

Prédiction de l'aire potentielle de répartition du genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*) au Maroc

N. RIFAI¹, S. MOUKRIM¹, A. KHATTABI², S. LAHSSINI², H. MHARZI ALAOU³, L. RHAZI⁴

(Reçu le 01/11/2019; Accepté le 25/03/2020)

Résumé

La conservation et la bonne gestion des espèces forestières menacées de dégradation impose la connaissance de leurs aires de distribution potentielle et des facteurs environnementaux conditionnant leur répartition. Le présent article traite de l'identification des facteurs environnementaux régissant la répartition géographique du genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L. ssp. *africana* (Maire) Gauquelin & al.) au Maroc et la cartographie de son aire potentielle sous les conditions climatiques actuelles. L'approche adoptée s'est basée sur le recours à l'algorithme de maximum d'entropie. Le modèle ajusté a permis d'avoir une prédiction d'excellente qualité (AUC = 0,938). Les paramètres environnementaux les plus significatifs conditionnant la distribution du genévrier thurifère au Maroc sont la température minimale du mois le plus froid, la saisonnalité de la température et l'altitude. L'utilisation du modèle a permis d'établir la carte de l'aire potentielle. Celle-ci montre qu'une grande superficie des régions montagneuses de l'Atlas convient à l'expansion des peuplements du genévrier thurifère. L'aire de répartition actuelle ne représente que 5% de l'habitat favorable à cette espèce. Ces résultats pourraient aider les gestionnaires forestiers à mieux identifier les sites appropriés pour la réhabilitation de cette espèce vulnérable dont la superficie est en nette régression.

Mots-clés : Maroc, genévrier thurifère, entropie maximale, MaxEnt, modélisation, distribution des espèces, variables bioclimatiques

Predicting potential distribution area of thuriferous juniper (*Juniperus thurifera*) in Morocco

Abstract

Conservation and good management of endangered forest species require knowledge of their potential spatial distribution and the environmental factors defining this distribution. The present paper deals with the identification of environmental factors controlling the spatial distribution of thuriferous juniper (*Juniperus thurifera* L. ssp. *africana* (Maire) Gauquelin & al.) in Morocco and the mapping of its potential distribution under current climatic conditions. The Maximum Entropy algorithm was used in this assessment. The adjusted model had an excellent predictive quality (AUC = 0.938). Environmental parameters that preclude the spatial distribution of thuriferous juniper are the minimum temperature of the coldest month, temperature seasonality and altitude. The potential area mapped showed that large parts of the Atlas Mountains are suitable to the expansion of *Juniperus thurifera* stands. Further, current species distribution represents only 5% of its suitable area. These findings will help decision makers and forest planners to better identify suitable sites to rehabilitate this vulnerable species, whose area is declining.

Keywords: Morocco, thuriferous juniper, maximum entropy, MaxEnt, species distribution, modeling, bioclimatic variables

INTRODUCTION

Le Maroc constitue un véritable hot-spot pour la biodiversité avec une typologie diversifiée d'écosystèmes. C'est un pôle principal de diversité végétale au niveau de la Méditerranée occidentale (Médail et Diadema, 2006). Parmi les espèces les plus remarquables, le genévrier thurifère occupe une place prépondérante au niveau de l'étage oroméditerranéen (Benabid, 1985).

Le genévrier thurifère est une espèce emblématique des montagnes de la Méditerranée occidentale: France, Espagne, Italie, Maroc et Algérie (Sanguin *et al.*, 2013). Le Maroc possède les plus importants peuplements de cette espèce en Afrique du Nord avec une superficie estimée à environ 30 000 ha (Gauquelin *et al.*, 1999) sachant bien que les formations forestières marocaines s'étendent sur une surface d'environ 9 millions d'hectares.

Ces peuplements existent essentiellement dans le Moyen Atlas, le Haut Atlas et l'Anti-Atlas de Saghro et peuvent atteindre des altitudes dépassant 3000 mètres. Ils sont généralement à l'état clair (40 à 100 gros arbres/hectare)

et occupent des milieux caractérisés par des conditions climatiques et édaphiques particulièrement contraignantes, notamment un hiver très froid et un sol très superficiel (Auclair, 1993).

Dans le Parc National de Toubkal, la thuriferaie atteint 3520 m, mais c'est à 3300 m, qu'elle est plus fréquente (Ouhammou, 2005).

A la limite supérieure des peuplements de la thuriferaie, les paysages végétaux des hautes montagnes marocaines sont marqués par de grandes surfaces asylvatiques, occupées par des groupements végétaux de xérophytes épineuses (Quézel, 1957; Barbéro *et al.*, 1975; Benabid, 2000), notamment de *Bupleurum spinosum*, *Alyssum spinosum*, *Arenaria pungens*, *Erinacea anthyllis*, *Cytisus balansae* et *Astragalus ibrahimianus*.

Contrairement à l'Europe où l'espèce est peu menacée, dynamique et en pleine reconquête de l'espace, la thuriferaie marocaine est soumise à des usages multiples et persistants, qui rendent les conditions de maintien de l'espèce très aléatoires (Garraud *et al.*, 2009).

¹ Département des Eaux et Forêts, Direction du Développement Forestier, Rabat, Maroc

² École Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc

³ Département des Eaux et Forêts, Direction de la Lutte contre la Désertification et de la Protection de la Nature, Rabat, Maroc

⁴ Laboratoire de Botanique, Mycologie et Environnement, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc

Le genévrier thurifère est l'unique essence arborée utilisée par les populations de la haute montagne, pour le bois de chauffage, les usages médicinaux et le fourrage.

En effet, Gauquelin *et al.* (1999) considèrent que cette essence forestière est menacée d'extinction à cause d'une forte pression anthropique limitant sa régénération naturelle et accélérant le vieillissement de ses peuplements. DeSoto *et al.* (2014) ont constaté que les peuplements de thurifère du Haut Atlas marocain, par exemple, sont plus vieux (environ 500 ans) que ceux existant en Espagne (environ 200 ans).

Au Maroc, l'évolution historique de l'aire de répartition du genévrier thurifère témoigne d'une très grande régression (Garraud *et al.*, 2009). En effet, cette régression a été estimée à 90% par rapport à l'aire potentielle de répartition (Sanguin *et al.*, 2013). Dans la vallée de l'Azzaden, Montès (1999) a cartographié d'une manière précise la régression de cette thuriféraie passant de 2 622 ha en 1965 à 2 184 ha en 1989.

L'utilisation de la modélisation de la distribution des espèces constitue un outil pertinent pour caractériser la distribution potentielle de cette espèce sous les conditions climatiques actuelles dans une perspective de sa réhabilitation future.

La modélisation de la distribution des espèces fournit des informations précieuses à l'appui des actions de conservation de la nature (Lemos *et al.*, 2014). Elle contribue également à une meilleure compréhension des variations des paysages sous l'effet du changement climatique et/ou des pressions anthropiques (Saatchi *et al.*, 2008).

Le principe de cette modélisation consiste à relier les points de présence de l'espèce aux variables environnementales en vue de prédire la probabilité d'occurrence de l'espèce (fonction de réponse) et d'évaluer la contribution de chaque variable environnementale à cette fonction (Austin *et al.*, 2006).

En plus des méthodes statistiques de régression classique, la modélisation basée sur l'apprentissage automatique est largement utilisée, y compris les Réseaux de Neurones Artificiels (Ripley, 1996), l'Entropie Maximale (Phillips *et al.*, 2006), les Forêts Aléatoires (Evans *et al.*, 2011) et les Arbres de Classification et de Régression (Breiman *et al.*, 1984).

L'algorithme d'entropie maximale (MaxEnt) est le plus utilisé par la communauté scientifique. Il est considéré comme étant l'un des plus efficaces pour la modélisation des niches écologiques des espèces (Elith *et al.*, 2006; Wisz *et al.*, 2008; Elith *et al.*, 2011; Merow *et al.*, 2013).

Ce modèle a été largement utilisé pour la modélisation des distributions des espèces forestières à travers le monde (Saatchi *et al.*, 2008; Webber *et al.*, 2011; Benito *et al.*, 2011; Amici *et al.*, 2014; Lemos *et al.*, 2014; Ülker *et al.*, 2018).

Au Maroc, l'algorithme d'entropie maximale a montré ses performances pour la modélisation de l'aire potentielle de nombreuses essences forestières, notamment le caroubier (*Ceratonia siliqua*) dans la province d'Azilal (Lahssini *et al.*, 2015), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*)

dans le Haut Atlas central (Rupprecht *et al.*, 2011) et l'arganier (*Argania spinosa*) (Alba-Sánchez *et al.*, 2015; Moukrim *et al.*, 2018a; Moukrim *et al.*, 2018b).

La présente étude vise à mettre en évidence l'aire potentielle de distribution du genévrier thurifère au Maroc en vue de sa réhabilitation, en utilisant l'algorithme d'entropie maximale.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Biologie et écologie du genévrier thurifère

Le genévrier thurifère (famille des Cupressacées) est un arbre héliophile de 5 à 12 mètres de hauteur, supportant les basses températures et la sécheresse (Garraud *et al.*, 2009). C'est un conifère caractérisé par sa longévité (jusqu'à 600 ans) (DeSoto *et al.*, 2012). Il est dioïque, de port très variable, à feuilles en écailles et à galbules noirs bleuâtres à maturité (Gauquelin, 1999).

Considéré d'un double point de vue biométrique (dimension des galbules et nombre de graines) et biochimique (proanthocyanidines du feuillage), le genévrier thurifère, *Juniperus thurifera* L., présente deux sous-espèces, *thurifera* en Europe et *africana* (Maire) Gauquelin *et al.* au Maghreb (Garraud *et al.*, 2009).

Au Maroc, le genévrier thurifère forme la limite altitudinale atteinte par les arbres (entre 1600 et 3520 m), en climat méditerranéen semi-aride à subhumide froid continental, sec et lumineux (Ouhammou, 2005). Il est indifférent quant à la nature du substrat quoiqu'on le retrouve le plus souvent sur des terrains calcaires (Badri, 2003).

Pour les aspects biotiques du genévrier thurifère, la compétition intra-spécifique est négligeable (Vizcaino-Palomar *et al.*, 2014). Le rôle de la symbiose mycorhizienne est particulièrement important (Sanguin *et al.*, 2013).

Bien que la thuriféraie soit peu productive et dégradée, elle procure à la population locale un ensemble de produits de première importance, dans le cadre d'une économie orientée largement vers la subsistance. Les conditions du milieu font que l'élevage extensif soit l'activité prépondérante.

Sur le plan de gestion forestière, cet écosystème est généralement considéré comme un terrain forestier appartenant au domaine privé de l'État avec des droits d'usage reconnus à la population locale. Cette situation conduit parfois à des conflits avec les usagers, qui récusent la domanialité de ces espaces boisés et revendiquent une gestion selon leurs principes coutumiers ancestraux.

Données utilisées

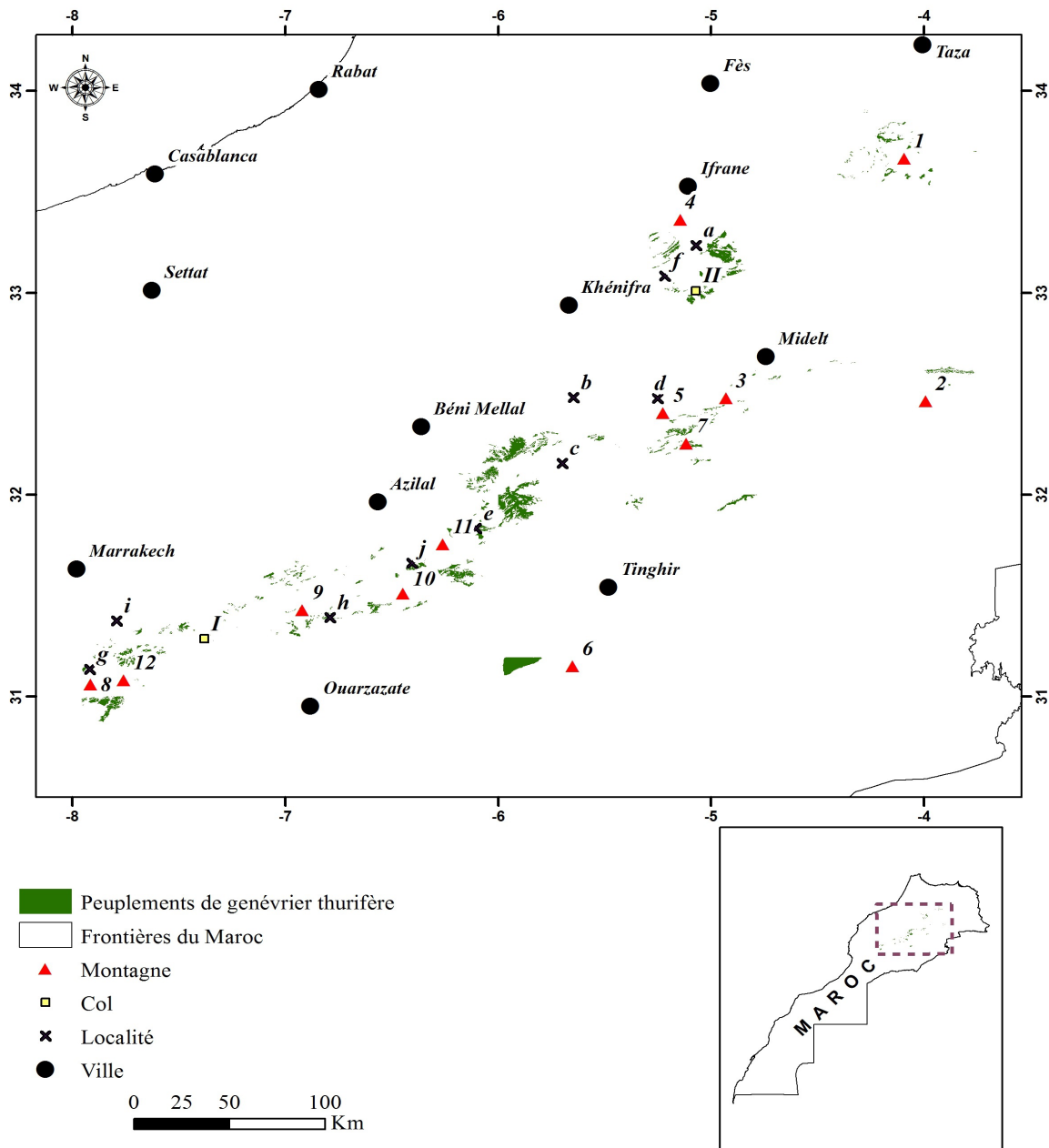
Les données mobilisées comportent les coordonnées géographiques des points de présence de l'espèce et des prédicteurs environnementaux. Les données d'occurrence se sont basées principalement sur l'exploitation des données de l'Inventaire Forestier National (cartographie réalisée pour tout le Maroc entre 2005 et 2018) et des cartes des types de peuplements dans certaines forêts aménagées contenant des formations de genévrier thurifère (forêts d'Immouzzar Marmoucha, Béni Sohane, Maghraoua, Tamjilt, Aghbalou Larbi, Ait Abdi et Ourika). Ceci a permis de préciser l'aire de distribution actuelle du genévrier thurifère au Maroc,

soit 117 000 ha (Figure 1). Cette surface reste largement supérieure aux estimations réalisées auparavant (Barbero *et al.*, 1990; Gauquelin, 1999). Sur la base des données précitées et des coordonnées spatiales extraites de la base de données du GBIF (Global Biodiversity Information Facility, <http://www.gbif.org>), 1182 points d'occurrence du genévrier thurifère ont été utilisés afin de couvrir la diversité des habitats de l'espèce. Une distance minimale de 1 kilomètre entre les points de présence du genévrier thurifère a été adoptée pour réduire les biais d'échantillonnage et d'autocorrélation (Webber *et al.*, 2011).

Vingt (20) variables environnementales ont été utilisées pour modéliser la probabilité de présence du genévrier thurifère. Ce sont l'altitude et 19 variables bioclimatiques

qui sont les plus directement liées aux aspects physiologiques de la croissance des végétaux (Tableau 1). Ces variables environnementales comportent 11 variables relatives aux températures et 8 aux précipitations (période d'observation: 1960-1990). Elles ont été extraites de la base de données WorldClim (<http://www.worldclim.org>) au format raster à une résolution de 30 arc-secondes, soit approximativement 1 kilomètre (Hijmans *et al.*, 2005).

Les données cartographiques représentant les variables environnementales retenues ont été découpées sur une étendue géographique correspondant aux limites territoriales du Maroc et à une même résolution spatiale afin d'évaluer l'aire potentielle de cette espèce sur la totalité du territoire marocain.



Montagnes: (1) Bou Iblane, (2) Mesrouh, (3) Ayachi, (4) Habri, (5) Masker, (6) Saghro, (7) Aberdouz, (8) Toubkal, (9) Azla, (10) M'goun, (11) Azourki, (12) Tifnout.

Cols: (I) Tizi N'tichka, (II) Zad.

Localités: (a) Timahdite, (b) Aghbala, (c) Imlchil, (d) Tounfite, (e) Zaouiat Ahansal, (f) Bekrit, (g) Imlil, (h) Megdaz, (i) Tnine de l'Ourika, (j) Tabant.

Figure 1: Répartition actuelle des peuplements du genévrier thurifère au Maroc

Approche de modélisation

La modélisation de la répartition spatiale du genévrier thurifère au Maroc a été utilisée pour prédire la distribution de cette espèce en fonction des limites environnementales. L'approche s'est basée sur des données de présence actuelle de l'espèce et des variables environnementales prédictives régnant dans ces sites. L'ajustement d'une fonction de réponse permet de prédire la probabilité d'occurrence en fonction de ces prédicteurs environnementaux.

L'approche de modélisation s'est basée sur le recours à l'algorithme d'entropie maximale. L'outil MaxEnt, version 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006; Phillips et Dudík, 2008), a été utilisé pour entraîner la fonction de réponse. Ceci se justifie par la performance de l'approche et par sa robustesse même dans des contextes de variables corrélées (Elith *et al.*, 2011). Dans notre mise en œuvre, toutes les variables environnementales décrites ont été retenues pour le modèle final.

Durant l'entraînement du modèle pour la prédiction de la distribution du genévrier thurifère, les paramètres par défaut de l'algorithme MaxEnt ont été sélectionnés (Phillips et Dudík, 2008). Les résultats ont ensuite été validés sur une plage de tests. Cette évaluation consiste à mesurer le degré d'adéquation entre les prédictions du modèle et les données observées (Guisan et Zimmermann, 2000).

La validité intrinsèque d'un modèle est caractérisée par la sensibilité et la spécificité (Sensibilité = Fréquence de Vraies Présences; Spécificité = Fréquence de Vraies Absences). Ces deux paramètres permettent l'établissement de la Courbe Caractéristique d'Opération dite ROC (*Receiving Operator Characteristic*) (Hanley et McNeil, 1982). Le calcul de l'Aire Sous la Courbe AUC (*Area Under the Curve*), qui est une caractéristique qui qualifie la précision de la prédiction du modèle (Fawcett, 2006), renseigne sur la performance et la qualité du modèle établi

à prédire correctement l'occurrence de l'espèce (Hanley et McNeil, 1982). Les valeurs de l'AUC sont interprétées tel que proposé par Swets (1988): $AUC < 0,75$: le modèle est mauvais; $0,75 \leq AUC \leq 0,90$: le modèle est passable; $AUC > 0,90$: le modèle est bon.

Le test de Jackknife a été aussi effectué sur les variables retenues afin d'identifier celles qui contribuent le plus au modèle (Miller, 1974).

Les résultats de la modélisation comprennent des évaluations de la performance du modèle, la contribution de chaque variable au modèle et la probabilité de présence de l'espèce à chaque pixel dans la zone d'étude (Phillips *et al.*, 2006). La carte de probabilité d'occurrence du genévrier thurifère correspond à une sortie logistique avec des valeurs entre 0 à 1 pour chaque pixel. Pour une meilleure caractérisation de la distribution potentielle, un seuil a été utilisé pour délimiter l'aire potentielle de l'espèce.

Comme suggéré par Phillips et Dudík (2008), le seuil retenu est celui relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile (*10 percentile training presence*), représentant la probabilité que 90% des points de présence tombent dans cette aire potentielle. Ce seuil procure un meilleur résultat, qui est écologiquement significatif par rapport aux valeurs des autres seuils.

RÉSULTATS

Qualité du modèle et variables influentes

La valeur de l'AUC pour l'évaluation du modèle MaxEnt est de 0,938. Ceci indique la robustesse de la modélisation effectuée et atteste de l'excellente performance du modèle ajusté à prédire l'aire favorable de l'espèce étudiée. Ainsi, ce modèle est capable de préciser clairement l'environnement associé aux emplacements les plus appropriés pour le genévrier thurifère.

Tableau 1: Contributions relatives et importance de la permutation (%) des variables environnementales utilisées pour la modélisation

Code	Paramètre environnemental	Unité	Pourcentage de contribution	Importance de la permutation
Bio 1	• Température moyenne annuelle	°C	1,4	0,0
Bio 2	• Écart diurne moyen (température maximale – température minimale; moyenne mensuelle)	°C	1,2	4,6
Bio 3	• Isothermalité (Bio 2/ Bio 7) * 100	%	1,2	6,2
Bio 4	• Saisonnalité de la température (coefficient de variation)	°C	3,2	13,2
Bio 5	• Température maximale du mois le plus chaud	°C	0,8	1,3
Bio 6	• Température minimale du mois le plus froid	°C	66,8	13,2
Bio 7	• Écart annuel de Température (Bio 5 - Bio 6)	°C	1,2	7,7
Bio 8	• Température moyenne du trimestre le plus humide	°C	0,0	0,6
Bio 9	• Température moyenne du trimestre le plus sec	°C	1,7	0,1
Bio 10	• Température moyenne du trimestre le plus chaud	°C	1,5	6,5
Bio 11	• Température moyenne du trimestre le plus froid	°C	1,5	0,0
Bio 12	• Précipitations annuelles	mm	0,0	0,0
Bio 13	• Précipitations du mois le plus humide	mm	0,2	5,2
Bio 14	• Précipitations du mois le plus sec	mm	1,1	1,8
Bio 15	• Saisonnalité des précipitations (coefficient de variation)	%	0,0	0,4
Bio 16	• Précipitations du trimestre le plus humide	mm	0,0	1,0
Bio 17	• Précipitations du trimestre le plus sec	mm	1,5	6,9
Bio 18	• Précipitations du trimestre le plus chaud	mm	0,2	11,0
Bio 19	• Précipitations du trimestre le plus froid	mm	0,1	8,8
Alt	• Altitude	m	16,3	11,5

L'analyse des pourcentages de contribution des différentes variables à la prédiction du modèle suggère que la température minimale du mois le plus froid (Bio 6) et l'altitude (Alt) sont, dans cet ordre, les variables les plus importantes avec des contributions respectives de l'ordre de 66,8% et 16,3%. Ces valeurs de contribution étant influencées par l'ordre d'intégration des variables dans le modèle, une autre statistique évaluant leur contribution a été également calculée: l'importance de la permutation (Tableau 1). Une valeur élevée de la permutation indique une grande importance de la variable concernée. En effet, la permutation confirme toujours l'importance de la température minimale du mois le plus froid et l'altitude pour la prédiction de la niche écologique du genévrier thurifère. De plus, la permutation a permis également de mettre en évidence la saisonnalité de la température (Bio 4) comme étant une variable dont l'omission entraîne une forte réduction (près de 13,2 %) du pouvoir prédictif du modèle.

L'examen des résultats du test d'importance des variables de Jackknife montre que la saisonnalité de la température est la variable qui réduit le plus le gain quand elle est omise, ce qui semble procurer au modèle des informations qui ne sont pas présentes dans les autres variables. Ce test montre aussi que la température minimale du mois le plus froid est la variable environnementale qui présente le meilleur gain et qui semble avoir l'information la plus utile lorsque cette variable est utilisée isolément dans le modèle (Figure 2).

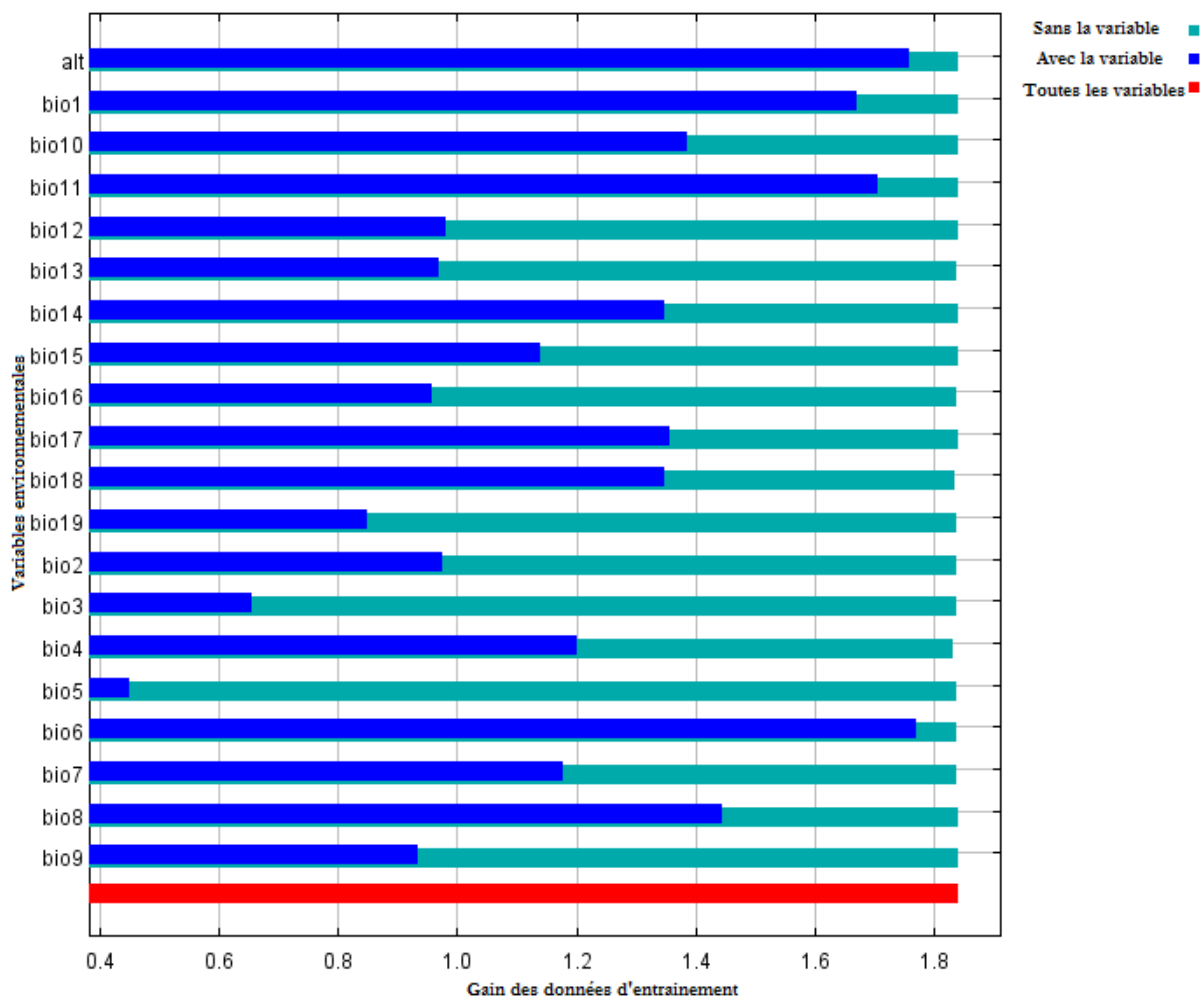
A la lumière de ce qui précède, les variables environnementales qui influencent le plus la distribution spatiale du genévrier thurifère sont la température minimale du mois le plus froid (Bio 6), la saisonnalité de la température (Bio 4) et l'altitude (Alt). Les autres variables environnementales avaient très faiblement contribué à la prédiction du modèle.

Les résultats obtenus concordent avec la littérature concernant les conditions d'existence et de développement du genévrier thurifère, considéré comme étant un arbre des montagnes continentales assez froides en hiver et sèche en été, et pouvant supporter les écarts thermiques diurnes et saisonniers prononcés (Gaussen, 1952; Auclair, 1993; Taleb et Fennane, 2010; Villar, 2013).

Cartographie de l'aire potentielle du Genévrier thurifère

Le modèle développé a permis de construire la première carte montrant l'aire potentielle de distribution du genévrier thurifère au Maroc sous les conditions climatiques actuelles (Figure 3).

En utilisant le seuil relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile qui est de 0,431, le genévrier thurifère devrait exister dans un environnement qui se compose d'une superficie totale d'environ 2 142 000 ha. Cette aire potentielle du genévrier thurifère au Maroc est largement supérieure à l'estimation de 327 000 ha (Barbero *et al.*, 1990).



«bio» représente les variables bioclimatiques extraites de WorldClim. Pour la signification de ces variables se référer au Tableau 1; Alt = Altitude

Figure 2: Résultats du test Jackknife sur la contribution des variables sélectionnées à la prédiction de l'aire de distribution du genévrier thurifère

De plus, en utilisant ce seuil de 0,431, on s'attend à ce que les zones potentiellement favorables pour cette espèce atteignent 3% du territoire marocain. Cette distribution spatiale prédite du genévrier thurifère confirme l'affinité de cette espèce pour les montagnes de l'Atlas.

Comparaison de l'aire potentielle et de l'aire de répartition actuelle

L'aire de répartition actuelle du genévrier thurifère (Figure 1) a été confrontée à son aire potentielle (Figure 3), dans le but de comparer les zones où l'espèce est réellement présente avec les zones prédites comme étant potentiellement favorables pour l'espèce. Cette comparaison montre que l'aire potentielle, où les conditions climatiques actuelles sont favorables, est beaucoup plus étendue (2 142 000 ha)

que l'aire réelle (117 000 ha). Ainsi, l'aire de répartition actuelle du genévrier thurifère au Maroc ne représente que 5% de l'habitat favorable à cette espèce.

Ce résultat témoigne de la forte dégradation des peuplements du genévrier thurifère au Maroc depuis des siècles comme il a été déclaré par différents auteurs (Barbero *et al.*, 1990; Auclair, 1993; Gauquelin *et al.*, 1998; Thion et Alifriqui, 2004) et met en relief le potentiel majeur de restauration de ces habitats. En effet, une grande partie des chaînes de l'Atlas (surtout le Haut Atlas central, le Moyen Atlas et l'Anti-Atlas de Saghro) sont bioclimatiquement adaptées au développement du genévrier thurifère. Cette espèce a régressé sur une grande partie des milieux potentiels, en dépit des conditions climatiques à priori favorables.

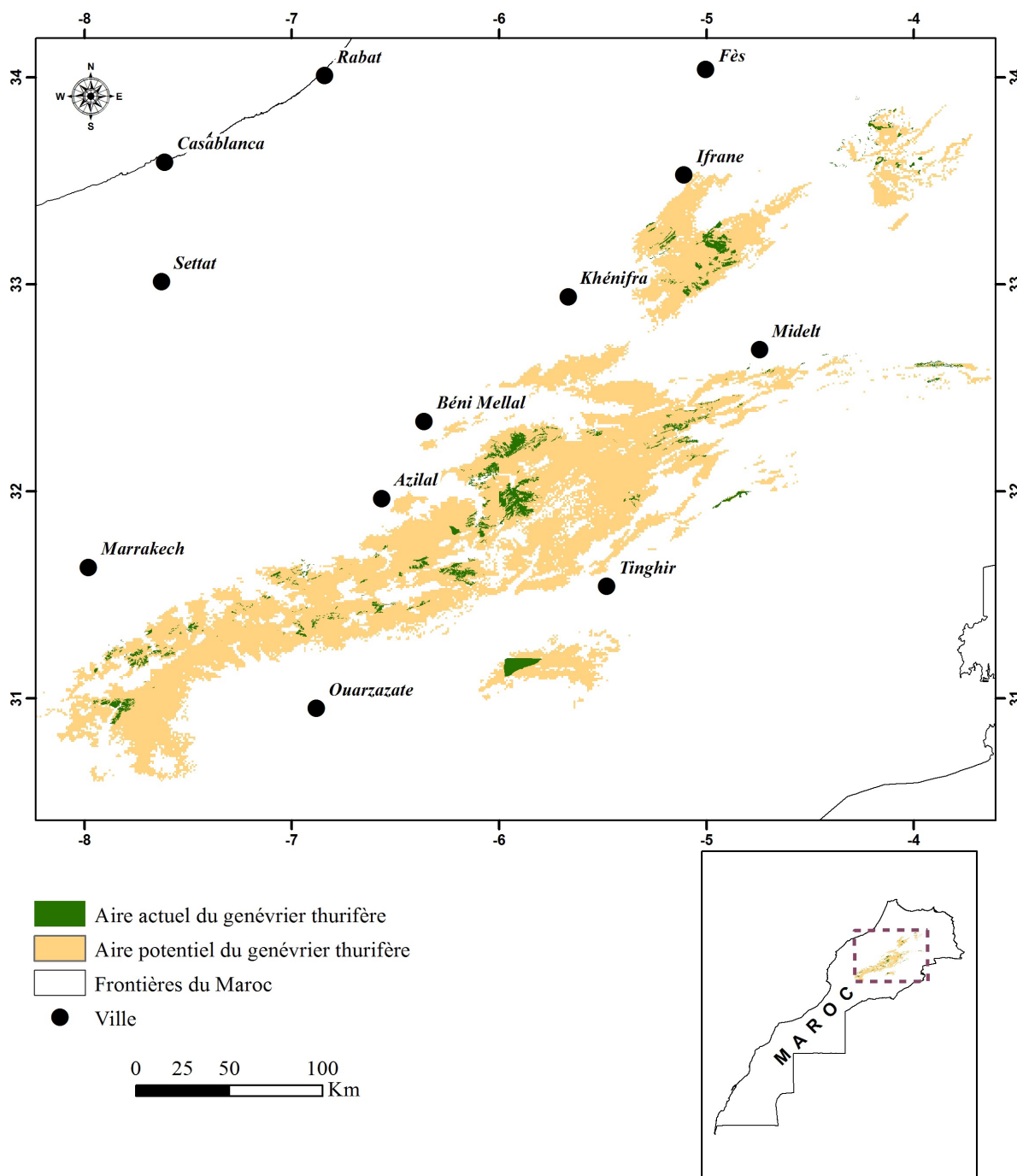


Figure 3: Aire potentielle du genévrier thurifère au Maroc

Cependant, d'autres facteurs non compris dans le modèle, limitent l'extension du genévrier thurifère notamment les conditions édaphiques (affleurement de la roche mère suite aux processus érosifs intenses), les perturbations humaines et la compétition interspécifique avec les peuplements forestiers surtout du Cèdre (*Cedrus atlantica*) et du Chêne vert (*Quercus rotundifolia*) dans les milieux les plus conservés.

En effet, Thinon et Alifriqui (2004) considèrent que le genévrier thurifère est le dernier stade de dégradation des groupements arborescents à base des chênes essentiellement, précédant l'asylvatisme.

DISCUSSION

La carte de l'aire potentielle du genévrier thurifère (Figure 3) peut fournir aux décideurs et gestionnaires du territoire un outil d'aide à la prise de décision pour une gestion raisonnée et durable de l'espèce. Ainsi, les zones prédites comme favorables, mais actuellement non occupées, peuvent être retenues pour la réhabilitation des peuplements de cette espèce.

Le thurifère peut ainsi jouer un rôle important dans une dynamique de conservation et de réhabilitation de la biodiversité dans la haute montagne marocaine. L'espèce est capable de coloniser différents milieux de la montagne et s'adapte à la diversité des conditions stationnelles de cet espace en termes d'exposition, nature du substrat, pente, etc.

La problématique de réhabilitation des écosystèmes de genévrier thurifère au Maroc se pose avec acuité. En effet, plusieurs auteurs confirment qu'avec le rythme actuel de dégradation, les peuplements de cette espèce sont menacés d'extinction (Mhirit et Blérot, 1999; Gauquelin *et al.*, 2012).

L'analyse de l'état de régénération naturelle du genévrier thurifère dans les forêts marocaines montre que la fructification ne pose pas de problèmes (Montès, 1999). Par contre, les difficultés sont rencontrées dans le faible taux de germination des graines lié à la forte dormance des semences et la sensibilité très élevée des graines et des galbules au parasitisme (Roques *et al.*, 1984; Bigot *et al.*, 1989; El Alaoui El Fels *et al.*, 1999; Badri, 2003).

De rares germinations ont été observées sous la couronne des arbres, où se développe un véritable horizon humifère, mettant en évidence l'importance du microédaphisme sur la dynamique de régénération du peuplement (Gauquelin et Dagnac, 1988; Gauquelin *et al.*, 1998). La germination s'observe aussi au sein des touffes de xérophytes épineuses qui protègent les jeunes plants contre le pâturage, l'érosion du sol et les facteurs climatiques extrêmes (Lemoine-Sébastien, 1965; Montès, 1999).

En l'absence d'interventions directes d'ordre sylvo-pastoral, les actions de restauration limitées menées par le forestier concernent essentiellement des mises en défens de régénération. Ces actions portent généralement sur des communautés végétales bien venantes et qui sont encore en bon état de conservation, notamment au niveau du parc national de Toubkal (Ouhammou *et al.*, 1996; Ouhammou *et al.*, 2013) et dans la thuriféraie d'El Houanet, située près de Tagleft.

Le reste de la thuriféraie est en dégradation continue, voire même en voie d'extinction à cause du parcours intensif et des prélèvements délictueux excessifs de bois de feu. L'absence de la régénération naturelle de l'espèce renforce davantage sa situation de vulnérabilité (Fennane, 2017).

Avant que la dégradation ne soit irréversible, l'administration forestière est amenée à entreprendre un programme ambitieux de réhabilitation de la thuriféraie dans les zones où l'espèce a été éradiquée, en prenant en considération l'aire potentielle de l'espèce.

Ce programme peut contenir des actions relatives à la plantation de jeunes plants de genévrier thurifère à l'intérieur des touffes de xérophytes épineuses, en procédant à la production des plants par semis, la réalisation des opérations de mycorhization contrôlée (Sanguin *et al.*, 2013) et à la multiplication végétative par bouturage (Ferradous *et al.*, 2013).

CONCLUSION

Cette étude fournit la première carte de l'aire de distribution potentielle du genévrier thurifère au Maroc. L'utilisation de l'algorithme d'entropie maximale montre une grande performance dans la prédiction précise de la répartition de cette espèce, en utilisant un certain nombre de points d'occurrence. L'application de cette approche peut être un outil efficace pour la conservation, la surveillance et la gestion de la thuriféraie dans le contexte du changement climatique.

La modélisation de la distribution des espèces constitue un moyen pertinent pour définir l'étendue géographique des aires favorables à ces espèces et pour identifier les variables environnementales qui affectent leur distribution. La carte de l'aire potentielle du genévrier thurifère développée dans le cadre de cette étude aidera à améliorer le niveau des connaissances et permettra de mieux raisonner la planification de la conservation et de la restauration de cette espèce en régression continue. La compréhension des facteurs qui limitent sa distribution spatiale est un préalable à l'amélioration des stratégies de gestion et de conservation.

Le modèle de distribution développé pour le genévrier thurifère peut aider à choisir des zones futures dans lesquelles les conditions bioclimatiques sont les plus favorables pour la restauration de cette espèce et la sauvegarde de la pérennité de son écosystème, surtout que la thuriféraie marocaine joue un rôle capital en matière de sauvegarde de la diversité génétique de cette espèce à l'échelle de la méditerranée.

D'autres paramètres peuvent être pris en considération, notamment l'âge des peuplements existants afin de localiser les zones abritant les vieux genévriers pour qu'elles soient prioritaires dans les opérations de réhabilitation ainsi que l'identification des zones les plus sujettes à la pression des activités anthropozoogènes.

Pour la concrétisation de cette vision, une analyse approfondie du contexte socio-économique de la haute montagne marocaine devra confronter les perceptions des populations locales et des services forestiers compétents vis-à-vis de cette formation ligneuse en vue de trouver les éléments clés pour une meilleure gestion et conservation durable.

RÉFÉRENCES

- Alba-Sánchez F., López-Sáez J.A., Nieto-Lugilde D., Svenning J.C. (2015). Long-term climate forcings to assess vulnerability in North Africa dry argan woodlands. *Applied vegetation science*, 18: 283-296.
- Amici V., Geri F., Bonini I., Rocchini D. (2014). Ecological niche modelling with herbarium data: A framework to improve Natura 2000 habitat monitoring. *Applied Ecology and Environmental Research*, 12: 645-659.
- Auclair L. (1993). Le genévrier thurifère *Juniperus thurifera* L. géant de l'Atlas. *Forêt Méditerranéenne*, 14: 306-314. Disponible à <http://hdl.handle.net/2042/45488>.
- Austin M.P., Belbin L., Meyers J.A., Doherty M.D., Luoto M. (2006). Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: role of artificial data and theory. *Ecological Modelling*, 199: 197-216.
- Badri W. (2003). Structure, Dynamique et Fonctionnement des peuplements à Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans les Atlas marocains. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 274 p.
- 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: 151-173.
- Barbéro, M., Bonin, G., Quézel, P. (1975). Les pelouses écorchées des montagnes Circum-Méditerranéennes. Aperçu bioclimatique et syngénétique, leurs rapports avec les forêts d'altitude. *Phytocoenologia*: 427-459.
- Benabid A. (2000). Flore et écosystèmes du Maroc: Evaluation et préservation de la biodiversité. Editions Ibis Press, Paris.
- Benabid A. (1985). Les écosystèmes forestiers, préforestiers et présteppiques du Maroc. *Forêt Méditerranéenne*, Tome VII, n°1: 53-64.
- Benito B., Lorite J., Peñas, J. (2011). Simulating potential effects of climatic warming on altitudinal patterns of key species in Mediterranean-alpine ecosystems. *Climatic Change*, 108: 471-483.
- Bigot L., Boumezzough A., El Alaoui El Fels A. (1989). Contribution à l'étude des insectes liés au genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans le Haut-Atlas marocain: biologie de deux micro-lépidoptères ravageurs dominants des galbules et des graines: *Argyrestia reticulata* (Yponomeutidae) et *Pammene juniperana* (Tortricidae), espèces nouvelles pour le Maroc [Lep.]. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 93: 233-238.
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. (1984). Classification and regression trees. Monterey, Calif., USA: Wadsworth, 432 p.
- DeSoto L., Varino F., Andrade J.P., Gouveia C.M., Campelo F., Trigo R.M., et al. (2014). Different growth sensitivity to climate of the conifer *Juniperus thurifera* on both sides of the Mediterranean Sea. *International journal of biometeorology*, 58: 2095-2109.
- DeSoto L., Camarero J. J., Olano J. M., Rozas V. (2012). Geographically structured and temporally unstable growth responses of *Juniperus thurifera* to recent climate variability in the Iberian Peninsula. *European Journal of Forest Research*, 131: 905-917.
- El Alaoui El Fels M. A., Roques A., Boumezzough A. (1999). Les arthropodes liés aux galbules et aux graines du genévrier thurifère, *Juniperus thurifera* L., dans les Atlas marocains. *Ecologia mediterranea*, 25: 95-110.
- 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: 43-57.
- Elith J., Graham C. H., Anderson R. P., Dudík M., Ferrier S., Guisan A., et al. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29:129-151.
- Evans J. S., Murphy M. A., Holden Z. A., Cushman, S. A. (2011). Modeling species distribution and change using random forest. In: Predictive species and habitat modeling in landscape ecology, Springer, New York, p. 139-159.
- Fawcett T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27: 861-874.
- Fennane M. (2017). Eléments pour un Livre rouge de la flore vasculaire du Maroc. Fasc. 2. Gymnospermae, Dicotyledonae (Acanthaceae - Aristolochiaceae) (version 1, janvier 2017). Edit. Tela-Botanica.
- Ferradous A., Alifriqui M., Hafidi, M., Duponnois, R. (2013). Essais de régénération artificielle du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.). *Ecologia mediterranea*, 39: 115-120.
- Garraud L., Lebreton P., Genis J. M. (2009). Biogéographie et écologie comparées du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans les Alpes françaises du sud/ Comparative biogeography and ecology of the Incense Juniper in the French southern Alps. *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 78: 119-135.
- Gauquelin T., Bertaudiere V., Montes N., Badri, W. (1998). Cycle biogéochimique et hétérogénéité édaphique des groupements forestiers pré-steppiques à Genévrier thurifère du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). *Ecologie*, 29: 177-180.
- Gauquelin T., Bertaudiere V., Montes N., Badri W., Asmode, J. F. (1999). Endangered stands of thuriferous juniper in the western Mediterranean basin: ecological status, conservation and management. *Biodiversity and Conservation*, 8: 1479-1498.
- Gauquelin T., Chondroyannis P., Boukhoud N., Bouysou M., Brunel C., Danneyrolles V., et al. (2012). Le Genévrier thurifère, espèce partagée au Nord et au Sud de la Méditerranée. *Forêt Méditerranéenne*, 33: 227-240.
- Gauquelin T. (1999). Le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.), un arbre emblématique des Monegros. In: A. Melic & J. Blasco-Zumeta (eds.), Manifesto científico por los Monegros. Volumen monográfico del Boletín de la Sociedad Entomológica aragonesa, p. 107-110.

- Gauquelin T., Dagnac J. (1988). Caractéristiques édaphiques des groupements à Genévrier thurifère des Atlas marocains: étude des niveaux superficiels des sols sous couvert et hors couvert. *Ecologia Mediterranea*, 14: 43-56.
- Gausson H. (1952). Les résineux d'Afrique du Nord. Ecologie, reboisements. *Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, 32: 505-532.
- Guisan A., Zimmermann N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135: 147-186.
- Hanley J.A., McNeil, B.J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143: 29-36.
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G., Jarvis A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
- Lahssini S., Hajib S., Lahlaoui H., Mharzi Alaoui H., Khat-tabi A. (2015). Modelling Spatial Distribution of the Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Azilal Province, Morocco. *Journal of Geography and Geology*, 7: 33-44.
- Lebreton P. (1990). La chimiotaxonomie des Gymnospermes. Bulletin de la Société Botanique de France. *Lettres Botaniques*, 137: 35-46.
- Lemoine-Sebastian C. (1965). Ecologie des genévriers au Maroc. *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles et physiques du Maroc*, 45: 49-116.
- Lemos R. P. M., D'Oliveira C. B., Rodrigues C. R., Roesch L.F.W., Stefenon V.M. (2014). Modeling distribution of *Schinus molle* L. in the Brazilian Pampa: insights on vegetation dynamics and conservation of the biome. *Annals of Forest Research*, 57: 205-214.
- Médail, F., Diadema, K. (2006). Biodiversité végétale méditerranéenne et anthropisation: approches macro et micro-régionales. *Annales de géographie*, 651: 618-640.
- Merow C., Smith M. J., Silander Jr J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36: 1058-1069.
- Mhirit O., Blerot P. (1999). Le grand livre de la forêt marocaine. Editions Mardaga, 281 p.
- Miller, R. G. (1974). The jackknife-a review. *Biometrika*, 61: 1-15.
- Montès N. (1999). Potentialités, dynamique et gestion d'une formation arborée à Genévrier Thurifère (*Juniperus Thurifera* L.) des Atlas marocains: le cas de la vallée de l'Azzaden. Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail, France, 192p.
- Moukrim S., Lahssini S., Rhazi M., Mharzi Alaoui H., Benabou A., Wahby I., et al. (2019). Climate change impacts on potential distribution of multipurpose agroforestry species: *Argania spinosa* (L.) Skeels as case study. *Agroforestry Systems*, 93:1209-1219.
- Moukrim S., Lahssini S., M., Mharzi Alaoui H., Rifai N., Arahou M., Rhazi L. (2018). Modélisation de la distribution spatiale des espèces endémiques pour leur conservation: cas de l'*Argania spinosa* (L.) Skeels. *Revue d'écologie*, 73: 153-166.
- Ouhammou A., Muller S., M'Hirit O. (1996). Impact des activités pastorales sur la biodiversité floristique dans une thuriféraie (*Juniperus thurifera* L. ssp. *africana* Maire) limitrophe du Parc National de Toubkal, Haut-Atlas de Marrakech, Maroc. *Acta Bot. Gallica*, 143: 393-401.
- Ouhammou A. (2005). Flore et végétation du Parc National de Toubkal (Haut-Atlas de Marrakech, Maroc): typologie, écologie et conservation. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Maroc, 260p.
- Ouhammou A., Hafidi M., Zarik L., Khoulassa S., Boumezzough A., Duponnois R. (2013). Gestion et conservation des thuriférais au Maroc: cas du Parc national du Toubkal. *Ecologia mediterranea*, 39: 61-68.
- Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Phillips S. J., Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161-175.
- Quézel P. (1957). Peuplement végétal des hautes montagnes de l'Afrique du Nord: essai de synthèse biogéographique et phytosociologique. Edit. Paul Lechevalier, Paris, 463p.
- Ripley B.D. (1996). Pattern recognition and neural networks. Cambridge university press, 390p.
- Roques A., Raimbault J.P., Goussard, F. (1984). La colonisation des cônes et galbules des genévriers méditerranéens par les insectes et acariens et son influence sur les possibilités de régénération naturelle de ces essences. *Ecologia mediterranea*, 10: 147-169.
- Rupprecht F., Oldeland J., Finckh, M. (2011). Modeling potential distribution of the threatened tree species *Juniperus oxycedrus*: how to evaluate the predictions of different modelling approaches?. *Journal of Vegetation Science*, 22: 647-659.
- Saatchi S., Buermann W., Ter Steege H., Mori S., Smith T. B. (2008). Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2000-2017.
- Sanguin H., Khoulassa S., Zarik L., Gryta H., Boumezzough A., Ouahmane L., et al. (2013). Rôles potentiels de la symbiose mycorhizienne dans la conservation des populations méditerranéennes de Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.). *Ecologia mediterranea*, 39: 99-107.
- Swets J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240: 1285-1293.
- Taleb M. S., Fennane, M. (2010). Étude phytosociologique des groupements présteppeiques du parc national du Haut Atlas oriental et ses bordures (Maroc). *Revue d'écologie*, 65: 97-128.

Thinon M., Alifriqui M. (2004). Dégradation des thuriféraires marocaines: premières données phytohistoriques et pédoanthracologiques. *Naturalia Maroccana*, 2: 241–250.

Ülker E. D., Tavşanoğlu Ç., Perktas U. (2018). Ecological niche modelling of pedunculate oak (*Quercus robur*) supports the ‘expansion–contraction’ model of Pleistocene biogeography. *Biological Journal of the Linnean Society*, 123: 338–347.

Villar L. (2013). Le Genévrier thurifère, vieil arbre compagnon de l’homme en Méditerranée occidentale. *Ecologia mediterranea*, 39: 7–16.

Vizcaino-Palomar N., Gómez-Aparicio L., Pavón-García J., Bartolomé-Esteban C., Álvarez-Jiménez J., Zavala M. A. (2014). Main biotic drivers of tree growth in a developing *Juniperus thurifera* stand in central Spain. *European journal of forest research*, 133: 1109–1119.

Webber B.L., Yates C.J., Le Maitre D.C., Scott J.K., Kriticos D.J., Ota N., et al. (2011). Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models. *Diversity and Distributions*, 17: 978–1000.

Wisz M. S., Hijmans R. J., Li J., Peterson A. T., Graham C. H., Guisan A., et al. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and distributions*, 14: 763–773.