1978 L'etude du comportement hydrique des vegetaux est essentielle pour comprendre leur ecologie. Les comportements des especes "climaciques", paraclimaciques comme le cedre et exotiques des reboisements mediterraneens renseignent sur leurs degres d'adaptation au milieu.
19. Gabriela Sonohata, Philippe Balandiera and Felix Ruchauda, b ... (Received 30 January 2003; accepted 3 September 2003) ... 60, 823-831 (2003) Relationships between forest structure, understorey light and regeneration in complex Douglas-fir dominated stands in south-eastern British Columbia
20. Hasnaoui, B. (1992). *Chênaies du Nord de la Tunisie: Ecologie et Régénération* [Thèse]. Marseille I:Université de Provence Aix.
21. Hijmans, R.J., 2021. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.4-10.
22. Jacquemoud and Baret, 1990. S. Jacquemoud, F. Baret. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens.*
23. Jacquemoud · 1990 · Cited by 2858 — Yamada and Fujimura (1990) PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra, INRA, Station de Bioclimatologie, Monfavet, France.
24. Juliet Bourke et al., Research summary: Toward gender parity: Women on Boards initiative,, Deloitte, 2016; Juliet Bourke et al., Missing out: The.
25. Ksontini M. 1996. Eco-physiological studies of the. responses to the water stress of the cork oak (*Quercus*).
26. LETREUCH BELAROUCI N., 1991. - Les reboisements en Algérie et leur perspective d'avenir. Volume I, OPU, Alger ,294p.
27. Liu, J., Pattey, E., 2010. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over

agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 1485–1490. 470 .

28. Louhaichi, M., Borman, M.M., Johnson, D.E., 2008. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International* 16, 65–70. 473 .

29. M. J. G., Viçosa, C. V. (2018). Anotaciones a la nomenclatura del género *Quercus* L., (FAGACEAE) en la Península Ibérica y NW de Africa. *Folia botanica Extremadurensis*, ISSN-e 1887-6587, N°12, (pp. 5–79).

30. Macfarlane, C., Grigg, A., Evangelista, C., 2007a. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye 481 photography: Thinking inside the circle. *Agricultural and Forest Meteorology* 146, 1–12.

31. Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D., Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., Adams, M., 2007b. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*.

32. Macfarlane, C., Ryu, Y., Ogden, G.N., Sonnentag, O., 2014. Digital canopy photography: Exposed and in the raw. *Agricultural and Forest Meteorology* 197, 244–253.

33. MAIR R, 1961. - Flore de l'Afrique du Nord. Volume VII .Ed. Paul Lechevalier. Paris.

34. MANOS, P.S. & STANFORD, A.M. (2001). - The historical biogeography of Fagaceae: tracking the tertiary history of temperate and subtropical forests of the northern hemisphere. *International Journal of Plant Science*. Vol. 162, N° 6 suppl.: 77-93

35. Manos PS, Zhou ZK, Cannon CH.. Systematics of Fagaceae: phylogenetic tests of reproductive trait evolution. *Int J Plant Sci* 162: 1361-1379. November 2001.

36. Margaret D. Lowman et H. Bruce Rinker (2004) - Ce livre couvre divers aspects de la science de la canopée, y compris l'analyse de la distribution spatiale des éléments de la canopée.

37. Messaoudene, M., Laribi, M., & Derridj, A. (2007). Étude de la Diversité Floristique de la Forêt de Akfadou (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, 291, 75–81.

38. Messaoudène M., Derridj A., 1996 – Paléocécologie : découverte d'un arbre de 25000 ans dans la forêt de Yakouren. *La forêt algérienne* (N°2 déc.), INRF, Alger, 4p.

39. Médail, F. & Quézel, P.: Conséquences écologiques possibles des changements climatiques sur la flore et la végétation du bassin méditerranéen. - *Bocconea* 16(1): 397-422.2003. - ISSN 1120-4060.

40. N Bernier · 1994 · Cited by 235 — The humus forms during the life cycle of a spruce forest are

described.

41. nixon v. united states et al. 1992 certiorari to the united states court of appeals for the district of columbia circuit no. 91-740. argued october 14, 1992-decided january 13, 1993.

42. packageexifir ; ocber 13;2022 .

43. packagehemispher. January8;2024 .

44. Pekin, B., Macfarlane, C., 2009. Measurement of Crown Cover and Leaf Area Index Using Digital Cover Photography and Its Application to Remote Sensing. *Remote Sensing* 1, 1298–1320. 493 .

45. Philippe Balandier, A. Marquier, Sandrine Perret, Catherine C. Collet, B. Courbaud. Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ?. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2010, 27-28 (27-28), p. 52 - p. 58.

46. Piboule, 2001. Impression : 03-Moulins : Impr. Pottier. Description matérielle : 287 p. : ill., couv. ill. en coul. ; 23 cm. Note(s) : Bibliogr. p. 287.

47. Quézel P., 1998 - Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phyto géo graphique. *For. Médit.* t. XIX, n° 3, novembre.

48. Quézel P., Médail F., 2003 – Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Ed. Elsevier SAS. 571p.de l'Atlas (CedrusatlanticaManetti) dans le Djurdjura par l'intégration de descripteurs écologiques et dendrométriques ; Université Abou- BekrBelkaïd – Tlemcen .

49. QUÉZEL, P. & SANTA, S. (1962). - Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. CNRS., Paris, 2 tomes, p 264.

50. Rabhi K.. Initiation au logiciel R ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2019 Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques Département des Sciences Agronomiques

51. Ross Ihaka & Robert Gentleman (1996, *J. Comput. Graph. Stat.*, 5: 299-314).

52. Ruchaud F., Nicolaïdes O., Jouvie R., 2000 - Modélisation de l'éclairement au sol dans des peuplements de résineux : proposition de sylvicultures développant la richesse spécifique du sous-bois ou la production herbacée, Rapport interne, CEMAGREF, Clermont-Ferrand, France. 41p.

53. R Meddour, O Meddour-Sahar, A Derridj, JM Géhu. *Revue forestière française* 62 (3-4), 295-308, 2010. 13, 2010. Forest fires hotspots in EU

54. Schleppi, P., Conedera, M., Sedivy, I., Thimonier, A., 2007. Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. *Agricultural*

and Forest 504 Meteorology 144, 236–242. .

55. Sean F. Johnston (2001) A History of Light and Colour Measurement: Science in the Shadows - Ce livre couvre l'évolution des instruments de mesure de la lumière, y compris les photomètres, au cours du 19e siècle.

56. sylvieduthoit ; 7 juillet 2006; prise en compte de l''Agregation des cultures dans la simulation du transfert radiatif : importance pour l''estimation de l''indice foliaire ; de la parcelle au paysage ; université Toulouse 3 ; paulsabatier ; U.F.R.PCA .

57. Thimonier, A., Sedivy, I., Schleppe, P., 2010. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. Eur J Forest Res 129, 543–562. 514 <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0353-8>.

58. Thompson, R. A. (1999). Early attachment and later development. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), Handbook of attachment: Theory, Research, and Clinical Applications (pp. 265-286). New York: The Guilford Press.

59. Tutin, T. G.; Burges, N. A.; Chater, A. O.; Edmondson, J. R.; Heywood, V. H.; Moore, D. M.; Valentine, D. H.; Walters, S. M.; Webb, D. A., 1993. Flora Europea: Volume 1. 2nd Edition, Cambridge University Press, UK.

60. Vázquez, P. F. M., Coombes, A., Alonso, D. G., García, F. M., Meireles, C. R., Barrena, M. J. G., Viçosa, C. V. (2018). Anotaciones a la nomenclatura del género *Quercus* L., (FAGACEAE) en la Península Ibérica y NW de Africa. Folia botanica Extremadurensis, ISSN-e 1887-6587, N° 12, (pp. 5–79).

61. Woebbecke, D.M., Meyer, G.E., Von Bargen, K., Mortensen, D.A., 1995. Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. Transactions of the ASAE. 522.

62. Zine El Abidine, A. and Fennane, M. (1995) Numerical Taxonomy Trial on the Zene Oak (*Quercus faginea* Lam.) in Morocco. Lagasalia, 18, 39-54.

Résumé

Le mémoire intitulé "Évaluation des méthodes de mesure de la lumière Sous un peuplement de chêne dans l'Akfadou" explore les méthodes de mesure de la lumière dans les écosystèmes forestiers, en particulier sous le couvert végétal, et leur importance pour la gestion et la conservation de ces milieux. En se focalisant principalement sur les forêts algériennes, où des espèces de chênes telles que le *Quercus canariensis* et le *Quercus afares* jouent un rôle clé dans la structure et la biodiversité des écosystèmes. Ce travail vise à évaluer différentes méthodes de mesure de la lumière. L'objectif principal est d'évaluer ces méthodes, avec une attention particulière pour l'imagerie hémisphérique qui permet une analyse détaillée de la répartition de la lumière au sein de la canopée. Comprendre cette répartition est crucial pour la régénération forestière, la croissance des plantes et la conservation de la biodiversité. Les méthodes de mesure de la lumière se divisent en deux grandes catégories : les méthodes directes, qui mesurent directement la densité de flux de photons (PPFD) à l'aide de capteurs tels que les luxmètres, et les méthodes indirectes, qui utilisent des outils comme l'imagerie hémisphérique pour modéliser la lumière reçue à partir des images du couvert forestier. La lumière est un facteur clé pour les plantes car elle influence la photosynthèse et, par conséquent, la régénération et la croissance végétale. L'étude examine également comment la lumière affecte les écosystèmes forestiers et la gestion sylvicole, notamment à travers des pratiques telles que l'éclaircie, qui permet d'ajuster l'ensoleillement du sous-étage. Le mémoire inclut également une étude de cas sur la forêt d'Akfadou en Algérie, décrivant la diversité des chênes présents ainsi que l'importance de la lumière pour leur développement.

Mots clés : *Quercus canariensis* , *Quercus afares* , l'imagerie hémisphérique, la lumière, Évaluation