République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abbès Laghrour - Khenchela
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de l'Écologie et de l'Environnement

N° de série : .....

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Filière : **Écologie et Environnement**

Spécialité : **Écologie Fondamentale et Appliquée**

Présenté par :

Amina ZERDOUM

Thème

Réponses spatio-temporelles du Cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* face au changement climatique (cas de la wilaya de Khenchela)

Mémoire soutenu publiquement le 04 / 06 / 2026 devant le jury composé de :

Mme. Amel BOUAKKAZ
MCA, Université de Khenchela, Présidente

M. Mehdi BADIS
MCB, Université de Khenchela, Encadrant

Mme. Amel MEZHOUD
MAA, Université de Khenchela, Examinatrice

Année Universitaire

2025/2026

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Très-Haut, le Clément et le Miséricordieux, pour Ses innombrables bienfaits et pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Mehdi BADIS, Maître de Conférences B à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, encadrant de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son soutien constant. Son accompagnement rigoureux et sa générosité dans le partage de son savoir, notamment dans l'apprentissage de la modélisation des niches climatique, ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Madame Amel BOUAKKAZ, Maître de Conférences A à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Madame Amel MEZHOUD, Maître Assistant A à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Je tiens également à remercier la Conservation des Forêts de la wilaya de Khenchela ainsi que les services des Circonscription des Forêts d'Elle Hamma, notamment messieurs Ounissi Abderrahmen , Kellil Noureddine ,Hezil Tarek , Attallah Riadh, pour leur accueil chaleureux et bienveillant lors de mon stage, pour le riche savoir forestier qu'ils m'ont généreusement transmis, pour leur accompagnement attentif et patient lors des sorties de terrain au sein de la cédraie d'Ouled Yaghoub, ainsi que pour la qualité de leurs échanges, la pertinence de leurs conseils et la générosité dont ils ont fait preuve en partageant leurs précieuses données cartographiques relatives aux peuplements de *Cedrus atlantica*, données qui ont été indispensables à l'aboutissement de cette recherche.

Dédicaces

Cinq années s'achèvent si vite et me voici en train de lever ma plume pour écrire cette dédicace à tous ceux qui sont passés devant mon parcours et grâce à eux j'ai grandi et j'ai mûri et je suis devenue ce que je suis maintenant.

Au meilleur papa, Fateh ZERDOUM, tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension… Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eus pour toi.

À ma très chère mère, HAFIAN D, affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Allah, le tout-puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

À ma chère sœur, Bouthaina, ma complice d'âme, tu es le soutien dans ma faiblesse, le sourire dans ma tristesse, et la sagesse à laquelle je m'accroche toujours. Ta présence est une bénédiction, et ta proximité est une source de paix intérieure.

Mes petits trésors, Fatima et Mohamed et Meriam. Vous êtes la joie et le cœur de la maison, et vos rires ravivent nos cœurs. Votre croissance nous remplit de fierté, et votre innocence apporte la paix dans nos âmes.

À mes chères proches amies : Meriam B, Soulef B, Aya A, Chaima L, et Khaoula L, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble. Je vous aime énormément.

À tous les enseignants qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours universitaire, merci pour votre savoir, votre patience et vos précieux conseils qui ont contribué à ma réussite académique.

À une enseignante qui occupe une place particulière dans mon cœur, Dr. FELLAH H je vous remercie profondément pour tout ce que vous m'avez apporté, humainement et académiquement.

À mon encadrant Dr Badis Mehdi, pour son guide tout au long de ce travail de fin d'études,

Le plus grand Merci est à Allah pour le doux sentiment d'accomplissement et de réussite…

Enfin mon rêve s'est réalisé après un long chemin d'études.

Résumé

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une espèce forestière endémique des massifs montagnards du Maghreb, dont la distribution géographique est étroitement conditionnée par des variables bioclimatiques, elles-mêmes soumises aux effets du changement climatique global. Ce travail vise à modéliser la distribution potentielle actuelle et future de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela, située dans le Nord-Est algérien, en intégrant l'impact des scénarios de réchauffement climatique. Les données d'occurrence (n = 81) ont été générées à partir de la délimitation cartographique des peuplements sains des deux cédraies de la wilaya, la forêt de Béni Oudjana et celle d'Ouled Yagoub, et raréfiées spatialement à une distance minimale de 1 km. La modélisation a été réalisée avec le logiciel MaxEnt, via le package kuenm sous R, en utilisant un ensemble de cinq variables bioclimatiques extraites de la base WorldClim v2.1 pour le présent et le futur selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et RCP 8.5) à l'horizon 2070. Le modèle présente d'excellentes performances (AUC = 0,98 ± 0,002) et révèle que l'écart diurne des températures (Bio2) et la température moyenne annuelle (Bio1) sont les facteurs déterminants de la présence du cèdre. Actuellement, les zones favorables se concentrent dans les massifs du nord-ouest de la wilaya, notamment autour du Djebel Chelia (2 328 m) et des djebels Aïdel, Faraoun et Chentgouma. Les projections climatiques futures indiquent des contractions sévères de l'aire favorable, avec une réduction de plus de 97 % sous RCP 4.5 et de plus de 99 % sous RCP 8.5, les derniers refuges se limitant aux versants nord de la région de Chelia et au couloir forestier d'El Hodh. Cette étude souligne la pertinence de la modélisation des niches climatique comme outil prédictif pour anticiper les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers montagnards et constitue une base stratégique pour orienter les politiques de conservation et de reboisement du cèdre de l'Atlas.

Mots-clés : *Cèdre de l'Atlas, Cedrus atlantica*, Changement climatique, Modélisation des niches climatique, MaxEnt, Distribution géographique, Wilaya de Khenchela, Algérie.

Abstract

The Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) is a forest species endemic to the mountainous massifs of the Maghreb, whose geographic distribution is closely conditioned by bioclimatic variables, themselves influenced by global climate change. This study aims to model the current and future potential distribution of *Cedrus atlantica* in the Khenchela province, located in northeastern Algeria, by integrating the impact of climate warming scenarios. Occurrence data (n = 81) were generated from the cartographic delineation of healthy stands from the two cedar forests of the province, the Beni Oudjana forest and the Ouled Yagoub forest, and spatially rarefied at a minimum distance of 1 km. Modeling was performed using MaxEnt software, via the kuenm package under R, based on a set of five bioclimatic variables extracted from the WorldClim v2.1 database for the present and future under two greenhouse gas emission scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) for the 2070 horizon. The model showed excellent performance (AUC = 0.98 ± 0.002) and revealed that the diurnal temperature range (Bio2) and mean annual temperature (Bio1) are the key determinants of cedar presence. Currently, suitable areas are concentrated in the northwestern massifs of the province, particularly around Djebel Chelia (2,328 m) and the Aïdel, Faraoun, and Chentgouma djebels. Future climate projections indicate severe contractions of the suitable range, with reductions exceeding 97% under RCP 4.5 and 99% under RCP 8.5, with the last refugia limited to the northern slopes of the Chelia region and the El Hodh forest corridor. This study highlights the relevance of ecological niche modeling as a predictive tool for anticipating the effects of climate change on mountain forest ecosystems, and provides a strategic basis for guiding conservation and reforestation policies for the Atlas cedar.

Keywords: *Atlas cedar, Cedrus atlantica*, Climate change, Ecological niche modeling, MaxEnt, Geographic distribution, Khenchela province, Algeria.

الملخص

يُعدّ أرز الأطلس (*Cedrus atlantica* Manetti) نوعًا حرجيًا متوطنًا في المرتفعات الجبلية بالمغرب العربي، وتخضع توزيعاته الجغرافية لمتغيرات مناخية-بيولوجية تتأثر بدورها بالتغيرات المناخية العالمية. يهدف هذا العمل إلى نمذجة التوزيع المحتمل الحالي والمستقبلي لأرز الأطلس في ولاية خنشلة الواقعة في شمال شرق الجزائر، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير سيناريوهات الاحترار المناخي. تم الحصول على بيانات التواجد (n = 81) انطلاقًا من تحديد حدود المجموعات الحرجية السليمة في الغابتين الرئيسيتين بالولاية غابة بني وجانة وغابة أولاد يعقوب مع تطبيق فلتر التخفيف المكاني بمسافة دنيا قدرها كيلومتر واحد. أُجريت النمذجة باستخدام برنامج MaxEnt عبر الحزمة kuenm تحت بيئة R، اعتمادًا على خمسة متغيرات مناخية مستخرجة من قاعدة البيانات WorldClim v2.1 للحاضر والمستقبل وفق سيناريوهَي انبعاثات الغازات الدفيئة (RCP 4.5 و RCP 8.5) لأفق عام 2070. أظهر النموذج أداءً ممتازًا (AUC = 0.98 ± 0.002)، وكشف أن مدى التغيّر اليومي في درجات الحرارة (Bio2) ومتوسط درجة الحرارة السنوية (Bio1) هما العاملان الحاسمان في تحديد وجود الأرز. تتمركز المناطق الملائمة حاليًا في سلاسل الجبال الواقعة في شمال غرب الولاية، لا سيما حول جبل الشيليا (2328 م) وجبال أيدل وفرعون وشنتقومة. تشير التوقعات المناخية المستقبلية إلى انكماشات حادة في المساحات الملائمة، بانخفاض يتجاوز 97% في سيناريو RCP 4.5 و99% في سيناريو RCP 8.5، مع اقتصار الملاجئ الأخيرة على منحدرات منطقة شلية الشمالية وممر غابة الهوض. تؤكد هذه الدراسة على أهمية نمذجة المجالات البيئية كأداة تنبؤية لاستباق تأثيرات التغير المناخي على النظم الإيكولوجية الغابوية الجبلية، وتوفر أساسًا استراتيجيًا لتوجيه سياسات الحفاظ وإعادة التشجير لأرز الأطلس.

الكلمات المفتاحية: أرز الأطلس، *Cedrus atlantica*، التغير المناخي، نمذجة المواطن البيئية، MaxEnt، التوزيع الجغرافي، ولاية خنشلة، الجزائر.

Table des matières

Remerciements I
Dédicaces II
Résumé III
Abstract IV
الملخص V
Table des matières VI
Table des Figures VIII
Liste des tableaux IX
Liste des Abréviations IX
Introduction 1
Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
1. Systématique et classification 3
1.1. Position systématique 3
1.2. La famille des Pinacées 5
1.3. Le genre Cedrus 5
2. Description morphologique et biologique 5
2.1. Port, tronc et feuillage 5
2.2. Système racinaire 6
2.3. Reproduction, floraison et fructification 6
2.4. Cycle de vie et longévité 7
3. Exigences écologiques du cèdre de l'Atlas 7
3.1. Conditions climatiques 7
3.2. Exigences édaphiques 8
3.3. Tolérance aux stress hydriques et thermiques 9
4. Aire de répartition géographique 8
4.1. Distribution naturelle en Afrique du Nord 8
4.2. Évolution historique de l'aire de répartition 8
4.3. Introduction dans d'autres régions du monde 9
5. Rôle écologique et importance socio-économique 9
5.1. Rôle dans les écosystèmes montagnards 9
5.2. Services écosystémiques 10
5.3. Valeur économique, culturelle et patrimoniale 10
6. Menaces pesant sur le cèdre de l'Atlas 11

6.1. Pressions anthropiques....11
6.2. Ravageurs et maladies....11
6.3. Dégradation et fragmentation de l'habitat.... 12
Matériel et Méthodes 14
1. Zone d'étude 15
2. Données d'occurrence 16
2.1 Source des données 16
2.2 Génération des points d'occurrence.... 16
3. Variables environnementales.... 17
4. Modélisation des niches climatique.... 18
Résultats.... 20
1. Données d'occurrence employées 21
2. Performances du modèle 22
3. Contribution des variables bioclimatiques 23
4. Distribution potentielle actuelle 26
5. Distribution potentielle future 28
5.1 Scénario RCP 4.5 – 2070.... 28
5.2 Scénario RCP 8.5 – 2070.... 29
Discussion 31
1. Température moyenne annuelle.... 32
2. Écart diurne des températures 33
3. Répartition actuelle 33
4. Réponse au changement climatique.... 34
Conclusion 36
Références bibliographiques 39

Table des Figures

Figure 1: Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans son habitat naturel 5
Figure 2: Morphologie du cèdre de l'Atlas : tronc, houppier et aiguilles 6
Figure 3: Cônes et graines du cèdre de l'Atlas 7
Figure 4: Rôle écologique des cédraies dans les écosystèmes montagnards 10
Figure 5:Pression pastorale et surpâturage au sein d'une cédraie de l'Atlas 11
Figure 6: Traces de coupe illicite dans une cédraie de *Cedrus atlantica* 11
Figure 7 : Chenille processionnaire attaquant *Cedrus atlantica* 12
Figure 8: Jaunissement des aiguilles chez le cèdre de l'Atlas 12
Figure 9: Dégradation et fragmentation des cédraies 13
Figure 10: Localisation des cèdres de Chelia et d'Ouled Yagoub dans la Wilaya de Khenchela 15
Figure 11:Points d'occurrence retenus après raréfaction spatiale (n = 81) 21
Figure 12: Courbe ROC du modèle MaxEnt final (AUC = 0,98 ± 0,002) 22
Figure 13:Les courbes de réponse 24
Figure 14: Probabilité de présence de *Cedrus atlantica* selon la température moyenne annuelle (Bio1) 25
Figure 15:Probabilité de présence de C*edrus atlantica* selon l'écart diurne des températures (Bio2) 26
Figure 16: Carte de la distribution potentielle actuelle de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela 27
Figure 17: Carte de la distribution potentielle future – Scénario RCP 4.5, horizon 2070 29
Figure 18: Carte de la distribution potentielle future – Scénario RCP 8.5, horizon 2070 30

Liste des Tableaux

Table 1: Variables bioclimatiques et topographiques retenues pour la modélisation de la niche écologique de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela. 18
Table 2: Contribution des variables bioclimatiques et topographiques au modèle final de distribution de *Cedrus atlantica*..... 23

Liste des Abréviations

AICc : Critère d'information d'Akaike corrigé pour les petits échantillons

Alt : Altitude

AUC : Area Under the Curve (Aire sous la courbe ROC)

Bio : Variable Bioclimatique (WorldClim)

°C : Degré Celsius

CSV : Comma-Separated Values

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

KML : Keyhole Markup Language (format Google Earth)

MaxEnt : Maximum Entropy Modeling

OR10 : Taux d'omission à 10 %

RCP : Representative Concentration Pathway

ROC : Receiver Operating Characteristic

R : Logiciel statistique R (R Core Team)

SNV : Sciences de la Nature et de la Vie

WHO/OMS : World Health Organisation / Organisation Mondiale de la Sant

Introduction

Introduction

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est l'une des espèces forestières emblématiques des écosystèmes montagnards du Maghreb. Conifère endémique d'Afrique du Nord, il joue un rôle écologique fondamental dans la structuration des paysages forestiers algériens et marocains, où il forme des peuplements denses entre 1 400 et 2 300 m d'altitude. En Algérie, les cédraies couvrent environ 34 000 hectares, principalement concentrées dans le Tell et le massif de l'Aurès, dont les deux cédraies de la wilaya de Khenchela — la cédraie d'Ouled Yagoub et celle de Chelia — constituent des stations particulièrement précieuses de par leur isolement géographique et leur valeur patrimoniale (Bentouati & Ghalmi, 2008).

Sur le plan biologique et écologique, *Cedrus atlantica* présente des exigences thermiques et hydriques strictes, caractéristiques des milieux montagnards méditerranéens. Sa distribution est étroitement conditionnée par des paramètres bioclimatiques tels que la température moyenne annuelle, l'amplitude thermique diurne et la saisonnalité des précipitations. Ces contraintes écophysiologiques font du cèdre de l'Atlas un bioindicateur particulièrement sensible aux variations climatiques, rendant cette espèce vulnérable aux modifications environnementales profondes induites par le réchauffement global (Bentouati, 2008 ; Linares et al., 2013).

Dans un contexte de changement climatique global, caractérisé par une élévation des températures, une accentuation de la sécheresse estivale et une modification des régimes pluviométriques, les forêts de cèdre de l'Atlas font face à des pressions croissantes qui se manifestent par un dépérissement progressif et documenté dans plusieurs stations du Maghreb. Les projections climatiques établies par le GIEC (IPCC, 2021) anticipent une intensification de ces perturbations au cours des prochaines décennies, notamment dans les régions arides et semi-arides du pourtour méditerranéen, dont fait partie le nord-est algérien. La wilaya de Khenchela, écologiquement vulnérable aux perturbations climatiques en raison de sa situation au carrefour des influences méditerranéennes et sahariennes, représente à ce titre un terrain d'étude particulièrement pertinent.

Face à ces enjeux, la modélisation des niches climatique s'est imposée comme un outil incontournable pour comprendre et anticiper les effets du changement climatique sur la distribution des espèces forestières. Le modèle MaxEnt (Maximum Entropy Modeling), largement plébiscité dans la communauté scientifique pour sa robustesse et son efficacité à

partir de données de présence uniquement, permet d'établir des cartes de répartition potentielle en croisant les données d'occurrence avec des variables bioclimatiques (Phillips et al., 2006 ; Elith et al., 2011). Cette approche a été appliquée avec succès à de nombreuses espèces forestières méditerranéennes, offrant des perspectives précieuses pour la planification des stratégies de conservation et de reboisement (El Omari et al., 2017).

Ce travail s'inscrit dans une double démarche, à la fois scientifique et conservatoire. Il vise d'abord à identifier les facteurs bioclimatiques déterminant la distribution actuelle de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela, en mettant en évidence le rôle prépondérant des variables thermiques dans la structuration de la niche écologique de l'espèce. Il s'agit ensuite de modéliser la distribution potentielle actuelle et future du cèdre de l'Atlas selon différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et RCP 8.5) à l'horizon 2070. L'objectif ultime est de produire des cartes de risque permettant aux gestionnaires forestiers et aux autorités concernées d'orienter les politiques de conservation, de reboisement et de surveillance de cette ressource sylvicole irremplaçable, dans un contexte de mutations climatiques rapides.

Systématique et classification

1.1. Position systématique

Le terme « Cèdre » dérive du latin *Cedrus*, lui-même issu du grec *Kedros*, désignation autrefois également attribuée aux genévriers (Massif, 2006).

La dénomination scientifique du cèdre de l'Atlas est *Cedrus atlantica* Manetti. L'espèce est communément connue sous les noms d'Arzin en arabe, de Begnoun en berbère, et d'Atlas Cedar en anglais (Figure 1).



Figure 1: Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans son habitat naturel *(Photographe de l'auteur)*

Du point de vue systématique, la classification taxonomique de *Cedrus atlantica* est structurée comme suit (Quézel & Santa, 1962) :

- Embranchement : Spermaphytes
- Sous-embranchement : Gymnospermes
- Classe : Conifères
- Ordre : Pinales
- Famille : Pinacées
- Sous-famille : Abiétoïdées
- Genre : *Cedrus*
- Espèce : *Cedrus atlantica* Manetti

1.2. La famille des Pinacées

La famille des Pinacées, également désignée sous le nom d'Abiétacées, constitue l'une des principales familles de conifères. Elle comprend environ 225 espèces réparties en 12 genres : *Abies*, *Hesperopeuce*, *Cedrus*, *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudolarix*, *Pseudotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Keteleeria* et *Nothotsuga* (Simpson, 2019). En Algérie, cette famille est représentée par trois genres : *Abies* (sapin), *Cedrus* (cèdre) et *Pinus* (pin) (Quézel & Santa, 1963).

Les Pinacées représentent la famille la plus diversifiée des gymnospermes (Ran et al., 2018). Elles présentent une importance économique considérable en tant que sources de bois d'œuvre, de pâte à papier et de résines, tout en assurant des fonctions écologiques essentielles : contribution à la biomasse forestière, création d'habitats pour de nombreux organismes associés, et séquestration du carbone atmosphérique (Krutovsky et al., 2004). Par ailleurs, les espèces de cette famille sont riches en huiles essentielles dotées de propriétés biologiques protectrices (Benabid, 1994).

1.3. Le genre *Cedrus*

Selon Fabre (1994), le genre *Cedrus* comprend quatre espèces distinctes :

- *Cedrus atlantica* Manetti (cèdre de l'Atlas), présent au Maroc et en Algérie ;
- *Cedrus brevifolia* (Hook.) Henry (cèdre de Chypre), endémique de l'île de Chypre ;
- *Cedrus libani* (G. Don) Loudon (cèdre du Liban), distribué au Liban, en Syrie et en Turquie ;
- *Cedrus deodara* Loudon (cèdre de l'Himalaya), présent dans la région himalayenne occidentale.

2. Description morphologique et biologique

2.1. Port, tronc et feuillage

Le cèdre de l'Atlas est considéré comme l'un des conifères les plus remarquables. Dans ses stations naturelles, il peut dépasser 50 mètres de hauteur, avec un diamètre de tronc pouvant atteindre 2 mètres. Il est caractérisé par une longévité exceptionnelle, survivant souvent plusieurs siècles, voire plus d'un millénaire. Avec l'âge, son houppier adopte progressivement une forme tabulaire caractéristique (Boudy, 1952). Le tronc est généralement unique et

cylindrique, bien que des bifurcations puissent occasionnellement se produire (Farjon, 2010). Les feuilles sont aciculaires, pointues, insérées isolément sur les pousses longues et en rosettes sur les rameaux courts, persistantes, avec plusieurs lignes de stomates sur leurs trois faces (Maire, 1952). Les aiguilles présentent une coloration glauque et persistent environ trois ans, avec une longueur variant généralement de 1 à 2 cm (Boudy, 1952) (Figure 2).



Figure 2: Morphologie du cèdre de l'Atlas : tronc, houppier et aiguilles*(Photographe de l'auteur)*

2.2. Système racinaire

Le système racinaire du cèdre de l'Atlas est généralement bien développé, bien qu'il soit rarement caractérisé par un pivot dominant. Il confère néanmoins à l'arbre une bonne stabilité mécanique (Boudy, 1952). Les racines obliques, particulièrement robustes, sont capables de pénétrer les sols profonds et humides (Toth, 1970, cité par Krouchi, 2010).

2.3. Reproduction, floraison et fructification

Le cycle reproducteur de *Cedrus atlantica* s'étend généralement sur trois ans (Ezzahiri & Belghazi, 2000). Selon Derridj (1990), le développement de l'inflorescence femelle dure environ deux ans et deux mois, aboutissant à la formation d'un cône mature qui libère ses graines lorsque les conditions climatiques sont favorables. En année N, les inflorescences femelles apparaissent fin août et les chatons mâles libèrent leur pollen en mi-septembre. En année N+1, le cône connaît une croissance rapide et change de couleur. En année N+2, les cônes s'ouvrent en octobre et les graines, dispersées principalement par le vent, peuvent se disséminer sur 20 à 50 mètres (Toth, 1978, in Ezzahiri & Belghazi, 2000) (Figure 3).



Figure 3: Cônes et graines du cèdre de l'Atlas *(Photographe de l'auteur)*

2.4. Cycle de vie et longévité

Cedrus atlantica constitue l'une des ressources sylvicoles les plus précieuses des écosystèmes forestiers du Maroc et de l'Algérie (M'Hirit & Maghnouj, 1994). Les individus adultes peuvent dépasser 50 m de hauteur et atteindre une circonférence de 5 à 6 m pour des arbres de plus de 300 ans (Toth, 1980). L'espèce tolère des températures allant de −20 °C à +39 °C et des précipitations annuelles variant de 400 à 1 500 mm (Boudy, 1950 ; Toth, 1978 ; M'Hirit, 1982).

3. Exigences écologiques du cèdre de l'Atlas

3.1. Conditions climatiques

L'aire de répartition naturelle de *Cedrus atlantica* est caractérisée par un climat méditerranéen de moyenne montagne, où la température moyenne annuelle varie entre 7,5 et 15 °C. Les hivers sont généralement froids, avec des températures minimales en janvier variant de −8 à −1 °C, tandis que les températures estivales peuvent dépasser 30 °C. Les précipitations annuelles sont très variables, de 500 à 2 000 mm, avec un optimum écologique estimé entre 800 et 1 500 mm. L'espèce présente une bonne adaptation à la sécheresse estivale, qui dure généralement deux à quatre mois, et elle est capable de tolérer des températures élevées

atteignant 41 °C. Néanmoins, le cèdre de l'Atlas reste sensible aux gelées tardives, aux températures inférieures à −25 °C prolongées, et aux dommages mécaniques causés par les chutes de neige ou les vents violents (Courbet et al., 2012).

3.2. Exigences édaphiques

Cedrus atlantica se développe principalement dans l'étage méditerranéen montagnard, généralement entre 1 400 et 2 300 m, pouvant atteindre 2 000 m dans des conditions locales favorables. L'espèce préfère les sols profonds (> 60 cm), meubles et bien structurés, à bonne capacité de rétention hydrique, avec un pH compris entre 4 et 6,5. Les expositions nord et nord-ouest, plus fraîches et humides, sont particulièrement favorables à son installation et à sa croissance (Courbet et al., 2012).

3.3. Tolérance aux stress hydrique et thermique

Cedrus atlantica est largement reconnu pour sa tolérance à la sécheresse, principalement attribuée à son système racinaire profond et étendu, lui permettant d'accéder à l'eau des couches profondes du sol. Cependant, lors de la phase d'installation, les semis restent plus vulnérables à la sécheresse prolongée, leurs mécanismes de régulation stomatique n'étant pas encore pleinement développés (Aussenac & Valette, 1982 ; Aussenac & Finkelstein, 1983).

4. Aire de répartition géographique

4.1. Distribution naturelle en Afrique du Nord

Le cèdre de l'Atlas se rencontre naturellement dans les zones montagneuses d'Afrique du Nord. Sa distribution couvre le Rif marocain au-dessus de 1 400 m, le Moyen Atlas à partir de 1 600 m, le Haut Atlas oriental à partir de 1 700 m, et les massifs montagneux algériens au-dessus de 1 400 m (Lefèvre & Courbet, INRA). En Algérie, les cédraies couvrent environ 34 000 ha, principalement dans le Tell et les Aurès (Bentouati & Ghalmi, 2008).

4.2. Évolution historique de l'aire de répartition

La présence de *Cedrus atlantica* en Afrique du Nord remonte à des temps anciens, probablement au Pléistocène moyen, voire inférieur. Les données paléoclimatiques indiquent qu'à certaines périodes, son aire était plus étendue, avec des limites orientales atteignant la

Tunisie (Cheddadi, 2004). La présence du cèdre au Maghreb a été démontrée par l'identification de pollens fossiles dans diverses régions, y compris le Hoggar, le sud et le nord-ouest de la Tunisie, ainsi que le Rif, le Moyen Atlas et le Haut Atlas oriental (Pons & Quézel, 1958 ; Nedjahi, 1988).

4.3. Introduction dans d'autres régions du monde

Le cèdre de l'Atlas a été introduit depuis plusieurs décennies dans divers pays méditerranéens, initialement planté comme arbre ornemental puis utilisé dans les programmes de reboisement forestier. En France, son introduction remonte à 1862 sur les pentes du Mont Ventoux, et il couvre aujourd'hui environ 10 000 hectares. En Italie, il est utilisé pour le reboisement depuis 1864. Les premières plantations en Bulgarie datent de 1890 (Nedjahi, 1988).

5. Rôle écologique et importance socio-économique

5.1. Rôle dans les écosystèmes montagnards

Le cèdre de l'Atlas joue un rôle fondamental au sein des écosystèmes montagnards, où il contribue significativement à la stabilité écologique des milieux forestiers. Sa capacité de régénération naturelle garantit la pérennité des populations et permet la mise en œuvre de stratégies de reboisement économiquement efficaces (M'Hirit & Benzeyane, 2006) (Figure 4). Cette espèce joue également un rôle important dans la prévention des incendies grâce à son feuillage peu inflammable (Alexandrian & Guiran, 1992), et contribue au maintien de l'équilibre biologique en protégeant les sols contre la dégradation (Toth, 1990).



Figure 4: Rôle écologique des cédraies dans les écosystèmes montagnards *(Photographe de l'auteur)*

5.2. Services écosystémiques

Le cèdre de l'Atlas constitue une ressource essentielle pour les populations locales, assurant des services vitaux et contribuant significativement au développement économique de la région. Cette espèce joue un rôle majeur dans la création d'emplois et l'exploitation forestière, tout en soutenant les activités récréatives telles que le tourisme (Benhalima, 2004 ; Benchekroune, 1994). Son bois est utilisé pour la construction de toitures, parquets et charpentes. D'autres produits extraits de son bois comprennent le goudron et diverses essences utilisées en pharmacie et en parfumerie (Benhalima, 2004 ; Boudy, 1952).

5.3. Valeur économique, culturelle et patrimoniale

Le cèdre de l'Atlas représente une ressource précieuse pour les populations locales et l'économie régionale. Son bois est réputé pour sa qualité exceptionnelle, sa durabilité naturelle et son parfum envoûtant. Il est largement utilisé en menuiserie, ébénisterie, parqueterie, charpente et décoration (Loukkas, 2001). L'espèce produit également une huile essentielle aux propriétés antiseptiques, et ses aiguilles servent de fourrage pour le bétail pendant les périodes enneigées (Bahri, 2007).

6. Menaces pesant sur le cèdre de l'Atlas

6.1. Pressions anthropiques

Les pressions anthropiques figurent parmi les principaux facteurs de régression de la cédraie. Le surpâturage (Figure 5), l'exploitation incontrôlée et les coupes illicites (Figure 6) ont considérablement contribué à l'altération de la structure des peuplements. Ces pratiques ouvrent progressivement le couvert forestier et compromettent l'équilibre écologique de l'écosystème. L'absence de gestion forestière rationnelle a entraîné une transformation significative de la structure forestière, aboutissant à des peuplements âgés, peu denses et fortement dégradés. Le pâturage et le broutage limitent sévèrement la survie des jeunes plantules, rendant la régénération naturelle faible, voire inexistante dans les zones soumises à un pâturage intensif (Bentouati, 2008).



Figure 5:Pression pastorale et surpâturage au sein d'une cédraie de l'Atlas *(Photographe de l'auteur)*



Figure 6: Traces de coupe illicite dans une cédraie de *Cedrus atlantica* *(Photographe de l'auteur)*

6.2. Ravageurs et maladies

Les forêts de cèdre de l'Atlas sont soumises à diverses pressions biotiques de la part d'insectes ravageurs (Figure 7) et d'agents pathogènes. Parmi les insectes les plus significatifs, on note les xylophages tels que *Phaenops marmottani* et certaines espèces de Cérambycidés et Scolytinés. Les défoliateurs, notamment *Thaumetopoea bonjeani* et *Thaumetopoea pityocampa*, réduisent la capacité photosynthétique des arbres (Auclair et al., 1997) (Figure 8). Des pucerons, dont *Cinara* spp., *Cinara cedri* et *Cedrobium laportei*, peuvent provoquer des rougissements et des chutes d'aiguilles (Nageliesen, 2007). Les champignons pathogènes

représentent un autre facteur majeur de dépérissement, notamment *Armillaria mellea* (Boudy, 1952) et *Phellinus chrysoloma* (Bakry et al., 2011).



Figure 7 : Chenille processionnaire attaquant *Cedrus atlantica* *(Photographe de l'auteur)*



Figure 8: Jaunissement des aiguilles chez le cèdre de l'Atlas*(Photographe de l'auteur)*

6.3. Dégradation et fragmentation de l'habitat

La dégradation de la cédraie est caractérisée par l'amincissement progressif des strates arborescentes et une évolution vers une structure de pré-forêt, marquée par la matorrisation (Quézel, 1998). Les aléas climatiques, notamment les sécheresses répétées, le stress hydrique et les influences sahariennes, jouent un rôle crucial dans l'intensification du dépérissement (Moukouri, 2006) (Figure 9). Les contraintes édaphiques aggravent cette situation, particulièrement sur les substrats marneux présentant une faible capacité de rétention en eau (Bentouati & Bariteau, 2006). Néanmoins, la régénération reste possible dans des conditions favorables, notamment dans les trouées où le sol est travaillé et la protection strictement appliquée (Bentouati, 2008).



Figure 9: Dégradation et fragmentation des cédraies (dépérissement) *(Photographe de l'auteur)*

Matériel et Méthodes

1. Zone d'étude

La présente étude a été conduite dans la wilaya de Khenchela (Figure 10), située dans le Nord-Est algérien, au sein du massif de l'Aurès. Cette wilaya est caractérisée par une forte hétérogénéité écologique, conditionnée par des gradients d'altitude, de température et de précipitations. Elle abrite deux des rares cédraies d'Algérie orientale : la cédraie d'Ouled Yagoub, localisée sur le massif du même nom et regroupant plusieurs monts tel que les djebels Aïdel, Faraoun et Chentgouma, et la cédraie de Chelia, au sommet du Djebel Chelia (2 328 m), point culminant de l'Algérie du Nord. Ces deux massifs forestiers constituent les zones d'occurrence de l'espèce retenues pour cette modélisation.

Sur le plan climatique, la wilaya de Khenchela présente un gradient bioclimatique allant du semi-aride au sub-humide, avec une influence continentale marquée. Les étés sont chauds et secs, et les hivers rigoureux en altitude, où la neige peut persister plusieurs mois. Ces conditions ont façonné un étagement de végétation original, au sein duquel le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) occupe les tranches altitudinales supérieures, généralement entre 1 400 et 2 300 m d'altitude.

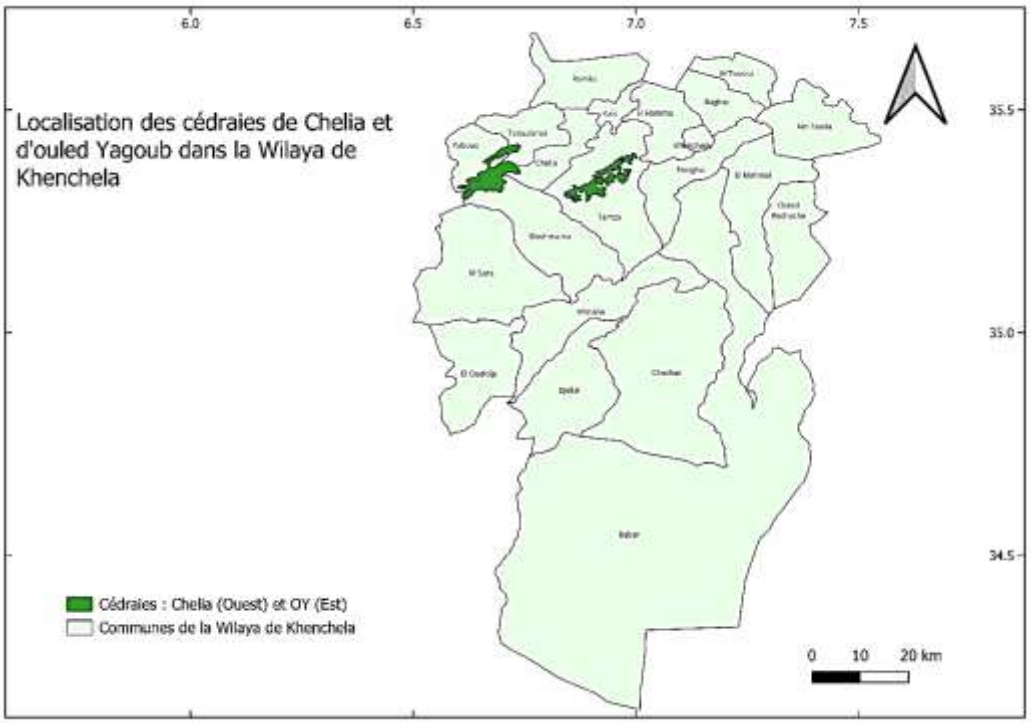


Figure 10: Localisation des cèdres de Chelia et d'Ouled Yagoub dans la Wilaya de Khenchela *(district forestier)*

2. Données d'occurrence

2.1 Source des données

Les données d'occurrence de *Cedrus atlantica* ont été générées à partir de la délimitation cartographique des peuplements sains des deux cédraies de la wilaya de Khenchela, à savoir la cédraie d'Ouled Yagoub et la cédraie de Chelia. Les polygones de délimitation ont été numérisés sous Google Earth Pro et enregistrés au format KML, puis importés sous R. Seuls les peuplements sains ont été retenus, à l'exclusion des zones présentant des signes de dépérissement par arbres isolés ou par taches. Ce choix méthodologique vise à caractériser la niche climatique optimale de l'espèce, c'est-à-dire les conditions dans lesquelles le cèdre exprime pleinement son potentiel de croissance, et non les conditions limites où il survit sous stress.

2.2 Génération des points d'occurrence

À partir des polygones KML des peuplements sains, des points d'occurrence aléatoires ont été générés à l'intérieur des polygones à l'aide du package terra sous R (Hijmans et al., 2023). Cette approche permet de maximiser la représentativité spatiale des occurrences et d'éviter les biais liés aux données d'observations de terrain ponctuelles.

Afin de réduire l'autocorrélation spatiale susceptible de biaiser les performances des modèles, une raréfaction spatiale a été appliquée en imposant une distance minimale de 1 km entre les points d'occurrence, conformément à la résolution des variables bioclimatiques utilisées (30 secondes d'arc ≈ 1 km). Cette opération a été réalisée à l'aide du package spThin sous R Studio (Aiello-Lammens et al., 2015), selon les recommandations de Radosavljevic and Anderson (2014).

Au terme de ce traitement, 81 points d'occurrence ont été retenus pour la modélisation. Ces points ont été répartis en trois fichiers distincts conformément aux exigences du package kuenm : un fichier joint regroupant l'ensemble des occurrences (n = 81), un fichier d'entraînement (train, n = 61, soit 75 % des données) utilisé pour la calibration du modèle, et un fichier de test (test, n = 20, soit 25 % des données) réservé à l'évaluation indépendante des performances du modèle.

3. Variables environnementales

La modélisation écologique a reposé sur un ensemble de variables bioclimatiques extraites de la base de données WorldClim v2.1 (Fick & Hijmans, 2017), à une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (environ 1 km). Parmi les 19 variables bioclimatiques standard (BIO1 à BIO19), quatre variables ont été exclues de l'analyse en raison de leurs discontinuités spatiales marquées entre pixels adjacents, susceptibles de générer des artefacts dans les prédictions et de nuire à la stabilité des modèles (Escobar et al., 2014) : BIO8 (température moyenne du trimestre le plus humide), BIO9 (température moyenne du trimestre le plus sec), BIO18 (précipitations du trimestre le plus chaud) et BIO19 (précipitations du trimestre le plus froid).

Afin d'éliminer la redondance entre les variables et de réduire les risques de multicolinéarité, une analyse de corrélation de Pearson a été conduite selon quatre seuils (0,6 ; 0,7 ; 0,8 et 0,9), à l'aide du package usdm sous R (Naïmi, 2017). Cette procédure a permis de sélectionner, pour le seuil retenu ($r = 0,7$), un sous-ensemble de cinq variables faiblement corrélées, maximisant la robustesse statistique du modèle tout en assurant son interprétabilité écologique. Les variables retenues sont présentées dans le tableau 1.

En complément des variables bioclimatiques, un modèle numérique de terrain (MNT) représentant l'élévation (en mètres) a été intégré dans l'analyse, conformément au rôle reconnu de l'altitude dans la structuration des peuplements de cèdre de l'Atlas.

Les couches environnementales ont été découpées à l'emprise de la wilaya de Khenchela à l'aide du package terra sous R (Hijmans et al., 2023). Les projections climatiques futures ont été obtenues à partir des simulations CMIP5 pour deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre (Representative Concentration Pathways, RCP) : le scénario RCP 4.5, représentatif d'une trajectoire d'émissions intermédiaire, et le scénario RCP 8.5, correspondant au scénario le plus pessimiste. Les projections ont été réalisées à l'horizon 2070 (période 2061-2080).

Table 1: Variables bioclimatiques et topographiques retenues pour la modélisation de la niche écologique de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela.

Variable	Description	Unité	Échelle
Bio1	Température moyenne annuelle	°C	Annuelle
Bio2	Écart diurne moyen des températures	°C	Mensuelle
Bio3	Isothermie (Bio2×100/Bio7)	%	Variation
Bio15	Saisonnalité des précipitations (CV)	%	Variation
Élévation	Altitude (modèle numérique de terrain)	m	Spatiale

4. Modélisation des niches climatiques

La modélisation de la niche climatique de *Cedrus atlantica* a été réalisée à l'aide du logiciel MaxEnt (version 3.4.1), implémenté dans R via le package kuenm (Cobos et al., 2019). MaxEnt repose sur le principe de l'entropie maximale et présente l'avantage de ne requérir que des données de présence, sans nécessiter de données d'absence réelles (Phillips et al., 2006). Il constitue l'un des algorithmes les plus performants et les plus utilisés en modélisation de la distribution des espèces (Elith et al., 2006).

La procédure de modélisation a été conduite en trois étapes principales selon le protocole kuenm (Cobos et al., 2019) :

- Calibration : 279 modèles candidats ont été générés en explorant 9 valeurs du multiplicateur de régularisation (RM : 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 8 ; 10) combinées à toutes les classes de fonctions disponibles dans MaxEnt (linéaire, quadratique, produit, charnière, seuil et leurs combinaisons), à partir du fichier d'entraînement.

- Évaluation : les performances de chaque modèle candidat ont été évaluées selon deux critères complémentaires : le taux d'omission à un seuil de présence de 10 % (OR10) et le Critère d'information d'Akaike corrigé (AICc), conformément aux recommandations de Peterson et al. (2011) et Warren & Seifert (2011). Le modèle

sélectionné est celui présentant la valeur d'AICc la plus faible parmi les modèles satisfaisant au critère OR10 ≤ 10 %.

- Construction du modèle final : le modèle sélectionné a été appliqué à 10 réplicats de type Bootstrap afin d'évaluer la stabilité des prédictions. L'importance de chaque variable a été mesurée par l'analyse jackknife et les courbes de réponse ont été générées pour l'ensemble des réplicats.

La qualité du modèle final a été évaluée par l'aire sous la courbe ROC (AUC), selon l'échelle de Hosmer & Lemeshow (2000) : AUC < 0,7 (faible), 0,7-0,8 (bonne), 0,8-0,9 (excellente), > 0,9 (exceptionnelle).

Les projections futures ont été réalisées en appliquant les paramètres du modèle final sélectionné aux variables bioclimatiques projetées selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2070, en utilisant le type d'extrapolation avec clamping (EC). L'étendue spatiale des projections couvre l'ensemble de la wilaya de Khenchela, sans restriction aux zones actuellement forestières, afin de détecter d'éventuelles zones refuges ou zones potentiellement favorables non encore colonisées.

Résultats

1. Données d'occurrence employées

La délimitation cartographique des peuplements sains des deux cédraies de la wilaya de Khenchela, à savoir la cédraie d'Ouled Yagoub et la cédraie de Chelia, a permis de générer un total de 300 points d'occurrence aléatoires à partir des polygones KML. Après application du filtre de raréfaction spatiale imposant une distance minimale de 1 km entre les points, 81 points d'occurrence ont été retenus pour la modélisation (Figure 11). Ces points sont distribués sur les deux massifs montagneux du nord-ouest de la wilaya, reflétant la distribution naturelle actuelle de l'espèce dans la région.

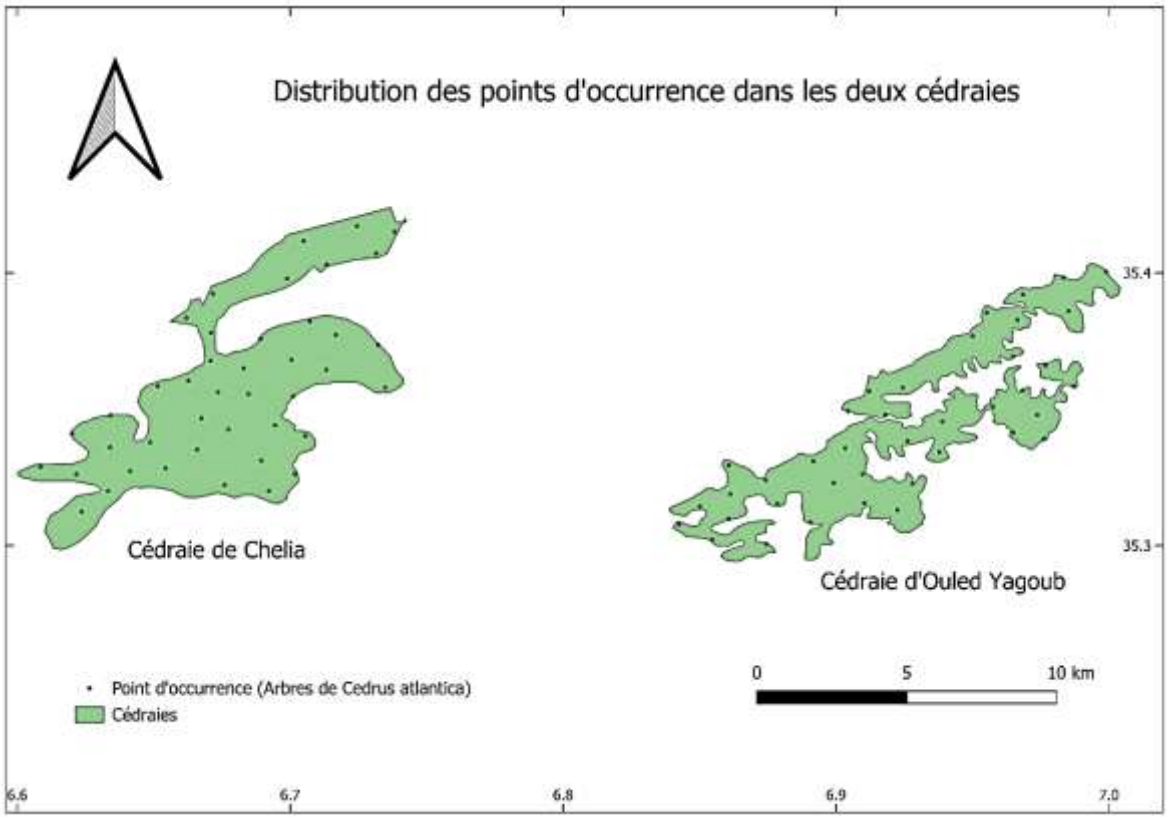


Figure 11: Points d'occurrence retenus après raréfaction spatiale (n = 81) *(Photographe de l'auteur)*

Les 81 occurrences ont été réparties comme suit : 61 points dans le fichier d'entraînement (75 %) et 20 points dans le fichier de test (25 %), selon un partitionnement aléatoire stratifié visant à assurer une évaluation indépendante des performances du modèle.

2. Performances du modèle

Lors de la calibration, un total de 279 modèles candidats ont été testés, combinant 9 valeurs de multiplicateur de régularisation et toutes les classes de fonctions disponibles dans MaxEnt. L'évaluation par les critères AICc et OR10 (≤ 10 %) a permis d'identifier le modèle optimal. Le modèle final sélectionné présente un multiplicateur de régularisation de 8 et utilise uniquement la classe de fonctions quadratique (Q), avec une valeur d'AICc minimale de -166,78.

Les performances du modèle final ont été évaluées sur 10 réplicats Bootstrap. La valeur moyenne de l'aire sous la courbe ROC (AUC) est de 0,98 ± 0,002, ce qui indique une performance exceptionnelle du modèle selon l'échelle de Hosmer & Lemeshow (2000). Cette valeur témoigne d'une excellente capacité discriminante entre les zones climatiquement favorables et défavorables à *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela (Figure 12).

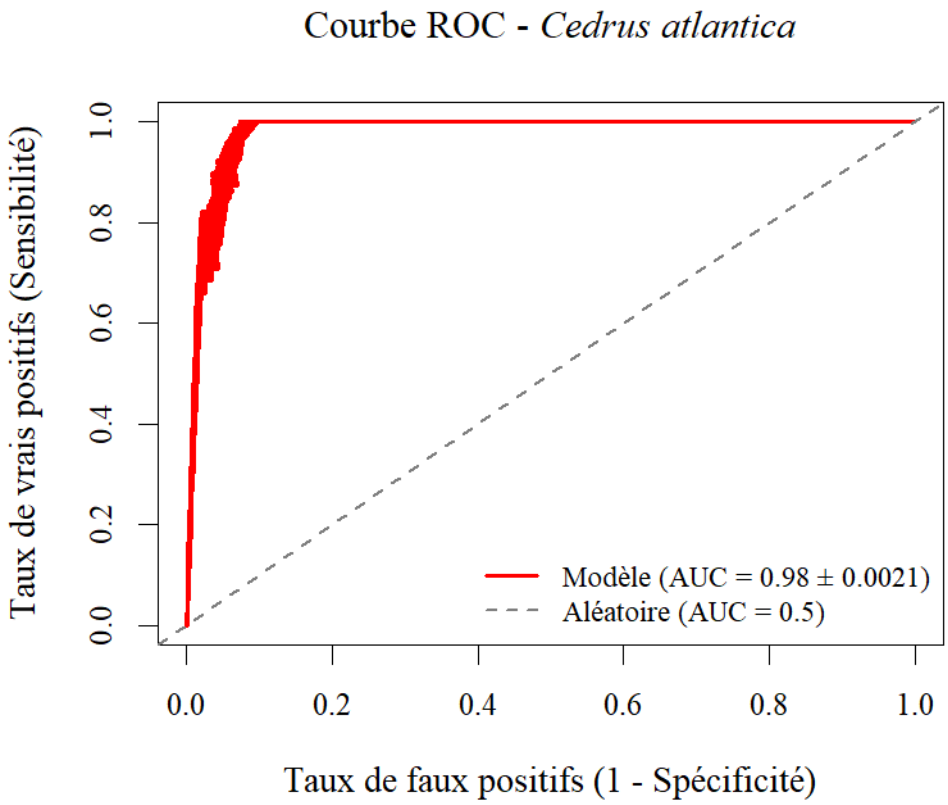


Figure 12:Courbe ROC du modèle MaxEnt final (AUC = 0,98 ± 0,002)

Le taux d'omission à 10 % (OR10) s'établit à 0,085, légèrement supérieur au seuil théorique de 0,05, ce qui est attendu compte tenu du faible nombre de points de test disponibles (n = 20) et de la résolution de 1 km des variables bioclimatiques.

3. Contribution des variables bioclimatiques

Parmi les cinq variables environnementales retenues pour la modélisation (Tableau 1), deux ont contribué de manière significative au modèle final : l'écart diurne moyen des températures (Bio2) avec une contribution de 51,8 % et la température moyenne annuelle (Bio1) avec une contribution de 48,0 %. Les variables Bio3 (isothermie), Bio15 (saisonnalité des précipitations) et l'élévation ont contribué marginalement, chacune à moins de 0,1 % (Tableau 2).

L'analyse jackknife confirme l'importance relative de ces deux variables thermiques, avec une importance de permutation de 67,0 % pour Bio1 et 32,8 % pour Bio2. Ces résultats soulignent le rôle prépondérant des facteurs thermiques, notamment l'amplitude thermique diurne et la température moyenne annuelle, dans la détermination de la niche climatique du cèdre de l'Atlas dans la wilaya de Khenchela.

Table 2: Contribution des variables bioclimatiques et topographiques au modèle final de distribution de *Cedrus atlantica.*

Variable bioclimatique	**Contribution (%)**	**Importance de permutation (%)**
Bio2 – Écart diurne moyen des températures	51,8	32,8
Bio1 – Température moyenne annuelle	48,0	67,0
Bio3 – Isothermie	0,1	0,1
Élévation	< 0,1	0,1
Bio15 – Saisonnalité des précipitations	< 0,1	< 0,1

Les courbes de réponse (Figure 13) révèlent une corrélation négative entre la probabilité de présence du cèdre et la température moyenne annuelle (Bio1) : l'espèce présente une

probabilité de présence maximale pour des températures moyennes annuelles comprises entre 8 et 10 °C, correspondant aux conditions thermiques des étages montagnards des massifs de l'Aurès. Au-delà de 12 °C, la probabilité de présence décroît rapidement, traduisant l'intolérance du cèdre aux températures élevées des étages inférieurs (Figure 14).

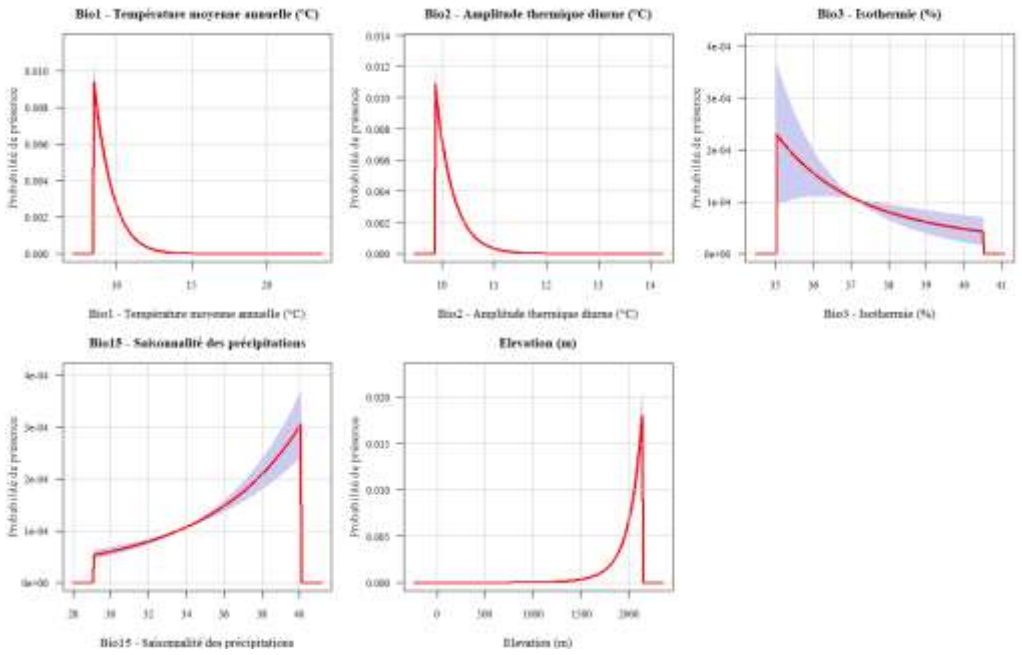


Figure 13: Les courbes de réponse

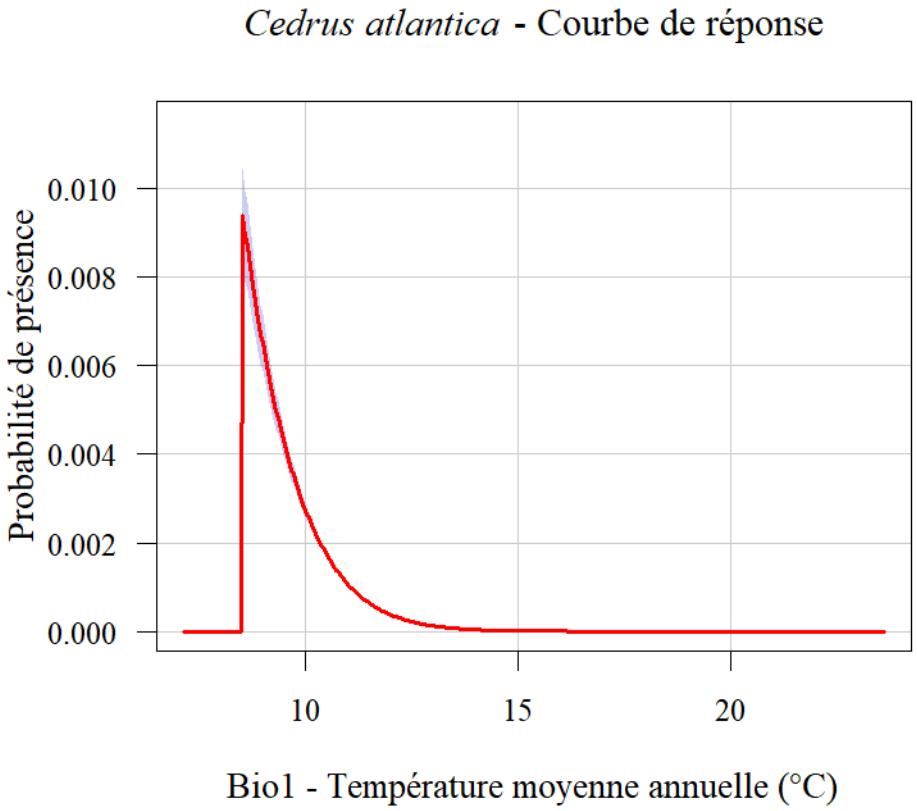


Figure 14: Probabilité de présence de *Cedrus atlantica* selon la température moyenne annuelle (Bio1)

De même, la courbe de réponse à l'écart diurne des températures (Bio2) indique une probabilité de présence maximale pour des amplitudes thermiques diurnes comprises entre 9,8 et 10,5 °C, reflétant les conditions de continentalité modérée caractéristiques des versants montagnards. Des amplitudes plus élevées, typiques des versants exposés au sud et des zones semi-arides, sont associées à une probabilité de présence réduite (Figure 15).

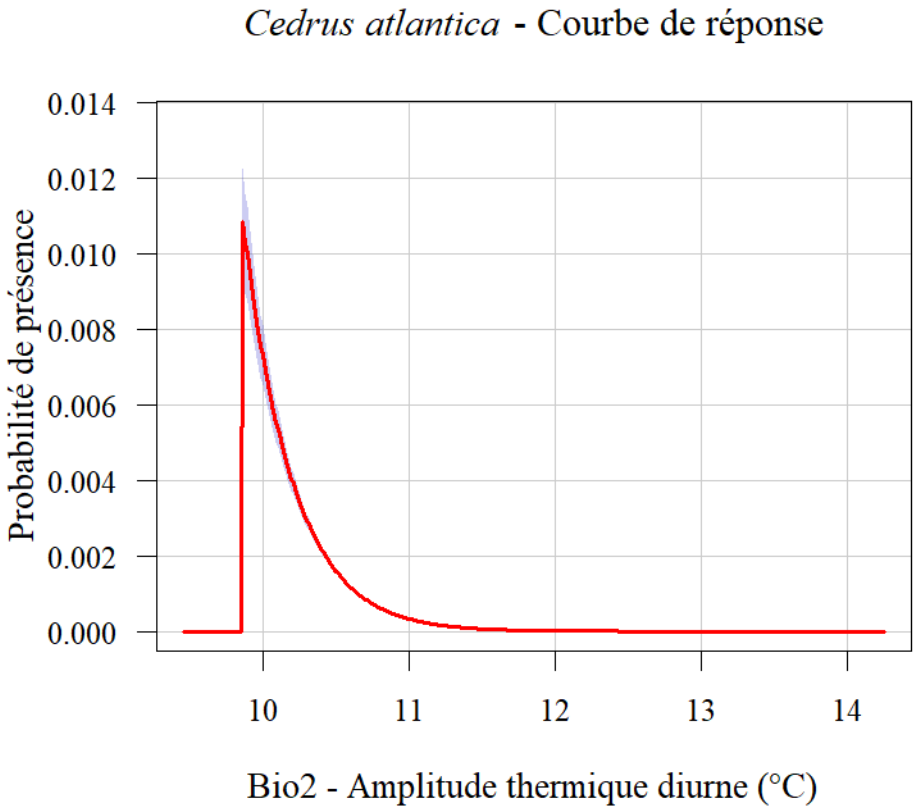


Figure 15: Probabilité de présence de *Cedrus atlantica* selon l'écart diurne des températures (Bio2)

4. Distribution potentielle actuelle

Les prédictions du modèle bioclimatique pour le climat actuel sont cohérentes avec la distribution connue de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela. Les zones climatiquement favorables à l'espèce se concentrent dans la partie nord-ouest du département, au niveau de deux massifs forestiers distincts. Le premier correspond au massif d'Ouled Yagoub, qui regroupe plusieurs sommets culminants tels que le Djebel Aïdel (2 143 m), le Djebel Faraoun et le Djebel Chentgouma (2 313 m). Le second massif correspond à la forêt de Béni Oudjana abritant la cédraie de Chelia, dont le point culminant est le Djebel Chelia (2 328 m), plus haut sommet d'Algérie du Nord. Ces deux entités forestières occupent les étages altitudinaux supérieurs du nord-ouest de la wilaya, caractérisés par des températures moyennes annuelles fraîches et une amplitude thermique diurne modérée, conditions optimales pour le développement du cèdre de l'Atlas (Figure 16).

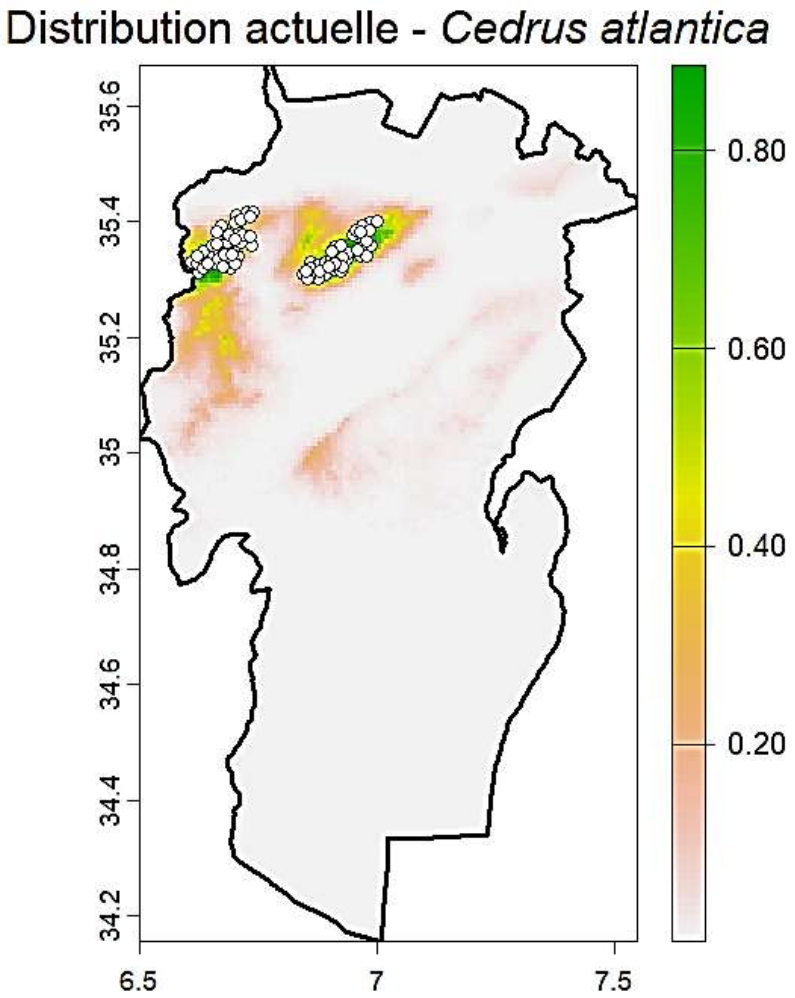


Figure 16: Carte de la distribution potentielle actuelle de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela

La probabilité de présence maximale prédite par le modèle atteint 0,89. Par ailleurs, le modèle identifie une zone de probabilité intermédiaire (0,20–0,40) au niveau du Djebel Ali Ennasse, situé dans la partie nord de la wilaya, ainsi qu'une zone résiduelle faible dans le massif forestier de Béni Melloul, au sud-ouest, forêt partagée entre les wilayas de Khenchela, Batna et Biskra. Ces deux secteurs, dépourvus de populations connues de cèdre, pourraient constituer des habitats potentiellement favorables non encore colonisés. En dehors de ces reliefs, le reste de la wilaya, notamment le Sahara des Nemamcha au sud et les zones de basse altitude de l'est du département, présente des conditions climatiques peu ou pas favorables à l'espèce.

Ces résultats confirment que les populations actuelles de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela sont en équilibre avec les conditions climatiques présentes, et que la distribution de l'espèce est essentiellement déterminée par des facteurs thermiques.

5. Distribution potentielle future

Les projections climatiques futures réalisées selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2070 indiquent une contraction significative des niches climatiques favorables à *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela, dont l'intensité est proportionnelle au niveau de réchauffement climatique projeté.

5.1 Scénario RCP 4.5 – 2070

Sous le scénario d'émissions intermédiaires RCP 4.5, les projections à l'horizon 2070 montrent une réduction notable de la probabilité de présence du cèdre dans la wilaya de Khenchela. La probabilité de présence maximale chute à 0,023, soit une réduction de plus de 97 % par rapport aux valeurs actuelles. Les zones présentant encore des conditions climatiques favorables se maintiennent exclusivement dans les secteurs les plus élevés des deux massifs forestiers, sous forme de refuges altitudinaux résiduels. Dans la forêt de Béni Oudjana, quelques cellules subsistent au niveau des versants nord de la cédraie de Chelia. Dans le massif d'Ouled Yagoub, la probabilité résiduelle se concentre sur la pinède de transition dite El Hodh, couloir forestier reliant les deux massifs et constituant à ce titre un tampon climatique potentiellement stratégique. Ces refuges correspondent aux zones où les températures restent suffisamment fraîches pour permettre le maintien de l'espèce (Figure 17).

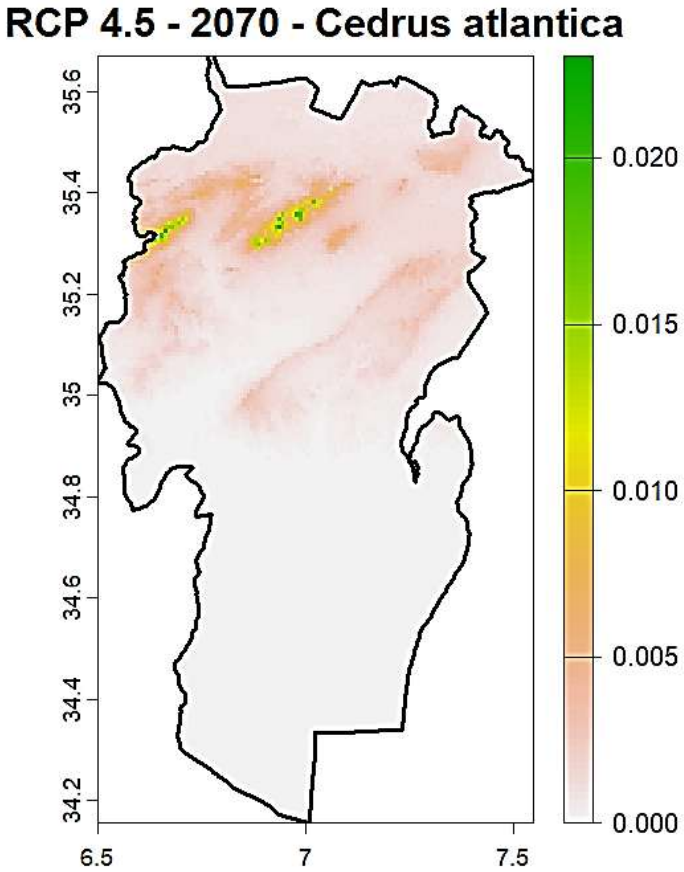


Figure 17: Carte de la distribution potentielle future – Scénario RCP 4.5, horizon 2070

5.2 Scénario RCP 8.5 – 2070

Sous le scénario pessimiste RCP 8.5, la contraction de la niche climatique du cèdre atteint son niveau le plus sévère. La probabilité de présence maximale s'effondre à 0,008, soit une réduction de plus de 99 % par rapport aux valeurs actuelles. Cette quasi-disparition des conditions climatiques favorables traduit un dépassement des seuils de tolérance thermique de l'espèce sur l'ensemble du territoire de la wilaya. Seule une bande résiduelle allongée, localisée dans le nord-ouest de la Wilaya, présente encore une probabilité non nulle, témoignant d'un ultime refuge thermique aux sommets les plus élevés. Le Djebel Ali Ennasse au nord et le massif de Béni Melloul au sud-ouest ne présentent plus, sous ce scénario, que des valeurs négligeables de probabilité de présence (Figure 18).

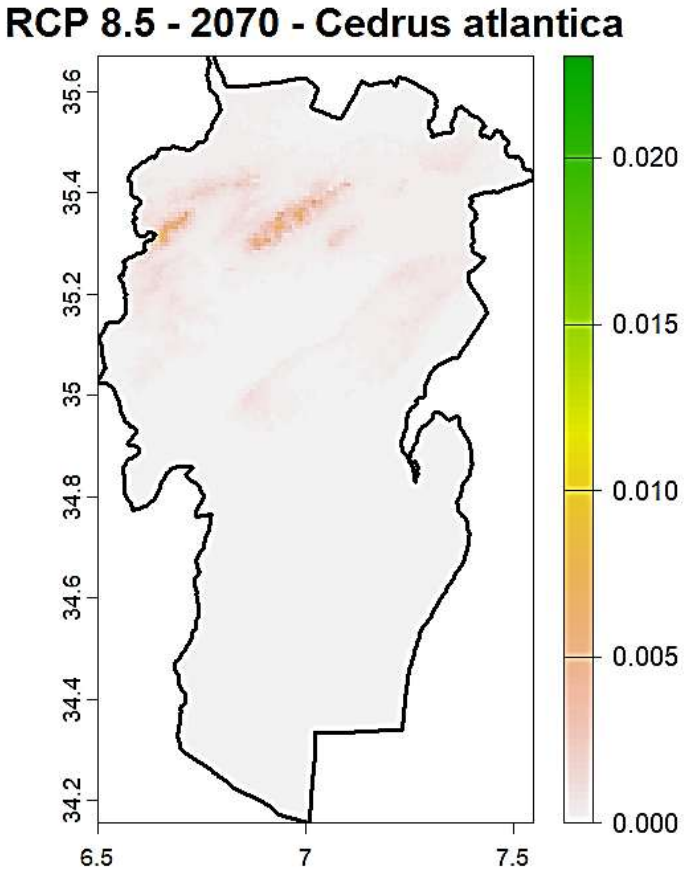


Figure 18: Carte de la distribution potentielle future – Scénario RCP 8.5, horizon 2070

L'ensemble de ces projections souligne la très grande vulnérabilité des cédraies de Khenchela face aux changements climatiques projetés, quelle que soit la trajectoire d'émissions considérée. La contraction de la niche est d'autant plus préoccupante que les massifs forestiers de la wilaya constituent des refuges biogéographiques isolés, pour lesquels les possibilités de migration altitudinale ou latitudinale vers des zones plus favorables sont très limitées.

Discussion

Discussion

Le présent travail s'intéresse aux facteurs environnementaux influençant la répartition de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela, à l'identification des zones climatiquement favorables à sa présence, ainsi qu'à l'évaluation de sa réponse face aux scénarios de changement climatique projetés pour les prochaines décennies. Les modèles obtenus ont permis d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques. Ainsi, la présence du cèdre dans la région est fortement corrélée à des conditions thermiques fraîches et à des amplitudes thermiques diurnes modérées. Les zones les plus favorables se concentrent dans les massifs montagneux du nord-ouest de la wilaya. Sous l'effet du réchauffement climatique, les niches climatique favorables au cèdre devraient connaître des régressions sévères, particulièrement sous le scénario pessimiste RCP 8.5.

1. Température moyenne annuelle

Selon les résultats de notre modélisation, la température moyenne annuelle (Bio1) constitue, avec l'écart diurne, l'un des facteurs déterminants de la distribution spatiale du cèdre de l'Atlas dans la wilaya de Khenchela. La courbe de réponse révèle une probabilité de présence maximale pour des températures comprises entre 8 et 10 °C, traduisant les exigences thermiques de l'espèce pour les étages montagnard et subalpin. Au-delà de 12-13 °C, la probabilité de présence décroît rapidement, reflétant l'intolérance de *Cedrus atlantica* aux conditions chaudes des zones de basse et moyenne altitude.

Ces résultats sont cohérents avec les données de la littérature, qui indiquent que *Cedrus atlantica* est une espèce adaptée aux conditions de montagne fraîches et semi-humides, avec des optimums de croissance pour des températures moyennes annuelles inférieures à 15 °C (Bentouati & Ghalmi, 2008 ; Linares et al., 2013). La température agit directement sur les processus physiologiques de l'espèce, notamment la photosynthèse, la respiration et la phénologie, mais aussi sur la disponibilité en eau via l'évapotranspiration. Des températures élevées induisent un stress hydrique estival qui constitue aujourd'hui le principal facteur de dépérissement du cèdre dans les Aurès (Nedjahi, 1988 ; Bentouati, 2008 ; Linares et al., 2013).

2. Écart diurne des températures

L'écart diurne moyen des températures (Bio2) constitue la variable bioclimatique présentant la contribution la plus élevée au modèle final (51,8 %), bien que les importances de permutation indiquent que Bio1 joue un rôle plus déterminant dans la structure du modèle (67,0 %). La courbe de réponse à Bio2 indique une probabilité de présence maximale pour des amplitudes thermiques diurnes comprises entre 9,8 et 10,5 °C, correspondant aux conditions de continentalité modérée des versants montagnards nord-exposés.

Des amplitudes thermiques diurnes élevées, typiques des versants méridionaux exposés au rayonnement solaire intense et des zones semi-arides de basse altitude, sont associées à une probabilité de présence réduite. Ceci s'explique par la sensibilité du cèdre aux variations brutales de température, qui peuvent provoquer des déshydratations des tissus foliaires, perturber les échanges gazeux et compromettre la régénération naturelle (Sarris et al., 2011). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bentouati & Ghalmi (2008), qui soulignent l'importance de la continentalité thermique dans la régression des cédraies algériennes, et avec les observations de Linares et al. (2013) sur le rôle des extrêmes thermiques dans le dépérissement de *Cedrus atlantica* au Maghreb.

3. Répartition actuelle

La distribution potentielle actuelle prédite par le modèle est compatible avec la localisation connue des cédraies dans la wilaya de Khenchela, validant ainsi la cohérence écologique du modèle. La concentration des niches favorables dans le nord-ouest du département reflète le rôle structurant des massifs de l'Aurès dans la distribution de cette espèce relique, héritée des périodes plus fraîches et humides du Quaternaire (Quézel & Santa, 1962 ; Barbero et al., 1990).

Le modèle prédit également des zones de probabilité de présence faible à modérée au-delà des cédraies actuelles. Il s'agit notamment des versants nord des djebels composant le massif d'Ouled Yaghoub — Djebel Aïdel, Djebel Faraoun et Djebel Chentgouma — où le cèdre est présent sur les flancs nord mais absent des versants sud. Le couloir d'El Hodh, pinède de transition reliant les forêts de Béni Oudjana et d'Ouled Yagoub, présente également une probabilité résiduelle non négligeable. Plus au nord, le Djebel Ali Ennasse affiche une probabilité intermédiaire, suggérant que cet espace montagnard pourrait offrir des conditions

partiellement compatibles avec la présence du cèdre. Ces zones, dépourvues de populations connues, pourraient correspondre à des habitats potentiellement favorables non encore colonisés, en raison de contraintes édaphiques, historiques ou de dispersion.

En dehors des massifs montagneux du nord-ouest, le reste de la wilaya — notamment la plaine du Sahara des Nemamcha au sud et les piémonts de l'est du département — présente des conditions climatiques peu ou pas favorables à *Cedrus atlantica*, confirmant sa nature strictement oroméditerranéenne dans ce secteur.

4. Réponse au changement climatique

Les projections climatiques issues de la modélisation suggèrent une contraction extrêmement sévère des niches climatiques favorables à *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela, selon les deux scénarios climatiques testés. Cette tendance est d'autant plus préoccupante que les cédraies de Khenchela constituent des populations marginales et isolées géographiquement, pour lesquelles les possibilités d'adaptation par migration altitudinale ou latitudinale sont très limitées.

Sous le scénario RCP 4.5, la réduction de la probabilité de présence maximale de 0,89 à 0,023 (soit -97,4 %) traduit un dépassement progressif mais significatif des seuils de tolérance thermique de l'espèce. Les refuges climatiques se maintiendraient uniquement dans les secteurs les plus élevés des massifs, dans la région de Hammam Essalhine et dans le couloir d'El Hodh entre les forêts de Béni Oudjana et d'Ouled Yagoub.

Sous le scénario RCP 8.5, la quasi-disparition des conditions favorables (probabilité maximale de 0,008, soit -99,1 %) indique que le réchauffement extrême projeté à l'horizon 2070 serait incompatible avec le maintien de populations viables de cèdre dans la wilaya de Khenchela. Seule la région Djebel Chelia, présente encore une probabilité résiduelle très faible, soulignant l'importance de ce site comme ultime refuge potentiel sous le scénario le plus pessimiste. Les massifs du Djebel Ali Ennasse et de Béni Melloul perdent toute valeur climatique pour l'espèce sous ce scénario. Ces résultats convergent avec les travaux de Linares et al. (2013), Ettahiri et al. (2015) et Zine El Abidine (2019), qui font état d'une régression prévisible des cédraies maghrébines dans les décennies à venir.

Ces projections soulignent la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de conservation proactive : (i) la protection stricte des peuplements sains existants ; (ii) l'identification et la

conservation des micro-refuges climatiques potentiels sur les versants nord des massifs les plus élevés ; (iii) la mise en place d'actions de reboisement assisté dans les zones identifiées comme potentiellement favorables ; et (iv) le suivi à long terme de l'état sanitaire et de la dynamique des populations pour détecter précocement les signes de dépérissement climatique.

Conclusion

Conclusion

Ce travail s'inscrit dans une démarche de compréhension et d'anticipation des effets du changement climatique sur la distribution géographique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans la wilaya de Khenchela, l'une des rares cédraies d'Algérie orientale. En mobilisant la modélisation des niches climatique à l'aide du logiciel MaxEnt, implémenté via le package kuenm sous R, nous avons élaboré des modèles prédictifs permettant d'identifier les zones climatiquement favorables à la présence actuelle et future de cette espèce forestière emblématique, en fonction de deux scénarios de réchauffement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5) à l'horizon 2070 (Elith et al., 2011 ; Phillips et al., 2006).

Les résultats obtenus soulignent que la répartition actuelle de *Cedrus atlantica* dans la wilaya de Khenchela est principalement déterminée par deux facteurs thermiques : l'amplitude thermique diurne (Bio2, 51,8 % de contribution) et la température moyenne annuelle (Bio1, 48,0 % de contribution). Le modèle présente des performances exceptionnelles (AUC = 0,98 ± 0,002). Les zones de présence optimale se concentrent dans les massifs montagneux du nord-ouest de la wilaya — la cédraie d'Ouled Yagoub et celle de Chelia — caractérisés par des températures moyennes annuelles fraîches (8–10 °C) et une amplitude thermique modérée, confirmant la nature strictement oroméditerranéenne de cette espèce.

À l'horizon 2070, les projections climatiques indiquent une contraction sévère et préoccupante des niches climatique favorables au cèdre de l'Atlas, dont l'intensité est proportionnelle au niveau de réchauffement considéré. Sous le scénario intermédiaire RCP 4.5, la probabilité de présence maximale chute de 0,89 à 0,023, soit une réduction de plus de 97 %, les refuges climatiques se maintenant uniquement dans les secteurs altitudinaux les plus élevés, en particulier dans la région de Hammam Essalhine et le couloir d'El Hodh. Sous le scénario pessimiste RCP 8.5, la quasi-disparition des conditions favorables (probabilité maximale de 0,008, réduction de plus de 99 %) traduit un dépassement généralisé des seuils de tolérance thermique de l'espèce sur l'ensemble du territoire de la wilaya.

Ces résultats convergent avec les travaux récents sur la vulnérabilité de *Cedrus atlantica* au changement climatique en Afrique du Nord (Linares et al., 2013 ; Ettahiri et al., 2015 ; Zine El Abidine, 2019). La particularité des cédraies de Khenchela réside dans leur isolement géographique au sein de refuges biogéographiques hérités des périodes plus fraîches du Quaternaire, pour lesquels les possibilités de migration altitudinale ou latitudinale sont extrêmement limitées.

Conclusion

Il convient cependant de souligner certaines limites inhérentes à cette étude. La génération d'occurrences à partir de polygones de peuplements sains ne permet pas de capturer l'ensemble de la variabilité écologique de la niche de l'espèce. De même, la résolution des données bioclimatiques utilisées (1 km) peut occulter des effets topoclimatiques locaux importants dans les milieux montagnards complexes de l'Aurès. Enfin, d'autres facteurs déterminants — la nature des sols, la compétition interspécifique, les perturbations anthropiques et les attaques de ravageurs — n'ont pas pu être intégrés dans le modèle (Seyer, 1991 ; Bentouati, 2008).

Au-delà des recommandations scientifiques, ce travail met en évidence la nécessité urgente de mettre en œuvre des stratégies de conservation proactive pour *Cedrus atlantica* dans les Aurès : la protection stricte des peuplements sains existants, l'identification et la préservation des micro-refuges climatiques potentiels sur les versants nord des massifs les plus élevés, la mise en place d'actions de reboisement assisté dans les zones identifiées comme potentiellement favorables, et le suivi à long terme de l'état sanitaire des populations.

Enfin, ce travail met en lumière l'intérêt des outils de modélisation écologique comme aide à la décision dans la gestion anticipée des risques liés au changement climatique sur les écosystèmes forestiers montagnards, soulignant la nécessité de stratégies de veille, de conservation et d'intervention adaptées au contexte climatique en mutation rapide de la wilaya de Khenchela.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdessemed, K. (1981). *Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica *Manetti) dans l'Aurès et le massif de Belazma : étude phytosociologique et problèmes de conservation* [Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III].

Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, *38*(5), 541–545. https://doi.org/10.1111/ecog.01132

Alexandrian, D., & Guiran, M. (1992). Les causes des incendies de forêts. *Forêt Méditerranéenne*, *1*, 41–47.

Auclair, P. D., Eglinton, P. D., & Minnemeyer, S. L. (1997). Principal forest dieback episodes in northern hardwoods. *Water, Air, and Soil Pollution*, *93*, 175–198.

Aussenac, G., & Finkelstein, D. (1983). Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre. *Annales des Sciences Forestières*, *40*, 67–77.

Aussenac, G., & Valette, J. C. (1982). Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica*, *Quercus ilex* et diverses espèces de pins sur le Mont Ventoux. *Annales des Sciences Forestières*, *39*, 41–62.

Bahri, B. (2007). *Contribution à l'étude de l'influence des facteurs édaphiques, orographiques et biologiques sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas dans les monts Ouled Yaghoub* [Mémoire de Master, Université El-Hadj Lakhdar, Batna].

Bakry, M., Amrani, N., & Gaci, H. (2011). Étude des champignons pathogènes dans les cédraies algériennes : cas de *Phellinus chrysoloma*. *Revue Forestière Algérienne*, *12*, 32–39.

Barbero, M., Bonin, G., Loisel, R., & Quézel, P. (1990). Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the Mediterranean basin. *Vegetatio*, *87*(2), 151–173.

Benabid, A. (1994). Biogéographie, phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, *27*, 61–76.

Benchekroune, F. (1994). L'économie de la cédraie marocaine et son impact sur le développement des communautés locales. *Annales de la Recherche Forestière*, *27*, 698–713.

Benhalima, S. (2004). *Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans le Haut et Moyen Atlas (Maroc)* [Thèse de doctorat, Université Mohammed V, Rabat].

Bentouati, A. (2008). La situation du cèdre de l'Atlas en Algérie. *Forêt Méditerranéenne*, *29*(2), 203–208.

Références bibliographiques

Bentouati, A., & Bariteau, M. (2006). Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas de l'Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, *27*(4), 317–322.

Bentouati, A., & Ghalmi, S. (2008). La situation actuelle des cédraies en Algérie. *Forêt Méditerranéenne*, *29*(2), 195–202.

Boudy, P. (1950). *Économie forestière nord-africaine : Monographies et traitements sylvicoles des essences forestières*. Larose.

Boudy, P. (1952). *Guide du forestier en Afrique du Nord*. La Maison Rustique.

Cheddadi, R. (2004). Changements de l'environnement au nord-ouest de l'Afrique : passé, présent et futur. Dans A. M. Semah & J. Renault-Miskowski (Éds.), *L'évolution de la végétation depuis deux millions d'années* (pp. 104–125). Artcom.

Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, *7*, e6281. https://doi.org/10.7717/peerj.6281

Courbet, F., Lagacherie, M., Marty, P., Ladier, J., Ripert, C., Riou-Nivert, P., Huard, F., Amandier, L., & Paillassa, E. (2012). *Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations* (32 p.). RMT AFORCE.

Derridj, A. (1990). *Étude des populations de* Cedrus atlantica *M. en Algérie* [Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse].

El Omari, B., Moukrim, S., Lahssini, S., Rhazi, M., Msanda, F., Haïdara, O., Benabou, A., & Rhazi, L. (2017). Changements de la distribution potentielle de l'*Argania spinosa* au Maroc sous des scénarios de changements climatiques. *Sécheresse*, *28*(3), 158–168.

Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., … Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, *29*(2), 129–151.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, *17*(1), 43–57.

Ettahiri, O., Benabou, A., & El Omari, B. (2015). Modélisation de la distribution potentielle du cèdre de l'Atlas au Maroc en réponse aux changements climatiques. *Revue d'Écologie (Terre et Vie)*, *70*(2), 138–152.

Ezzahiri, M., & Belghazi, B. (2000). Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas dans le Moyen Atlas (Maroc). *Sécheresse*, *11*(2), 79–84.

Fabre, J. P. (1994). État actuel des connaissances sur les ravageurs provenant de l'aire naturelle des cèdres ayant rejoint la France. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, *27*, 539–551.

Farjon, A. (2010). *A Handbook of the World's Conifers*. Brill Academic Publishers.

Références bibliographiques

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, *37*(12), 4302–4315.

Hijmans, R. J., Karney, C., Williams, J., & Vennes, C. (2023). *terra: Spatial data analysis* (R package version 1.7). https://CRAN.R-project.org/package=terra

Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied logistic regression* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Krouchi, F. (2010). *Étude de la diversité d'organisation reproductive et de la structure génétique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica *Manetti) dans des peuplements naturels* [Thèse de doctorat, UMMTO, Tizi-Ouzou].

Krutovsky, K. V., Troggio, M., Brown, G. R., Jermstad, K. D., & Neale, D. B. (2004). Comparative mapping in Pinaceae. *Genetics*, *168*(1), 447–461.

Lefèvre, F., & Courbet, F. (n.d.). *Le Cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations* (32 p.). INRA / RMT AFORCE.

Linares, J. C., Camarero, J. J., Bowker, M. A., Carreira, J. A., & Carricondo, J. M. (2013). Forest-management legacies and climate change alter the decline trajectories of relict *Abies pinsapo* forests. *Oecologia*, *171*(2), 339–350.

Loukkas, M. A. (2001). *Étude de la variabilité de site de la qualité du bois du cèdre de l'Atlas dans le massif forestier central du Djurdjura* [Mémoire de Master, INA, El-Harrach, Alger].

Maire, R. (1952). *Flore de l'Afrique du Nord* (Vol. 1). Éditions Le Chevalier.

Massif, T. (2006). *Étude de la productivité du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica *Manetti) dans le Parc National de Theniet El-Had* [Mémoire d'ingénieur agronome, INA, El Harrach, Alger].

M'Hirit, O., & Benzeyane, M. (2006). Taxonomie et distribution historique. Dans O. M'Hirit (Éd.), *Le Cèdre de l'Atlas*. Mardaga.

M'Hirit, O., & Blerot, P. (1999). *Le grand livre de la forêt marocaine*. Mardaga.

M'Hirit, O., & Maghnouj, M. (1994). Stratégie de conservation des ressources génétiques forestières au Maroc. Dans *Ressources génétiques végétales et développement durable* (pp. 123–138). Actes Éditions.

Moukouri, N. (2006). *Contribution à l'étude du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le massif Ouled Yagoub : approche sylvicole* [Mémoire d'ingénieur, Faculté des Sciences, Batna].

Nageliesen, L. M. (2007). Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France. *Forêt Entreprise*, *174*, 1–31.

Références bibliographiques

Naïmi, B. (2017). *usdm: Uncertainty analysis for species distribution models* (R package version 1.1-18). https://CRAN.R-project.org/package=usdm

Nedjahi, A. (1988). Croissance et productivité du cèdre de l'Atlas à Chréa. *Annales de la Recherche Forestière*, *2*, 23–58.

Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3–4), 231–259.

Pons, A., & Quézel, P. (1958). Premières remarques sur l'étude palynologique d'un guano fossile du Hoggar. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, *244*, 2290–2292.

Quézel, P. (1998). Les cèdres et les cédraies du bassin méditerranéen : signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt Méditerranéenne*, *XIX*(3), 243–257.

Quézel, P., & Santa, S. (1962). *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales* (Vol. I). CNRS.

Quézel, P., & Santa, S. (1963). *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales* (Vol. II). CNRS.

Radosavljevic, A., & Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, *41*(4), 629–643.

Ran, J.-H., Shen, T.-T., Wu, H., Gong, X., & Wang, X.-Q. (2018). Phylogeny and evolutionary history of Pinaceae updated by transcriptomic analysis. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, *129*, 106–116.

Sarris, D., Christodoulakis, D., & Körner, C. (2011). Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change*, *106*(2), 203–223.

Seyer, P. (1991). La tordeuse du cèdre *Acleris undulana* (Walsingham) (Lep., Tortricidae). *Revue Forestière Française*, *43*(3), 253–258.

Simpson, M. G. (2019). *Plant Systematics* (3rd ed.). Academic Press.

Toth, J. (1978). *Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica *M.) dans le sud de la France* [Thèse d'ingénieur-docteur, Faculté des Sciences, Marseille].

Toth, J. (1980). Le cèdre dans quelques pays méditerranéens et dans deux autres pays d'importance forestière majeure. *Forêt Méditerranéenne*, *2*, 23–30.

Toth, J. (1990). Le cèdre III : Intérêt paysager. Forêt touristique au cèdre. *Forêt Privée*, *195*, 8 p.

Références bibliographiques

Toth, J. (2005). *Le Cèdre de France – Étude approfondie de l'espèce*. L'Harmattan.

Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, *21*(2), 335–342.

Zine El Abidine, A. (2019). Climate change and forest ecosystems in Morocco: Vulnerability and adaptation. *Journal of Forest Economics*, *36*(2), 175–19

Abstract

The Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) is a forest species endemic to the mountainous massifs of the Maghreb, whose geographic distribution is closely conditioned by bioclimatic variables, themselves influenced by global climate change. This study aims to model the current and future potential distribution of *Cedrus atlantica* in the Khenchela province, located in northeastern Algeria, by integrating the impact of climate warming scenarios. Occurrence data (n = 81) were generated from the cartographic delineation of healthy stands from the two cedar forests of the province, the Beni Oudjana forest and the Ouled Yagoub forest, and spatially rarefied at a minimum distance of 1 km. Modeling was performed using MaxEnt software, via the kuenm package under R, based on a set of five bioclimatic variables extracted from the WorldClim v2.1 database for the present and future under two greenhouse gas emission scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) for the 2070 horizon. The model showed excellent performance (AUC = 0.98 ± 0.002) and revealed that the diurnal temperature range (Bio2) and mean annual temperature (Bio1) are the key determinants of cedar presence. Currently, suitable areas are concentrated in the northwestern massifs of the province, particularly around Djebel Chelia (2,328 m) and the Aïdel, Faraoun, and Chentgouma djebels. Future climate projections indicate severe contractions of the suitable range, with reductions exceeding 97% under RCP 4.5 and 99% under RCP 8.5, with the last refugia limited to the northern slopes of Chelia region and the El Hodh forest corridor. This study highlights the relevance of ecological niche modeling as a predictive tool for anticipating the effects of climate change on mountain forest ecosystems, and provides a strategic basis for guiding conservation and reforestation policies for the Atlas cedar.

الملخص

يُعدّ أرز الأطلس (*Cedrus atlantica* Manetti) نوعًا حرجيًا متوطنًا في المرتفعات الجبلية بالمغرب العربي، وتخضع توزيعاته الجغرافية لمتغيرات مناخية-بيولوجية تتأثر بدورها بالتغيرات المناخية العالمية. يهدف هذا العمل إلى نمذجة التوزيع المحتمل الحالي والمستقبلي لأرز الأطلس في ولاية خنشلة الواقعة في شمال شرق الجزائر، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير سيناريوهات الاحترار المناخي. تم الحصول على بيانات التواجد (n = 81) انطلاقًا من تحديد حدود المجموعات الحرجية السليمة في الغابتين الرئيسيتين بالولاية غابة بني وجانة وغابة أولاد يعقوب مع تطبيق فلتر التخفيف المكاني بمسافة دنيا قدرها كيلومتر واحد. أُجريت النمذجة باستخدام برنامج MaxEnt عبر الحزمة kuenm تحت بيئة R، اعتمادًا على خمسة متغيرات مناخية مستخرجة من قاعدة البيانات WorldClim v2.1 للحاضر والمستقبل وفق سيناريوهَي انبعاثات الغازات الدفيئة (RCP 4.5 و RCP 8.5) لأفق عام 2070. أظهر النموذج أداءً ممتازًا (AUC = 0.98 ± 0.002)، وكشف أن مدى التغيّر اليومي في درجات الحرارة (Bio2) ومتوسط درجة الحرارة السنوية (Bio1) هما العاملان الحاسمان في تحديد وجود الأرز. تتمركز المناطق الملائمة حاليًا في سلاسل الجبال الواقعة في شمال غرب الولاية، لا سيما حول جبل الشيليا (2328 م) وجبال أيدل وفرعون وشنتقومة. تشير التوقعات المناخية المستقبلية إلى انكماشات حادة في المساحات الملائمة، بانخفاض يتجاوز 97% في سيناريو RCP 4.5 و99% في سيناريو RCP 8.5، مع اقتصار الملاجئ الأخيرة على منحدرات منطقة شلية وممر غابة الهوض. تؤكد هذه الدراسة على أهمية نمذجة المجالات البيئية كأداة تنبؤية لاستباق تأثيرات التغير المناخي على النظم الإيكولوجية الغابوية الجبلية، وتوفر أساسًا استراتيجيًا لتوجيه سياسات الحفاظ وإعادة التشجير لأرز الأطلس.