

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences Agronomiques

Option : Ecologie forestière

Thème

Analyse Spatiale du Cèdre de l'Atlas au Lac Noir (Akfadou) et Effet de la Lumière sur la Régénération Naturelle

Réalisé par :

GAOUA Saliha

Devant le jury :

Président : Dr. MENHOUK Nacera à l'UMMTO.

Promoteur : Pr. RABHI Khellaf à l'UMMTO.

Examineur : Dr. ADJAOUD Drifa à l'UMMTO.

Promotion 2024-2025

Remerciements

*J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrant
« Pr RABHI Khellaf » pour ces précieux conseils et son soutien permanent.*

Mes remerciements vont également à :

*A Dr. MENHOUK Nacera et Dr. ADJAOUD Drifa de nous avoir honorés
par leur présence pour évaluer ce travail.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon mari Karim et mes filles « Lina » et « Líticia ».

A ma famille.

A tous mes amis qui m'ont soutenu pour la réalisation de ce travail.

Saliha

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude dans la forêt d'Akfadou (Rabhi, 2009).....	8
Figure 2 : Projection des postes météorologique sur le climagramme d'Emberger	11
Figure 3 : Diagramme ombrothermique pour le point d'altitude moyenne de la forêt d'Akfadou.....	12
Figure 4 : FoxPoi 360° Photo Sphere Cam une application innovante conçue pour capturer des images sphériques à 360 degrés. (google play)	15
Figure 5 : Image sphérique (prise par GAOUA S. avec FoxPoi 360° Photo Sphère 2025).....	17
Figure 6 : Création du masque noir à la photo hémisphérique	19
Figure 7 : Binarisation en noir et blanc	19
Figure 7 : Niveau de gris avec la fonction "import_fisheye" de la station	20
Figure 8 : Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction "gapfrac_fisheye" de la station	21
Figure 9 : Cartographie de la placette	23
Figure 10 : Présentation des semis sous et avec les houppiers des chênes voisins.....	23
Figure 11 : Présentation des cèdres en fonction de leurs diamètres.....	23
Figure 12 : Densité des semis au dm ²	24
Figure 13 : Division de la placette en quadras	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les Attributs des images (sans masque et avec masque) pour la station d'étude.....	18
Tableau 2 : Liaison entre le nombre de semis et DIFN (degré d'ouverture de la canopée.....	24
Tableau 3 : Comparatif des attributs de la canopée entre les placettes.....	26

Sommaire

Introduction	1
 <i>Chapitre I : Le cèdre de l'atlas—écologie, répartition et enjeux de conservation</i>	
I.1. Répartition géographique et écologie du cèdre de l'Atlas.....	3
I.2. Dynamique de croissance et régénération du cèdre	3
I.2.1. Régénération naturelle et contraintes	3
I.2.2. Reboisements et plantations.....	4
I.3. Menaces et facteurs de dépérissement	4
I.3.1. Changements climatiques et stress hydrique	4
I.3.2. Pressions anthropiques.....	4
I.4. Stratégies de conservation et de gestion durable des cédraies	4
 <i>Chapitre II : Impact de la lumière sur la régénération du cèdre de l'atlas</i>	
II.1. Rôle de la lumière dans la régénération forestière	6
II.2. Lumière et croissance des jeunes cèdres	6
II.2.1. Adaptation des jeunes plantes en fonction du gradient lumineux	6
II.2.2. Influence de la lumière sur l'architecture des semis	7
II.3. Régénération sous différents régimes lumineux.....	7
 <i>Chapitre III : Zone d'étude</i>	
III.1. Localisation du foret de l'Akfadou	8
III.2. Le relief et topographie	9
III.3. Le substrat géologique et la pédologie de la forêt de l'Akfadou.....	9
III.4. Le climat et le bioclimat de la forêt de l'Akfadou	9
III.5. Climagramme d'Emberger	10
III.6. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	11
III.7. La végétation de la forêt d'Akfadou	12

Chapitre IV: Matériels et méthodes

IV.1. Méthodologie d'étude	14
IV.1.1. Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée.....	14
a- Images hémisphérique	15
b- Traitement des Images Sphériques	18
c- Préparation des Métadonnées avec le Logiciel R.....	18
d- Conversion en Image Hémisphérique.....	18
e- Redimensionnement et Projection sur les Coordonnées Polaires.....	18
f- Création du Masque Noir et de la Photo Hémisphérique	19
g- Binarisation en Noir et Blanc	19
h- Niveau de gris avec la fonction ‘import_fisheye’	20
i- Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction ‘gapfrac_fisheye’	21
i- Calcul des Attributs de la Canopée.....	21
IV.2. Analyse des données	22

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1. Spatialisation de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas	23
V.2. Analyse des données hémisphériques	25
V.3. Discussion des Résultats	26
Conclusion générale	28
Références bibliographiques	29



Introduction

générale

Introduction générale

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) est une essence forestière emblématique des massifs montagneux d'Afrique du Nord. Présent principalement en Algérie et au Maroc, il joue un rôle écologique fondamental dans la régulation hydrique, la conservation des sols et la préservation de la biodiversité. En tant qu'espèce clé des écosystèmes montagnards, il offre un habitat à de nombreuses espèces animales et contribue à l'équilibre des écosystèmes forestiers (M'hirit, 1994).

Cependant, malgré sa résilience naturelle, les cédraies nord-africaines sont confrontées à de nombreuses menaces, notamment :

- Le changement climatique, qui entraîne une augmentation des sécheresses et une diminution des précipitations ;
- La régénération difficile du cèdre en raison, de la pression exercée par le pâturage ;
- Vieillessement des peuplements.

Dans ce contexte, l'analyse spatiale devient un outil incontournable pour comprendre la dynamique des cédraies et les facteurs influençant leur régénération.

Le Lac Noir, situé dans la forêt domaniale de l'Akfadou-est (Wilaya de Béjaia) en Algérie, constitue un site d'étude privilégié pour l'observation de la régénération naturelle du cèdre. Cette région, caractérisée par une diversité écologique importante, offre un terrain idéal pour analyser l'effet de la lumière sur la croissance et la survie des jeunes semis.

Problématique et Objectifs de l'Étude

Face aux défis environnementaux et aux contraintes de régénération du cèdre de l'Atlas, d'autant plus que l'espèce est protégée par la réglementation algérienne, sa régénération est déficiente d'où l'intérêt de l'étude et il est essentiel de répondre aux questions suivantes :

- ✓ Comment l'ouverture de la canopée, donc, l'accès à la lumière influence-t-elle la croissance et la régénération du cèdre au Lac Noir ?
- ✓ Quelles sont les zones les plus favorables à son implantation en fonction des paramètres environnementaux ?

- ✓ Comment l'analyse spatiale peut-il aider à mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes ?

L'objectif principal de ce mémoire est donc d'étudier la relation entre l'éclairement et la régénération du cèdre de l'Atlas au Lac Noir, en combinant relevés de terrain et position spatiale des arbres adultes et des semis. Plus spécifiquement, il s'agira de :

- ✓ Cartographier la distribution des jeunes semis de cèdre en fonction de l'exposition lumineuse.
- ✓ Analyser les effets de l'ombrage et de la lumière sur la croissance des arbres.
- ✓ Proposer des recommandations pour une meilleure gestion et conservation des cédraies.
- ✓ Appliquer une méthode de mesure de la lumière basée sur le traitement d'image hémisphérique par le biais du langage de programmation R.



Chapitre I

*Le cèdre de l'Atlas-écologie, répartition
et enjeux de conservation*

I.1. Répartition géographique et écologie du cèdre de l'Atlas

En Algérie, le cèdre de l'Atlas couvre naturellement 33000 hectares répartis en plusieurs massifs. Les cédraies s'organisent en deux blocs (humide et sec). Le bloc constituant les cédraies de l'Atlas tellien est individualisé en quatre îlots : le massif du Djurdjura (2000 ha), des Babors (1300 ha), de l'Ouarsenis (1000 ha) et du mont blidéen (1000 ha) sur grès calcaire, schiste et marno-calcaire (Derridj, 1990 ; M'hirit, 1999). L'ensemble le plus important est celui des cédraies de l'Atlas saharien qui renferme d'importants peuplements dans les monts des Aurès et du Belezma (17000 ha) ainsi que dans les monts du Hodna (8000 ha) sur dolomies et calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur et sur calcaire du Crétacé inférieur (Abdessemed, 1981). Le cèdre de l'Atlas est principalement présent en Algérie, au Maroc et dans une moindre mesure en Tunisie. En Algérie, les principales cédraies se situent dans les massifs du Djurdjura, des Aurès, des Babors, de Chréa et de l'Ouarsenis (Messaoudène *et al.*, 2013).

Les cédraies se développent sous de conditions écologiques spécifiques :

- **Altitude** : entre 1 400 et 1800 m, où l'humidité est suffisante pour assurer leur croissance (Bentouati et Oujehih, 1999).
- **Climat** : méditerranéen montagnard, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers froids et humides.
- **Sols** : de nature calcaire ou siliceuse, riches en matière organique et bien drainés (Messaoudène *et al.*, 2013).

Les cédraies algériennes jouent un rôle écologique fondamental : elles protègent les sols contre l'érosion, régulent le cycle de l'eau et offrent un habitat à une biodiversité unique (Meddour, 2010).

I.2. Dynamique de croissance et régénération du cèdre

La régénération du cèdre peut être naturelle ou artificielle, mais elle rencontre de nombreux obstacles.

I.2.1. Régénération naturelle et contraintes

La régénération naturelle repose sur la germination des graines, mais elle est limitée par plusieurs facteurs :

- **Lumière** : Une couverture forestière modérée favorise l'établissement des jeunes semis (Messaoudène *et al.*, 2013).
- **Humidité du sol** : Indispensable pour assurer une croissance optimale.
- **Pâturage excessif** : La consommation des jeunes plants par le bétail freine fortement leur développement (Bentouati et Oujehih, 1999).

Les études réalisées dans les Aurès et dans le Djurdjura montrent que la régénération est plus efficace dans les zones ouvertes, où l'équilibre entre lumière et humidité est optimal (Messaoudène *et al.*, 2013).

I.2.2. Reboisements et plantations

En réponse à la faible régénération naturelle, des efforts de reboisement ont été entrepris dès la fin du XIX^e siècle. Plusieurs campagnes ont eu lieu en 1860, 1890, 1940 et 1960, notamment autour des arboretums et maisons forestières. Toutefois, leur réussite reste inégale selon la qualité des sols et des techniques employées (Messaoudène *et al.*, 2013).

I.3. Menaces et facteurs de dépérissement

I.3.1. Changements climatiques et stress hydrique

Les sécheresses successives des dernières décennies, notamment celles de 1996-2002, ont provoqué un dépérissement important des cédraies des Aurès et de Theniet El Had (Kherchouche *et al.* 2013).

I.3.2. Pressions anthropiques

- **Coupes illicites** : Le cèdre est convoité pour son bois de haute qualité, ce qui entraîne une surexploitation (Messaoudène *et al.*, 2013).
- **Surpâturage** : La pression du bétail empêche la régénération naturelle (Bentouati et Oujehih, 1999).
- **Incendies de forêt** : Le stress hydrique accentue l'inflammabilité du sous-bois, augmentant la fréquence des feux.

1.4. Stratégies de conservation et de gestion durable des cédraies

Face à ces menaces, plusieurs actions de conservation ont été mises en place :

- **Création d'aires protégées** : Des parcs nationaux comme celui du Djurdjura permettent de préserver les cédraies (Messaoudène *et al.*, 2013).
- **Suivi des peuplements via SIG et télédétection** : Ces outils permettent d'identifier les zones sensibles et d'orienter les efforts de conservation (Rondeux, 1993).
- **Reboisement ciblé et gestion sylvicole durable** : Une attention particulière doit être portée au choix des sites et à l'entretien des plantations (Bentouati et Oujehih, 1999).
- **Sensibilisation et implication des populations locales** : L'intégration des habitants dans la gestion forestière est essentielle pour la réussite des programmes de conservation (Messaoudène *et al.*, 2013).



Chapitre II

*Impact de la lumière sur la
régénération du cèdre de
l'Atlas*

II.1. Rôle de la lumière dans la régénération forestière

La lumière est l'un des facteurs écologiques les plus déterminants pour la régénération du cèdre de l'Atlas. Elle influence à la fois la germination des graines, la croissance des semis et leur capacité à résister au stress hydrique (Balandier *et al.* 2010).

- **Effet de l'éclairement sur la germination :** L'augmentation de la lumière favorise l'émergence des jeunes plantules en améliorant la photosynthèse et en stimulant la croissance des racines (Ponge *et al.* 1994).
- **Compétition pour la lumière :** Les semis de cèdre se retrouvent souvent en compétition avec la strate herbacée et les espèces de sous-bois qui limitent leur accès au rayonnement solaire (Dubé, 2007).
- **Influence de la lumière sur la morphologie des semis :** Un éclairement insuffisant entraîne une élongation des tiges et une réduction de la masse foliaire, rendant les jeunes plantes plus vulnérables (Balandier et Pauwels, 2002).

II.2. Lumière et croissance des jeunes cèdres

L'intensité lumineuse influence directement la **croissance aérienne et racinaire** des semis de cèdre.

II.2.1. Adaptation des jeunes plantes en fonction du gradient lumineux

Les études montrent que les semis réagissent de manière différenciée selon leur exposition à la lumière :

- Faible éclairement → Développement de feuilles plus larges et augmentation du taux de chlorophylle (Smith, 1982).
- Éclairement modéré → Croissance équilibrée entre parties aériennes et racines, favorisant une meilleure résistance au stress hydrique (Sonohat *et al.*, 2004).
- Éclairement excessif → Réduction de la surface foliaire et augmentation du stress hydrique, pouvant entraîner une mortalité estivale élevée (Aussenac et Granier, 1978).

II.2.2. Influence de la lumière sur l'architecture des semis

- Un excès de lumière provoque une limitation du développement racinaire et un risque accumulé de sécheresse (Aussenac et Valette, 1982).
- En forêt dense, la faible luminosité favorise un développement rapide en hauteur, mais au détriment du diamètre des semis (Balandier *et al.*, 2010).

II.3. Régénération sous différents régimes lumineux

Les modèles de régénération du cèdre montrent que la lumière joue un rôle clé dans la dynamique des populations forestières.

- **Régénération en pleine lumière** : Croissance rapide mais forte sensibilité au stress hydrique (Ducrey, 1993).
- **Régénération sous couvert forestier** : Croissance lente mais meilleure protection contre la sécheresse (Courbet *et al.*, 2012).
- **Effet des clairières et des éclaircies sylvicoles** : La gestion de la lumière via des éclaircies permet d'optimiser la régénération naturelle (Balandier et Pauwels, 2002).



Chapitre **III**

Zone d'étude

III.1. Localisation de la forêt de l'Akfadou

Le massif forestier d'Akfadou est situé à la confluence de deux chaînes de montagnes : la chaîne du Djurdjura et la chaîne côtière. Il se trouve à environ 50 km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou et à moins de 20 km de la mer Méditerranée en ligne droite.

La forêt d'Akfadou s'étend sur une superficie de 11 000 hectares, ce qui représente 18% des forêts de chênes caducifoliés en Algérie (Messaoudene et *al.*, 2007).

Cette forêt est propriété de l'État et est divisée en deux parties, l'Akfadou Ouest et l'Akfadou Est, qui relèvent respectivement des wilayas de Tizi-Ouzou (4 600 ha) et de Bejaia (6 400 ha).

Les sites choisis pour cette étude se trouvent dans la partie ouest de l'Akfadou, délimitée par :

- La tranchée pare-feu qui sépare l'Akfadou Est (Bejaia) et l'Akfadou Ouest (Tizi- Ouzou) au nord-est.
- La forêt domaniale de Beni Ghobri au nord-ouest.
- La forêt domaniale de Beni Ghobri et des terrains privés à l'ouest.
- La forêt de l'Akfadou Est à l'est et au sud.
- Les terrains privés de la daïra de Bouzeguène.

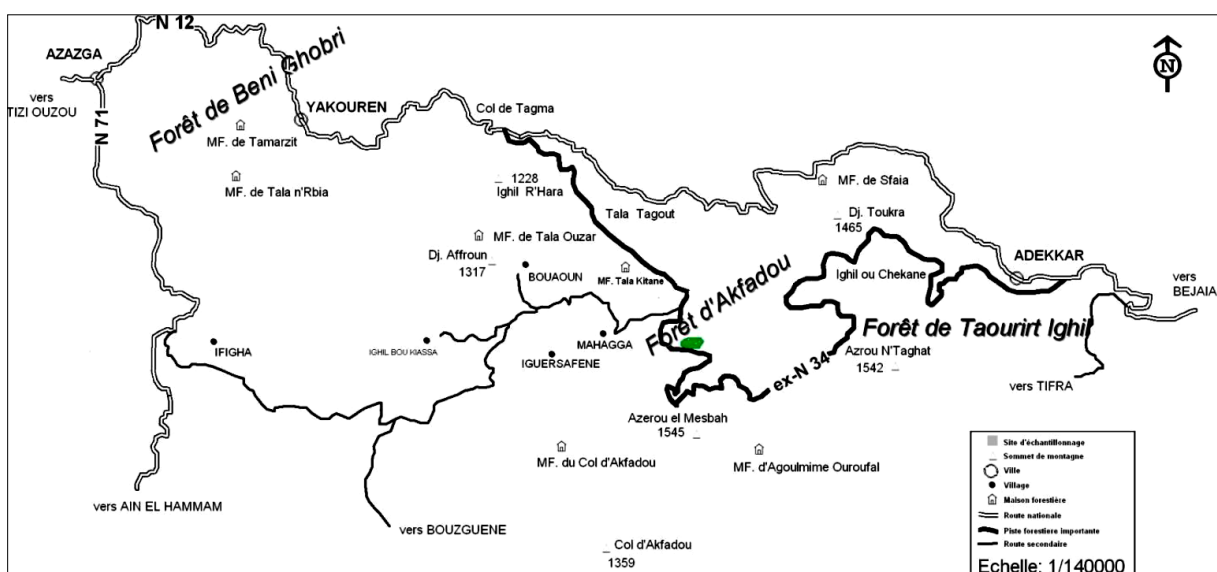


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude dans la forêt d'Akfadou (Rabhi, 2009).

III.2. Le relief et topographie

Le relief de cette région est caractérisé par des montagnes, formant une succession de crêtes. Les deux principales crêtes s'orientent Est Nord-Est et Ouest Sud-Ouest dans la partie Nord de l'Akfadou, puis Nord Nord-Est et Sud Sud-ouest dans la partie orientale. L'altitude varie entre 870 mètres et 1646 mètres, avec une altitude moyenne de 1200 mètres (Anonyme, 1988).

Les sommets les plus importants comprennent Djbel Afroun (1317 m), Djbel Toukra (1465 m), Azrou El Mesbah (1450 m), Azrou n'Taghat (1542 m), Tala Guizane (1623 m) et le point culminant, Djbel Ezeen, atteint 1646 mètres (Laribi, 1999).

III.3. Le substrat géologique et la pédologie de la forêt de l'Akfadou

Selon la carte de Gelard (1978), l'Akfadou est composé de trois substrats distincts : les grès numidiens, les éboulis et les argiles sous-numidiennes de l'Oligocène qui se trouvent entre les pentes. Le flysch à microvbrèche du Sénonien occupe les sommets arrondis. Durand (1950) estime que cette région comprend seulement deux types de faciès :

- Les grès siliceux du Numidien supérieur ;
- Les argiles du Numidien inférieur avec des bancs de grès intercalés (flysch).

Le même auteur souligne que la majeure partie des sols de l'Akfadou sont des sols bruns lessivés, légèrement acides. Dans certains endroits, il existe des sols sujets à une hydromorphie temporaire en contact avec les argiles sous-numidiennes. Le sol est riche en humus de type mull forestier, caractérisé par un rapport C/N satisfaisant, ce qui favorise une bonne minéralisation, avec un pH inférieur à 7.

Les recherches menées par Durand (1951) dans la région démontrent que le facteur clé de différenciation des sols est la roche mère, qui, par sa perméabilité plus ou moins grande, conditionne la migration des argiles. Cela entraîne une différenciation des sols sur un substrat gréseux d'un côté et sur un substrat argileux de l'autre côté.

III.4. Le climat et le bioclimat de la forêt de l'Akfadou

Le massif de l'Akfadou s'étend sur un territoire présentant des dénivellations entre ses points extrêmes ; il est donc, naturellement caractérisé par une variabilité microclimatique. Il se caractérise par les bioclimats sub-humide et humide à variante fraîche et tempérée. En

effet, ses précipitations varient de 1200 à 2000 mm/an, ce qui en fait la zone la plus arrosées d'Afrique du Nord. La saison des pluies la période est importante (8 mois), la période sèche estivale est de plus de deux et demi. Le régime saisonnier des précipitations est de type: Hiver – Automne – Printemps -Eté (HAPE) (Messaoudène, 1989).

III.5. Climagramme d'Emberger

La localisation des stations sur le climagramme d'Emberger est possible grâce au calcul du quotient pluviométrique (Q2) et de la valeur de la température minimale du mois le plus froid. En exploitant les données climatiques fournies par l'ANRH sur une période relativement étalée, les quotients pluviométriques calculés positionnent le point d'altitude moyenne de l'Akfadou (1400 m) dans l'étage bioclimatique humide à variante fraîche (Messaoudène, 1989).

Q2 est calculé de la manière suivante :

$$Q2 = 3,43P / M - m$$

Q2 : Quotient pluviométrique d'Emberger ;

P : Pluviométrie annuelle en (mm) ;

M : Moyenne des maximas du mois le plus chaud en (°C) ;

m : Moyenne des minimas du mois le plus froid en (°C).

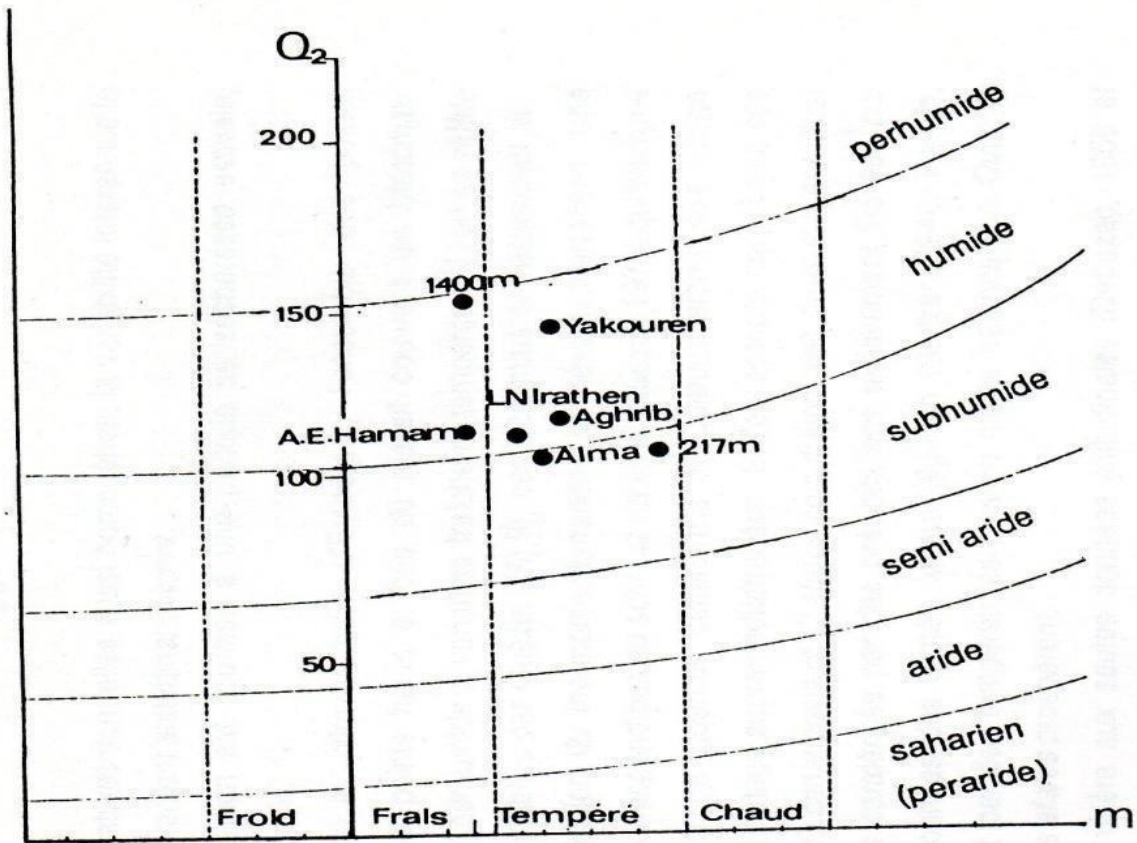


Figure 2 : Projection des postes météorologique sur le climagramme d'Emberger.

III.6. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен est une représentation graphique obtenue par la superposition des deux courbes de variation annuelle des précipitations et des températures. Ces dernières sont reliées par la relation :

$$P \leq 2T$$

Les mois de l'année sont portés en abscisse et en ordonnée les précipitations d'un côté et les températures de l'autre côté.

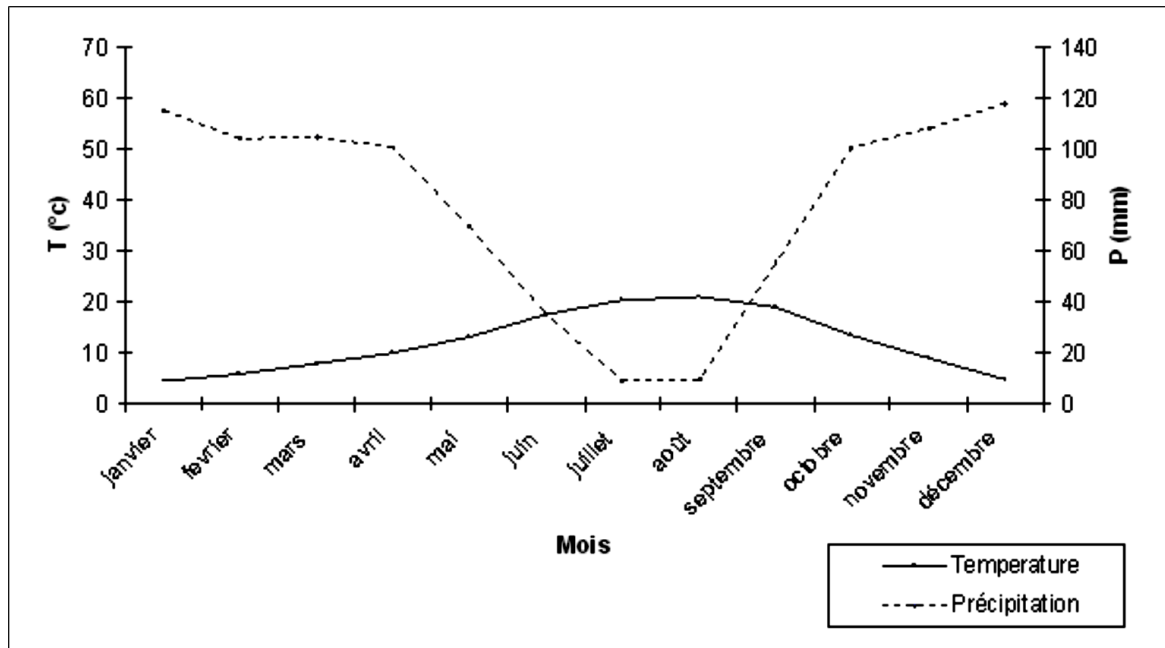


Figure 3 : Diagramme ombrothermique pour le point d'altitude moyenne de la forêt d'Akfadou.

III.7. La végétation de la forêt d'Akfadou

La forêt d'Akfadou est principalement composée de chêne zéen (*Quercus canariensis Willd.*), de chêne afarès (*Quercus afares*) et de chêne liège (*Quercus suber L.*). Ces peuplements présentent une diversité d'âges, formant une mosaïque. Le chêne zéen domine jusqu'à une altitude de 1646 m, couvrant environ 45% de la superficie d'Akfadou. Le chêne afarès se trouve principalement le long des crêtes, sur les versants sud et sud-ouest, ainsi que sur les sols plus ou moins argileux, généralement en dessous de 1250 m d'altitude. Les peuplements purs représentent environ 15% de la surface boisée. Les zones de transition abritent des peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne afarès, tout comme les peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne liège, limités à une altitude de 1100 m. Ces peuplements mixtes couvrent environ 25% de la zone boisée. Le chêne liège pur occupe 15% de la zone périphérique d'Akfadou. Des chênes zéens et afarès matures, âgés de plus de 500 ans, sont présents dans de nombreux sites, témoignant de l'ancienneté de la chênaie d'Akfadou. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*), introduit en 1890 puis en 1948 dans le cadre de programmes d'amélioration forestière, forme aujourd'hui de magnifiques cédraies, qui se perpétuent grâce à une régénération naturelle très importante. Le châtaignier (*Castanea sativa Mill.*), le pin noir (*Pinus nigra Ait.*), le pin coulter (*Pinus coulteri D. Don.*) et le cyprès (*Cupressus horizontalis L.*) sont également présents. On compte 75 individus d'*Abies numidica* (De Lann.) inventoriés au sud de la cédraie d'Agoulmime Aberkane. L'aulne

glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), l'if et le houx colonisent les stations les plus humides et marécageuses d'Akfadou, ainsi que les sources et les cours d'eau. Parmi les espèces à feuilles caduques, on trouve également l'érable (*Acer obtusatum* W. et K.) qui peut parfois coexister avec le chêne zéen, voire le dominer pour former de véritables érablières sur des surfaces relativement réduites. Le sorbier (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz) et le merisier (*Cerasus avium* L.), bien que relativement fréquents, sont rarement abondants. Cependant, leur importance écologique est suffisamment élevée pour que les zones restreintes où ces espèces poussent dans Akfadou soient protégées (Messaoudène *et al.*, 2007).



Chapitre IV

Matériel et méthodes

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 dans 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 10000 ha. 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 (4600 ha) et de Bejaia (5400 ha) (Rabhi, 2011) (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 choisi une station au niveau d'Akfadou :

L'échantillonnage, a été effectué dans la forêt de l'Akfadou sur une station. Le nombre de photos sphériques d'arbres échantillonnés est de 12 photos. Sur les 12 photos, nous avons pu traiter 6 photos. Elles étaient prises à la même heure et au même endroit.

IV.1.1. Traitement des Images Sphériques pour l'Analyse de la Canopée

Les données ont été collectées à l'aide d'un appareil photo OPPO A40M via l'application 360° photo sphérique Cam foxpoi, capturant des images à des endroits distincts dans la même station. Les attributs tels que l'exposition, la luminosité, les coordonnées GPS,

et d'autres paramètres liés à la FoxPoi 360° Photo Sphere Cam est une application innovante conçue pour capturer des images sphériques à 360 degrés, offrant une expérience immersive unique.

j- Images hémisphérique

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 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.

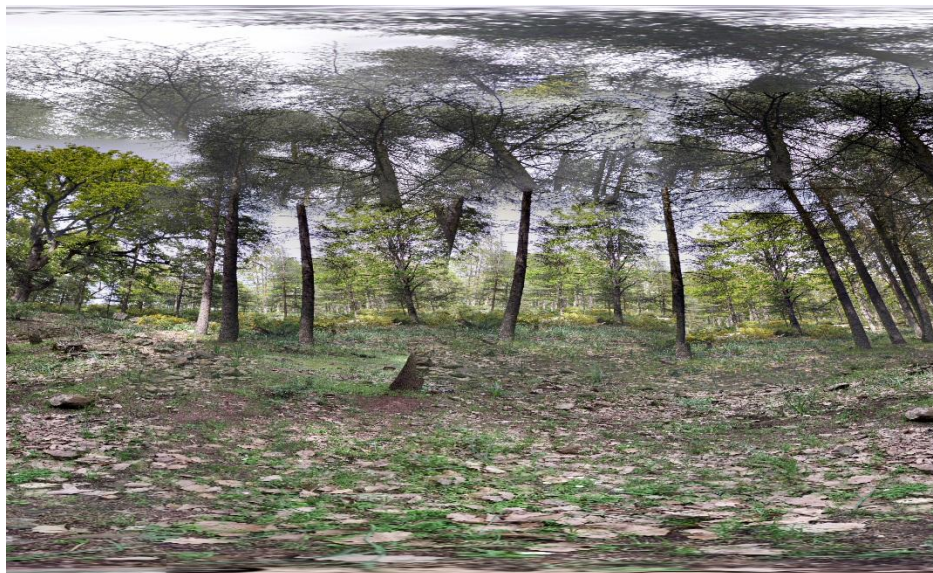


Figure 5 : Image sphérique (prise par GAOUA S. avec FoxPoi 360° Photo Sphère 2025).

k- 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.

l- Préparation des Métadonnées avec le Logiciel R

Les métadonnées des images, contenues dans le fichier st.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 de différents endroits dans la même station. Les valeurs sont organisées selon le numéro de la prise pour faciliter la comparaison.

m- 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.

n- 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, en incluant les versions avec et sans masque pour chaque station.

Tableau 1 : Les Attributs des images (sans masque et avec masque) pour la station d'étude.

Station	Format	Width	Height	ColorSpace	Matte	FileSize	Density
Station	JPEG			sRGB	FALSE	3447781	72x72
Station (masque)	JPEG			sRGB	FALSE	0	72x72

o- 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.



Figure 6 : Création du masque noir à la photo hémisphérique.

p- 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.

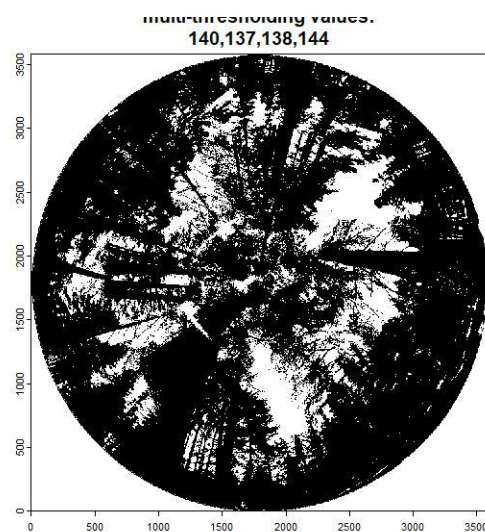


Figure 7 : Binarisation en noir et blanc.

q- 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).

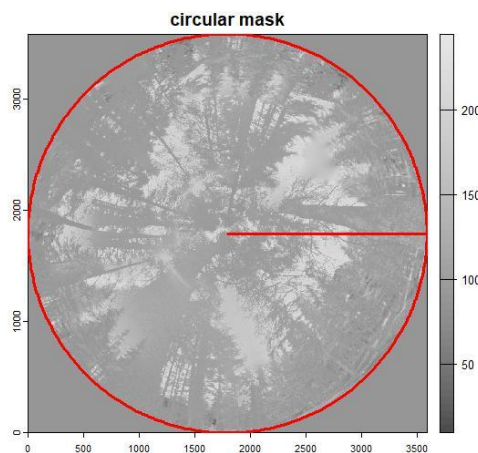


Figure 7 : Niveau de gris avec la fonction ‘import_fisheye’ de la station.

ii- 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 ; Schleppey 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).

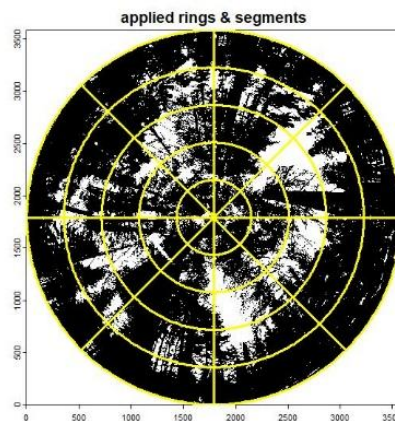


Figure 8 : Binarized circular hemispheric plot with azimuth rings and segments avec la fonction ‘gapfrac_fisheye’ de la station.

r- 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.

IV.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 V

Résultats et discussion

V.1. Spatialisation de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas

Cette approche est appliquée à l'aide de mesure de positions spatiales. Les données sont traitées par le package Spatsat sous R.

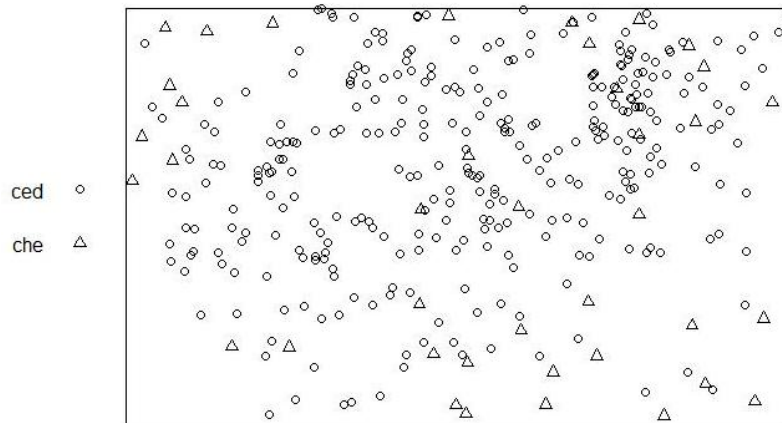


Figure 9 : Cartographie de la placette.

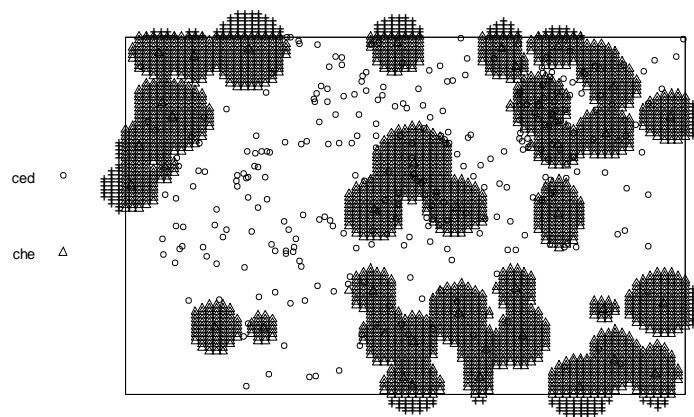


Figure 10 : Présentation des semis sous et avec les houppiers des chênes voisins.

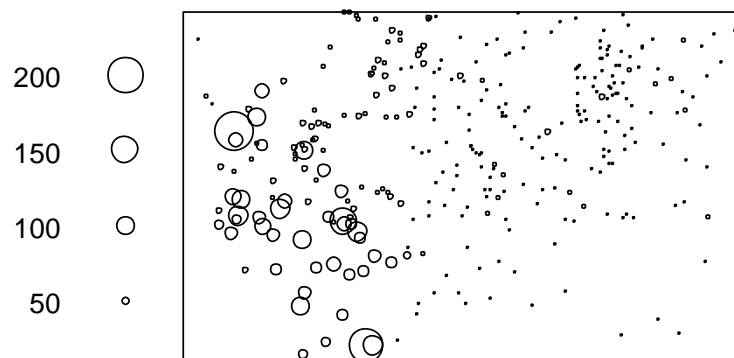


Figure 11 : Présentation des cèdres en fonction de leurs circonférences.

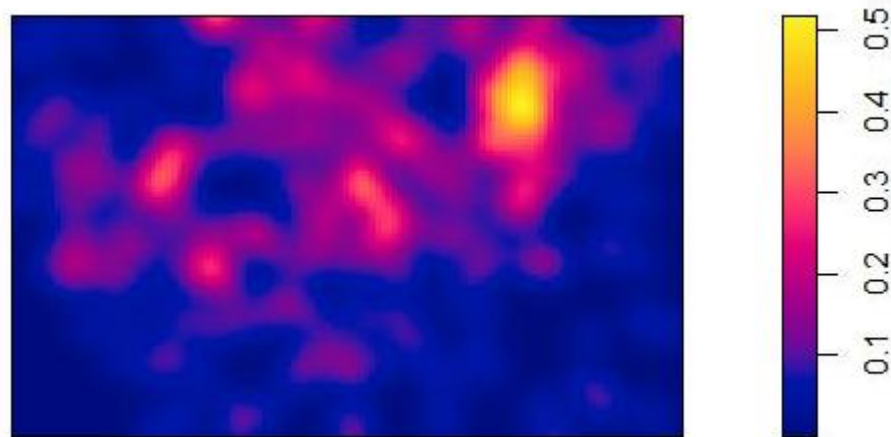


Figure 12 : Densité des semis au dm².

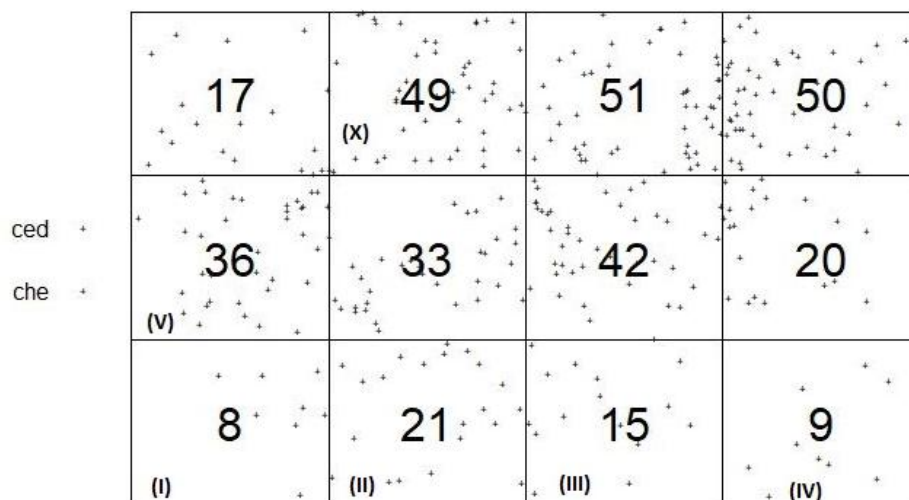


Figure 13 : Division de la placette en quadras.

Tableau 2 : Liaison entre le nombre de semis et DIFN (degré d'ouverture de la canopée).

N° Photo	DIFN EN %	Effectif des semis
I	27.87	8
II	19.152	21
III	19.152	15
IV	29.381	9
V	28.891	36
X	29.381	49

Les paramètres de lumière, tels que L, Le, LXG1, LXG2 et l'indice de diffusion de la lumière (DIFN), montrent des variations significatives entre les différentes placettes. Ces variations influencent directement la quantité et la qualité de la lumière atteignant le sol

forestier, impactant ainsi la régénération du cèdre de l'Atlas. Nous remarquons les valeurs plus élevées de Le, L, LXG1, LXG2 au niveau des deux placettes où sont prises les photos 2 et 3, ce qui suggèrent une meilleure transmission de la lumière à travers la canopée.

Par contre sur les deux placettes où sont prises les photos 4 et 10, nous remarquons le DIFN le plus élevé.

En résumé, les conditions environnementales et la structure de la canopée jouent un rôle crucial dans la régénération du cèdre de l'Atlas. Les placettes, avec ses conditions de lumière plus favorables et une canopée plus ouverte, favorise une régénération plus dynamique du cèdre de l'Atlas par rapport aux autres placettes. 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.2. Analyse des données hémisphériques

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

V.3. Discussion des Résultats

Les résultats montrent des différences significatives entre les différentes placettes en terme de densité de feuillage et de structure de la canopée. Les placettes 2 et 3, avec des valeurs plus élevées de Le, L, LX, LXG1, LXG2, 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 les placettes 4 et 10 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.

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 différentes placettes, suivis d'une discussion approfondie sur leurs implications écologiques et environnementales.

Tableau 3 : Comparatif des attributs de la canopée entre les placettes.

N° de photo	Le	L	LX	LXG1	LXG2	GF	DIFN	MA.ell
1	1.41	1.52	0.93	0.77	0.68	3.39	27.87	24
2	1.78	1.92	0.93	0.78	0.7	3.1	19.15	26
3	1.78	1.92	0.93	0.78	0.7	3.1	19.15	26
4	1.6	1.8	0.89	0.72	0.61	1.51	29.38	47
5	1.45	1.66	0.87	0.68	0.56	2.43	28.89	33
10	1.6	1.8	0.89	0.72	0.61	1.51	29.38	47

Les résultats ont révélé des différences significatives entre les différentes stations

- **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.**
- **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.

En conclusion, l'analyse des attributs de la canopée aux différentes placettes 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 le cèdre de l'Atlas, 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 différents 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.



Références bibliographiques

A

Aidrous-Larbi N. (2007). Exploration de la variabilité géographique des cèdres méditerranéens. Mém. Mag. Sci. agr. ENSA, Alger, 115p.

Arbez M., Ferrandès P. et Uyar N. (1978). Contribution à l'étude de la variabilité géographique des Cèdres. *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, n° 4, 1978, pp. 265-284.

Argillier C., Falconnet G., Moussain D. et Guehl J.M., (1994). Technique de production hors-sol du cèdre de l'Atlas. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), pp: 487-497.

Aussenac G., et El Nour M. (1986). Évolution du potentiel hydrique et du système racinaire de jeunes plants de cèdre, pin laricio de Corse et pin noir plantés à l'automne et au printemps. *Ann. Sci. For.* 43, pp : 1-14.

Aussenac G., Guehl J.M., Kaushal P., Granier A. & Grieu P. (1988). Critères physiologiques pour l'évaluation de la qualité des plants forestiers avant plantation. *Rev. For. Fr.* 40s, pp : 131-139

Aussenac G., Valette J.-C. (1982). Comportement estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. for.* 39 (1), pp : 41-62.

B

Balandier P., Marquier A., Perret S., Collet C. et Courbaud B. (2010). Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ? *RDV techniques* n° 27-28 - hiver-printemps 2010 – ONF, 7p.

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* n° 61, pp : 9-13.

Bentouati A. et Oujehih B. (1999). Première étude de la croissance et de la productivité du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma (Aurès - Algérie). *Rev. For. médit.* t : XX, n° 2, pp : 115-119.

Bentouati A., Bariteau M. (2006). Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Rev. For. médit.* t. XXVII, n° 4, pp : 317-322.

Bernard C. et Philippe D. (1994). Effet du dépressage dans une régénération naturelle mixte de cèdre et pin noir. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 269-280.

Bouchon J. (1979). Structure des peuplements forestiers. *Ann. Sci. Forest.* 36 (3), pp. 175-209. Bouchon, J. 1995 - Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance. *Rev. For. Fr.* XLVII-n° sp : 23-34.

Bréda, N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française* 2 (LI), p. 135-150.

C

Cutini A. et Mercurio R., (1994). Les performances d'accroissement d'un peuplement de cèdre de l'Atlas en éclaircie. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp: 281-194.

D

De Marteau M., François L., Cheddadi R., & Roche E., (2007). Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, 31, pp: 105-146.

Deleuze C., Blaudez D., Hervé J.C., (1996). Ajustement d'un modèle hauteur – circonférence pour l'épicéa commun. Effet de la densité. *Ann. Sci. Forest.* 53 (1), pp. 93-111.

Derak M., M'hirit O., Mouflih B., et Et-Tobi M., (2008). Influence de la densité et du type de peuplement sur le dépérissement du cèdre à Sidi M'Guild (Moyen Atlas marocain). *Forêt méditerranéenne. t. XXIX, n° 1*, pp : 23-32.

Derridj A. (1990). Étude de la variabilité géographique des dimensions des pollens du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie. In : Symposium international sur le cèdre, FAO/IUFRO. Antalya, Turquie, octobre 1990, pp : 904-932.

Derridj A. (1990). Etude des populations de *Cedrus atlantica* Manetti en Algérie. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 288 p.

DGF, (2006). Atlas des parcs nationaux. Direction générale des forêts, Algérie, 96p.

DGF, (2012). Projet de localisation de peuplements portes-graines en Algérie. www.dgf.dz.

Dubé F. (2007). Étude sur la dynamique de succession et de régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) et du chêne vert (*Quercus rotundifolia* Lam.) dans le Parc National d'Ifrane au Maroc. Rapport de stage, Fac. Sci. univ Sherbrooke, Canada, 94p.

Ducrey M. (1981). Action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du douglas. *Ann. Sci. for.* 38 (3), pp : 317-329.

Ducrey, M. (1993). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen : Aspects écophysiologicals de sa réaction à la sécheresse. *Annales des Recherches Forestières du Maroc 27(sécial)*, 140-153.

Durand J.H. (1951). Sur quelques sols de la forêt d'Akfadou et des environs de Yakouren. *Ann. Agr.*, 2, pp. 110-126.

E

El Abid A. (1994). Bilan des recherches au Maroc en matière d'exploitation et valorisation du cèdre, *Ann. Rech. For. Maroc 27*, pp : 628-637.

El-Azzouzi K., Keller R. (1998). Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (Maroc), *Rev. For. Medit.* 29, pp : 11-33.

Ellatifi M. (1994). Le cèdre de l'Atlas hors de son aire naturelle : propriétés technologiques, Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas, *Ann. Rech, For. Maroc 27*, pp : 684-697.

Emberger L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Géol. Zool., Fac. Sc. Univ. Montpellier, Bot.*, 7, 3-43.

Ezzahiri M., & Belghazi B. (2000). Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas (Maroc). *Sécheresse*, Vol. 11 (2), pp : 79-89.

Ezzahiri, M., Belghazi, B., et Bahmad, M. (1994). Bilan naturel de la régénération naturelle de la cédraie dans les parcelles clôturée du Moyen Atlas, Maroc. *Annales des Recherches Forestières du Maroc 27 (spécial)*, pp : 260-268.

F

Fady B. et Vauthier D. (1988). Comparaison des stratégies de croissance en hauteur du sapin de Céphalonie (*abies cephalonica* loud.) et du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Maneti). *Forêt méditerranéenne*, t. X, n° 2, pp : 397-406.

Ferrandès P. (1986). Cèdres. *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° spécial-Amélioration génétique des arbres forestiers, pp : 139-141.

G

Gachi M. (1994). Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre: *Thaumetopoea bonjeani* powell (*Lepidoptera; Thaumetopoeidae*). *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 613-626.

Granier A. (1981). Etude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco). *Ann. For. Sci.* 38 (4), pp : 503-512.

H

HCEFLD, (2006). Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Le cèdre de l'Atlas, mémoire du temps. Ed. Mardaga, 253p.

K

Kadi-Bennane S. (2003). *Cedrus atlantica* en plantations artificielles : variation des épaisseurs des cernes. 7eme congrès forestier mondial, Québec city (Canada), 5p.

Khanfouci M. S. (2005). Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M) dans le massif du Belezma. *Mém. Mag. Univ. Batna*, 224p.

Kherchouche., Kalla M., Gutierrez E., Briki A., Hamchi A. (2013). La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse*, 24 : 129-137.

Kokutse A. D. (2002). Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis* L.f) en plantation au Togo : formation du bois de cœur, propriétés mécaniques et durabilité. Th. Doc. Science du bois. Univ. Bordeaux I, 163p.

Krouchi F. (2010). Etude de la diversité de l'organisation reproductrice et de la structure génétique de cèdre de l'Atlas (*cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala-Guilef, Djurdjura nord-ouest, Algérie). Th. Doc. Eco. For. UMMTO. 127p. + annexes.

L

Lepoutre B. (1963). Premier essai de synthèse sur le mécanisme de régénération du cèdre de l'Atlas dans Le moyen atlas marocain. *Ann. Rech. For. Maroc.* T 7, Rabat, pp : 57-163.

Letreuch-Belarouci N. (1991). Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir. 2 vol., *Office des publications universitaire* (Alger), 641 p.

M

M'hirit O. (1982). Etude écologique et forestière du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du cèdre. *Ann. Rech. Forest. Maroc.* Tome 22. pp : 502-511.

M'hirit O. (1994). Croissance et productivité du cèdre : approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons stations production. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 295-312.

M'hirit O. (1999). Le cèdre de l'Atlas à travers le réseau silva mediterranea «cèdre». Bilan et perspectives. *Rev. For. médit.* t : XX, n° 3, pp : 91-100.

Meddour R. (2010). Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie : exemple des groupements forestiers et pré-forestiers de la Kabylie Djurdjureene. Th. Doct. Sci. Agr. UMMTO. 397 p. + annexes.

Mediouni K. & Yahi N. (1989). Etude structurale de la série du cèdre à Ait Ouabane, Djurdjura. *Forêt médit.*, XI, 2, pp : 103-112.

Messaoudène M. (1989). Dendroécologie et productivité de *Quercus afares* POMEL et *Quercus canariensis* WILL. Dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni Ghobri en Algérie. Th. Doct. ès sciences, univ. Aix – Marseille III, 123p.

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

Messaoudène M., Loukkas A., Janin G., Tafere M., Dilem A., Gonzalez J. (2004). Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie). *Ann. For. Sci.* 61, pp : 589-595.

Messaoudène M., Rabhi K., Megdoud A., Sarmoum M. et Dahmani-Megrerouche M. (2013). Etat des lieux et perspectives des cédraies algériennes. III^e Semaine forestière méditerranéenne, Tlemcen. *rev. For. Médit. t. XXXIV, n° 4*, pp : 1-8.

Mestar N. (1995). Cartographie physionomique et approche phytoécologique de la cèdre aie de Tala Guilef (Djurdjura occidental). *Thèse de Magister, INA, Alger, 116 p.*

Mouna M. (1994). Etat des connaissances sur l'entomofaune du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au Maroc. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 513-526.

N

Nedjahi A. (1987). La croissance et la productivité du cèdre de l'Atlas à Chréa. *Ann. Rech. For. en Algérie*, vol. II, n °2, pp : 23-59.

Nedjahi A. (1993). La régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie : cas de Chréa et des Aurès. INRF. *Ann. Rech. For. Algérie*. Alger, pp : 31-40.

Q

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

Quézel P., Médail F. (2003). Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Ed. *Elsevier SAS*. 571p.

R

Rabhi K. (2015). Modélisation et optimisation de la croissance et du fonctionnement du cèdre de l'Atlas (*cedrus atlantica* Manetti) dans le djurdjura par l'intégration de descripteurs écologiques et dendrométriques. Thèses Doctorat Sci. Agr. UMMTO. 171p.

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

Rabhi K., Messaoudène M. (2013). Ajustement de modèle hyperbolique hauteur – circonférence pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) de l'Akfadou (Algérie). *Ann. Rech. For. en Algérie*, pp : 83-92.

Rabhi KH, (2009). *Contribution à l'étude du comportement du châtaignier (Castanea sativa Mill.) dans l'Akfadou par l'approche dendroécologique. ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH – ALGER. p (52-54).*

Riedacker A. (1978). Régénération et croissance de la partie souterraine et aérienne de cèdres placés sous climat constant. *Ann. Sci. For.*, 35 (2), pp : 117-138.

S

Sarmoum M. (2008). Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Diagnostic dendroécologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had. Mémoire de Magister, USTHB (Alger), 98 p.

V

Vlashev V. (1987). Croissance en groupes du cèdre dans la montagne des Babors. *Ann. Sci. agr. INA* (Alger), pp : 1-14.

W

Walter J. M. N. (2000). Photographies Hémisphériques des voûtes forestières, Etude du rayonnement solaire sous le couvert à l'aide du logiciel GLA(c) Version 2.0. Note technique, Université Louis Pasteur Strasbourg I Centre d'Etudes et de Recherches Eco- Géographiques (C.N.R.S.), les Nouragues (Guyane Française), 28 p.

Y

Yahi N. (2007). Les cédraies d'Algérie : phytoécologie, phytosociologie, dynamique et conservation des peuplements. Thèse Doctorat ès sciences, *USTHB, Alger, 2007, 265 p.*

Z

Zedek M. (1993). Contribution à l'étude de la productivité du *cedrus atlantica* Manetti (cèdre de l'Atlas) dans le Parc National de Theniet El Had. Mém. Mag. Sci. Agr. ENSA, 175p + annexes.

Résumé

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) est une espèce emblématique et protégée des massifs montagneux nord-africains, en particulier en Algérie. Cependant, sa régénération naturelle est aujourd'hui fortement compromise par plusieurs facteurs, notamment le changement climatique, les incendies de forêt, le surpâturage et la fermeture progressive du couvert forestier.

Dans ce contexte, ce travail de recherche a pour objectif principal d'évaluer l'impact de la lumière, à travers l'ouverture de la canopée, sur la régénération du cèdre au niveau du Lac Noir, dans la forêt d'Akfadou (Kabylie). Pour cela, une approche d'analyse spatiale couplée à des méthodes innovantes de capture et de traitement d'images hémisphériques a été mise en œuvre.

Des images sphériques à 360° ont été capturées à l'aide de l'application FoxPoi, puis traitées sous le logiciel R à l'aide du package **hemispheR**, afin d'extraire des indicateurs comme le DIFN (indice de diffusion de la lumière), la luminance et d'autres paramètres décrivant la structure de la canopée. L'analyse a révélé une corrélation significative entre l'ouverture du couvert forestier et la densité des jeunes semis de cèdre.

Les résultats soulignent l'importance de la gestion lumineuse dans les peuplements de cèdre et encouragent des pratiques sylvicoles fondées sur des éclaircies ciblées, un suivi régulier de la canopée et l'intégration d'outils géospatiaux dans la planification forestière.

Mots-clés : *Cedrus atlantica*, régénération, lumière, DIFN, canopée, Akfadou, imagerie hémisphérique, R, analyse spatiale.

Summary

The Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) is an emblematic and protected species of North African mountain ranges, particularly in Algeria. However, its natural regeneration is currently compromised by several factors, including climate change, forest fires, overgrazing, and the gradual closure of the forest canopy.

In this context, this research aims to evaluate the impact of light, through canopy openness, on the regeneration of cedar in the Lac Noir area, within the Akfadou forest (Kabylia). A spatial analysis approach combined with innovative methods for capturing and processing hemispherical images was implemented.

360° spherical images were captured using the FoxPoi application and processed in R using the **hemispheR** package to extract indicators such as **DIFN** (Diffuse Light Fraction), luminance, and other parameters describing canopy structure. The analysis revealed a significant correlation between canopy openness and the density of young cedar seedlings.

The results highlight the importance of light management in cedar stands and support silvicultural practices based on selective thinning, regular canopy monitoring, and the integration of geospatial tools into forest planning.

Keywords : *Cedrus atlantica*, regeneration, light, DIFN, canopy, Akfadou, hemispherical imagery, R, spatial analysis.