

Soumis le : 22/10/2020

Forme révisée accepté le : 26/04/2021

Auteur Correspondant: laaribya.s@ucd.ac.ma



**Revue
Nature et Technologie**

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – E-ISSN : 2437-0312

Modélisation par l'entropie maximale de l'habitat potentiel du cèdre de l'atlas au Maroc (*Cedrus atlantica Manetti*)

Said LAARIBYA^{a,*} et Assmaa ALAOUI^b

^aLaboratoire de Recomposition de l'Espace et Développement Durable (LREDD) - Département de géographie - Université Chouaib Doukkali Avenue Jabran Khalil Jabran B.P 299-24000- El Jadida, Maroc.

^bLaboratoire de Biotechnologie et Valorisation des Ressources Naturelles (LBVRN)- Université Ibn Zohr -Faculté des sciences - B.P 8106 Cité Dakhla- Agadir, Maroc

Résumé

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) est une espèce emblématique du Maroc, classée par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) dans la liste rouge des espèces en voie de disparition. La détermination de son aire potentielle sous les conditions climatiques actuelles est une étape indispensable pour planifier et assurer sa conservation. Nous avons eu recours à la modélisation de la distribution de l'aire potentielle au Maroc par l'utilisation de l'approche d'entropie maximale « MaxEnt ». Le modèle développé est d'excellente qualité (AUC=0,967). Les variables les plus significatives conditionnant la distribution du cèdre de l'Atlas, sous les conditions climatiques actuelles, sont la précipitation du trimestre le plus sec, les précipitations du mois le plus sec, la température moyenne annuelle et l'humidité relative. Le modèle développé a permis d'établir la première carte de l'aire potentielle de zones appropriées du cèdre de l'Atlas du Maroc. Les résultats obtenus guideront les gestionnaires à identifier les sites favorables pour la réhabilitation du cèdre de l'Atlas menacé d'extinction.

Mots-clés : *Cedrus atlantica* ; Aire potentielle ; MaxEnt ; Variables bioclimatiques ; Entropie maximale, Climat.

Modelling potential habitats for the Atlas cedar (*Cedrus atlantica Manetti*) in Morocco using the maximum entropy model

Abstract

The Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) is an emblematic species of Morocco, classified by the International Union for the Conservation of Nature (IUCN) in the red list of endangered species. Determining its potential area under current climatic conditions is an essential step in planning and ensuring its conservation. In this paper, we applied the maximum-entropy algorithm (MaxEnt) to predict the current and potential distribution of the Atlas cedar in order to provide a basis for its conservation. The adjusted model had an excellent predictive quality (AUC = 0.967). The most significant variables influencing the distribution of Atlas cedar, under current climatic conditions, are the precipitation in the driest quarter, precipitation in the driest month, average annual temperature and relative humidity. The model developed made it possible to establish the first map of the suitable potential area of the Atlas cedar in Morocco. The results obtained will guide managers to identify favorable sites for the rehabilitation of the Atlas cedar threatened with extinction.

Keywords: *Cedrus atlantica*; Potential area; MaxEnt; Bioclimatic variables; Maximum entropy; Climate

1. Introduction

La diversité des conditions climatiques et écologiques du Maroc ainsi que sa position de rencontre entre la flore européenne, saharienne et macaronésienne en font un véritable carrefour floristique d'une diversité et d'une complexité incontestable. De cette diversité, résulte une grande richesse floristique et faunistique des espaces forestiers qui couvrent près de 9 millions

d'hectares, soit un taux de couvert de 12,7 % du territoire national et un taux moyen de boisement de 8 % [1].

Parmi les essences forestières du Maroc, le cèdre de l'Atlas est l'essence noble emblématique des montagnes de l'Atlas et du Rif, appréciée pour ses valeurs technologiques, écologiques et biogéographiques. Sur le plan économique, une grande partie de familles riveraines vivent directement des ressources offertes par



Ceci est un document en libre accès selon les termes de [Creative Commons Attribution License CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), ce qui permet de le partager, copier, reproduire, distribuer, communiquer, réutiliser ou de l'adapter avec l'obligation de créditer son auteur.

les cédraies : bois de feu, bois de construction, parcours etc.... Sur le plan écologique, le cèdre organise des écosystèmes forestiers très importants. Il occupe une place remarquable, sinon au premier rang dans le paysage forestier marocain. Quant à sa valeur biogéographique, elle est liée au fait qu'il représente chez nous un genre ancien dont l'apparition remonte au Crétacé inférieur [2].

Le cèdre de l'Atlas est une espèce montagnarde, occupe des surfaces d'importance inégale et forme spontanément un seul bloc géographique en Afrique du Nord représenté par l'Atlas marocain (130.000 ha), le Rif marocain (15.000 ha) et l'Atlas algérien (40.000 ha) [3].

Au Maroc, le cèdre de l'Atlas a fait l'objet de plusieurs études bioécologiques et phytosociologiques [4-11]. Toutefois, jusqu'à présent aucune étude n'a mis en relief l'aire potentielle de distribution du cèdre de l'Atlas au Maroc.

Malgré son inscription, en 2016, au réseau mondial des réserves de biosphère, la cédraie marocaine affiche une tendance régressive aussi bien dans le temps que dans l'espace. L'[Union internationale pour la conservation de la nature](https://www.iucn.org/fr) (UICN)¹ l'a introduit dans sa liste rouge des espèces en voie de disparition [12].

La gestion durable et la conservation des écosystèmes au cèdre de l'Atlas du Maroc dans le contexte du changement climatique actuel nécessitent des perceptions scientifiques ciblées et une analyse spatiale permettant de formuler et mettre en œuvre une stratégie bien efficace. La connaissance de l'aire potentielle de distribution de l'espèce, ainsi que l'identification des facteurs environnementaux qui la conditionnent est une étape inévitable qui peut fournir des informations cruciales.

L'objectif de ce travail est de prédire l'habitat et la distribution spatiale du cèdre de l'Atlas du Maroc, en vue de sa conservation. L'algorithme d'entropie maximale (MaxEnt)² a été utilisé car il est considéré comme étant l'un des plus efficaces pour la modélisation de la répartition spatiale des espèces.

¹ <https://www.iucn.org/fr>

²Un modèle de Maximum d'Entropie (MaxEnt) : est un classifieur probabiliste linéaire et discriminant. À chaque individu est associé une probabilité d'appartenance à chacune des classes (dont la somme est 1). Voir :

https://web.stanford.edu/~hastie/Papers/maxent_explained.pdf

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude : cèdre de l'Atlas au Maroc

La présente étude est réalisée à l'échelle du bloc Marocain constitué par toute la zone de répartition actuelle du cèdre de l'Atlas au Maroc (Figure1). Les forêts de cèdre s'étagent en altitude entre le montagnard méditerranéen et l'oroméditerranéen et peuvent être observées aussi dans le supra méditerranéen [13]. En effet, au Maroc on distingue les cédraies du Moyen Atlas central (120.000 ha), les cédraies du Moyen Atlas oriental (23.000 ha), les cédraies du Haut Atlas oriental (26.000 ha), les cédraies du Rif (15.000 ha) et les cédraies du Tazekka (850 ha).

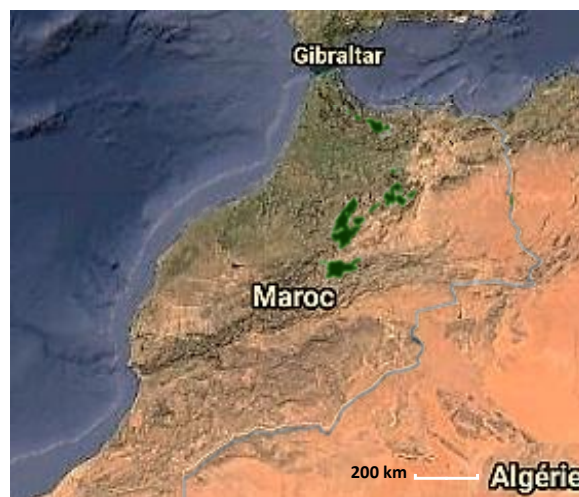


Figure 1 – Localisation des peuplements de cèdre de l'Atlas au Maroc

- Les cédraies du Moyen Atlas central : se développent sur substrats calcaire ou dolomitique du Lias et du Jurassique et sur basalte du Quaternaire. Deux groupes se distinguent par leur structure géomorphologique : le groupe du Causse moyen atlasique tabulaire au nord et le groupe du Moyen Atlas plissé au sud constitué par des reliefs plus individualisés [14].
- Les cédraies du Moyen Atlas oriental : s'individualisent en petits îlots dans les massifs du Bou Iblane, de Taffert et de Tamtroucht au Nord et dans les massifs de Bou Naceur au sud, sur substrat dolomitique ou marno-calcaire du Toarcien- Aolenien.
- Les cédraies du Haut Atlas oriental : se répartissent sur les versants Nord de Jbel Layachi et du Jbel Masker

sur marno-schistes calcaires. Ces massifs présentent des analogies climatiques et édaphiques avec les cédraies de Bou-Iblane [15].

- Les cédraies du Rif : se développent sur calcaire en mélange avec le sapin du Maroc (*Abies maroccana*) et sur des substrats quartzeux-schisteux de la nappe de Kétama ou sur des substrats gréseux de la nappe de Tizirène [16].
- Les cédraies du Tazekka : se développent sur schistes primaires non calcaires, présentant beaucoup d'affinités avec celles du Rif située à quelques centaines de km à vol d'oiseau 23.000 ha [16].

2.2. Données et méthodes

Pour déterminer l'aire potentielle du cèdre de l'Atlas du Maroc, on a eu recours à la version 3.4.1 du programme de modélisation de la distribution spatiale basée sur le principe d'entropie maximale «MaxEnt» qui consiste à choisir pour un phénomène donné une distribution qui maximise l'entropie. Cette méthode permet d'établir une relation entre la niche écologique de l'espèce et les variables environnementales susceptibles de conditionner sa présence [17]. Elle représente un outil important de prédiction en écologie de la conservation [18].

Compte tenu de l'occurrence d'une espèce donnée et des variables explicatives, une carte de pertinence de la distribution potentielle peut être réalisée [19].

Dans notre cas nous avons utilisé un échantillon de points de présence du cèdre de l'Atlas du Maroc (données d'occurrence) et les rasters des variables environnementales qui couvrent tout le Maroc.

Nous avons choisi un échantillon aléatoire et simple mille deux cent cinquante et un (1251) points de présence du cèdre de l'Atlas du Maroc à partir de la base de données de l'Inventaire Forestier National. Par la suite nous avons effectué des sorties de vérification sur 125 points de présence choisis selon une grille représentative de notre échantillon de départ (soit 10 % de notre échantillon de départ) afin d'éviter tout oubli ou confusion avec les autres espèces.

Les données climatiques de base concernant la période 1970 à 2000, ont été extraits sous forme Raster de la version 2.1 de la base de [WorldClim](http://www.worldclim.org)³, catalogue de données de températures et de pluviométrie à

l'échelle mondiale, recueillies à une résolution de 30 arc-secondes au sol "≈1 km²/pixel" [20].

Pour pousser davantage la modélisation de l'aire du cèdre au Maroc, au lieu des 19 variables bioclimatiques utilisées dans ce genre de modélisation, nous avons eu recours à 24 variables environnementales et indices synthétiques méditerranéens pour modéliser la probabilité de présence du cèdre de l'Atlas du Maroc (Tableau1) : Dix-neuf (19) variables bioclimatiques les plus reliées aux aspects physiologiques de la croissance des plantes, trois (03) variables topographiques : l'altitude, l'exposition et la pente qui, selon la documentation, ont un effet sur la distribution du cèdre de l'Atlas du Maroc. Deux (02) autres indices qui agissent sur la distribution des espèces dans le contexte du climat méditerranéen : l'indice bioclimatique d'Emberger (Equation 1) et l'humidité relative (Equations 2 et 3). Compte tenu de leur indisponibilité, les données du sol n'ont pas été prise en compte dans le model.

Afin de tenir compte de l'évapotranspiration, Emberger [21] a induit l'amplitude thermique (M-m) qui a l'avantage d'exprimer indirectement le degré de continentalité et de l'humidité atmosphérique. Cet auteur estime dans son quotient pluviométrique (Q2) que la vie d'une espèce végétale se déroule entre deux moyennes thermiques extrêmes. Pour une station donnée, l'amplitude thermique (M-m) exprime bien le degré de continentalité.

$$Q2 = \frac{2000 P}{M2 - m2} \quad (1)$$

Q2 = Coefficient d'Emberger modifié par Sauvage en 1963

P = Pluviométrie moyenne annuelle (mm)

M = Moyenne des maxima thermiques du mois le plus chaud en degré Kelvin (°k)

m = Moyenne des minima thermiques du mois le plus froid en degré kelvin (°k)

Humidité relative (Hr) :

$$Hr = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \quad (2)$$

avec l'équation :

$$P_{sat} = 0,61078 * \text{Exp} \left(\frac{17,27 * T}{273,3 + T} \right) \quad (3)$$

L'humidité relative (Hr) a été déduite en se basant sur le rapport entre la pression partielle de la vapeur

³ <http://www.worldclim.org>

d'eau contenue dans l'air "Pvap" et la pression de vapeur saturante "Psat" à la même température. Le calcul du paramètre "Psat" a nécessité le recours à la formule de Tetens donnée par l'équation (3) telle qu'elle est reprise par Monteith *et al.* [23].

Les données relatives aux températures moyennes annuelles "T", à la pression partielle de la vapeur d'eau "Pvap", à l'altitude et aux variables bioclimatiques extraites de la base WorldClim [24].

Tableau 1
Variables utilisées dans le processus de modélisation

Code	Variables environnementales	Unité
Bio1	Température moyenne annuelle	°C
Bio2	Plage diurne moyenne (moyenne mensuelle (Temp max - temp min))	°C
Bio3	Isothermalité (BIO2 / BIO7) ($\times 100$)	%
Bio4	Saisonnalité de la température	°C
Bio5	Température maximale du mois le plus chaud	°C
Bio6	Température minimale du mois le plus froid	°C
Bio7	Plage annuelle de température (BIO5-BIO6)	°C
Bio8	Température moyenne du trimestre le plus humide	°C
Bio9	Température moyenne du trimestre le plus sec	°C
Bio10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	°C
Bio11	Température moyenne du trimestre le plus froid	°C
Bio12	Précipitations annuelles	mm
Bio13	Précipitation du mois le plus humide	mm
Bio14	Précipitation du mois le plus sec	mm
Bio15	Saisonnalité des précipitations	%
Bio16	Précipitation du trimestre le plus humide	mm
Bio17	Précipitation du trimestre le plus sec	mm
Bio18	Précipitation du trimestre le plus chaud	mm
Bio19	Précipitation du trimestre le plus froid	mm
Q-Emberger	Quotient d'Emberger	---
Hr	Humidité relative	%
Exp	Exposition	----
P	Pente	°
Alt	Altitude	m

2.3. Modélisation avec MaxEnt

1. La Courbe Caractéristique d'Opération dite ROC (Receiving Operator Characteristic) [22] et l'AUC (Air Under Curve : Aire sous la courbe ROC), qui est un seuil qui évalue la capacité prédictive du modèle ; Plus la valeur d'AUC est proche d'un, plus on est éloigné d'un modèle aléatoire. Les valeurs de l'AUC sont interprétées comme suit [2] : le modèle est « Excellent » si $AUC > 0,90$; « Bon » si $0,80 < AUC \leq 0,90$; « Acceptable » si $0,70 < AUC \leq 0,80$; « Mauvais » si $0,60 < AUC \leq 0,70$ et « Invalide » si $AUC \leq 0,6$.

Pour valider le modèle estimé nous avons utilisé une partie de l'échantillon (soit 30 %) (Test data).

Le [test de jackknife](#) permet la détermination du pouvoir prédictif de chaque variable et l'identification celles qui contribuent le plus à la génération du modèle de distribution produit par MaxEnt.

2. Le modèle MaxEnt pour le cèdre de l'Atlas est une représentation de la probabilité de présence de l'espèce à chaque pixel dans la zone d'étude. Ce modèle permet de produire la carte de distribution du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) en se basant sur une classification des résultats en deux intervalles de probabilité de présence "P", définis principalement par un seuil "S" retenu. Ce seuil (Threshold) est relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile (10 percentiles training présence), représentant la probabilité que 90 % des points de présence tombent dans cette aire potentielle [25].

Pour réaliser la cartographie nécessaire, nous avons utilisé le logiciel « [Arcgis](#) »⁴, version 10.4.1

⁴ Système informatique composé de différentes plateformes qui permettent aux utilisateurs SIG de collaborer et de partager l'information géographique. <https://www.arcgis.com/index.html>

3. Résultats

3.1. Performance du modèle développé

La valeur de AUC de l'aire sous la courbe ROC, qui mesure la précision de prédiction du modèle, est 0,967

(Figure 2) ce qui confirme l'excellence de la modélisation qu'on a réalisé et indique la performance et la robustesse du modèle choisi pour la prédiction de l'aire potentielle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) au Maroc.

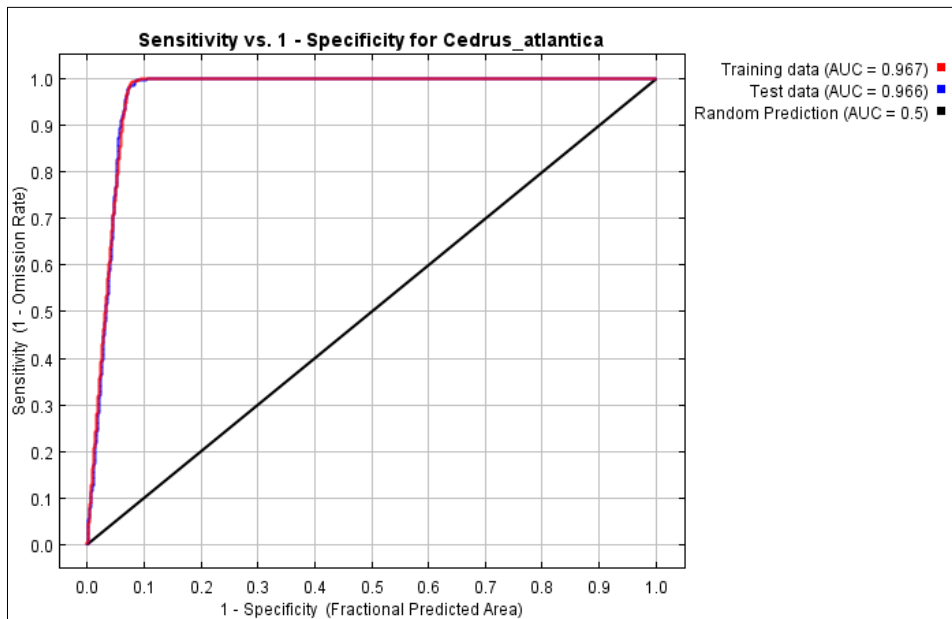


Figure 2 – Résultat du calcul de l'AUC, Aire Sous la Courbe Caractéristique d'Opération (ROC).

3.2. Contribution relative des variables

Les résultats du test jackknife (Tableau2) révèlent que les principales variables qui ont le plus d'influence sur la présence du cèdre de l'Atlas au Maroc sont la Précipitations du trimestre le plus sec (bio-17), Précipitations du mois le plus sec (bio-14), Température moyenne du trimestre le plus sec (bio-9) et l'Altitude (Alt) avec respectivement 71,3 % ; 9,9 % ; 4,3 % et 3,3 % de contribution.

L'influence de ces variables est également évaluée par un autre paramètre statistique : l'importance de la permutation (Tableau 2) qui permet de dégager les variables provoquant une forte réduction dans le pouvoir prédictif du modèle lorsqu'ils sont omis.

Le test de jackknife fait ressortir que la variable environnementale qui entraîne une forte réduction (soit 18,1 %) du pouvoir prédictif du modèle lorsqu'elle est omise est l'humidité relative (Hr). La variable environnementale qui entraîne le meilleur gain (35,7 %) lorsqu'elle est utilisée isolément dans le modèle est la

température moyenne annuelle (Bio1). Ces deux variables semblent donc avoir plus d'informations explicatives sur la distribution du cèdre de l'Atlas comme le montre le tableau 2 et les résultats du test jackknife (Figure 3).

Ainsi, la combinaison des résultats du tableau 2 et de la figure 3 révèle que les précipitations du trimestre le plus sec (bio-17), les précipitations du mois le plus sec (bio-14), la température moyenne annuelle (Bio1) et l'humidité relative moyenne annuelle (HR) sont donc les variables qui influencent le plus le modèle. Les autres variables environnementales ont une faible contribution à la prédiction du modèle en question.

Tableau 2
Contributions relatives et importance de la permutation en (%) des variables obtenus par le test Jackknife

Variable	Pourcentage de contribution	Importance de permutation
Bio17	71,3	9
Bio14	9,9	0,5
Bio9	4,3	3,7
Alt	3,3	0
Bio10	1,9	0
Bio11	1,7	0
Bio1	1,5	35,7
Hr	1,4	18,1
Bio19	1	8,6
Q-Emberger	0,6	0,8
Bio7	0,5	0,1
Bio3	0,5	10,2
Bio15	0,5	0,1
Bio5	0,4	0,6
Bio2	0,4	0,9
Bio6	0,3	0,2
Bio12	0,1	0,1
Bio16	0,1	0,3
P	0,1	0,1
Bio8	0,1	7
Bio13	0,1	3,9
Expo	0	0
Bio18	0	0
Bio4	0	0

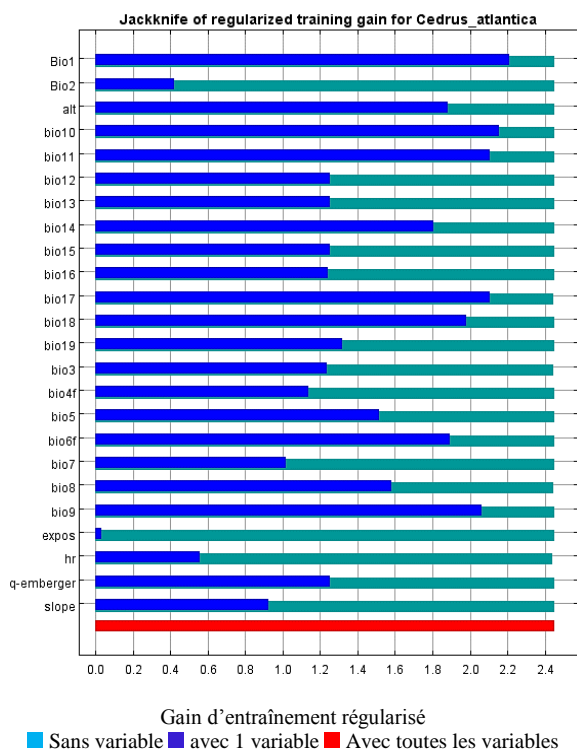


Figure 3 – Résultats du test Jackknife sur la contribution des variables sélectionnées à la prédiction de l'aire de distribution du cèdre de l'Atlas.

1.1. Cartographie de l'aire potentielle du cèdre de l'Atlas au Maroc

La méthode de modélisation utilisée et complétée par le travail cartographique, nous a permis de réaliser la première carte de l'aire potentielle de distribution du cèdre de l'Atlas au Maroc. Tenant compte du seuil relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile. Ce seuil "S" retenu représentant la probabilité que 90 % des points de présence tombent dans cette aire potentielle.

La superficie actuelle du cèdre de l'Atlas su Maroc cartographiée est de l'ordre de 138.691 hectares. Les zones prédites (modélisées) favorables à l'installation du cèdre de l'Atlas du Maroc couvrent quant à eux 770.605 ha y compris les zones où l'espèce est actuellement présente (Figure4).

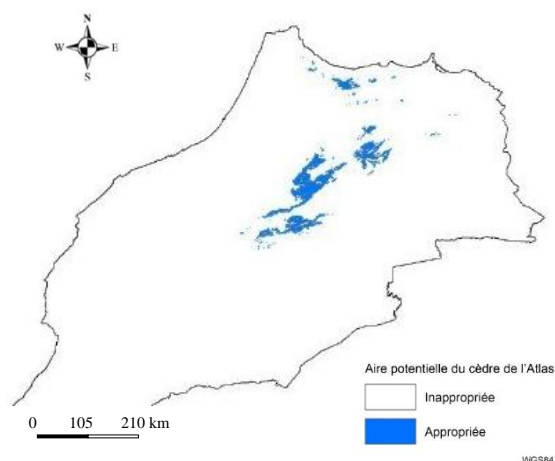


Figure 4 – Aire potentielle du cèdre de l'Atlas au Maroc (partie Nord Maroc).

Aussi, la superposition de l'aire de répartition actuelle du cèdre de l'Atlas à son aire potentielle prédite (Figure 5), nous a permis de déceler un surplus de 631.914 ha (soit une augmentation prévisionnelle de +455 %).

Mokrim *et al.* [9] ont trouvé une superficie potentielle de 961.510 ha chose qui confirme davantage les possibilités d'extension et de développement du cèdre de l'Atlas au Maroc.

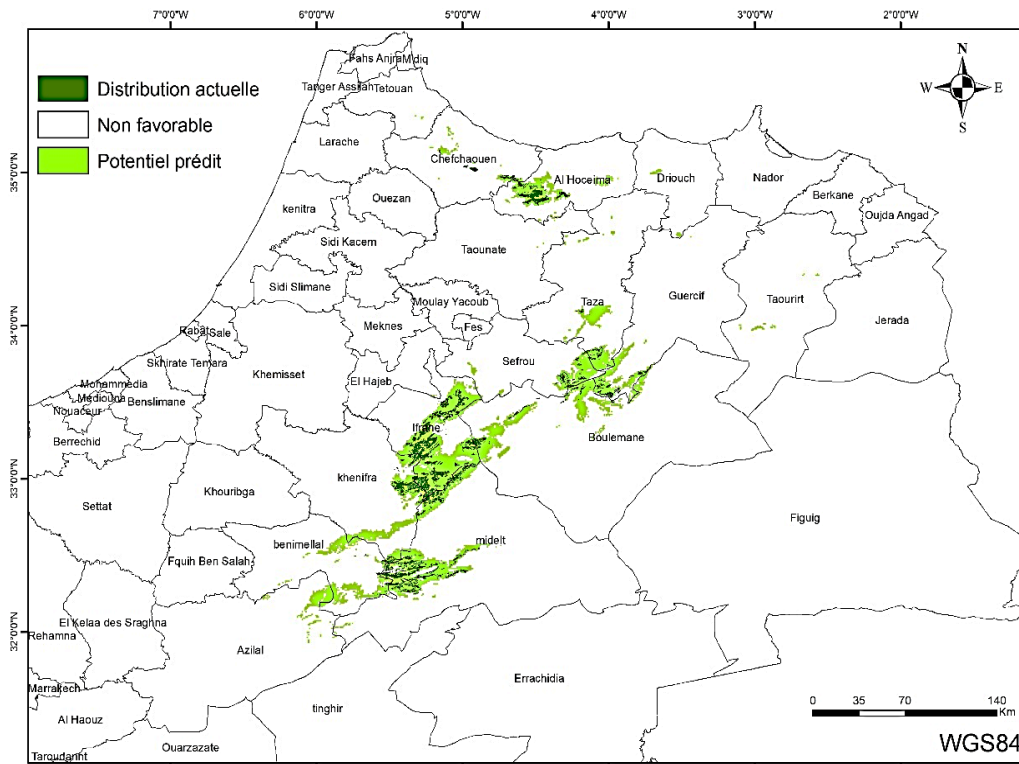


Figure 5 – Comparaison de la répartition actuelle avec l'aire potentielle prédite du cèdre de l'Atlas au Maroc.

2. Discussion

La modélisation de la distribution spatiale révèle que les précipitations du trimestre le plus sec (bio-17), Précipitations du mois le plus sec (bio-14), la température moyenne annuelle (Bio1) et l'humidité relative moyenne annuelle (HR) sont les variables qui influencent le plus dans la répartition actuelle du cèdre de l'Atlas au Maroc. L'espèce est absente dans les zones arides et semi arides où les précipitations sont faibles et les températures sont élevées et qui constituent un facteur limitant pour le cèdre de l'Atlas au Maroc. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs études qui stipulent que les variables climatiques jouent un rôle de première importance dans la distribution du cèdre de l'Atlas au Maroc [4,7].

Les courbes de réponses écologiques des variables ayant la plus grande importance montrent que la présence du cèdre de l'Atlas est optimale dans les zones où il y a plus de précipitation durant le trimestre le plus sec (bio-7) et celle des précipitations du mois le plus sec (bio-14) tandis que la température moyenne annuelle (Bio1) affiche des valeurs faibles. En effet, dans les conditions climatiques actuelles, les précipitations et leur variabilité constituent le facteur le plus important

de la distribution du cèdre de l'Atlas et sa croissance. Pour ce qui est du sol, la profondeur du sol et le substrat basaltique stimule positivement l'accroissement du cèdre de l'Atlas mieux que le calcaire [7].

Le cèdre individualise des peuplements dans les zones montagneuses froides principalement en ambiance bioclimatique subhumide, humide et perhumide, sous étage froid et très froid. Les cédraies d'altitude situées entre 2.200 et 2.500 m s'individualisent dans la variance extrêmement froide au Moyen Atlas et au Haut Atlas. Ce résultat confirme le fait que ce sont les paramètres climatiques, tels que la température et les précipitations, affectent le plus la distribution des espèces [27].

Mis à part l'altitude, les variables géotopographiques (exposition et pente) à la lumière des autres variables climatiques, ont très faiblement contribué à la prédiction du modèle et sont donc très peu significatives. Cependant, tenant compte de l'étroite relation de la variabilité spatiale des facteurs climatiques avec les facteurs géo-topographiques, on considère que l'influence de ces derniers sur la distribution de cèdre de l'Atlas est indirecte.

La superficie actuelle cartographiée du cèdre de l'Atlas au Maroc est de l'ordre de 138.691 ha tandis que

l'aire de distribution potentielle modélisée, représente 770.605 ha soit un surplus de 631.914 ha (+ 455 %) par rapport à son habitat actuel. Ce résultat témoigne d'une part, la régression de la superficie qu'occupait le cèdre de l'Atlas dans le passé, suite aux pressions humaines et pastorales, et révèle d'autre part, la possibilité de reconstitution de son habitat dans les conditions climatiques actuelles par sa reconstitution à l'échelle de son aire potentielle prédite.

La faisabilité de cette approche n'est pas à démontrer et permet, en perspectives, la modélisation du potentiel de distribution avec d'autres paramètres tels que la pédologie et la géomorphologie de l'espace.

3. Conclusion

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), est une espèce emblématique qui a subi une forte dégradation et une réduction de sa répartition dans le temps. Elle est à présent classée par l'UICN dans la liste des espèces en danger.

Le modèle MaxEnt développé (AUC = 0,967) a permis de délimiter l'aire potentielle qui représente un gain de plus 425 % par rapport à la situation actuelle du cèdre de l'Atlas du Maroc. En effet, le présent travail fournit la première carte de l'aire de distribution potentielle du cèdre de l'Atlas au Maroc dans le contexte des données climatiques actuelles.

Dans les conditions climatiques actuelles, les précipitations du trimestre le plus sec, les précipitations du mois le plus sec, la température moyenne annuelle et l'humidité relative moyenne annuelle sont les descripteurs qui influencent le plus l'aire de répartition du cèdre de l'Atlas au Maroc.

Cette étude originale pour cette espèce emblématique servira de base pour toute planification stratégique de conservation de la biodiversité et de gestion durable du cèdre de l'Atlas au Maroc.

Références

- [1] IFN (2005 et 2020). Données de l'Inventaire Forestier National du Maroc. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. (Non publié).
- [2] Emberger I. (1938). Les arbres du Maroc et comment les reconnaître - Paris, Larose, 1938, 317p. (OCoLC)555273964. Disponible en ligne : <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-archives/archives-textuelles/l/sciences-et-technologies/sciences-exactes-et-naturelles/sciences-biologiques/phytologie-botanique/les-arbres-du-maroc-et-comment-les-reconnaitre>
- [3] Lahssini S., Hajib S., Lahlaoui H., Mharzi alaoui H., Khattabi A., Modelling spatial distribution of the Carob Tree (*Ceratonia siliqua*) in Azilal Province, Morocco. J. Geogr. Geol., 7 (4) (2015) : 33-44. <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v7n4p33>
- [4] Achhal A., Akabli O., Barbero M., Benabid A., M'Hirit O., Peyre C., Quezel P., Rivas-martinez S., A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc, Ecologia Mediterranea, 5 (1980) : 211-249. [Version HTML]. https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_1979_num_5_1_960
- [5] Et-tobi M., (2006). « Approche multidimensionnelle des relations (état sanitaire- station – sylviculture) pour l'étude du dépérissement des cédraies (*Cedrus atlantica* Man.) au Moyen Atlas en vue d'élaborer un modèle sylvicole de prévention phytosanitaire ». Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Agronomiques, I.A.V. Hassan II, Rabat, Maroc, 168 pages.
- [6] Ezzahiri M., Benghazi B. Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas (Maroc), Sci. Change. Planét. / Sécheresse, 11 (2000) : 79–84.
- [7] Laaribya S., Belghazi B., Dynamique et accroissement radial du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) – Cas de la forêt d'Azrou (Maroc), Revue Nature et Technologie, B- Sciences Agronomiques et Biologiques, n° 14/ Janvier 2016, Pages 19 à 32. Disponible en ligne : https://www.univ-chlef.dz/revuenatec/issue-14/Article_B/Article361.pdf (Consulté le 11/10/2020).
- [8] Lepoutre B., Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines, Ann. Rech. For. au Maroc, 6.6 (1961) : 01-183.
- [9] Moukrim S., Lahssini S., Rifai N., Menzou K., Mharzi-Alaoui H., Labbaci A., Rhazi M., Wahby I., El Madihi M., Rhazi L., Modélisation de la distribution potentielle de *Cedrus atlantica* Manetti au Maroc et impacts du changement climatique. Bois et Forêts des Tropiques, 344 (2020) : 3-16. <https://doi.org/10.19182/bf2019.344.a31888>.
- [10] Terrab A., Paun O., Talavera S., Tremetsberger K., Arista M., Stuessy T.F. (2006) – Genetic diversity and population structure in natural populations of Moroccan Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*; Pinaceae) determined with CPSSR markers. Am. J. Bot. 93, 1274–1280. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.9.1274>
- [11] Till C., Guiot J., Reconstruction of precipitation in Morocco Since 1100 A.D. Based on *Cedrus atlantica* tree-ring widths, Quat. Res., 33 (1990) : 337–351. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(90\)90060-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(90)90060-X)
- [12] IUCN (2017) –The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017-1. Disponible en ligne : <http://www.iucnredlist.org>. (Consulté le 03/10/2020)
- [13] Till C (1985). « Recherches dendrochronologiques sur le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) au Maroc », Thèse d'état, Fac. Sci. Louvain la Neuve, Belgique.
- [14] M'Hirit O., Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti), présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva mediterranea « le Cèdre », Ann. Rech. Forest., 27 (spécial), 1 (1994) : 3-21. Disponible en ligne : <http://www.fao.org/3/AH002F/AH002F00.pdf> (Consulté le 07/09/2020)
- [15] Emberger L (1939) : Aperçu général sur la végétation du Maroc. Commentaire de la carte phytocéologique du Maroc 1 :1.500.0000. Mémoire hors série de la Société des sciences naturelles du Maroc. p.11. [version imprimée].
- [16] M'Hirit O (1982). « Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytocéologie et de la productivité du cèdre ». Thèse de Doctorat es Science, Univ. Dr. Eco. Sci., Aix-Marseille, 436 pages.
- [17] Xavier S., Maarten Z., (2012). Manuel de formation à l'analyse spatiale de la diversité et de la distribution des plantes. Bioersity International, Rome, Italie. 186 pp. ISBN 978-92-9043-917-2

- [18] Phillips S., Anderson P., Schapire R., Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecol. Model.*, 190 (3-4) (2006): 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- [19] Elith J., Leathwick JR., Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 40 (2009) : 677-697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- [20] Fick S.E., Hijmans R.J., WorldClim 2 : nouvelles surfaces climatiques de résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales, *International Journal of Climatology*, 37(2017) (12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- [21] Emberger L., Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique, *Bull. Soc. Nat. Toulouse*, 77 (1942) : 97-124. ISSN : 0758-4113. Disponible sur : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65553575/f101.image.r=Emberger> (Consulté le 09/01/2021)
- [22] Hanley J., Mcneil B., The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, *Radiology*, 143 (1982) : 29-36. <https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747>
- [23] Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. (2007), *Principles of Environmental Physics*. Third ed. Academic Press, Amsterdam. eBook ISBN: 9780080924793
- [24] Hijmans RJ., Cameron SE., Parra JL., Jones PG., Jarvis A., Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Int. J. Climatol.*, 25(2005) : 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- [25] Phillips S., Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation, *Ecography*, 31(2008): 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- [26] Cheddadi R., Henrot A-J., François L., Boyer F., Bush M., Carré M., Coissac E., De Oliveira PE., Ficetola F., Hambuckers A., Huang K, Lézine A-M., Nourelbait M., Rhoujjati A., Taberlet P., Sarmiento F., Abel-Schaad D., Alba-Sánchez F., Zheng Z., Microrefugia, Climate Change, and Conservation of *Cedrus atlantica* in the Rif Mountains, Morocco. *Front. Ecol. Evol.*, 5 (2017): 114. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00114>
- [27] Aussenac, G., Finkelstein D (1983) – Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre. *Ann. Des Sci. Forest.* 40, 67–77. <https://doi.org/10.1051/forest:19830103>
-