



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Modélisation de la distribution de *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. pour sa conservation au Niger

Ibrahim DJIBO MOUSSA^{1*}, Boubé MOROU¹, Abdoulaye DIOUF² et
Abdoulaye AMADOU OUMANI²

¹Faculté des Sciences et Techniques, Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi, Niger.

²Faculté d'Agronomie et des Sciences de l'Environnement, Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi,
Niger.

*Auteur correspondant ; E-mail : djibo.uddm@gmail.com ; Tel.: (+227) 96 34 65 97

Received: 11-07-2022

Accepted: 27-09-2022

Published: 31-10-2022

RESUME

Les variabilités climatiques pourraient compromettre les services écosystémiques fournis par les espèces ligneuses alimentaires en milieu naturel. Cette étude conduite dans la région de Zinder visait à modéliser la distribution actuelle de *B. senegalensis* dans les écosystèmes du Niger par l'approche du Maximum d'Entropie. Au total, 669 points d'occurrence distants d'au moins 1 km ont été combinés aux variables bioclimatiques de WorldClim 2.1 et de l'altitude d'une part et celles d'AfriClim 3.0 d'autre part après des analyses de corrélations de Spearman et de détermination du Facteur d'Inflation de la Variance réalisés avec le logiciel R. Ces prédicteurs rendent compte de la disponibilité en eau et du gradient d'aridité. WorldClim 2.1 projette la variation annuelle de température (Bio_7), la saisonnalité de la température (Bio_4) et l'élévation (elev) comme principales variables prédictives et AfriClim 3.0 suggère l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq), la saisonnalité de la température (Bio 4) et la durée de la plus longue saison sèche (Ilds). Les modèles prédisent les plus fortes probabilités de distribution de l'espèce essentiellement dans des zones qu'elle occupe actuellement. *B. senegalensis* peut être une espèce candidate pour reboiser les écosystèmes dégradés dans les zones prédites favorables à sa distribution spatiale.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Variables bioclimatiques, MaxEnt, gradient d'aridité, Afrique de l'Ouest.

Modeling the distribution of *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. for its conservation in Niger

ABSTRACT

Climate variability could compromise the ecosystem services provided by woody food species in the wild. This study conducted in the Zinder region aimed to model the current distribution of *B. senegalensis* in Niger ecosystems using the Maximum Entropy Approach. A total of 669 points of occurrence at least 1 km apart were combined with bioclimatic variables from WorldClim 2.1 and altitude on the one hand and AfriClim

3.0 on the other hand after Spearman correlation and Variance Inflation Factor analyses performed with R software. These predictors account for water availability and the aridity gradient. WorldClim 2.1 projects annual temperature variation (Bio_7), temperature seasonality (Bio_4) and elevation (elev) as the main predictors and AfriClim 3.0 suggests the wettest quarter aridity index (mimq), temperature seasonality (Bio 4) and the duration of the longest dry season (lds). The models predict the highest probability of distribution of the species primarily in areas it currently occupies. *B. senegalensis* may be a candidate species to reforest degraded ecosystems in predicted areas favorable to its spatial distribution.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Bioclimatic variables, MaxEnt, aridity gradient, West Africa.

INTRODUCTION

Toute espèce vivante ne peut accomplir son cycle biologique et sa reproduction qu'à l'intérieur d'une plage limitée de variations environnementales d'origine abiotique et biotique (Saliou et al., 2015). Cette plage de variations environnementales compatible avec la présence d'une espèce permet de caractériser le rôle que celle-ci joue dans l'écosystème (Polechová et Storch, 2018). Dans le domaine de l'écologie et de la biogéographie, plusieurs auteurs s'intéressent de plus en plus aux modèles de distribution des espèces (Latimer et al., 2006). Cette modélisation prédictive part du principe que les sites d'observation d'une espèce se trouvent dans des habitats qui lui sont favorables. Le modèle estime donc les conditions environnementales favorables à l'espèce à partir des points de présence et des facteurs environnementaux susceptibles d'influencer, entre autres, sa distribution. Puis, à partir de la relation obtenue, le modèle prédictif évalue la contribution de chaque variable environnementale au modèle (Austin, 2006) et fournit une carte de sensibilité basée sur des probabilités de présence de l'espèce sur l'ensemble du territoire donné. Ces modèles constituent un outil de prise de décisions par leur capacité à contribuer à définir les zones prioritaires où les espèces pourraient être réintroduites permettant ainsi la compréhension de la biologie et de l'écologie de celles-ci. Il est aussi essentiel pour prendre en compte l'effet du changement climatique et/ou des pressions anthropiques dans la dynamique paysagère (Saatchi et al., 2008).

Dans l'optique de prendre en compte la dynamique de la biodiversité face aux pressions anthropiques et climatiques, plusieurs travaux ont tiré la sonnette d'alarme quant à la capacité de la biodiversité à satisfaire les besoins en nourriture des populations surtout dans les pays du Sahel. En fait, ces populations utilisent les produits forestiers dans leurs stratégies de réaction à une crise lorsque la sécheresse entraîne de mauvaises récoltes (Locatelli, 2013). Selon ce même auteur, la diversification des moyens de subsistance, en particulier grâce aux produits forestiers est la principale stratégie utilisée au Niger pour anticiper la variabilité climatique. Dans un environnement changeant, prédire les variations de distribution d'espèces devrait être une priorité (Gbesso et al., 2013) notamment pour les espèces emblématiques dans la gestion des crises alimentaires. C'est le cas de *B. senegalensis* (Rabiou, 2011; Morou et al., 2016; Djibo et al., 2020). Elle est l'une des rares espèces ligneuses alimentaires qui fructifient en saison sèche correspondant à la période de soudure alimentaire pour les populations locales qui utilisent ses graines et ses feuilles.

La connaissance de l'aire potentielle de distribution actuelle de cette espèce est un préalable pour identifier ses populations les plus menacées et prédire éventuellement celles qui requièrent des mesures de conservation plus urgentes face aux changements globaux. C'est dans cette optique que l'algorithme MaxEnt – un modèle de biogéographie prédictive a été choisi. Ce choix se justifie pour (i) sa capacité à fonctionner avec des données de présence

uniquement, (ii) sa performance pour divers scénarii de modélisation en biogéographie (Elith et Leathwick, 2009) et (iii) sa robustesse même dans des contextes de variables corrélées (Elith et al., 2011). Ce modèle a été largement utilisé pour la modélisation de distribution des espèces forestières à travers le monde (Elith et al., 2011). Au Niger, cet algorithme a permis de prédire l'aire potentielle de nombreuses

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

Cette étude a été conduite dans la région de Zinder circonscrite entre 12°50' et 16°30' de latitude Nord et 7°30' et 13° de longitude Est (Figure 1). Elle couvre une superficie de 146 170 km². En allant du Sud au Nord on y distingue trois zones climatiques. La zone sahélienne dont la végétation est caractérisée par la présence des savanes arbustives ou arborées à couverture lâche ou moyenne et des savanes arborées moyennement dégradées, la zone sahélo-saharienne correspondant à la zone agropastorale où la végétation est composée principalement d'épineux xérophytes et la zone saharienne à végétation représentée par la steppe herbeuse qui alterne avec les dunes mouvantes (PNCC, 2012). Cette zonation climatique traduit une baisse des précipitations annuelles du Sud au Nord avec des isohyètes de 600 mm au Sud (Magaria) à moins de 150 mm au Nord (Tesker). La région de Zinder est située entre 309 m d'altitude au Sud-Est jusqu'à environ 700 m au niveau de Kéllé et du massif du Termit et Tin Touma et au Nord-Est (Figure 1). Sur le plan humain, la population qui était de 1 411 061 habitants en 1988 est passée à 2 080 250 habitants en 2001 puis à 3 539 764 habitants en 2012. Cette population s'est accrue de 3% entre 1988 et 2001 et de 4, 7% entre 2001 et 2012.

Collecte des données

Variables réponses

Les données d'occurrence utilisées sont issues des travaux de terrain prises à l'aide d'un GPS (*Global Positioning System*)

essences forestières, notamment *Diospyros Mespiliformis* Hochst ex A. DC. (Ali et al., 2020), *Prosopis africana* (Guill. & Perr.) Taub. (Abdou et al., 2020), *Tamarindus indica* L. (Garba et al., 2020) et *Striga gesnerioides* (Willd.) Vatke (Sadda et al., 2021). L'objectif global était de modéliser la distribution actuelle de *B. senegalensis* dans les écosystèmes du Niger par l'approche du Maximum d'Entropie.

couplées à celles téléchargées gratuitement sur la plate-forme du GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*), sur <http://www.gbif.org> le 19 Août 2019. Les données d'occurrence issues de GBIF sont susceptibles d'introduire des biais dans la modélisation de la distribution actuelle du fait des processus écologiques ou d'interventions humaines récents. Selon Hijmans et al. (2000), ces occurrences sont souvent collectées dans des zones faciles d'accès ou des zones où l'on sait que se trouve une espèce, ce qui réduirait la représentativité des données. Un contrôle basé sur l'information relative aux unités administratives a été effectué en se basant sur la vérification de la capacité des coordonnées à représenter correctement le site de collecte ou d'observation d'où est issue la donnée passeport. A l'aide de l'outil ArcGis 10.8, un *shapefile* a été créé à l'échelle de la zone d'étude (Figure 2). La vérification a consisté à visualiser les données d'occurrence contenues dans le *shapefile* à travers *Google Earth*. Les points d'occurrence à coordonnées géographiques incomplètes sont manuellement supprimés dans le tableur Excel. La base de données supplémentaires peut également être susceptible de biais lié à l'identification de l'espèce d'étude. Dans ce sens, aucune mesure de contrôle qualité n'a été menée. Une distance minimale de 1 km a été respectée entre deux points d'occurrence voisins afin de n'avoir qu'un seul point de présence par pixel et limiter par conséquent les biais d'échantillonnage et l'effet de l'autocorrélation spatiale lié à la taille d'échantillon (Guisan et Zimmermann, 2000) à travers l'outil ArcGis 10.8. Au total 669

occurrences ont été retenues pour la modélisation dont 569 relevées sur le terrain et 100 de GBIF après le nettoyage.

Variables prédictives

Les variables prédictives utilisées sont issues des 19 variables bioclimatiques de WorldClim 2.1 (Modèle de Circulation Globale) pour la période 1970-2000 (Tableau 1), téléchargées le 25/09/2020 via <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html> (Hijmans et al., 2005), l'altitude (*Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM 30s), téléchargées sur <https://earthexplorer.usgs.gov/> le 02/03/2022 et les 21 variables environnementales d'AfriClim 3.0 pour la période actuelle 1950-2000, téléchargées via <http://www.york.ac.uk/environment/research/kite/resources/> en Mai 2021 (Platts et al., 2015). Ces couches d'une résolution de 30 arc-secondes au sol " $\approx 1 \text{ km}^2/\text{pixel}$ " (Fick et Hijmans, 2017) ont été extraites à l'aide du logiciel ArcGis 10.8. Sous les tropiques, il a été démontré que la distribution des plantes est essentiellement fonction de la disponibilité en eau et du gradient d'aridité (Fandohan et al., 2015; Moutouama et al., 2016). Il est également démontré l'existence de multicollinéarité entre les variables climatiques (Elith et al., 2011). Sur la base des variables susceptibles de rendre mieux compte du gradient d'aridité, des tests de corrélations de Spearman au seuil de 85% ($r < 0,85$) ont été réalisés avec le logiciel R (Asseh et al., 2019). Le VIF (*Variance Inflation Factor*) pour chaque variable prédictive a été calculé et celles ayant des valeurs élevées ont été supprimées. La plus petite valeur possible de VIF est une absence de multicollinéarité. En règle générale, une valeur du VIF qui dépasse 5 ou 10 indique une quantité problématique de colinéarité. Les prédicteurs retenus pour WorldClim sont la température moyenne annuelle (Bio1), de la saisonnalité de la température (Bio4), de la variation annuelle de température (Bio7) et de l'élévation (elev) (Hijmans et al., 2005) et pour AfriClim ce

sont la saisonnalité de la température (bio4), de la durée de la plus longue saison sèche (llds), de l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et de l'évapotranspiration potentielle (pet) (Platts et al., 2015).

Traitement et analyse de données

L'algorithme choisi est le Maximum d'Entropie (MaxEnt) qui fonctionne sur la base de l'approche corrélative permettant d'établir la relation entre la distribution spatiale d'une espèce et les facteurs environnementaux caractérisant son aire de distribution. Le choix de MaxEnt repose sur l'utilisation des points de présence uniquement, sa capacité à générer une carte globale des habitats potentiels de l'espèce dans l'aire considérée (Fandohan et al., 2013). Le format de sortie Cloglog a été préféré. Pour ce format, il est démontré que la modélisation des données d'occurrence permet d'estimer l'abondance relative d'une espèce et qui est transformée en une probabilité de présence (Phillips et al., 2017). Le nombre d'itérations est maintenu à sa valeur par défaut (1000) au lieu des 10.000 conventionnels. L'utilisation des options par défaut est raisonnable puisque qu'elle a été validée dans d'autres études sur un large éventail d'espèces, et de conditions environnementales, ainsi que dans les cas d'échantillonnages biaisés (Phillips et Dudík, 2008).

Evaluation de la robustesse des modèles établis

L'évaluation statique s'est basée sur les outils d'analyse statistiques les plus significatifs que sont la validation croisée, l'*Area Under the Curve* (AUC) et le teste de Jackknife. La validation croisée, réalisée 15 fois de suite de manière automatique, a consisté à réserver 25% de la totalité des données d'occurrence pour tester le modèle et les 75% restants pour sa calibration (Fandohan et al., 2013). Une des méthodes de validation intrinsèque les plus couramment utilisées pour déterminer la performance du modèle est l'analyse de la courbe ROC

(Receiver Operating Characteristic) qui produit une valeur d'aire sous la courbe (*Area Under the Curve* : AUC). Un modèle généré par MaxEnt atteint le plus haut pouvoir prédictif lorsque l'AUC a une valeur de 1. Selon Swets (1988), le modèle est mauvais lorsque $AUC < 0,75$, passable pour $0,75 \leq AUC \leq 0,90$ et bon si $AUC > 0,90$. Le test de Jackknife a été automatiquement sélectionné dans l'interface de l'algorithme afin d'apprécier le degré de contribution individuelle de chaque variable environnementale dans la construction du modèle ainsi que le fonctionnement du modèle (Doffou et al., 2021).

Cartographie et analyse spatiale

Pour cartographier les habitats favorables à l'espèce, les résultats de modélisation produits par MaxEnt ont été importés dans le logiciel ArcGis 10.8. L'étendue de chaque type d'habitat sous l'effet des conditions climatiques actuelle a été estimée à partir du nombre de pixels occupés par chaque type d'habitat. Le seuil retenu pour délimiter l'aire potentiellement favorable à la distribution de cette espèce est relatif à une présence d'entraînement au 10^{ème} centile (*10 percentile training presence*) (Phillips et Dudík, 2008). Un gradient de probabilité de présence continue a été respecté pour établir la carte de distribution finale.

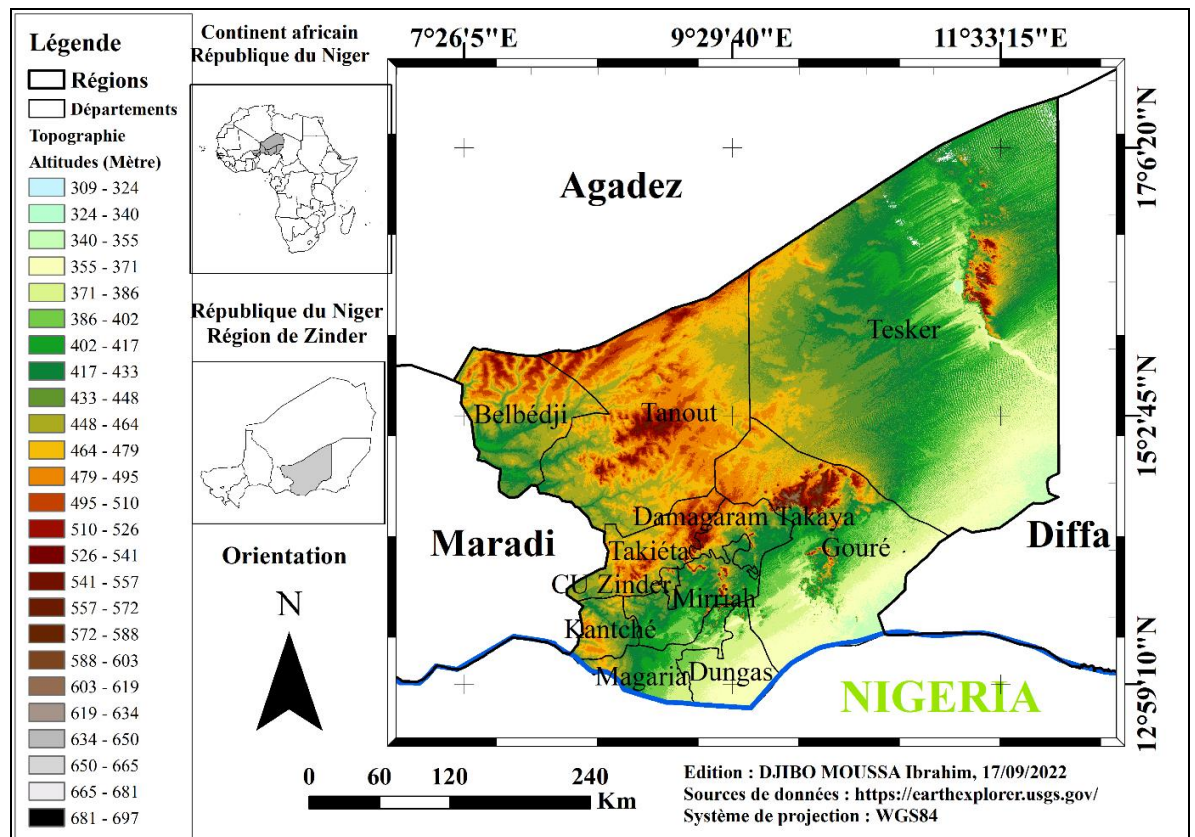


Figure 1 : Situation géographique et topographique de la région de Zinder.

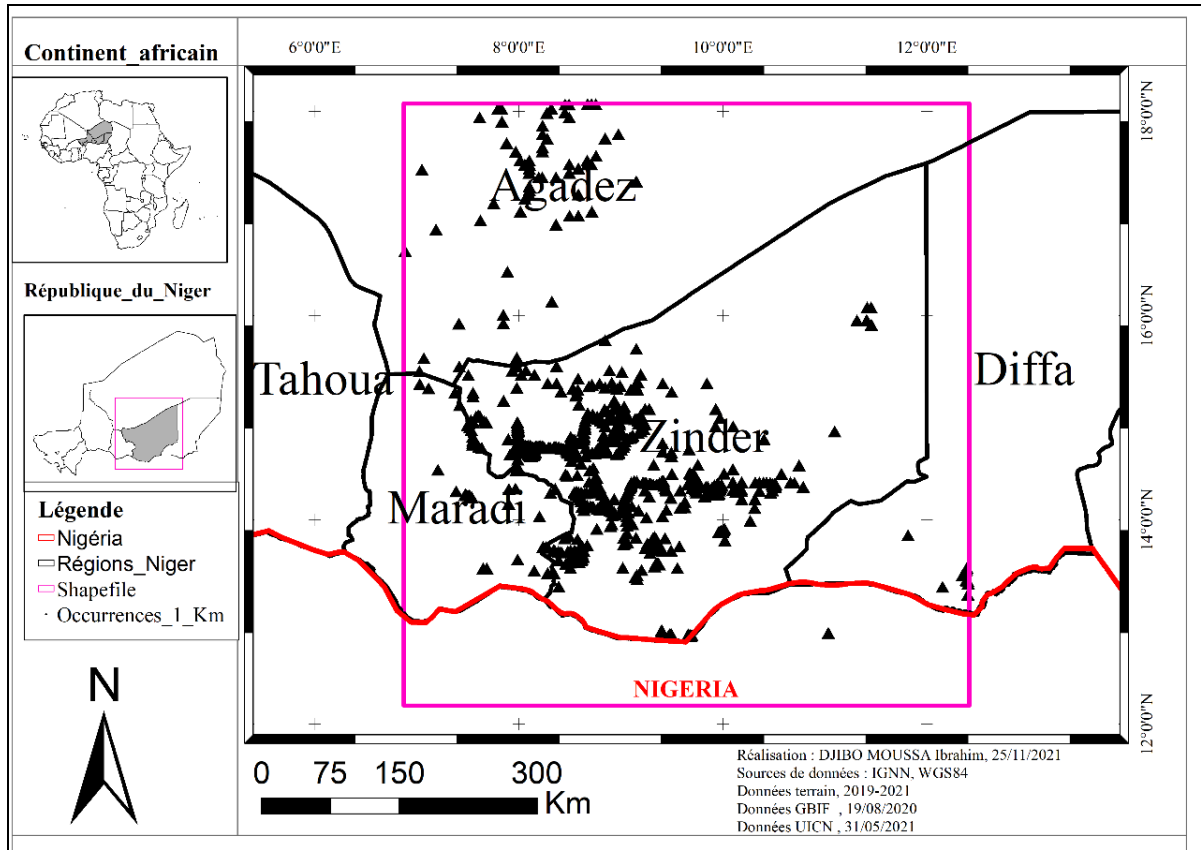


Figure 2 : Distribution spatiale des points d'occurrence de *B. senegalensis* à Zinder.

RESULTATS

Distribution géographique observée de *B. senegalensis* dans la région de Zinder

L'analyse exploratoire susmentionnée sur les données d'occurrence a permis d'établir la carte de distribution de *B. senegalensis* dans la région de Zinder (Figure 2) sur la base de 669 observations retenues dans le *shapefile* créé pour la modélisation.

Présentation des variables prédictives et validation des modèles

La mise en évidence de la corrélation entre les différentes variables (Figure 3) a permis d'examiner le Facteur d'Inflation de la Variance (VIF) à un seuil maximal fixé à 10, puisqu'un seuil de 5 ne permet pas, dans le cas présent, de conserver assez de variables environnementales.

Selon le Modèle de Circulation Générale, la température moyenne annuelle (Bio 1), la saisonnalité de la température (Bio 4), la variation annuelle de température (Bio 7), la précipitation annuelle (Bio 12) et l'élévation (elev) constituent les variables bioclimatiques les moins corrélées sélectionnées pour la prédiction de la distribution de *B. senegalensis*. L'analyse de leurs pourcentages de contribution à la prédiction du modèle suggère que la variation annuelle de température (Bio_7) et la saisonnalité de la température (Bio_4) sont dans cet ordre, les variables les plus importantes avec des contributions respectives de l'ordre de 50,7%, 21,2%. L'examen de l'importance de la permutation révèle que la saisonnalité de la température (Bio_4), l'élévation (elev) et la température moyenne annuelle (Bio_1) sont les trois principales

variables ayant le plus contribué à la construction du modèle. Les valeurs de cette statistique indiquent la réduction du pouvoir prédictif du modèle lorsque les valeurs d'une variable donnée sont aléatoirement permutées entre les points du *background* et ceux de présence. Une valeur élevée indique une grande importance de la variable concernée. Cette permutation suggère que l'ajout de ces trois variables prédictives a entraîné une forte augmentation du pouvoir prédictif du modèle. Ces variables semblent donc avoir une incidence relativement importante sur le modèle. Le teste de Jackknife (Figure 5 (i)) révèle que la variation annuelle de température est le prédicteur environnemental qui présente le meilleur gain et qui semble avoir l'information la plus utile lorsque cette variable est utilisée isolément dans le modèle. Cependant, 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. Au total, la variation annuelle de température (Bio_7), la saisonnalité de la température (Bio_4) et l'élévation (elev) sont donc les variables qui influencent le plus le modèle.

Pour le Modèle de Circulation Régionale, les variables bioclimatiques les moins corrélées sélectionnées pour la prédiction sont la saisonnalité de la température (Bio 4), la durée de la plus longue saison sèche (Ilds), l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et l'évapotranspiration potentielle (pet). L'analyse de leurs pourcentages de contribution à la prédiction du modèle suggère que la saisonnalité de la température (Bio 4) et la durée de la plus longue saison sèche (Ilds) sont dans cet ordre, les variables prédictives les plus importantes avec des contributions respectives de l'ordre de 37,1% et 32,8%. L'importance de la permutation révèle en plus que l'ajout de la saisonnalité de la température (Bio 4) (72,4%) a entraîné une forte augmentation du pouvoir prédictif du modèle. Cette variable semble donc avoir une incidence relativement importante sur le

modèle. L'examen des résultats du test d'importance des variables de Jackknife montre que l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) est la variable qui réduit le plus le gain quand elle est omise mais aussi celle qui présente le meilleur gain lorsqu'elle est utilisée isolément dans le modèle. L'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) semble procurer au modèle des informations qui ne sont pas présentes dans les autres variables (Figure 5 (ii)). Au regard de l'analyse du Tableau 1 et de la Figure 5(ii), l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq), la saisonnalité de la température (Bio 4) et la durée de la plus longue saison sèche (Ilds) sont les variables qui influencent le plus le modèle.

Validation des modèles

Les valeurs de l'AUC sont de $0,882 \pm 0,012$ pour WorldClim et $0,877 \pm 0,023$ pour AfriClim (Figure 4). Ce qui indique que ces modèles sont capables de préciser clairement l'environnement associé aux emplacements les plus appropriés pour *B. senegalensis*.

Courbes de réponse

La probabilité de distribution est faible avec des valeurs de Bio 1 inférieures à $26,5^{\circ}\text{C}$ et forte vers $27,5^{\circ}\text{C}$ (Figure 5A). Les variables Bio 4 et Bio 7 semblent restreindre l'aire de répartition de cette espèce à travers la diminution de l'aptitude de l'habitat pour les valeurs de Bio 4 supérieures ou inférieures à 35°C (Figure 5B) et pour les valeurs de Bio 7 supérieures ou inférieures à 25°C (Figure 5C). Pour Bio 12, le niveau de convenance de l'habitat augmente dans les zones à pluviométrie annuelle comprise entre 100 et 500. Cette espèce montre une forte préférence pour l'isohyète 250 mm (Figure 5D). En ce qui concerne mimq, la qualité de l'habitat est faible pour ses valeurs supérieures ou inférieures à 45. Cette même tendance se dégage pour les valeurs de pet supérieures ou inférieures à 2070 mm.

Cartographie de l'aire potentielle sous les conditions climatiques actuelles

Le modèle développé a permis de construire la première carte montrant l'aire de

distribution actuelle de *B. senegalensis* dans la région de Zinder sous les conditions climatiques actuelles. Les modèles de distribution établis mettent en évidence une probabilité d'observation relativement élevée de *B. senegalensis* approximativement entre 7°30' et 09°58' de latitudes Nord et 13°42' et 15°12' de longitudes Est. Cependant, la distribution de l'espèce dans le Sud et le Nord-Est est quasiment faible (Figure 6). Les

aires de prédilection de *B. senegalensis* à probabilité d'observation supérieure ou égale à 50% se situent essentiellement dans les départements de Belbédji, Tanout, Gouré, Damagaram Takaya et Takiéta (Figure 6). Selon les prédictions de WorldClim, les aires où la probabilité de présence est supérieure ou égale à 50% correspondent à 24,32% de la superficie totale de la région de Zinder et 37,89% selon AfriClim.

Tableau 1 : Importance relative des variables prédictives utilisées.

| Variables | Contribution | Importance de permutation | Moyenne ± écart-type | Minimum | Maximum |
|----------------------|--------------|---------------------------|----------------------|---------|---------|
| WorldClim 2.1 | | | | | |
| Bio_7 (°C) | 50,7 | 6,9 | 25,8±1,32 | 23,60 | 30,60 |
| Bio_4 (°C) | 21,2 | 46,5 | 37,2±45,8 | 32,2 | 54,8 |
| Bio_12 (mm) | 14,1 | 8,4 | 250±80 | 69 | 495 |
| Elev (m) | 13 | 28,3 | 475±83 | 307 | 1013 |
| Bio_1 (°C) | 1,1 | 10 | 27,5±0,4 | 25,22 | 29,14 |
| AfriClim 3.0 | | | | | |
| bio4 (°C) | 37,1 | 72,4 | 34±0,46 | 30 | 51 |
| lids | 32,8 | 7,3 | 10,82±0,65 | 10 | 12 |
| mimq | 28,6 | 11,6 | 43,7±13,4 | 9 | 80 |
| pet (mm) | 1,6 | 8,8 | 2 081±20 | 1968 | 2161 |

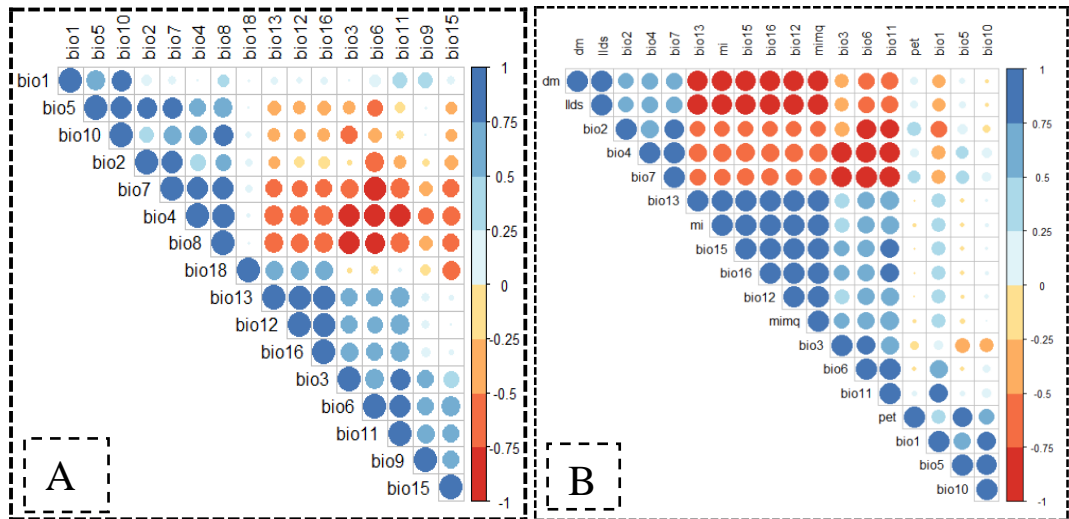


Figure 3 : Corrélogrammes de mise en évidence de la multicollinéarité entre les variables prédictives issues des matrices de corrélation (A) WorldClim et (B) AfriClim.

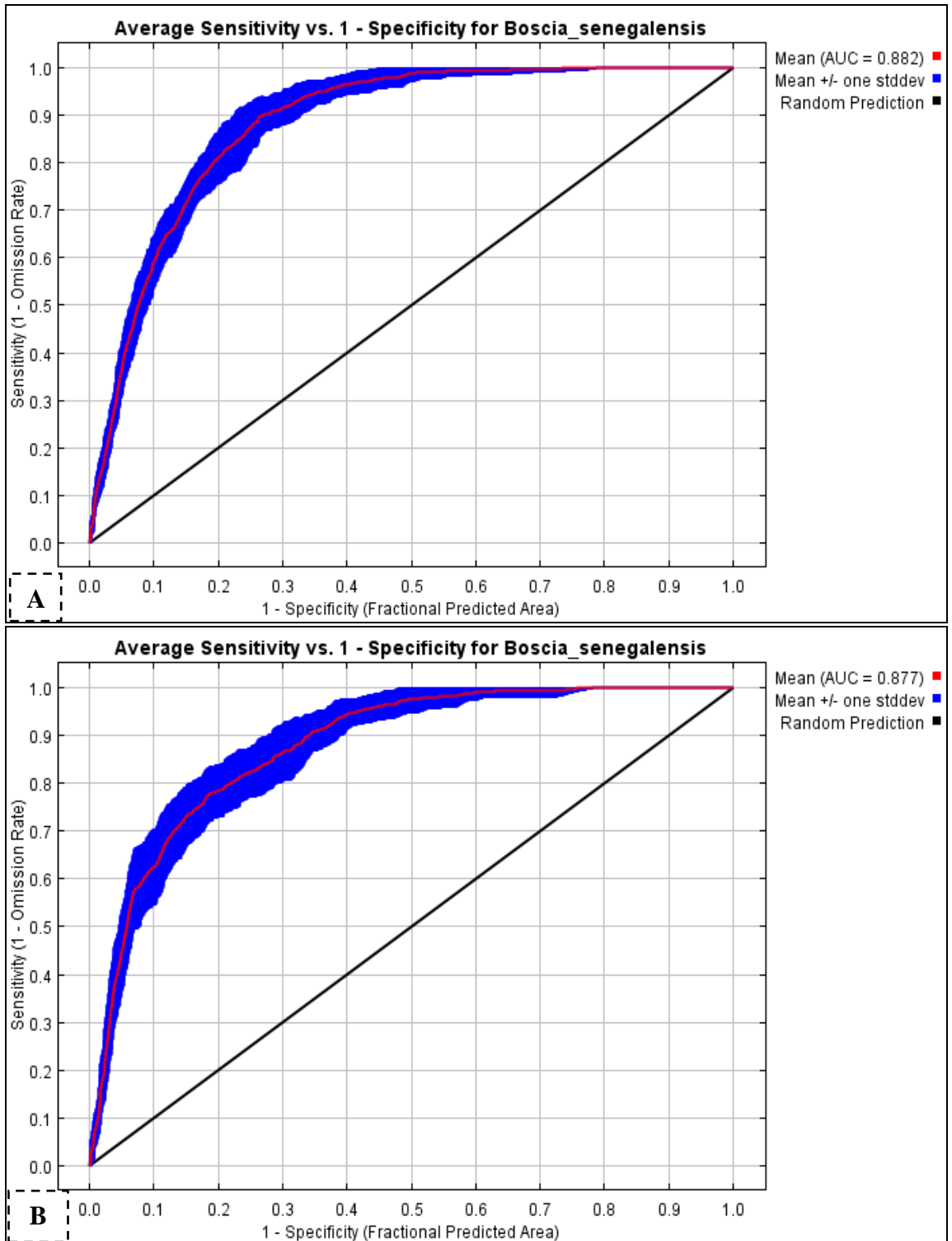
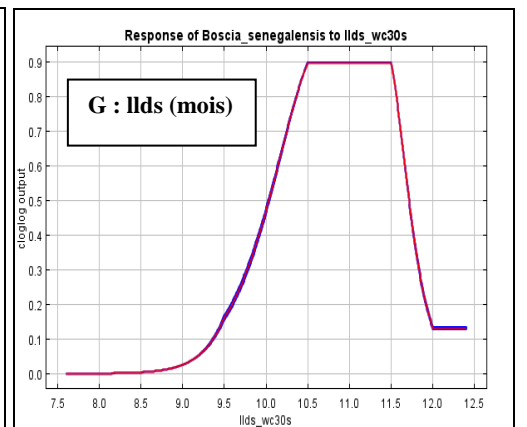
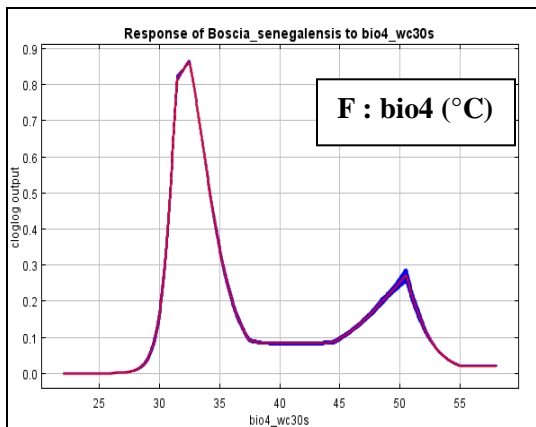
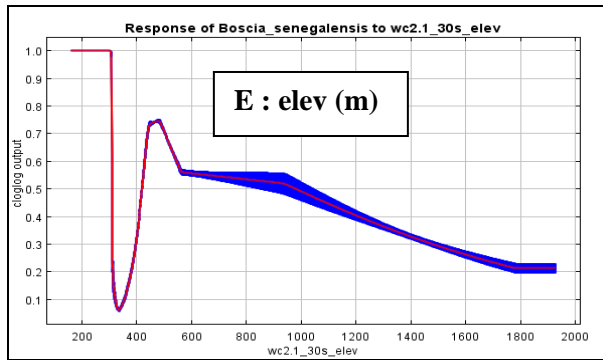
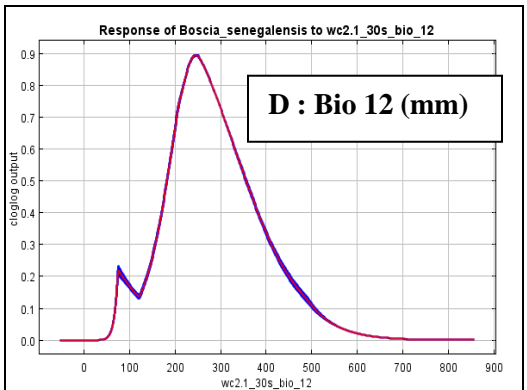
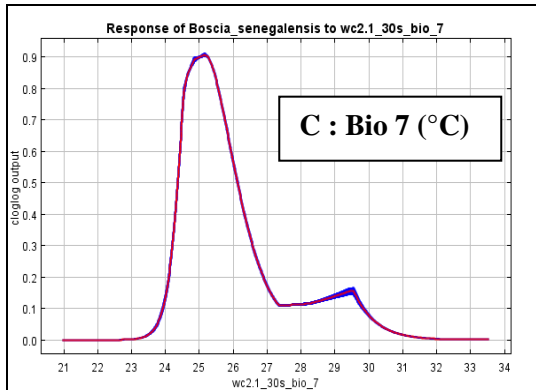
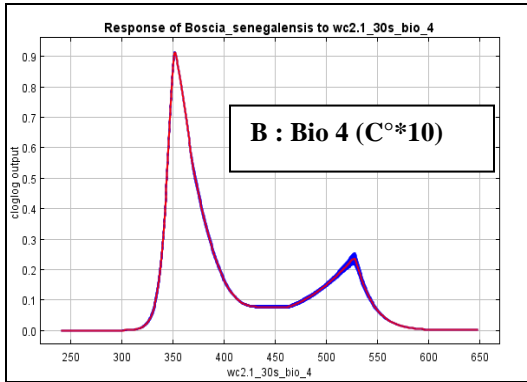
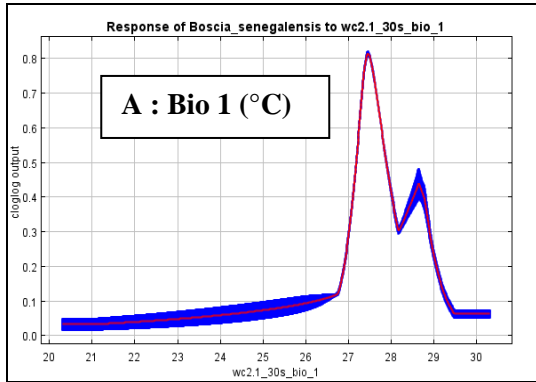


Figure 4 : Valeur de l'AUC indiquant la précision de prédiction du modèle.



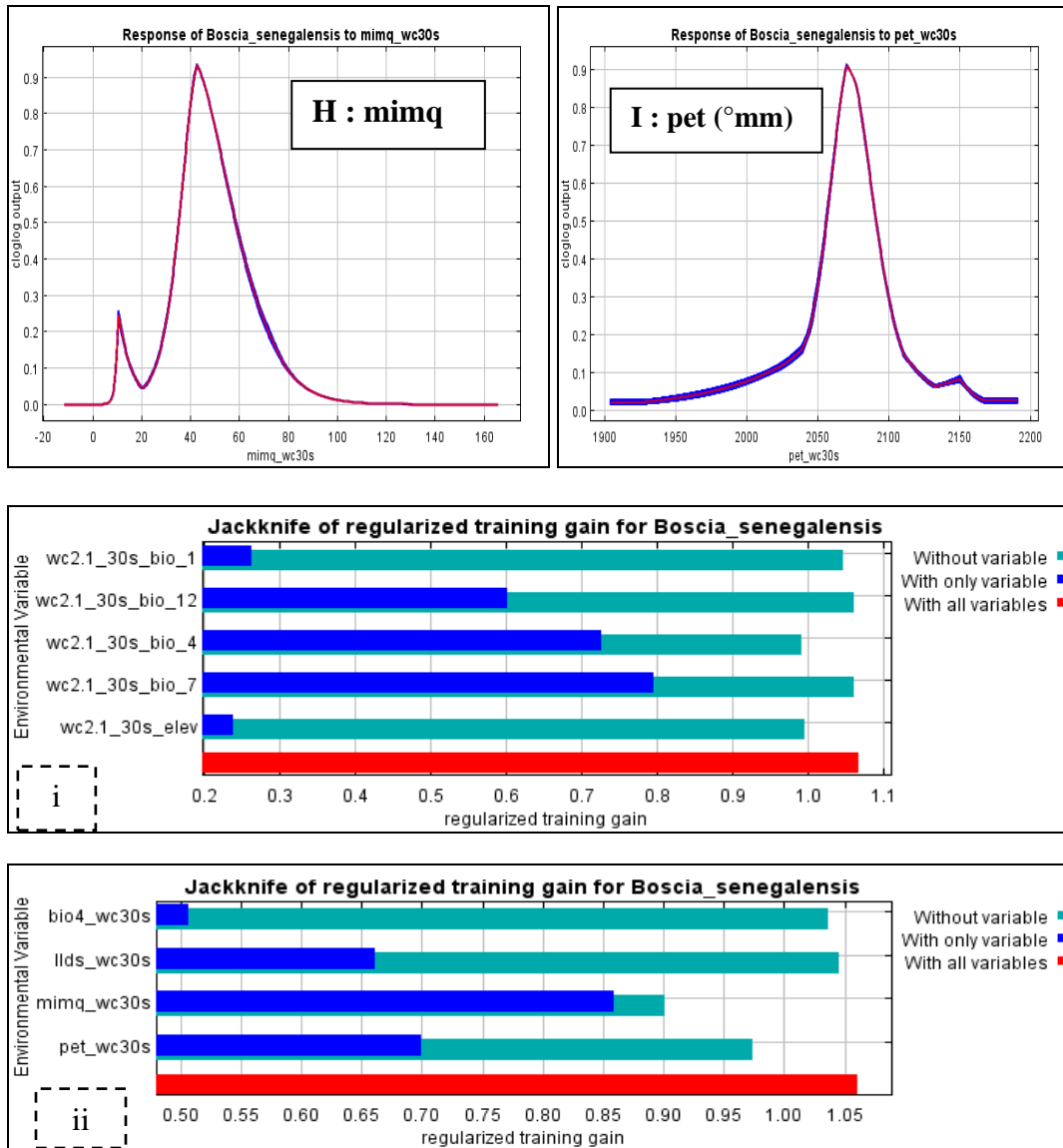


Figure 5 : Courbes de réponse reflétant la dépendance de l'adéquation prédite à la fois sur la variable sélectionnée et sur les dépendances induites par les corrélations entre la variable sélectionnée et d'autres variables.

WorldClim de A-E, A : Température moyenne annuelle (Bio 1), B : Saisonnalité de la température (Bio 4), C : Variation annuelle de température (Bio 7), D : Précipitation annuelle (Bio 12) et E : Elévation (elev), AfriClim de F-I, F : Saisonnalité de la température (Bio 4), G : Durée de la plus longue saison sèche (llds), H : Indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et I : Evapotranspiration potentielle (pet) et Test Jackknife sur la contribution des variables sélectionnées à la prédiction de l'aire de distribution : (i) pour WorldClim et (ii) pour AfriClim. La figure i et ii présentent en ordonnées les variables prédictives pour le calibrage du modèle. La bande devant chaque variable indique les performances du modèle lorsque ce dernier est tourné avec ladite variable seule (bleue) ou sans elle (verte) et avec toutes les variables (Ayihouenou et al., 2016).

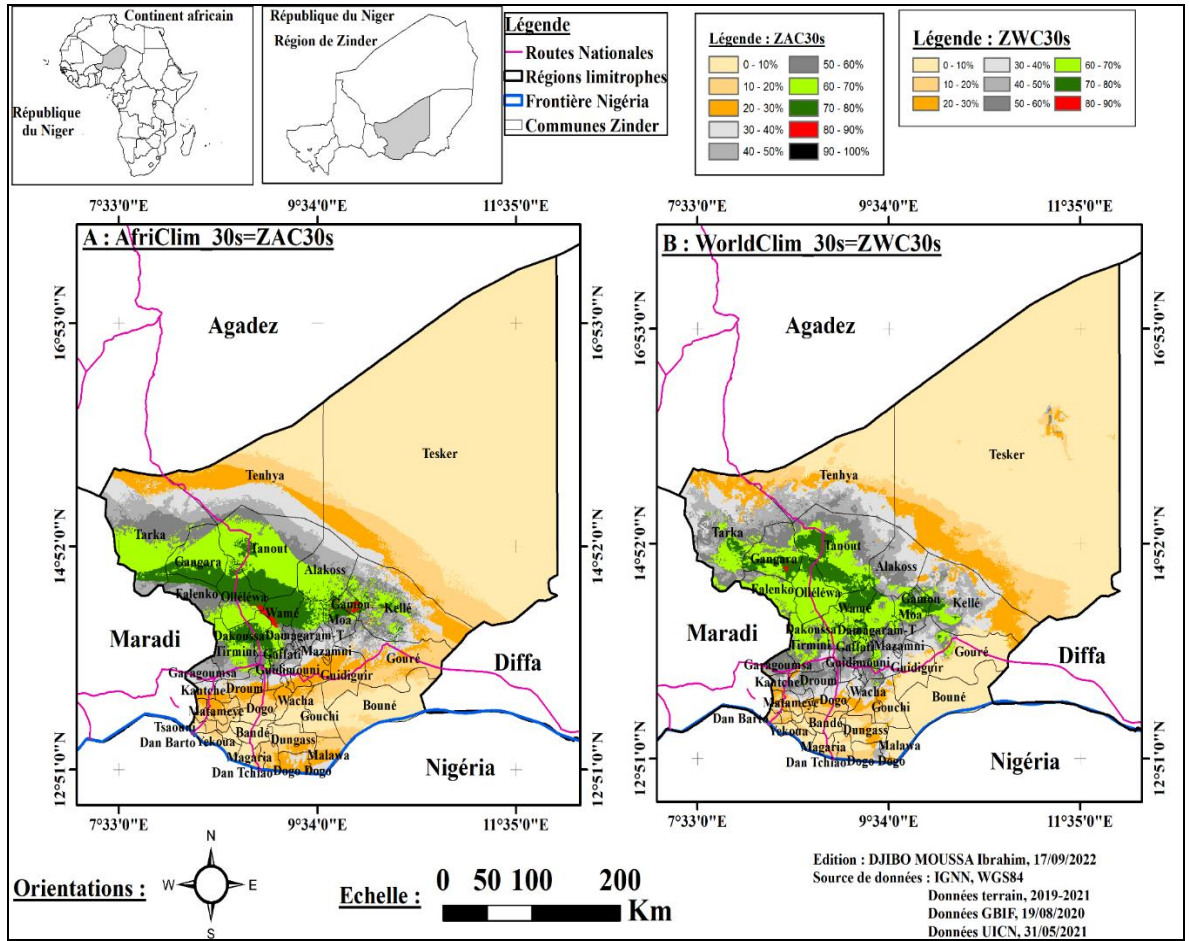


Figure 6 : Modèles de distribution de *B. senegalensis* sous les conditions climatiques actuelles.

DISCUSSION

Aperçu sur le choix de l'approche méthodologique

Les modèles de distribution des espèces sont actuellement les principaux outils utilisés pour obtenir des prédictions spatialement explicites de la correspondance des habitats aux conditions favorables à des espèces (Elith et Leathwick, 2009). L'approche du Maximum d'Entropie a été adoptée pour établir les modèles de distribution. Cette approche est reconnue comme l'une des méthodes de modélisation les plus puissantes susceptibles de générer de très bonnes informations biogéographiques tout en offrant une bonne discrimination des

habitats favorables et non favorables à une espèce d'un point de vue bioclimatique.

Qualité prédictive des modèles et variables influentes

Les données d'occurrence ayant servi à la modélisation de la distribution de *B. senegalensis* sont constituées à 85% des données collectées directement sur le terrain au moyen d'un GPS. Ces données occurrence ont été priorisées sur celles issues de GBIF qui souvent, sont collectées dans des zones faciles d'accès ou des zones où l'on sait que se trouve une espèce, ce qui réduirait la représentativité des données (Hijmans et al., 2000). Cette étude visait à modéliser la

distribution géographique observée de *B. senegalensis* et non sa distribution géographique potentielle. Cette dernière requière la prise en compte de barrières géographiques, de la présence et de l'abondance d'autres espèces interagissant de manière importante avec l'espèce focale et les changements anthropogéniques locaux de l'environnement (Urban et al., 2013). L'objectif de cette étude suppose donc l'identification des facteurs environnementaux qui pourraient influencer les limites de distribution de *B. senegalensis* d'où le choix porté sur les variables prédictives susceptibles de rendre compte de la disponibilité en eau et du gradient d'aridité (Fandohan et al., 2015 et Moutouama et al., 2016) après des analyses de corrélation et de détermination du Facteur d'Inflation de la Variance.

Les variables prédictives efficaces retenues selon WorldClim sont la température moyenne annuelle (Bio 1), la saisonnalité de la température (Bio 4), la variation annuelle de température (Bio 7), la précipitation annuelle (Bio 12) et l'élévation (elev). L'analyse des pourcentages de contributions, l'importance de permutation et le test de Jackknife révèle que la variation annuelle de température (Bio_7), la saisonnalité de la température (Bio_4) et l'élévation (elev) sont les variables prédictives qui influencent le plus le modèle. Les paramètres relatifs à la température et l'altitude semblent être les plus pertinentes. Les précipitations semblent moins influencer la distribution de cette espèce. Ce qui semble corroborer les travaux antérieurs sur cette espèce dont certains auteurs ont émis l'hypothèse que sa capacité de productivité en fruits est plus importante pendant les années à faible pluviométrie (Maman et Mato, 2014).

Selon le modèle établi sur la base de données d'AfriClim les prédicteurs environnementaux les plus déterminants sont la saisonnalité de la température (Bio 4), la durée de la plus longue saison sèche (Ilds), l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et l'évapotranspiration potentielle

(pet). Pour ce modèle, les variables environnementales qui influencent le plus le modèle sont l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq), la saisonnalité de la température (Bio 4) et la durée de la plus longue saison sèche (Ilds).

Cartographie de l'aire potentielle sous les conditions climatiques actuelles

Pour les deux modèles de circulation, les modèles de distribution établis mettent en évidence une probabilité d'observation relativement élevée de *B. senegalensis* approximativement entre 7°30' et 09°58' de latitudes Nord et 13°42' et 15°12' de longitudes Est (Figure 6). Les aires à forte probabilité de distribution de *B. senegalensis* sont essentiellement localisées dans des zones qu'elle occupe actuellement. Il s'agit du Sud des communes de Gamou, Tanout, Gangara et Tarka, du Nord des communes de Moa et de Olléléwa ainsi que l'Ouest de Damagaram Takaya. Cette tendance témoigne relativement la robustesse des modèles produits et reflète la présence des conditions environnementales assez favorables dans ces zones pour cette espèce. Les résultats de cette prédiction de la distribution corroborent l'affinité de cette espèce pour ces régions géographiques (; Rivera-Vega et al., 2015). Cette espèce semble bien se développer dans des zones recevant annuellement 250 mm de pluie avec des températures moyennes annuelles de 27,5°C. De telles préférences pour ces variables corroborent les résultats de Killian (1937) et Orwa et al. (2009). Selon ces auteurs l'espèce survit dans des zones recevant peu de précipitations annuelles (100 mm) bien qu'elle pousse mieux là où il y a au moins 250 mm. Au total 24,32% (36 884,58 km²) de la superficie de la région de Zinder offre une probabilité de présence supérieure ou égale à 50% pour cette espèce et 37,89% (57 469 km²) selon AfriClim.

Cette distribution spatiale prédite peut ne pas refléter automatiquement la présence actuelle de *B. senegalensis* à un point donné

puisse que les conditions environnementales peuvent être favorables à la présence de l'espèce, mais que celle-ci peut ne pas être présente, du fait de la concurrence interspécifique, des pressions anthropiques, de sa capacité de dissémination Saliou et al. (2014) ou des choix sylvicoles opérés dans le passé tel que suggéré par Rifai et al. (2020) sur *Cedrus atlantica* Manetti au Maroc. A ces facteurs d'incertitudes probables s'ajoutent (i) la faible couverture spatiale des stations météorologiques à l'échelle de la zone d'étude, (ii) l'hétérogénéité spatiale des données d'occurrence et (iii) la fiabilité des données d'occurrence additionnelles (GBIF) puisse que dans cette étude, aucune mesure de contrôle qualité n'a été menée afin de vérifier si toutes les coordonnées géographiques retenues de GBIF correspondent aux positions de présence de *B. senegalensis* à un moment donné.

Conclusion

Cette étude fournit la première carte prédisant l'aire de distribution actuelle de *B. senegalensis* à l'échelle de la région de Zinder. L'application de cette approche peut être un outil efficace pour l'amélioration des stratégies de gestion, de conservation et de valorisation de *B. senegalensis*. En fait, elle a permis d'améliorer (i) le niveau de compréhension des principales variables prédictives qui affectent sa distribution spatiale, (ii) le niveau de connaissance des aires à forte probabilité de distribution de cette espèce. A ce titre, le Modèle de Circulation Globale prédit que les principales variables prédictives sont la variation annuelle de température (Bio_7), la saisonnalité de la température (Bio_4) et l'élévation (elev). Par contre, le Modèle de Circulation Régionale suggère que l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq), la saisonnalité de la température (Bio 4) et la durée de la plus longue saison sèche (lids) constituent les variables prédictives les plus efficaces. Les modèles établis prédisent les plus fortes

probabilités de distribution de *B. senegalensis* essentiellement dans des zones que l'espèce occupe actuellement. Cela témoigne leur robustesse et reflète la présence des conditions environnementales favorables dans ces zones pour cette espèce. Il s'agit globalement des départements de Tanout, Belbédji, Damagaram Takaya, Gouré et Takiéta. Ainsi, au regard de ces résultats et compte tenu de l'importance socio-économique et environnementale de cette espèce, des opérations de sa conservation à travers la sensibilisation des populations peut être envisagée dans les zones prédites favorables à sa distribution spatiale qu'elle occupe déjà.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas de conflit d'intérêts.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Dans cette étude, IDM a collecté, traité et analysé les données puis rédigé le manuscrit. BM a participé à la relecture de l'article, AD et AAO ont apporté des conseils dans la collecte des données d'occurrence et bioclimatiques.

REMERCIEMENTS

Notre reconnaissance va aux responsables des services techniques et aux chefs coutumiers de la région de Zinder pour leur hospitalité légendaire pendant les travaux de terrain.

REFERENCES

- Abdou L, Abdourahmane IS, Moussa MB, Mahamane A. 2020. Impact potentiel du changement climatique sur la dynamique des peuplements de *Prosopis africana* (G. et Perr.) Taub. à l'horizon 2050 au Niger. *Journal of Applied Biosciences*, **155**: 16049-16059. DOI: 10.35759/JABs.155.9
- Ali A, Abdou L, Inoussa MM, Séghiéri J, Mahamane A. 2020. In Niger, the Expected Futur Climate Will Provide

- Better Conditions than the Current One to *Diospyros Mespiliformis* Hochst. ex A.DC. Rich. *Environment and Natural Resources Research*, **10**(3): 16-26. DOI : 10.5539/enrr.v10n3p16.
- Asseh EE, Ake-Assi E, Koffi KJ. 2019. Diversité biologique et influence des changements climatiques sur la distribution géographique de quelques espèces d'Acanthaceae en Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**(2): 676-692. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i2.9.
- Austin M. 2006. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, **200**: 1-19. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.07.005.
- Ayihouenou EB, Fandohan AB, Sodé AI, Gouwakinnou NG, Djossa AB. 2016. Biogéographie du néré (*Parkia biglobosa* (Jack.) R. Br. ex. Don.) (Jack.) R. Br. ex. Don.) sous les conditions environnementales actuelles et futures au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, **11**: 93-108.
- Djibo MI, Rabiou H, Morou B, Diouf A, Diallo II, Adamou AB, Maman LH, Amadou OA, Ali M. 2020. *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., une Espèce Ligneuse à Fortes Potentialités Ethnobotaniques et Bien Adaptée à la Sécheresse au Sahel: Synthèse Bibliographique. *European Scientific Journal ESJ*, **16**(9): 206-228. DOI: 10.19044/esj.2020.v16n9p206
- Doffou SC, Kouadio K, Dibi HN. 2021. Effets des variations climatiques à l'horizon 2050 sur la distribution phytogéographique de *Tieghemella heckelii* Pierre ex A. Chev. (Sapotaceae) en Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **15**(2): 679-694. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v15i2.2>.
- Elith J, Leathwick JR. 2009. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, **40**: 677-697. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.12015.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, **17**: 43-57. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.
- Fandohan AB, Moutouama JK, Biaou SSH, Gouwakinnou GN, Adomou CA. 2015. Le réseau d'aires protégées Bénin-Togo assure-t-il la conservation de *Thunbergia atacorensis* (Acanthaceae)? *Revue CAMES - Science de la vie, de la terre et agronomie*, **3**(2): 25-31.
- Fandohan B, Gouwakinnou GN, Fonton NH, Sinsin B, Liu J. 2013. Impact des changements climatiques sur la répartition géographique des aires favorables à la culture et à la conservation des fruitiers sous-utilisés: Cas du tamarinier au Bénin. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, **17**(3): 450-462.
- Fick SE, Hijmans RJ. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas ». *International Journal of Climatology*, **37**(12): 4302-4315. DOI: 10.1002/joc.5086
- Garba A, Abdou L, Soumaila SA-k, Mamadou BA, Mahamane A. 2020. Démographie et distribution des espèces fruitières sauvages à usages multiples: cas de *Tamarindus indica* L. dans les zones Sud-Ouest du Niger. *Afrique Science*, **17**(5): 185-196. DOI: 10.2165/00128415-201213900-00148
- Gbesso FHG, Tente BHA, Gouwakinnou GN, Sinsin BA. 2013. Influence des changements climatiques sur la distribution géographique de *Chrysophyllum albidum* G. Don (Sapotaceae) au Bénin. *Int. J. Biol.*

- Chem. Sci.*, **7**(5): 2007-2018. DOI: 10.4314/ijbcs.v7i5.18.
- Guisan A, Zimmermann NE. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, **135**(2-3): 147-186. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9
- Hijmans RJ, Garrett KA, Huamán Z, Zhang DP, Schreuder M, Bonierbale M. 2000. Assessing the geographic representativeness of genebank collections: The case of Bolivian wild potatoes. *Conservation Biology*, **14**(6): 1755-1765. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2000.98543.x.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**: 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276
- Killian C. 1937. Contribution à l'étude écologique des végétaux du Sahara et du Soudan tropical. *Bull. Soc. Hist. Nat.*, **28**: 12-18.
- Latimer AM, Wu S, Gelfand AE, Silander JAJr. 2006. Building statistical models to analyze species distributions. *Ecological Applications*, **16**(1): 33-50.
- Locatelli B. 2013. Services écosystémiques et changement climatique. Mémoire d'Environnement et Société, Université de Grenoble, Grenoble, 89p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00931871>
- Maman MH. 2014. Evaluation de la capacité de la productivité du « Hanza » dans la région de Zinder. Rapport de stage de Licence Professionnelle, Institut Universitaire de Technologie de Zinder, 40 p.
- Morou B, Oumani AA, Diouf A, Mahamane A. 2016. Structure démographique et dynamique de quelques essences forestières appréciées par la girafe au Niger. *Afrique Science*, **12**(4): 213-227.
- Moutouama JK, Fandohan AB, Biaou SSH, Amahowe OI, Moutouama FT, Natta AK. 2016. Potential climate change favored expansion of a range limited species, *Haematostaphis barteri* Hook f. », *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, **110**(2): 397-411. DOI: 10.12895/jaeid.20162.516
- Orwa C, Mutua A, Kindt R, Jamnadass R, Anthony S. 2009. A tree reference and selection guide version 4.0. *Agroforestry Database*, **4**: 1-5. <http://www.worldagroforestry.org/sites/trreedbs/treedatabases.asp>.
- Phillips SJ, Anderson RP, Dudík M, Schapire RE, Blair ME. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, **40**(7): 887-893. DOI: 10.1111/ecog.03049
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, Banff, Canada, p. 8.
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, **31**(2): 161-175. DOI:10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- Platts PJ, Omeny PA, Marchant R. 2015. AFRICLIM: High-resolution climate projections for ecological applications in Africa ». *African Journal of Ecology*, **53**(1): 103-108. DOI : 10.1111/aje.12180
- PNCC. 2012. Avant-Projet de document de Politique Nationale en matière de Changements Climatiques. PNCC, République du Niger, 54 p.
- Polechová J, Storch D. 2018. Ecological Niche. In *Encyclopedia of Ecology Oxford*, Jørgensen SE, Fath BD (eds). Elsevier: Pays-Bas; 72-80. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11113-3
- Rabiou H. 2011. Ecologie de l'espèce *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir.

- (Capparaceae) dans la commune de Simiri (Ouallam) au Nord-Ouest du Niger. Master en Gestion des Ressources Naturelles et de la Biodiversité (RESBIO), Université d'Abomey Calavi (UAC) Benin et Université Abdou Moumouni de Niamey (UAM) Niger, p. 49.
- Rifai N, Moukrim S, Khattabi A, Lahssini S, Mharzi AH, Rhazi L. 2020. Prédiction de l'aire potentielle de répartition du genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*) au Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, **8**(2): 141-150.
- Rivera-Vega LJ, Sebastian K, de Graaf RM, Garvi J, Garvi-Bode RD, van Dam NM. 2015. Allelopathic effects of glucosinolate breakdown products in Hanza [*Boscia senegalensis* (Pers.) Lam.] processing waste water. *Front. Plant Sci.*, **6**: 532. DOI: 10.3389/fpls.2015.00532
- Saatchi S, Buermann W, ter Steege H, Mori S, Smith TB. 2008. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. *Remote Sensing of Environment*, **112**(5): 2000-2017. DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.008
- Sadda A-S, Coppens d'EG, Saidou A-A, Diouf A, Jangorzo NS, Issoufou HB-A. 2021. The witchweed *Striga gesnerioides* and the cultivated cowpea: A geographical and historical analysis of their West African distribution points to the prevalence of agro-ecological factors and the parasite's multilocal evolution potential. *PLoS ONE*, **16**(8): e0254803. DOI: 10.1371/journal.pone.0254803
- Saliou ARA, Oumrou M, Sinsin AB. 2014. Variabilités bioclimatiques et distribution spatiale des herbacées fourragères dans le Moyen-Bénin (Afrique de l'Ouest). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(6): 2696-2708. DOI: 10.4314/ijbcs.v8i6.29
- Saliou ARA, Oumrou M, Sinsin BA. 2015. Modélisation des niches écologiques des ligneux fourragers en condition de variabilité bioclimatique dans le Moyen-Bénin (Afrique de l'Ouest). *Revue d'Ecologie*, **70**(4): 342-353.
- Swets J A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**: 1285-1293.
- Urban MC, Zarnetske PL, Skelly DK. 2013. Moving forward: dispersal and species interactions determine biotic responses to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1297**: 44-60. DOI: 10.1111/nyas.12184.