

Identification des principaux déterminants environnementaux et modélisation de la distribution potentielle de pin d'Alep et impact du changement climatique en Tunisie

T. BEN RHOUMA¹, H. BEN MARIEM²

(Reçu le 15/06/2021; Accepté le 10/12/2021)

Résumé

La répartition géographique des écosystèmes forestiers méditerranéens est largement influencée par les conditions du milieu notamment les paramètres climatiques et orographiques. Cet article porte sur l'étude des variables influençant la répartition spatiale du pin d'Alep à l'échelle de la Tunisie. Cependant, il est important de mentionner un autre type de menaces qui risque bien de bouleverser, à l'avenir, de cet écosystème forestier, ce sont les impacts liés aux changements climatiques. Dans cette étude, le développement d'un modèle à l'échelle de l'aire de pin d'Alep par combinaison des variables environnementales et des points de présence de l'espèce selon le principe d'entropie maximale, a permis, de connaître les principales variables responsables de sa distribution, ainsi, de cartographier la répartition potentielle des pinèdes sous les conditions climatiques actuelles et futures. Le modèle développé avec Maxent a montré une bonne prévisibilité avec une AUC > 0,9. Les résultats ont montré que les précipitations annuelles, l'altitude, la pente et l'amplitude thermique semble être les principaux facteurs de la distribution spatio-temporelle du pin d'Alep dans la zone d'étude. Une comparaison de la couverture végétale actuelle avec la répartition potentielle actuelle met en évidence une fragmentation de l'habitat naturel de cette espèce conifère. En effet, l'aire de répartition actuelle ne représente que 25% de l'habitat favorable à cette espèce. Conséquences de l'action de l'homme sur son environnement. Cependant, la simulation de cette aire potentielle de distribution de l'espèce selon deux scénarios de réchauffement RCP2.6 et RCP8.5, aux horizons 2050 et 2070, permet d'évaluer et de cartographier l'impact potentiel du changement climatique sur le pin d'Alep. Ainsi, les distributions futures semblent être affectées par le climat futur. En réponse aux changements climatiques, le pin d'Alep peut présenter deux tendances contrastées. Une évolution progressive dans le nord et une évolution régressive dans sa limite inférieure. Cependant, l'expansion des aires favorables pourrait être plus importante qu'un rétrécissement. Le climat futur pourrait convertir les zones qui sont actuellement peu favorables au pin d'Alep (subhumides humides) en zones très favorables.

Mots clés: Pin d'Alep, paramètres climatique et orographiques, changement climatique, Maxent, Tunisie

Identification of the main environmental determinants and modeling the potential distribution of Aleppo pine, and the impact of climate change in Tunisia

Abstract

The distribution of forest ecosystems in Mediterranean region are largely under the influence of environmental conditions such as climate and orographic parameters. This study aimed to understand the relationship between Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) occurrences and environmental conditions at a regional scale in Tunisia. However, it is important to mention another type of threat that is likely to trouble this forest ecosystem in the future; these are the consequences of climate change. In this study, the Maxent software, based on sample point of the Aleppo pine and the environment variables was used to model the current distribution and to predict the impact of climate change. The model developed showed good predictivity with AUC > 0.90 indicated the prediction model's high credibility and accuracy. Furthermore, we examined the variable importance and contribution to the prediction results, to distinguish the effect of different variables on the potential distribution area. The results showed that the variables relevant to Aleppo pine distribution area are precipitation, altitude, slope and temperature Annual Range. To investigate the potential effects of climate change on the target species, we used Maxent modeling algorithm for two representative concentration pathways, lower emission scenario (RCP 2.6) and higher emission (RCP 8.5) climate scenarios in 2050 and 2070. A comparison of the current vegetation cover with the current potential distribution highlights a fragmentation of the natural habitat of the Aleppo pine in Tunisia. Indeed, the current species distribution represents only 25% of its suitable area. Human activities had induced severe changes in the natural Aleppo pine forest ecosystems. Future predictions expect an extension of the areas classified as favorable to the Aleppo pine. In response to climate changes, the Aleppo pine may display two contrasted tendencies: a progressive evolution in the north, and a regressive evolution in the southern limit. However, the expansion of suitable areas may be more important than loss of habitat suitability. The future climate could convert areas that are currently not suitable for Aleppo pine (humid sub-humid) into very suitable.

Keywords: Aleppo pine, climate and orographic parameters, climate change, Maxent, Tunisia

INTRODUCTION

Le climat constitue un paramètre primordial qui détermine la répartition des espèces. Il a été prouvé qu'il existe une forte relation entre l'environnement et la distribution des espèces (Araújo and Guisan, 2006; Pulliam, 2000). Plusieurs types de modèles existent pour modéliser la distribution d'une espèce ou les zones favorables à sa dispersion, en vue de reproduire le déterminisme environnemental de la répartition de cette espèce. Dont, le but est d'identifier les conditions optimales qui permettent à une espèce de se maintenir et/ou d'étudier l'impact écologique de certains facteurs sur l'espèce (anthropisation, changement climatique, etc.).

Pour ce faire, les modélisations spatiales, basées sur des variables environnementales et les données de présence, sont des outils qui sont largement utilisés pour prédire les zones favorables à l'établissement d'une espèce dans l'espace et le temps (Shabani *et al.*, 2016). Ces méthodes sont basées sur la détermination de relations entre l'espèce et les différents facteurs biotiques et abiotiques qui composent son environnement (Austin, 2007).

Ces facteurs sont considérés très importants pour expliquer la distribution des espèces aussi bien à grande échelle qu'à l'échelle locale (Box *et al.* 1993; Shao et Halpin 1995; Lehmann *et al.*, 2002). En fait, de nombreuses méthodes

¹ Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Sfax, Tunisie

² U.R. Biodiversité et Dynamiques des Ecosystèmes en milieux arides, Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie

ont été largement développées en lien avec le développement de modèles performants, des bases de données floristiques et faunistiques, de données environnementales spatialisées, et de Systèmes d'Information Géographiques (McKenzie *et al.*, 2003; Thuiller *et al.*, 2008). D'ailleurs, les SIG rendent possible la spatialisation des modèles écologiques et l'obtention de cartes de distribution potentielle des espèces (Guisan *et al.*, 1998; Guisan et Zimmermann 2000), et des cartes de projections de distribution à partir de scénarios climatiques, qui sont utilisées pour appréhender les impacts probables du changement climatique.

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est un des arbres les plus communs du bassin méditerranéen. C'est une essence forestière représentative des écosystèmes forestiers d'Afrique du Nord qui assure des fonctions et services écologiques, environnementaux et sociaux ainsi que des biens économiques (Ben Rhouma, 2017). Toutefois, cet écosystème reste soumis à diverses pressions d'origines anthropiques et climatiques: les feux des forêts, le pastoralisme, l'exploitation forestière illicite, conduisant à des degrés divers à la réduction de la diversité biologique, qui est accentuée au cours de cette dernière décennie avec les mouvements sociaux liés à la révolution tunisienne de 2011. D'autre part, le climat méditerranéen est caractérisé par une sécheresse estivale, principale contrainte pour la végétation (Daget, 1977) et qui pourrait devenir critique avec les changements climatiques prévus (Hoff et Rambal, 2000). D'ailleurs, Plusieurs travaux (Giannakopoulos *et al.* 2009; IPCC 2014) ont mis en exergue la vulnérabilité particulière de la région méditerranéenne face au changement climatique. Une région particulièrement vulnérable où les changements seront marqués en termes d'élévation des températures et de diminution des précipitations moyennes, de variabilité interannuelle et des phénomènes météorologiques extrêmes (Somot, 2005).

En revanche, les observations de température et précipitation présentées dans le rapport du GIEC de 2014 montrent une augmentation significative des températures en Afrique du Nord (IPCC, 2014). D'ailleurs, Collins (2011) a suggéré que le Nord de l'Afrique sera parmi les zones les plus touchées par le réchauffement du climat, ce qui pourrait avoir des conséquences sur les habitats des espèces et les processus du sol à l'échelle locale (Sturm *et al.*, 2005a; Post *et al.*, 2009).

Dès lors, face à un réchauffement climatique inéluctable, Il devient pertinent d'évaluer l'influence de tels changements du climat sur les écosystèmes forestiers, d'autant plus que la pression anthropique sur le milieu s'accroît progressivement. C'est pourquoi il est primordial que les responsables de la gestion des ressources forestières prennent conscience des conséquences des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers tout en structurant les stratégies de planification et de gestion des forêts.

La gestion durable des écosystèmes forestiers de pinède, implique la connaissance des aires de distribution potentielles, mais aussi l'identification des facteurs qui la conditionnent et la connaissance des changements attendus susceptibles de les affecter (Pearson et Dawson, 2003; Thuiller *et al.*, 2008), surtout, sous un climat méditerranéen caractérisé par des fluctuations inter-saisonnières et inter-annuelles et la Méditerranée figure parmi les hot-spots du changement climatique.

Aujourd'hui, les modèles de distribution d'espèces sont de plus en plus utilisés pour répondre aux problématiques majeures que sont la compréhension, la description et la prédiction de l'aire potentielle d'une espèce, et l'identification des facteurs qui déterminent sa distribution (Kumar et Stohlgren, 2009). De ce fait, ils représentent, un outil pertinent pour la gestion et la conservation de l'environnement et de la biodiversité (Guisan et Zimmermann, 2000). Cette étude s'étend sur l'ensemble de l'aire de répartition géographique du pin d'Alep en Tunisie. Cet arbre est très fréquent sur tous les massifs montagneux de la Dorsale Tunisienne et des Hautes Steppes (Le Houerou, 1969).

Ce travail est basé sur la modélisation de la distribution d'espèces Maxent. Ce programme peut prédire la répartition de probabilité d'une occurrence donnée en fonction des points de données et des contraintes connues (Elith *et al.*, 2010). Ceci est un point fort de ce modèle, car il n'a pas besoin des données d'absence pour fonctionner. Il représente une approche pertinente de prédiction (Franklin et Miller, 2010), largement répandu dans les études de conservation. L'objectif de cette étude est de mieux connaître les facteurs écologiques déterminants de la distribution géographique du pin d'Alep en Tunisie, et de déterminer les facteurs environnementaux essentiels qui participent à la structuration géographique de cette flore, et de modéliser la distribution potentielle de cette espèce sous les conditions climatiques actuelles et futures (2050 et 2070).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone d'étude et écologie de l'espèce modèle

La zone d'étude concerne le territoire Tunisien. Ce pays est situé à l'extrême nord-est de l'Afrique, entre 32° et 38° de latitude Nord et entre 7° et 12° de longitude Est. La Tunisie représente une zone de transition climatique entre le domaine tempéré au nord de la Méditerranée et le domaine subtropical au sud où commence le grand Sahara (IPCC 2007). Par sa position géographique la Tunisie présente le double aspect d'un climat méditerranéo-saharien, avec des contrastes régionaux assez marqués (IPCC, 2007).

L'espèce étudiée dans le cadre de ce travail est le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) (Photo 1). Cette espèce forestière dont l'extension territoriale est la plus importante au niveau de la Dorsale tunisienne, occupe environ 297000 ha, soit plus de 56% de la superficie forestière totale (Sghaier, 2005). On rencontre le Pin d'Alep depuis les régions fraîches au Nord (Laribi, 1992; Abaza, 2006), où il touche le Chêne-liège (Gammar, 1979), les massifs montagneux de la région de centre ouest (BouAllagui et Bannour, 1979), jusqu'aux marges arides (Abdallah, 2015, Ben Rhouma, 2017) pour céder la place ensuite à la végétation steppique (Le Houerou, 1969).

L'amplitude écologique du pin d'Alep est relativement large. Il s'observe dans le bioclimat aride supérieur et l'humide, cependant, son optimum de croissance étant enregistré dans le semi-aride à hivers frais (El Hamrouni, 1978; Garchi, 1992). Concernant le régime pluviométrique, le pin d'Alep semble très tolérant avec une amplitude variant de moins de 350 mm annuels à plus de 700 mm (Quezel, 1986). Pour ce qui est de la nature du sol, il pousse dans une très large gamme de conditions pédologiques, et

plus rarement sur les sols compacts et hydromorphes et les sols à faible rétention (Khouja, 1997).

Concernant le régime thermique, le pin d'Alep est limité par les froids hivernaux qui peuvent occasionner des dégâts importants surtout aux jeunes plants (Khouja, 1997), la moyenne des minima du mois le plus froid qui semble être un facteur limitant pour son développement et sa survie ne doit pas descendre au-dessous de 0 °C (Garchi, 1992), mais tolère très bien les fortes chaleurs estivales. De ce fait, le pin d'Alep supporte bien une certaine continentalité c'est-à-dire de fortes amplitudes thermiques entre l'hiver et l'été. C'est une des essences résineuses les plus tolérantes à la sécheresse. Enfin, cette espèce supporte moins les embruns marins que le pin pignon (*Pinus pinea*) et le pin maritime (*Pinus pinaster*) (Khouja, 1997).

Approche de modélisation et outils préconisés

En écologie, divers modèles sont appliqués pour modaliser la distribution des espèces (Guisan et Zimmermann, 2000; Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006; Austin, 2007; Franklin et Miller, 2010). La modélisation de distribution des espèces, consiste à formuler une fonction de paramètres environnementaux qui permet d'identifier les types de relations entre l'occurrence d'une espèce ou groupes d'espèces et des variables environnementales et de prédire la probabilité de présence d'une ou plusieurs espèces cibles (Sampoux et Badeau, 2009). En fait, de tels modèles prédisent plutôt des combinaisons de facteurs environnementaux qui sont attendus favorables à la présence de l'espèce, en quantifiant la probabilité que les conditions environnementales soient favorables à la persistance de l'espèce modélisée; il serait donc approprié de considérer qu'ils prédisent des habitats potentiels (Araujo et Guisan, 2006). Afin de pouvoir rendre plus lisible l'output de la modélisation, une cartographie a été réalisée.

Dans cette étude, la modélisation géographique potentielle de pin d'Alep est basée sur l'approche maximum d'entropie

(Maxent) dans sa version 3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006). Un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle permet de calibrer le modèle sans données d'absence de l'espèce (Pearce et Boyce, 2006). Aussi, des nombreuses études comparatives montrent que la méthode Maxent est une des plus performantes pour la modélisation spatialisée de l'occur-

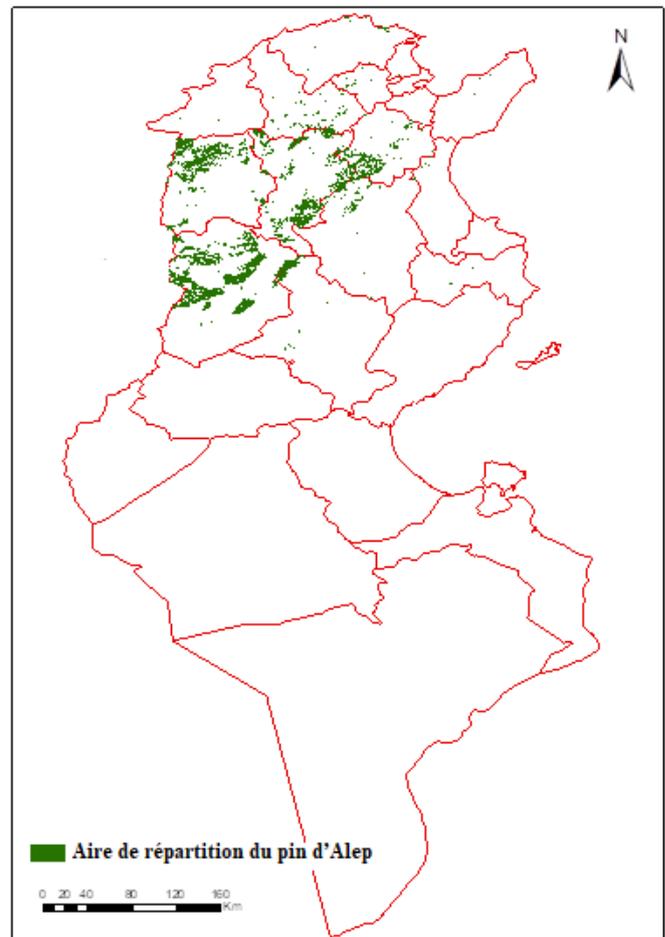


Figure 1: Zone d'étude et l'aire de distribution du pin d'Alep en Tunisie selon la DGF (1994)



Photo 1: Massif forestier dominé par le pin d'Alep dans la Dorsale tunisienne (Région de Kasserine)

rence des espèces à partir de données de présence (Elith *et al.*, 2006; Hernandez *et al.*, 2006, 2008; Wang *et al.*, 2007).

Variables utilisées

Le jeu de données utilisé dans la présente étude comprend des données d'occurrence de l'espèce et des valeurs de certaines variables environnementales, qui sont sélectionnés en fonction de l'écologie du pin d'Alep. En effet, une bonne connaissance de l'espèce est primordiale, afin de conserver les variables les plus contraignantes pour la distribution (Jarnevich *et al.*, 2015). En plus, qu'elles soient peu corrélées, avec un seuil de corrélation adapté à l'étude.

Données d'occurrence de l'espèce

Puisque les données environnementales sont disponibles pour l'ensemble de la Tunisie, un échantillonnage aléatoire est effectué. Il couvre de façon homogène les principaux gradients écologiques de la zone d'étude, les gradients de continentalité, d'altitude et de climat. En effet, ces points géoréférencés (latitude et longitude), constitués des occurrences où le pin d'Alep est observé. Au total, 410 points d'occurrence ont été choisis de manière aléatoire à partir de la base de données de l'Inventaire Forestier National (DGF, 1995) en utilisant le logiciel ArcMap 9.1 et l'extension Hawth's tools.

Variables environnementales

La sélection des variables est basée sur sa disponibilité sur le territoire national, sa pertinence par rapport à l'écologie de pin d'Alep et la minimisation des corrélations entre variables. Un examen de la littérature par rapport à l'écologie de pin d'Alep, permet de dégager un jeu de caractéristiques environnementales des écosystèmes des pinèdes et pouvant à cet égard être considérés comme variables structurantes.

Dans cette étude, deux types de variables sont utilisées; des variables topographiques (l'altitude, la pente et l'orientation) et les variables climatiques (température et précipitations). Les variables climatiques ont été téléchargées sur la base de données Worldclim (Fick et Hijmans, 2017). La résolution choisie est 30 secondes, ce qui correspond approximativement 1 km². Cette résolution spatiale est suffisante pour capturer l'influence de l'orographie et également simuler l'hétérogénéité du climat et de rendre compte des impacts du changement climatique à une échelle plus locale. Afin de projeter les températures et les précipitations aux horizons 2050 et 2070, deux scénarios RCP2.6 et RCP8.5 ont été utilisés. Sachant que le RCP2.6 est le scénario le plus optimiste et que le RCP8.5 est le plus pessimiste

La colinéarité entre les variables peut être source de biais dans la modélisation. Afin de surmonter ce problème, toutes les variables ont été au départ soumis à une analyse

de corrélation et celles qui sont corrélées entre elles au seuil de corrélation de Pearson réalisée avec le logiciel SPSS ($r > 0,85$) ont été éliminées (Elith *et al.*, 2010). La température minimale du mois le plus froid, la température moyenne annuelle et précipitations du trimestre le plus sec présentent une corrélation significative avec l'altitude, d'où elles ne sont pas intégrées dans le modèle. En tout, six variables ont été utilisées pour cette modélisation. L'ensemble a été ensuite transformé en mode raster pour être introduit dans un système d'information géographique (SIG) en tant que couche d'information (Jiguet *et al.*, 2010).

Entraînement, validation du modèle et analyse des résultats

Une fois que les variables environnementales et les points de présence sont prêts, la modélisation peut être lancée via l'interface Maxent (Phillips *et al.*, 2006). L'application Maxent permet de sélectionner un certain nombre d'options qui facilitent ensuite la validation et l'interprétation des résultats. La majorité des paramètres ont été laissés par défaut.

La sortie brute de Maxent est une fonction exponentielle qui assigne une probabilité d'occurrence à chaque site (Phillips *et al.*, 2006), nommée aussi index d'adéquation relative de l'habitat (Index of relative habitat suitability) (Fitzpatrick *et al.*, 2013). Les valeurs brutes sont converties en une probabilité cumulative pour pouvoir évaluer le chiffre 1 (Phillips *et al.*, 2006).

Pour la modélisation de pin d'Alep, 25 % des points d'observation ont été utilisés pour tester le modèle et 75 % des points ont servi à la calibration du modèle. Également on a choisi de réaliser 50 itérations afin de permettre la comparaison d'un plus grand nombre de modèles. On a choisi d'utiliser la méthode du sous-échantillonnage (subsample) pour le choix des points de test, qui permet de ré-sélectionner aléatoirement un nouveau jeu de points de test différent à chaque itération et qui était le plus adapté par rapport au nombre de points d'observation disponibles.

Un test de Jackknife a été ensuite effectué sur les variables bioclimatiques considérées pour déterminer celles qui contribuent le plus à la modélisation. Les indices de probabilité générés par le modèle ont été convertis en raster.

La validité intrinsèque du modèle est aussi caractérisée par les paramètres sensibilité et spécificité de la courbe caractéristique d'opération, dite ROC (Receiving Operator Characteristic) (Hanley et McNeil, 1982). Le calcul de l'aire sous la courbe, dite AUC (Area Under the Curve), qui est un seuil qui mesure la précision de la prédiction du modèle, 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 comme proposé par Swets (1988): le modèle

Tableau 1: Variables environnementales utilisées pour la modélisation

N°	Code	Paramètres environnementaux et bioclimatiques
1	Bio_12	Précipitations annuelles
2	Bio_5	Température maximale du mois le plus chaud
3	Bio_7	Amplitude thermique
4	Alt	Altitude
5	Pente	Pente
6	Orientation	Orientation

est «mauvais» si $AUC \leq 0,70$; «passable» si $0,70 < AUC \leq 0,90$; «excellent» si $AUC > 0,90$. La qualité du modèle a également été évaluée en examinant visuellement à quel point les résultats de la modélisation correspondent aux enregistrements de présence effective de l'espèce étudiée.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'étude a permis de vérifier statistiquement que la position topographique régie la répartition spatiale de certaines variables climatiques. Ceci peut s'expliquer par l'interdépendance entre les paramètres climatiques et les facteurs géographiques tels que l'altitude. D'ailleurs, Merzougui et Slimani, (2012) ont évoqué que les données climatiques en Tunisie ont été interpolées en fonction de l'altitude.

Relation altitude-température

L'espèce forestière étudiée au sein de la zone d'étude s'étage entre environ 100 et 1400 m en altitude. D'ailleurs, en allant de régions de basse altitude vers les régions montagneuses, les températures moyennes annuelles s'étendent de 18 à 12°C. Les formes topographiques se révèlent déterminantes sur la distribution spatiale de pin d'Alep. Une relation linéaire entre la température moyenne et l'altitude a été quantifiée ($R^2=0,884$), la montée en altitude s'accompagne d'une baisse de la température de l'air de 0,33°C par 100 m d'élévation (Figure 2). Ainsi, l'analyse permet de confirmer l'effet important de l'altitude sur la répartition de pinède en Tunisie.

La température minimale du mois le plus froid (m) varie entre environ -1°C à 7°C. L'analyse a permis de montrer

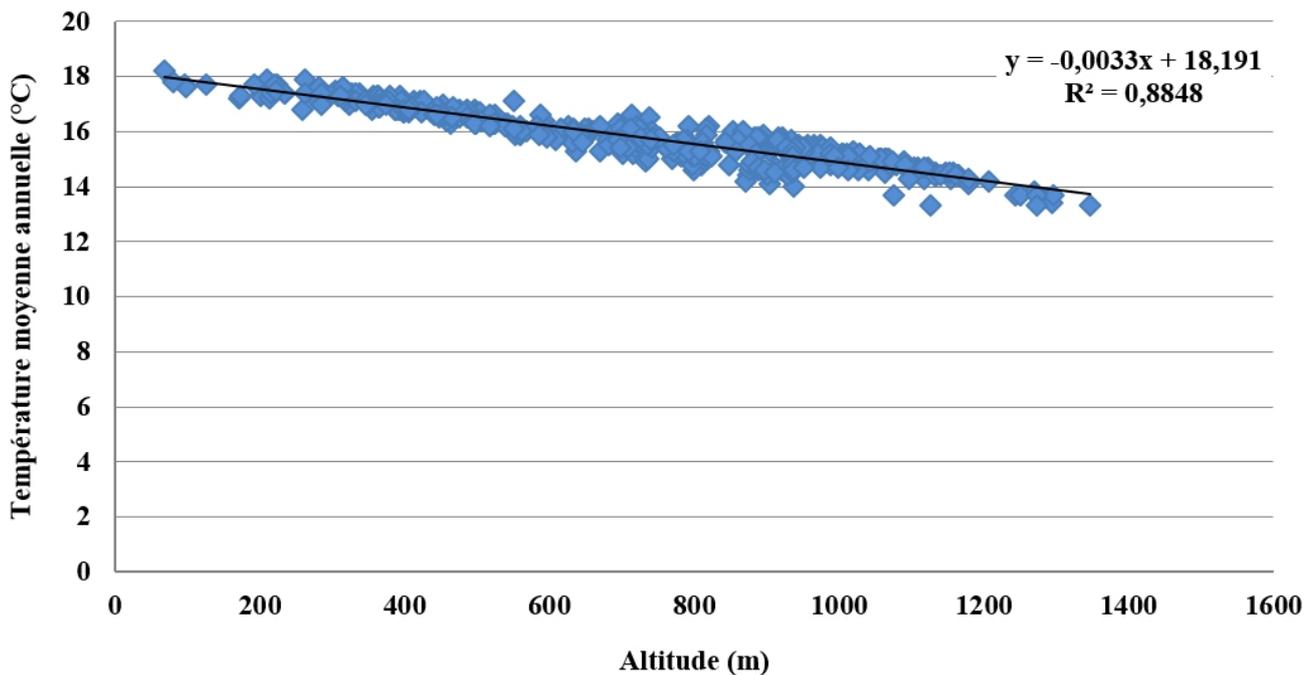


Figure 2: Relation entre l'altitude et la température moyenne annuelle

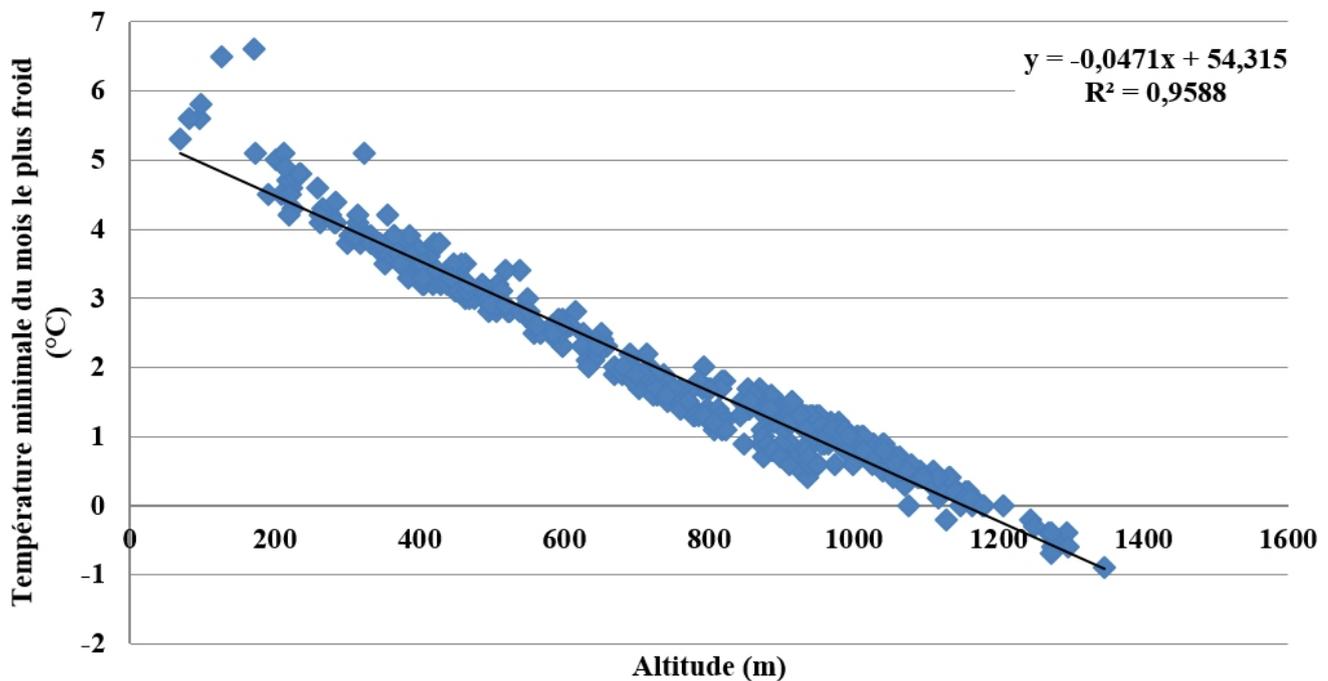


Figure 3: Relation entre l'altitude et la température minimale du mois le plus froid (m)

que la température minimale du mois le plus froid est fortement corrélée à l'altitude ($r=0,979$). Ainsi, la représentation graphique de (m) en fonction de l'altitude dévoile un gradient de (- 0,47°C) par 100 mètres (Figure 3).

Relation altitude-précipitations

Les précipitations du trimestre le plus sec ou précipitations estivales sont reliées à l'altitude par une relation linéaire croissante. En fait, la répartition spatiale des précipitations estivales révèle un gradient altitudinal bien marqué, le relief influence le régime des pluies estivales. La relation altitude et précipitations du trimestre le plus sec est assez forte ($R^2=0,902$).

La région de la Dorsale, définies par Le Houérou (1969), est une région naturelle de l'aire d'extension actuelle des forêts spontanées de Pin d'Alep, les pinèdes reçoivent davantage de précipitations durant la période estivale. De ce fait, à échelle régionale, l'intensité de ces précipitations orographiques est augmentée par l'action du relief. La figure 4 amène à détecter un gradient pluviométrique au niveau de formation montagneuse, pendant les mois d'été (Merzougui & Slimani, 2012), de 3 mm par 100 m qui sont des zones où les précipitations estivales semblent être trop élevées pour favoriser la présence de pin d'Alep.

La variation spatiale de la température minimale du mois le plus froid, la température moyenne annuelle et précipitations du trimestre le plus sec sont régies par l'altitude.

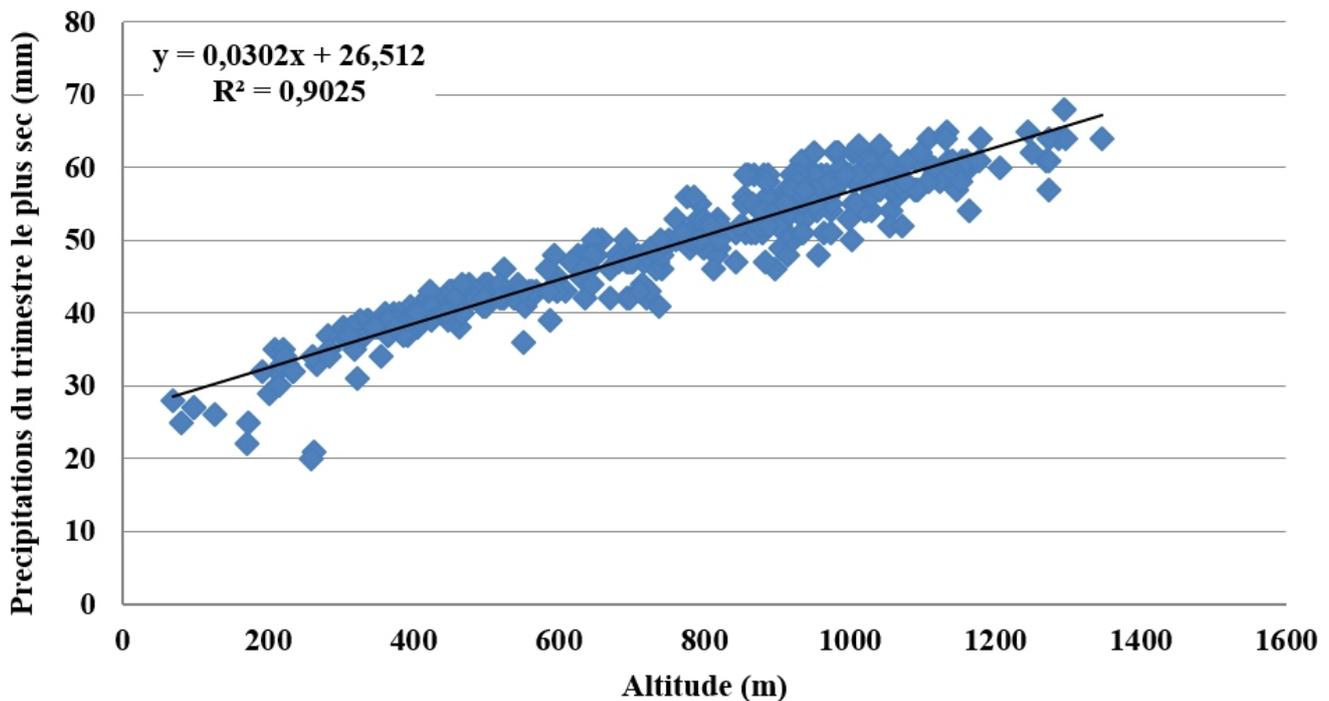


Figure 4: Relation entre l'altitude et précipitations du trimestre le plus sec

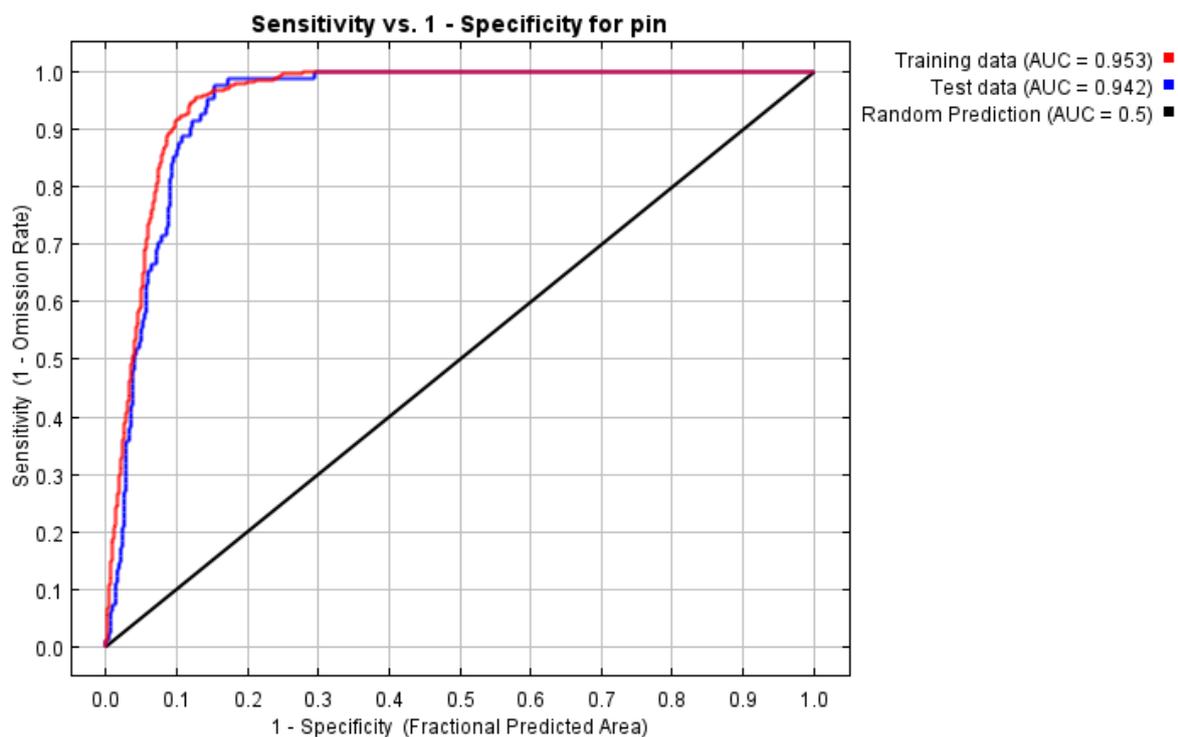


Figure 5: Résultat du calcul de l'AUC du modèle de distribution du pin d'Alep

D’ailleurs, nombreuses constatations peuvent être marquées concernant les relations définies entre l’altitude, température et précipitations, permettant de comprendre les relations qui existent entre des variables climatique et la distribution de l’espèce à l’échelle locale ou régionale.

Qualité prédictive du modèle et variables influentes sur la distribution du pin d’Alep

La figure 5 montre que les valeurs de l’Aire Sous la Courbe (AUC) pour la mise en œuvre du modèle Maxent et pour son test sont respectivement de 0,953 et 0,942. Ceci indique la robustesse de la modélisation effectuée et témoigne l’excellente performance de l’algorithme Maxent (Swets, 1988) à prédire l’aire favorable du pin d’Alep.

Contribution des variables à la prédiction des habitats

Le modèle réalisé permet de préciser l’écologie de l’espèce étudiée en étudiant son comportement au regard de variables difficiles à relever sur le terrain. Sur les six prédicteurs utilisés, les précipitations annuelles, était la variable la plus importante (Tableau 2). Elle influe le plus à la prédiction des habitats favorables au *Pinus halepensis* en Tunisie, contribuant pour 48,1 % dans la détermination des limites de dispersion de l’espèce. Elle est suivie de l’altitude (23,1 %), la pente (20,9 %), l’amplitude thermique (5,9 %), la température maximale du mois le plus chaud (1,5%) et l’orientation (0,5 %).

Le test de Jackknife basé sur les données de l’AUC (Figure 6), effectué sur chacune des six variables, prise isolément, a confirmé l’importance de la variable précipitations annuelles suivie de l’altitude, la pente, l’amplitude thermique, la température maximale du mois le plus chaud et

l’orientation. Les résultats de ce test ont suggéré aussi que la variable précipitations annuelles est celle 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.

Les résultats de l’analyse de la contribution des différentes variables dans la modélisation de la distribution du pin d’Alep semblent être cohérents avec l’écologie de cette espèce. Ils confirment la plage climatique de pinède en Tunisie, qui est caractérisée par des précipitations abondantes (durant les mois humides et même secs) et des amplitudes thermiques considérables (Boudy, 1952).

Le logiciel Maxent permet d’établir les courbes de réponse de pin d’Alep aux valeurs de chaque variable environnementale exprimée en termes de probabilité de présence. Ainsi, le modèle réalisé permet une compréhension de la réponse écologique de l’espèce étudiée vis-à-vis des variables climatiques (Guisan et Zimmermann, 2000).

Il est intéressant d’observer dans un premier temps l’importance de la variable Bio12 dans la structuration du modèle (Figure 7). On observe que le pin d’Alep a des pourcentages de présence potentielle plus forts pour des précipitations proches de 400 mm. La courbe de réponse du pin d’Alep aux précipitations montre que la probabilité de présence croît rapidement de 350 mm jusqu’au pic, ensuite, elle décroît moins rapide. Ainsi, le pin d’Alep semble très tolérant à ce facteur, avec une amplitude variant d’environ 350 mm annuels à plus de 1000 mm. Le pin d’Alep est qualifié comme étant une essence xérophile, il se développe essentiellement dans la tranche pluviométrique comprise entre 350 et 450 mm (Khouja *et al.*, 2020).

Tableau 2: Contributions relatives (en %) des variables utilisées dans le modèle de distribution potentielle de pin d’Alep en Tunisie

Code	Variables	Contribution (%)
Bio_12	Précipitations annuelles	48,1
Alti	Altitude	23,1
Pente	Pente	20,9
Bio_7	Amplitude thermique	5,9
Bio_5	Température maximale du mois le plus chaud	1,5
Orientation	Orientation	0,5
Total		100

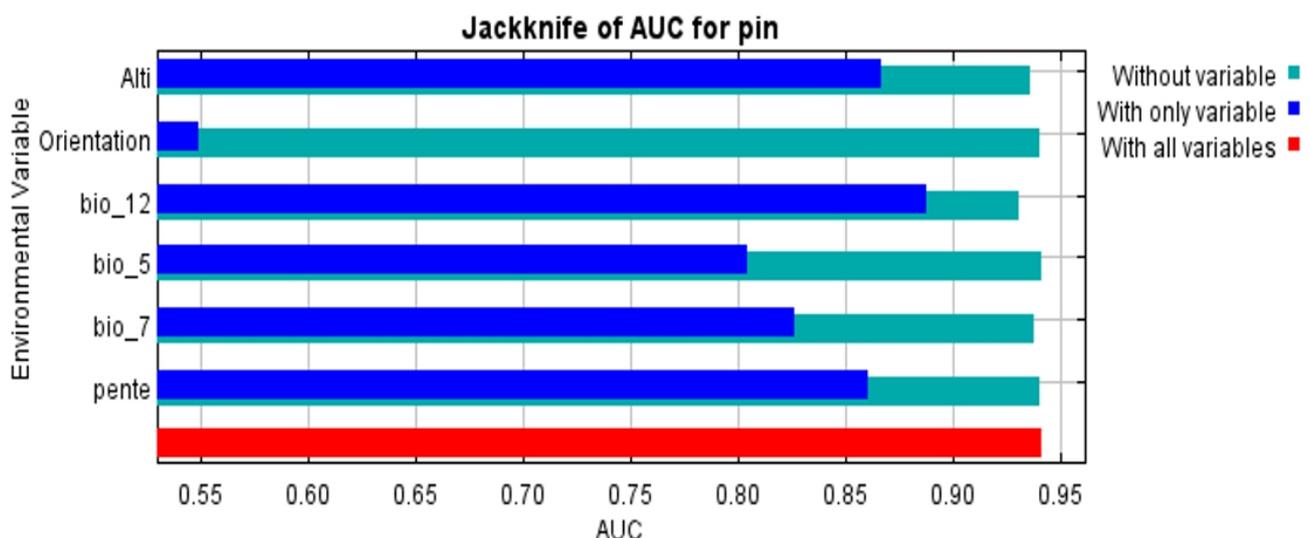


Figure 6: Résultats du test Jackknife sur la contribution des variables sélectionnées à la prédiction des aires de distribution de pin d’Alep

Du point de vue altitudinal, le pin d'Alep a des pourcentages de présence relativement forts vers les altitudes élevées, montrant sa capacité à supporter les fortes élévations. D'ailleurs, Quézel (1974) a évoqué que, le pin d'Alep a tendance à occuper certaines ceintures altitudinales (Figure 8). En Tunisie, la grande majorité des pineraies se rencontre à une altitude comprise entre 200 et 1200 m et il peut monter jusqu'à 1500 m d'altitude (Khouja *et al.*, 2020), en effet, l'amplitude écologique pour ce facteur écologique est relativement large. De ce fait, Le pin d'Alep se développe essentiellement sur différents étages bioclimatiques liées essentiellement aux altitudes (Akman, Barbero et Quézel, 1978).

Le pin d'Alep se trouve principalement dans les terrains en pente (Figure 9). Fortes pentes n'ont pas affecté l'organisation spatiale de cette espèce, cette essence forestière peut s'adapter à une large gamme de massif montagneux. Les caractéristiques de résistance à la chaleur et la préférence pour le climat aride du pin d'Alep apparaissent nettement à travers le modèle réalisé (Figure 10). Avec un optimum de probabilité de présence compris entre 30 et 32°C.

Le pin d'Alep tolère très bien les fortes chaleurs estivales pouvant dépasser les 30°C. La forte probabilité de présence de l'espèce dans des régions chaudes est cohérente avec l'idée que l'espèce a une forte résistance envers de climat chaud. En termes d'amplitude écologique, le pin d'Alep semble très tolérant avec une amplitude variant de plus de 29 °C à moins de 38°C.

Aire de distribution potentielle

Le modèle développé a permis de construire la carte présentant l'aire potentielle de distribution du pin d'Alep en Tunisie sous les conditions climatiques actuelles (Figure 12). En utilisant le seuil relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile qui est de 0,321 le pin d'Alep devrait exister dans un environnement qui se compose d'une superficie totale d'environ 1189100 ha. Cette aire potentielle est largement supérieure à l'aire de répartition actuelle de 297000 ha (Sghaier, 2005). En effet, des pertes importantes de surfaces forestières des pinèdes ont été enregistrées en Tunisie en faveurs des surfaces cultivées, notamment l'arboriculture et les grandes cultures (DGF, 2015).

Au-delà de la validation quantitative des performances de modèle via les AUC, la bonne concordance entre la répartition actuelle de pin d'Alep et la distribution potentielle prédite à l'échelle de la Tunisie apporte une forme de validation qualitative de la performance prédictive de modèle. En effet, les probabilités élevées se situent la plupart du temps au niveau de la répartition actuelle. La carte de prédiction s'ajuste relativement bien aux données d'observation. Sa présence est prédite au niveau essentiellement les monts de la dorsale tunisienne. Cette prédiction de la distribution confirme l'affinité de cette espèce pour ces régions géographiques et concorde amplement avec la littérature existante (Quézel & Barbero, 1992). Plus particulièrement, le modèle prédit la présence du pin d'Alep à la frontière de l'Algérie, alors qu'aucune donnée entrée dans le modèle pour cette zone.

Par contre, le modèle ne prédit pas l'occurrence du *Pinus halepensis* dans le nord de la Tunisie. Dans la partie septentrionale du pays, les forêts de pin d'Alep entrent en concurrence avec d'autres espèces mieux adaptées au froid (Vennetier, M. *et al.*, 2011) (chêne-liège et du chêne zen)

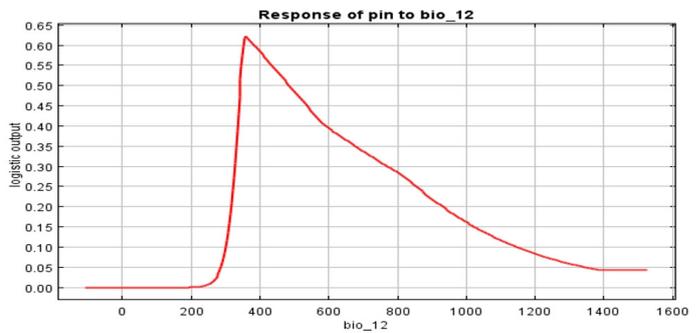


Figure 7: Relation entre les précipitations annuelles et la probabilité de présence du pin d'Alep calculée par le modèle Maxent

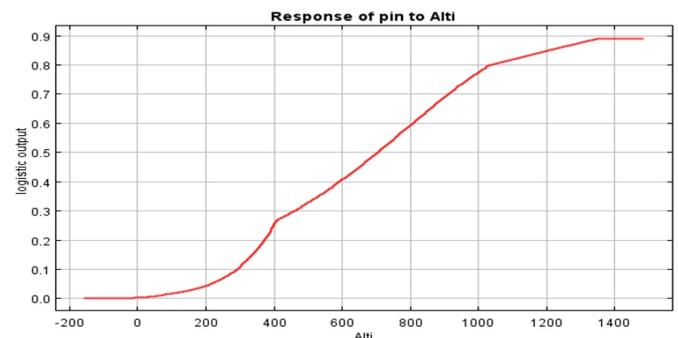


Figure 8: Relation entre l'altitude et la probabilité de présence du pin d'Alep calculée par le modèle Maxent

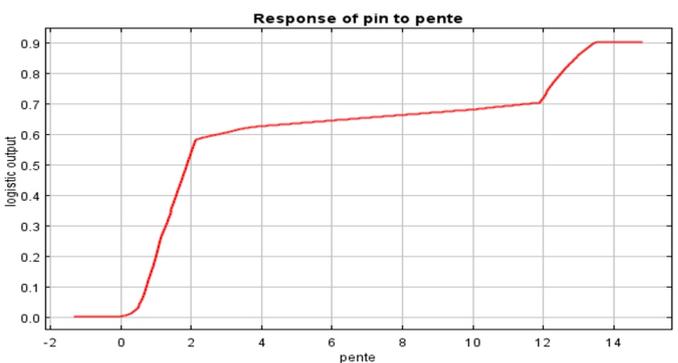


Figure 9: Relation entre la pente et la probabilité de présence du pin d'Alep calculée par le modèle Maxent

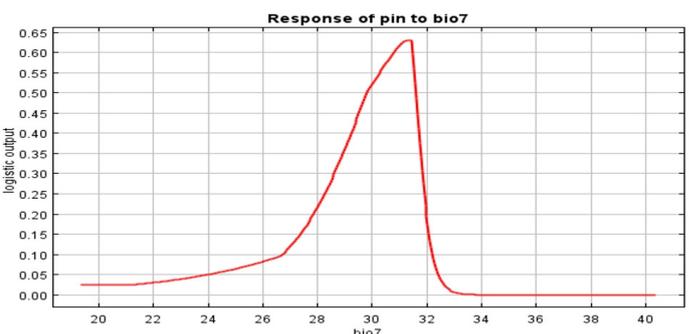


Figure 10: Relation entre l'amplitude thermique et la probabilité de présence du pin d'Alep calculée par le modèle Maxent

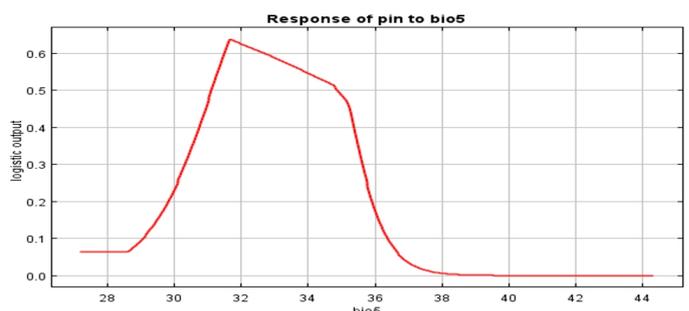


Figure 11: Relation entre la Température maximale du mois le plus chaud et la probabilité de présence du pin d'Alep calculée par le modèle Maxent

qui limitent son extension. Ces essences forestières colonisent la frange sud de la Kroumirie et des Mogods, c'est le domaine par excellence du chêne-liège et du chêne zen. Dans sa partie centro-méridionale, le pin d'Alep entre en contact avec le genévrier rouge et les espèces steppiques particulièrement avec *Stipa Tenacissima* (Le Houérou, 1969). Il s'agit de la limite inférieure de la répartition de cette essence, qui est limitée par des conditions climatiques rudes, où les forêts de pin d'Alep ont cédé la place à un paysage steppique dominé par des steppes d'Alfa (*Stipa tenassicima* L) et de l'armoise (*Artemisia herba-alba* Asso), qui marquent sa limite bioclimatique inférieure (Le Houerou, 1969).

La comparaison de l'aire de distribution de *Pinus halepensis* et l'aire potentielle démontre une fragmentation des habitats, Il est souvent rapporté que la fragmentation de l'habitat, due par exemple à la création de systèmes

agricoles à grande échelle, modifie drastiquement le paysage et provoque une disparition d'habitats naturels et des espèces qui les occupent.

L'aire de répartition actuelle du pin d'Alep a été confrontée à son aire potentielle (Figure 12), 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 (1189100 ha) que l'aire réelle (297000 ha). Ainsi, l'aire de répartition actuelle ne représente que 25% de l'habitat favorable à cette espèce. Cette réduction prouve bien la forte dégradation des peuplements du pin d'Alep comme il a été déclaré par différents auteurs (Ben Rhouma, 2017; DGF, 2015). Cette espèce a régressé sur une grande partie des milieux potentiels, le couvert forestier a été converti à d'autres usages par des phénomènes de déforestation.

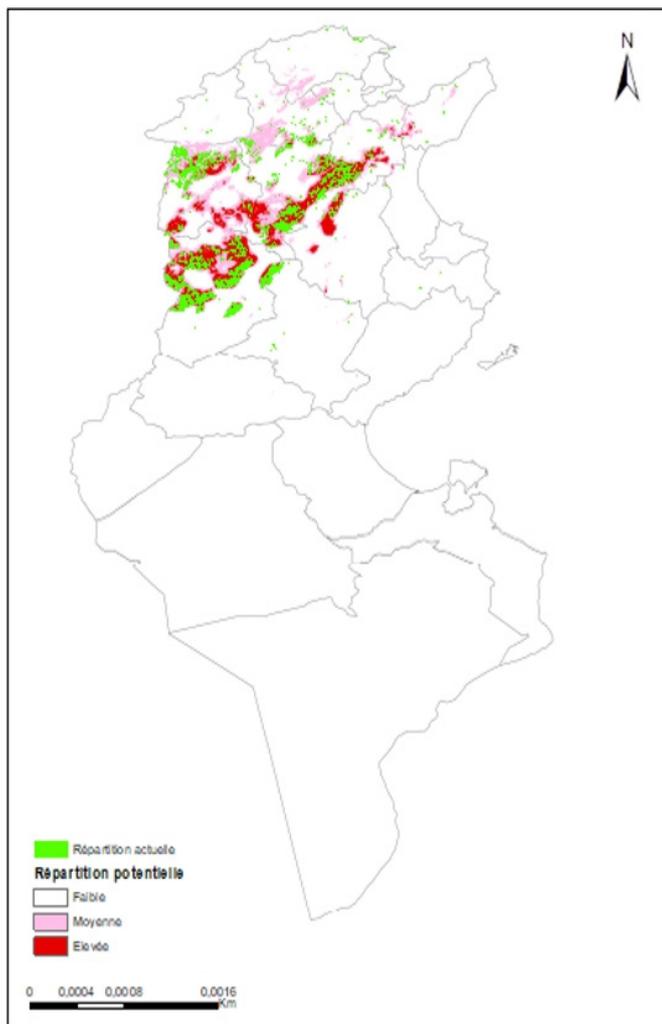


Figure 12: Distribution géographique potentielle et de l'aire de répartition actuelle du pin d'Alep en Tunisie

Impact du changement climatique sur l'aire potentielle

La comparaison des cartes de distribution potentielle sous les conditions climatiques actuelles et futures a permis d'estimer l'impact du changement climatique sur la répartition du pin d'Alep. Les résultats de cette comparaison indiquent que l'aptitude des espaces au développement de cette espèce connaîtra des variations tant en 2050 qu'en 2070 (Tableau 3). Les prévisions futures prévoient vraisemblablement une expansion des aires favorables au pin d'Alep vers le nord de la Tunisie (Figure 13). Pour les deux horizons temporels et sous les deux scénarios des changements climatiques, le modèle prédit un gain important des aires hautement favorables à cette espèce. Le pourcentage de variation des potentialités du milieu au développement de cette espèce indique des valeurs positives pour les deux scénarios, allant de 177 % à 391 %.

En termes de superficie potentielle future, par rapport à l'aire potentielle actuelle, les résultats de modélisation a révélé des légers écarts pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 (2070) et le scénario RCP2.6 (2050), tandis que pour le scénario RCP8.5 (2050) l'écart est plus marqué (Tableau 3).

En termes de distribution, la projection future avec les données de 2050 à 2070 pour les deux scénarios a dévoilé deux tendances contrastées une évolution progressive des aires hautement favorables vers le nord de la Tunisie et une évolution régressive dans la limite inférieure, là où les conditions sont contraignantes pour le pin d'Alep (Figure 13). Cependant, l'expansion des aires favorables pourrait être plus importante qu'un rétrécissement. Le climat futur pourrait convertir les zones qui sont actuellement peu favorables au pin d'Alep (subhumides humides) en zones très favorables.

Tableau 3: Aire potentielle du pin d'Alep en Tunisie sous les conditions climatiques futures

Superficie en hectare		Moyenne favorable	Hautement favorable	Total	Pourcentages des changements/ Aire potentielle
Aire potentielle (ha)		656000	533100	1189100	
Prédictions 2050	RCP2.6	825600	1398900	2224500	187%
	RCP8.5	518800	4131900	4650700	391%
Prédictions 2070	RCP2.6	834600	1401100	2235700	188%
	RCP8.5	722800	1387400	2110200	177%

Les conséquences des changements climatiques sur la répartition des espèces peuvent être de nature différente (Breshears *et al.*, 2008): sa disparition à la limite inférieure, son extension vers des altitudes supérieures, au-delà ou non de sa limite supérieure actuelle. Le modèle Maxent a suggéré l'apparition de conditions favorables au niveau de la zone naturelle Mogods Kroumirie (Figure 13). Cela indique que les forêts de pin d'Alep, se sont étendues vers le nord, ce qui se traduit par une réduction de la biodiversité floristique et faunique et destruction des habitats. Ainsi, un déplacement est probable des aires de distribution du pin d'Alep vers le nord. Lenoir *et al.* (2008) ont mis en évidence une remontée des espèces en latitude. Par conséquent, La faune du nord de la Tunisie pourrait vivre ainsi des changements majeurs dans l'avenir à cause de changements dans les précipitations et de températures. Le modèle n'a prédit un recul important de l'aire de distribution de *Pinus halepensis* en Tunisie. A

l'horizon 2050 et 2070, cette espèce pourra probablement maintenir son statut actuel. Sauf pour le profil d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (RCP8.5) à l'horizon 2050 le modèle prévoit une régression importante.

On note également que le modèle a pu prédire la présence du pin d'Alep, avec des probabilités hautement favorables, dans la partie nord sous les conditions climatiques futures, bien que cette espèce soit actuellement absente dans cette zone. Ceci signifie que les conditions environnementales dans ces zones seront favorables au développement de cette espèce dans le futur. Ce qui concorde avec certaines études, qui ont reconnu que le réchauffement climatique pourrait avoir aussi un effet positif sur les écosystèmes et les espèces.

La différence d'impact du changement climatique entre les deux scénarios RCP2.6 et RCP 8.5 semble différente. Les diminutions calculées en comparant les distributions potentielles futures et actuelle, pouvaient aller de - 1 %

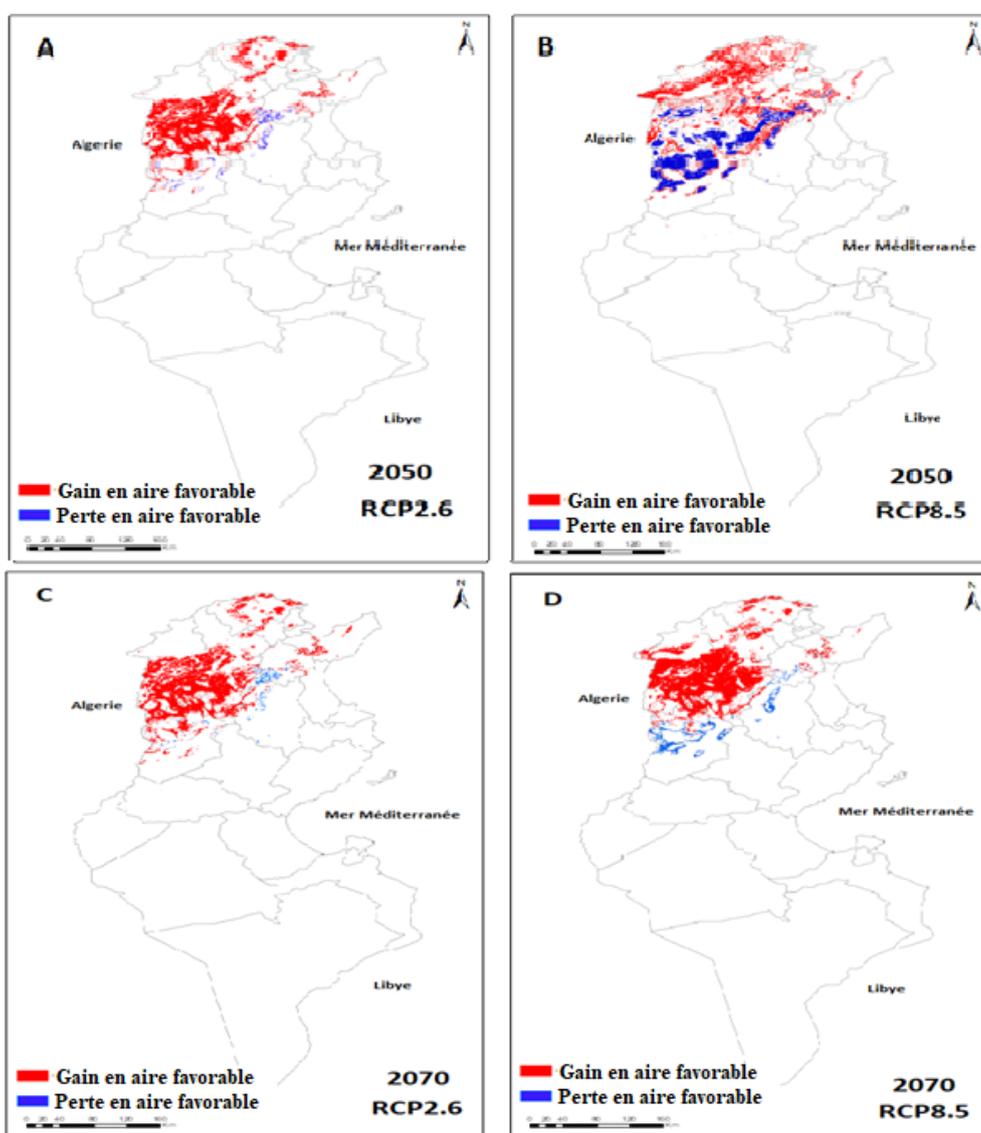


Figure 13: Modification de l'aire de répartition hautement favorable du pin d'Alep entre l'état actuelle et (A) 2050 RCP2.6, (B) 2050 RCP8.5, (C) 2070 RCP2.6 et (D) 2070 RCP8.5 suite aux variations climatiques engendrées par le réchauffement

Tableau 4: Les pourcentages des changements des aires hautement favorables sous les conditions climatiques futures par rapport aux aires potentielles actuelles

	2070		2050	
	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6
Pourcentage de gain (Déplacement d'aire hautement favorable)	91%	29%	74%	88%
Pourcentage de perte (Diminution d'aire hautement favorable)	10%	1%	47%	5%

sous le scénario optimiste RCP 2.6 (à l'horizon 2070) à -47 % sous le scénario pessimiste RCP 8.5 (à l'horizon 2050) (Tableau 4).

Pour ce qui est de la vulnérabilité aux changements climatiques les résultats de cette analyse permet de considérer que les forêts de pin d'Alep ne sont pas vulnérables aux changements climatiques. Cette vulnérabilité demeure négligeable à court terme et moyen terme pour le scénario pessimiste (RCP2.6).

Même si le changement climatique ne pourrait pas affecter la répartition du peuplement mais pourrait affecter la croissance de pin d'Alep (El Khorchani, 2006). D'autre part, lorsqu'il y a une diminution des quantités de pluies, une augmentation des températures et une réduction de l'humidité de l'aire régnant dans les forêts ce qui rend les conditions plus sèches, par conséquent, il faut s'attendre à une augmentation du risque de feux de forêt. D'ailleurs, Ilmen et Benjelloun (2013) ont annoncé que, les incendies de forêts marocaines, sont la conséquence directe et immédiate du changement climatique.

La modélisation a permis d'évaluer le lien qui existe entre la probabilité de présence de pin d'Alep par rapport aux variables environnementales utilisées. Les résultats de modèle Maxent, ont montré que les paramètres environnementaux les plus influents sont relatifs à la pluviosité et au relief. Par ailleurs, des paramètres comme les types des sols et le degré d'anthropisation ne sont pas pris en compte dans cette analyse permettraient de produire un modèle plus fiable.

CONCLUSION

L'approche utilisée dans la présente étude pour la modélisation de la distribution de pin d'Alep est celle d'entropie maximale (Maxent). La qualité du modèle à prédire la distribution de l'espèce témoigne que la modélisation de distribution potentielle était possible à l'échelle régionale et suffisamment robuste. La modélisation a permis de cerner la répartition spatiale potentielle de cette espèce et de comprendre sa répartition vis-à-vis des facteurs influençant l'aire de dispersion de la forêt des pinèdes.

Le modèle a permis d'identifier les variables les plus significatives conditionnant la distribution de *Pinus halepensis* en Tunisie sont les précipitations annuelles, l'altitude, la pente et l'amplitude thermique, confirmant les résultats des études antérieures.

La cartographie de la pinède en Tunisie dans l'espace et dans le temps a permis de dégager les aires les plus sensibles qui pourraient probablement subir les effets de changement climatique. Selon les projections, les limites inférieures des aires de distribution actuelles de pin d'Alep seront sans doute les plus affectées, marquant une évolution régressive. Par contre, l'impact de ce changement entraînerait une évolution progressive dans le nord de la Tunisie, en effet, il s'agit d'un déplacement latitudinal des limites septentrionales des aires de répartition de pinède.

Il ressort de cette analyse que le changement climatique entraînera une augmentation de la superficie des aires favorables. Les limites des aires de répartition sont modifiées par le réchauffement climatique. Néanmoins, dans le cas d'un déplacement des aires de distribution vers de plus

hautes latitudes, l'impact du changement climatique va dépendre de l'aptitude de l'espèce à se déplacer pour suivre les conditions environnementales adaptées à son besoin, ce qui a pour conséquence de réduire et de contracter les aires de répartition des espèces déjà en hautes latitudes. Ainsi, la capacité de dispersion du pin d'Alep est donc un facteur déterminant dans l'impact potentiel du changement climatique.

BIBLIOGRAPHIE

- Abaza, K. (2006). La végétation des monts des Téboursouk: analyse locale et dynamique. Thèse de Doctorat de Géographie, F.S.H.S. Tunis, 335p.
- Abdallah, H. (2015). Dynamique de la végétation et transformations des systèmes d'élevage sur les marges arides du Tell Oriental de Soughas à Souar. (Dorsale tunisienne). Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 374p.
- Akman Y., Barbero M. et Quezel P. (1978). Contribution à l'étude de la végétation forestière d'Anatolie septentrionale. *Phytocoenologia*: 365-509.
- Araujo MB et Guison A., (2006). Five (or so) challenges for species distribution modeling. *Journal of Biogeography*, 33: 1677-1688.
- Austin M., (2007). Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches. *Ecological modeling*, 200: 1-19.
- Ben Rhouma, T., (2017). La place de la végétation forestière et pastorale dans l'aménagement des marges arides du Tell tunisien. Thèse de Doctorat de Géographie, FSHS, Tunis, 353 p.
- Bou Allagui, H. et Bannour, H., (1979). Le Djebel Chambi et ses piémonts (Tunisie Centrale): Aspects du milieu naturel, géomorphologie, morpho dynamique, végétation. Thèse de 3^{ème} cycle. Strasbourg.
- Boudy, P. (1952). Guide du forestier en Afrique du Nord. La maison rustique, Paris, 505 p.
- Breshears D. *et al.*, (2008). Vegetation synchronously leans upslope as climate warms. *PNAS*, 105:11591-11592.
- Collins M. *et al.*, (2011). Climate model errors, feedbacks and forcing: A comparison of perturbed physics and multi-model ensembles, *Clim. Dyn.*, 36: 1737-1766.
- Daget, Ph. (1977). Le bioclimat méditerranéen Caractères généraux, modes de caractérisation. *Végétation*, 34: 1-20.
- Direction Générale des Forêts, (1995). Résultats du Premier Inventaire Forestier National en Tunisie, Tunis, 154p.
- Direction Générale des Forêts, (2015). Stratégies de développement et de gestion durable des forêts et des parcours, plan d'action régional 2015-2024, Tunis, 71p.
- El Hamrouni, A., (1978). Étude phyto-écologique et problème d'utilisation et d'aménagement dans les forêts de pin d'Alep de la région de Kasserine (Tunisie Centrale). Thèse doctorat. 106 p.
- El Khorchani A., (2006). Approche dendrochronologique de l'influence des changements climatiques sur la productivité des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) en Tunisie. Thèse de Doctorat en science de l'environnement. Aix-Marseille 3.
- Elith J. *et al.* (2006). Novel methods improve prediction of species distribution from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.
- Elith J. *et al.* (2010). The art of modeling range-shifting species. *British Ecological Society*, 1: 330-342.
- Fick S. et Hijmans R., (2017). Worldclim: new 1 km spatial resolution climate surface for global land area. *International Journal of Climatology*, 37: 4302-4315.
- Fitzpatrick M.C *et al.*, (2013). Maxent versus MaxLike: empirical comparisons with ant species distributions. *Ecological Society of America*, 1-15.

- Franklin J. (2010). Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction.
- Gammar, A.M. (1979). Étude et carte écologique de la région de Kesra (Dorsale Tunisienne). Thèse de 3^{ème} cycle. Grenoble, 127p.
- Garchi S., (1992). Approche multidimensionnelle de la typologie et de la cartographie des stations à pin d'Alep de la région de Touiref (Tunisie septentrionale). Université Catholique de Louvain-La-Neuve (Belgique), 204p.
- Giannakopoulos C. *et al.* (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. *Global planet change*, 68:209-224.
- Guison A. et Zimmermann N.E., (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modeling*, 135:147-186.
- Hanley J.A et McNeil B., (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143: 29-36.
- Hoff C. et Rambal S., (2000). Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques. CEF/CNRS, Montpellier, 12p.
- Ilmen R. et Benjelloun H., (2013). Les écosystèmes forestiers marocains à l'épreuve des changements climatiques. Forêt méditerranéenne, pp 195-208.
- IPCC (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996p.
- IPCC (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation and variability. Contribution of Working Group II to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and N.Y, USA, in press.
- Janevich C.S *et al.*, (2015). Caveats for correlative species distribution modeling. *Ecological Informatics*, 29: 6-15.
- Jiguet F. *et al.*, (2010). Bird population trends are linearly affected by climate change along species thermal ranges. *Proceeding of the Royal Society B; Biological Sciences*, 277: 3601-3608.
- Khouja, M.L., (1997). Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie : perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse de Doctorat, Université catholique de Louvain-la-Neuve (Belgique), 181p.
- Khouja, M.L. *et al.*, (2020). Le pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages. Institut National de la Recherche en Génie Rural Eau et Forêts (INRGREF), 369p.
- Kumar S. et Stohlgren T.J (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Nature Environment*, 1: 94-98.
- Laribi, M. (1992). Le couvert végétal de la région de Nebeur. Mémoire de CAR Tunis, 138p.
- Lehmann J. *et al.*, (2002). Slash-and-char. A feasible alternative for soil fertility management in the Central Amazon. 17th world congress of soil science, Bangkok, Thailand. CD-Rom paper n°449, 1-12.
- Le Houerou, H.N. (1969). La carte phyto-écologique de la Tunisie centrale et méridionale au 1/500000^{ème}. *Annales de l'INRAT*, 42, fasc. 5, 624p.
- Lenoir J. (2008). A Significant Upward and Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th century. *Science*, 320: 1768-1771.
- Merzougui A. et Slimani M., (2012). Régionalisation des lois de distribution des pluies mensuelles en Tunisie. *Hydrological Sciences Journal*, 54: 668-685.
- Mc Kenzie D. *et al.* (2003). Climatic and biophysical controls on conifer species distributions in mountain forests of Washington state, USA. *Journal of Biogeography*, 30:1093-1108.
- Miller J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4: 490-509.
- Pearce J.L et Boyce M.S (2006). Modelling distribution and abundance with presence-only data. *British Ecological Society, Journal of Applied Ecology*, 43: 405-412.
- Pearson R.G et Dawson J.P (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12: 361-371.
- Phillips S.J *et al.*, (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modeling*, 190: 231-259.
- Post E. *et al.* (2009). Ecological Dynamics Across the Arctic Associated with Recent Climate Change. *Science*, 325: 1355-1358.
- Pulliam H.R (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, 3: 349-361.
- Quezel P., (1974). Les forêts du pourtour méditerranéen. UNESCO, Programme Homme et Biosphère, Comm. Nat. Fr. MAB.
- Quezel P., (1986). Les pins du groupe *halepensis*: écologie, végétation, écophysologie. *Options Méditerranéennes. Série Etude CIHEAM*, 86: 11-23.
- Quezel P. et Barbero M., (1990). Les forêts méditerranéennes, problèmes posés par leur signification historiques, écologiques et leur conservation. *Acta Bot. Malacitana*, 5: 145-178.
- Sampoux J.P et Badeau V., (2009). Modélisation de la niche écologique des fêtuques à feuilles fines: quels apports pour la conservation et la valorisation des ressources génétiques ? *Innovations Agronomiques*, INRAE, pp 79-91.
- Shabani F. *et al.* (2016). A comparison of absolute performance of different correlative and mechanistic species distribution models in an independent area. *Ecology and Evolution*, 6:5973-5986.
- Shao G., Halpin P.N, (1995). Climatic controls of eastern North American coastal tree and shrub distributions. *J. Biogeography*. 22:1083-1089.
- Sghaier, T., (2005). Contrôle de l'hétérogénéité spatiale dans des essais comparatifs de provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) installés dans les arboreta de Tunisie. Institut National Agronomique de Tunisie, Thèse de Doctorat, 126 + 41p.
- Somot S., (2005). Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. Thèse de Doctorat, Toulouse III, 347p.
- Sturn M. *et al.* (2005). Winter Biological Process could help convert Arctic Tundra to shrub land. *Bioscience*, 55:17-26.
- Swets J.A (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240:1285-1293.
- Tuiller W. *et al.* (2008). Predicting global change impacts on plant species distributions: Future challenges. Perspectives in plant ecology, evolution and systematics, 9: 137-152.
- Vennetier M. *et al.*, (2011). Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. *Forêt méditerranéenne*, 32: 151-167.