

Impact des changements climatiques sur la dynamique de l'habitat potentiel de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. au Niger

M. K. ABDOU HABOU¹, L. ABDOU¹, H. RABIOU¹, A. MAHAMANE¹

(Reçu le 18/11/2020; Accepté le 24/01/2021)

Résumé

La présente étude a pour objectif de modéliser la distribution potentielle de *Balanites aegyptiaca* sous l'influence des changements climatiques au Niger. Le principe d'entropie maximale (MaxEnt) a été utilisé pour déterminer les habitats favorables de l'espèce en fonction des variations des conditions climatiques actuelles et futures (horizon 2050). Les données de présence de l'espèce combinées aux données bioclimatiques dérivées de la base de données Worldclim ont permis de générer trois modèles climatiques pour les projections futures (les modèles CCCMA, CSIRO et HadCM3) sous le scénario A2 du GIEC. Les précipitations du trimestre le plus froid (BIO19) et les précipitations de la période la plus humide (BIO13) sont les variables environnementales qui ont plus contribué à la prédiction du modèle. Sous les conditions climatiques actuelles, 67,7% du territoire nigérien est très favorable au développement de *Balanites aegyptiaca*. Les modèles CCCMA et HadCM3 qui prédisent une augmentation des précipitations à l'horizon 2050 tout comme le modèle CSIRO qui prédit une diminution pour ce même horizon montrent que les habitats très favorables seront convertis en habitats moyennement favorables. Les aires protégées terrestres du Niger, situées majoritairement en sahélo-soudanienne, sont plus efficaces pour la conservation de *Balanites aegyptiaca* aussi bien dans les conditions climatiques actuelles qu'à l'horizon 2050. Il s'agit surtout des réserves totales de faune de Tamou et de Gadbedji. La présente étude montre que *Balanites aegyptiaca* est l'une des rares espèces qui sont bien adaptées aux conditions d'aridité de la zone sahélo-soudanienne. Les résultats de cette étude constituent un outil pouvant servir de base pour la conservation et la gestion des peuplements naturels de *Balanites aegyptiaca*.

Mots-clés: *Balanites aegyptiaca*, MaxEnt, niche écologique, changements climatiques, aires protégées, Niger

Impact of climate change on the dynamics of potential habitat of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. in Niger

Abstract

The objective of this study is to model the potential distribution of *Balanites aegyptiaca* under the influence of climate change in Niger. The principle of maximum entropy (MaxEnt) was used to determine the favorable habitats of the species based on variations in current and future climatic conditions (horizon 2050). The presence data of the species combined with bioclimatic data derived from the Worldclim database allowed to generate three climate models for future projections (the CCCMA, CSIRO and HadCM3 models) under the A2 scenario of the IPCC. The coldest quarter precipitation (BIO19) and the wettest period precipitation (BIO13) are the environmental variables that most contributed to the model prediction. Under current climatic conditions, 67.7% of the Nigerien territory is very favorable to the development of *Balanites aegyptiaca*. The CCCMA and HadCM3 models which predict an increase in precipitation by 2050 as well as the CSIRO model which predicts a decrease for this same horizon show that very favorable habitats will be converted into moderately favorable habitats. Terrestrial protected areas in Niger, located mainly in the Sahelo-Sudanian region, are more effective for the conservation of *Balanites aegyptiaca* both under current climatic conditions and by 2050. These are mainly the Tamou and Gadbedji total wildlife reserves. The present study shows that *Balanites aegyptiaca* is one of the few species that is well adapted to the arid conditions of the Sahelo-Sudanian zone. The results of this study constitute a tool that can serve as a basis for the conservation and management of natural stands of *Balanites aegyptiaca*.

Keywords: *Balanites aegyptiaca*, MaxEnt, ecological niche, climate change, protected areas, Niger

INTRODUCTION

Les périodes successives de sécheresse combinées à une pression démographique de plus en plus croissante ont entraîné une forte dégradation de la végétation en Afrique et particulièrement au Sahel. L'une des manifestations immédiates de cette dégradation est la réduction de la densité des espèces végétales dans les systèmes cultivés (Faye, 2010), la fragmentation et la réduction des superficies des forêts (Hill et Curran, 2005; Cramer *et al.*, 2007). Force est d'admettre qu'avec la destruction des habitats, les espèces disparaîtront plus vite (Giday, 2001). Aujourd'hui, à cause de la conquête de nouvelles terres agricoles et des zones d'habitation, les refuges de la biodiversité sont de plus en plus repoussés vers leurs limites extrêmes (Morou *et al.*, 2011; Karim *et al.*, 2012; Mama *et al.*, 2014). Selon Wezel (2004), plus que les facteurs climatiques, c'est la pression anthropique qui parachève la disparition des espèces après que les changements climatiques auront entraînés la perte de densité des espèces ligneuses (Gonzalez, 2001). Boko *et al.* (2007) estiment que 25 à 42% des espèces végétales d'Afrique pourraient être menacées d'extinction du fait d'une perte de 81 à 97% des habitats favorables d'ici 2085.

Au Niger, sur un potentiel de ressources forestières ligneuses nationales estimé en 1989 à 16 millions d'hectares comprenant 600.000 ha de forêts classées, environ 200.000 ha sont perdus chaque année du fait des facteurs anthropiques et des variations climatiques (Abdourahmane *et al.*, 2012). Dans une telle dynamique, la survie de nombreuses espèces ligneuses particulièrement les espèces fruitières est menacée. C'est le cas de *B. aegyptiaca*, espèce caractérisée par une exploitation intense. Tous les organes de cette espèce sont utilisés par les populations. Les fruits sont consommés crus ou transformés en huile et savon. Le bois est utilisé pour la confection de divers outils aratoires. Les jeunes feuilles sont consommées en épinard et divers extraits des organes sont utilisés dans le traitement des maladies (Abdou *et al.*, 2020). Dans ce contexte du changement climatique et des pressions anthropiques sur les ressources naturelles, prédire les variations de distribution spatiale de *B. aegyptiaca* constituerait un outil d'aide à la prise de décision notamment dans le cadre de la gestion et de la conservation durable.

Ces dernières années, un nombre croissant d'outils pour l'analyse des modèles de distribution géographique à dif-

¹ Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Diffa, Niger

férentes échelles spatiales est apparu (Guisan et Thuiller, 2005; Jimenez-Valverde *et al.*, 2008). Parmi ces outils, une attention particulière a été donnée à des modèles prédictifs de distribution d'espèces, où la niche écologique potentielle est modélisée à partir des descripteurs des caractéristiques environnementales des localités où la présence de l'espèce a été confirmée (Guisan et Zimmermann, 2000). Parmi ces modèles se trouve le modèle de Maximum d'Entropie (MaxEnt) (Phillips *et al.*, 2006). Au Niger, très peu d'études ont été publiées sur la modélisation des données de l'habitat des espèces avec ce modèle (Abdou *et al.*, 2016; Satta *et al.*, 2018; Yahou *et al.*, 2020).

Cette étude a pour objectif de prédire la distribution géographique actuelle et future de *B. aegyptiaca* au Niger sous l'influence du changement climatique et d'évaluer l'efficacité des aires protégées dans la conservation de cette espèce.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude et description de l'espèce étudiée

Cette étude concerne l'ensemble du territoire de la République du Niger. Ce pays est situé entre 11°37' et 23°33' de latitude Nord et entre 0°10' et 16°00' de longitude Est. Il est limité au Nord par l'Algérie et la Libye, à l'Est par le Tchad, au Sud par le Nigeria et le Bénin et à l'Ouest par le Burkina Faso et le Mali. Le Niger couvre une superficie de 1 267 000 km².

Balanites aegyptiaca (L.) Del. est présente en Afrique de l'Ouest dans les zones sahélienne et soudano-sahélienne. Arbre à cime sphérique, aplatie ou irrégulière atteignant 8-9 m de haut (Arbonnier, 2000). Le port est remarquable

avec des branches retombantes souples, armées de longues épines droites, alternes ou disposées plus ou moins en spirale, insérées au-dessus de l'aisselle des feuilles. Son écorce grise et lisse au stade jeune devient fissurée et crevassée chez les sujets âgés (Arbonnier, 2000). Les feuilles, courtement pétiolées, sont composées, bifoliolées, atteignant 1 à 7 cm de long, insérées sous la base des épines (Figure 1). D'une grande amplitude écologique, on trouve cet arbre en Afrique Orientale jusqu'à 1500 m d'altitude. Il indique le surpâturage dans les régions caractérisées par un indice de pluviométrie comprise entre 500 et 750 mm (Beka, 2011).

Collecte des données

Points de présence *B. aegyptiaca*

Les données d'occurrence (coordonnées géographiques) de *B. aegyptiaca* (Figure 2) ont été collectées à partir des sources suivantes: les travaux de terrain, une revue bibliographique qui a permis de consulter les données de publication, thèses et mémoires sur les informations de présence de *B. aegyptiaca* sur le territoire nigérien et la base des données du laboratoire Garba Mounkaila (Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni de Niamey). Afin de s'assurer que les données de présence de l'espèce étudiée couvrent le plus possible la région où elle est régie par les mêmes facteurs climatiques (Fitzpatrick et Hargrove, 2009), les coordonnées de présence de l'espèce ont été collectées dans son aire de distribution en Afrique de l'Ouest. Ces données additionnelles ont été obtenues à partir de la base des données du GBIF (Global Biodiversity Information Facility) (www.gbif.org).

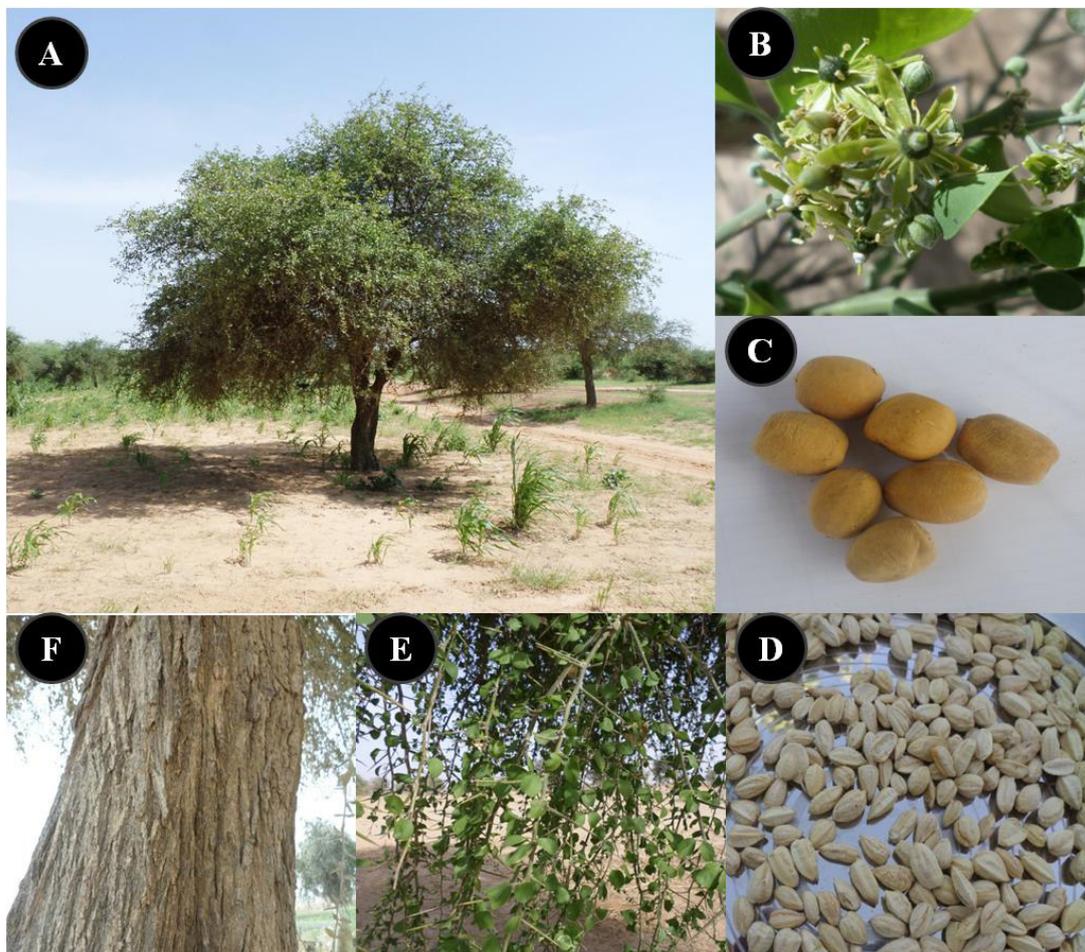


Figure 1: *Balanites aegyptiaca* (A: Pied dans un parc agroforestier; B: Fleur; C: Fruits; D: Graines; E: Rameaux; F: Tronc)

En cas d'absence des coordonnées géographiques exactes de certains points de présence issus de la revue bibliographique ou du site GBIF, les « Gazettiers » des localités dans lesquels ils se trouvent ont été utilisés pour identifier leurs coordonnées géographiques à l'aide de l'outil d'identification de DIVA-GIS 7.5 (www.diva-gis.org/datadown). Le tableau 1 donne la répartition de points de présence de *B. aegyptiaca* utilisés en fonction des sources.

Données climatiques

Les données sur les conditions climatiques actuelles ont été dérivées des données climatiques de 1950-2000, téléchargées de la base de données Worldclim version 1.4 (www.worldclim.org) (Hijmans *et al.*, 2005; Hijmans *et al.*, 2006). Pour les projections climatiques futures, trois modèles de circulation générale (Global Circulation Models: GCMs) parmi les plus recommandés (IPCC, 2007) ont été utilisés. Il s'agit des modèles CCCMA (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) et HadCM3 (Hadley Centre for Coupled Model version 3). Pour ces modèles, les projections faites pour 2050 ont été utilisées sous le scénario d'émission A2. Ce scénario a été utilisé de préférence car il prédit une situation considérée plus probable pour l'Afrique à l'horizon 2050 (Williams *et al.*, 2007).

Dix-neuf (19) variables bioclimatiques ont été générées à partir des données climatiques brutes (précipitations et température) préparées et mises sous formats compatibles avec le programme MaxEnt (Tableau 2). À cet effet, le logiciel DIVA-GIS 7.5 a été utilisé. Les facteurs édaphiques

ne sont pas pris en compte parce que plusieurs auteurs ont signalé que l'espèce *B. aegyptiaca* est peu exigeante par rapport au sol (Maydell, 1983; Chevallier *et al.*, 2003; Eyog *et al.*, 2006).

Tableau 2: Variables bioclimatiques utilisées (www.worldclim.org)

Code	Les variables bioclimatiques
BIO1	Température moyenne annuelle
BIO2	Écart diurne moyen (T maxi – T min; moyenne mensuelle); moyenne mensuelle)
BIO3	Isothermalité (BIO1/BIO7) * 100
BIO4	Saisonnalité de la température (Coefficient de variation)
BIO5	Température maximale de la période la plus chaude
BIO6	Température minimale de la période la plus froide
BIO7	Écart annuel de température (BIO5-BIO6)
BIO8	Température moyenne du trimestre le plus humide
BIO9	Température moyenne du trimestre le plus sec
BIO10	Température moyenne du trimestre le plus chaud
BIO11	Température moyenne du trimestre le plus froid
BIO12	Précipitations annuelles
BIO13	Précipitations de la période la plus humide
BIO14	Précipitations de la période la plus sèche
BIO15	Saisonnalité des précipitations (Coefficient de variation)
BIO16	Précipitations du trimestre le plus humide
BIO17	Précipitations du trimestre le plus sec
BIO18	Précipitations du trimestre le plus chaud
BIO19	Précipitations du trimestre le plus froid

Tableau 1: Répartition des points de présence de *B. aegyptiaca* utilisés en fonction des sources

Sources	Nombre des points de présence	Fréquence (%)
Relevés du terrain	451	43,7
Bibliographie	248	24,0
Base des données Labo Garba Mounkaila	291	28,2
Base des données GBIF (www.gbif.org)	43	4,1
Total	1033	100

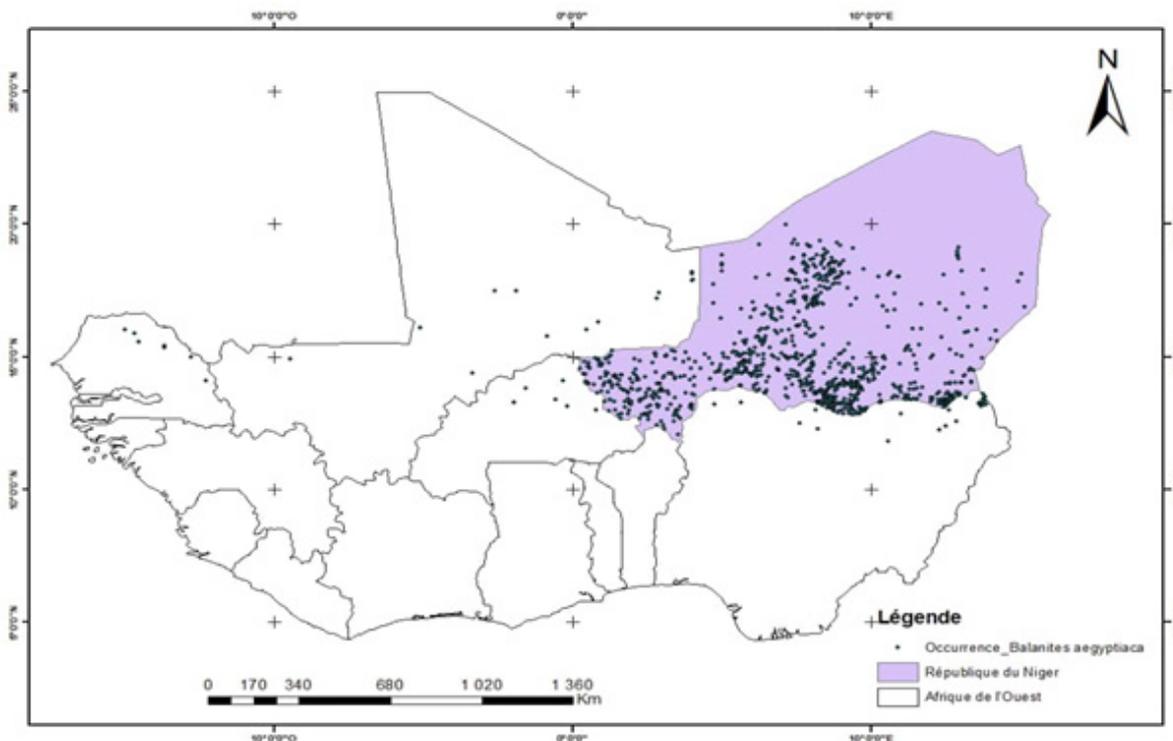


Figure 2: Localisation des points de présence de *B. aegyptiaca* utilisées en Afrique de l'Ouest

Analyse et traitement des données

Modélisation et validation de modèle

La modélisation a été réalisée en utilisant le programme MaxEnt (Maximum Entropy) version 3.4.1, qui utilise une procédure d'optimisation comparant la présence de l'espèce avec les caractéristiques de l'environnement en se basant sur le principe d'entropie maximale (Phillips *et al.*, 2006). Pour évaluer la qualité du modèle produit par MaxEnt, la Courbe Caractéristique d'Opération a été analysée (ROC: Receiver Operating Characteristic) qui attribue une valeur unique en fonction de la performance du modèle (AUC: Area Under the Curve). L'analyse ROC est une mesure de sensibilité qui correspond aux taux de positifs vrais (aucune erreur d'omission), par rapport aux taux de faux positifs (erreur de prévision superflue). Ainsi, l'analyse ROC évalue la capacité du modèle à prédire correctement l'occurrence de l'espèce selon la valeur d'AUC (Tableau 3) (Phillips *et al.*, 2006).

Afin de déterminer la contribution individuelle de chacune des variables retenues, le test de Jackknife a été effectué (Young *et al.*, 2011). Il consiste à écarter les variables tour à tour et à générer à chaque fois un modèle avec les variables restantes puis un modèle avec la seule variable écartée.

Tableau 3: Validité du test de Maxent suivant les valeurs de l'AUC

Interprétations	Valeurs
Excellente	1,00 > AUC > 0,90
Bonne	0,80 < AUC < 0,90
Acceptable	0,70 < AUC < 0,80
Mauvaise	0,60 < AUC < 0,70
Invalide	0,50 < AUC < 0,60

Analyse spatiale et cartographie

Les résultats issus de la modélisation avec MaxEnt ont été importés dans le logiciel ArcGis 10.1 pour spatialiser les différents habitats de *B. aegyptiaca* en fonction des probabilités logistiques d'occurrence. À cet effet, trois classes d'habitat ont été définies en fonction des probabilités logistiques d'occurrence: (i) habitat très favorable ($P > 0,6$), (ii) habitat moyennement favorable ($P = 0,4-0,6$) et (iii) habitat peu favorable ($P = 0,01- 0,4$). De même, l'outil d'analyse spatiale d'ArcGis 10.1 a permis de calculer la superficie de chaque type d'habitat. À partir de ces superficies calculées, la tendance de chaque type d'habitat (proportion de perte ou de gain) a été estimée. Pour évaluer la capacité actuelle et future des aires protégées du Niger à conserver *B. aegyptiaca*, les résultats de chaque analyse ont été superposés aux cartes des aires protégées. Ces cartes des aires protégées du Niger ont été extraites de la carte globale du réseau mondial des aires protégées (UNEP-WCMC et IUCN, 2020) (Tableau 4, Figure 3).

Tableau 4: Superficie des aires protégées du Niger

Aires protégées	Superficie (Km ²)
Parc W du Niger	2200
Réserve partielle de faune de Dosso	3065
Réserve totale de faune de Tamou	777
Réserve totale de faune de Gadbdéji	760
Réserve naturelle nationale de Termit et Tin-Toumma	97000
Réserve naturelle de l'Air et du Ténééré	77360

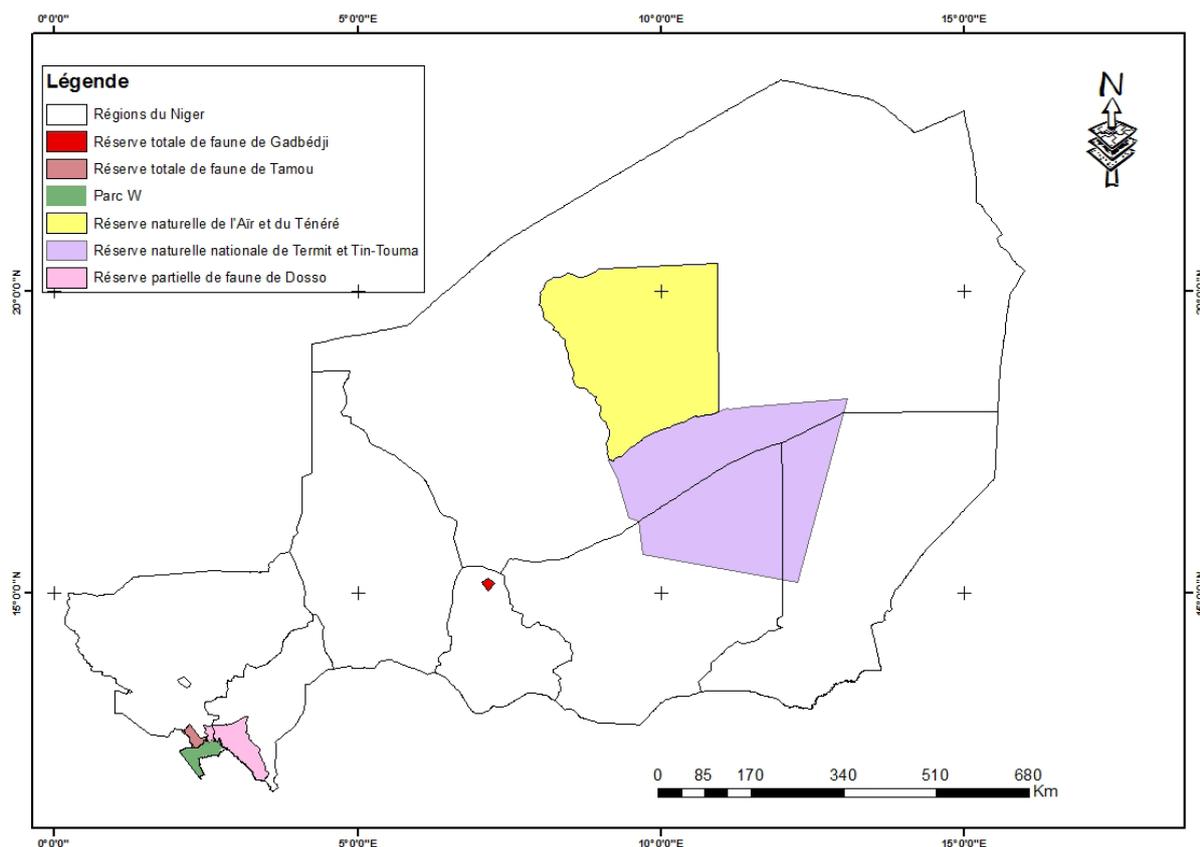


Figure 3: Localisation des aires protégées du Niger

RÉSULTATS

Contribution des variables environnementales et validation du modèle pour *B. aegyptiaca*

Sept (7) variables environnementales sur les dix-neuf (19) ont été retenues après le test de corrélation pour la modélisation de distribution de *B. aegyptiaca*. Les précipitations du trimestre le plus froid (BIO19) suivies par les précipitations de la période la plus humide (BIO13) sont les variables environnementales ayant plus contribué à la prédiction du modèle (Tableau 5). Le test de Jackknife confirme la contribution au modèle de la variable «précipitations du trimestre le plus froid» avec le gain le plus élevée lorsqu'elle est utilisée isolément dans l'analyse (Figure 4). Ainsi, en termes d'importance de permutation, la variable «précipitation du trimestre le plus froid» provoque la réduction de 55,6 % du pouvoir prédictif du modèle et la variable «isothermalité» le réduit à 16,4 % (Tableau 4). Le résultat d'évaluation de l'indice AUC (0,939) montre une bonne performance du modèle dans la prédiction de l'habitat favorable à *B. aegyptiaca*.

Distribution actuelle de *B. aegyptiaca* au Niger

Les résultats de la modélisation de distribution de *B. aegyptiaca* ont montré que sous les conditions climatiques actuelles, près de 67 % du territoire national nigérien constitue un habitat très favorable pour l'espèce (Figure 5A). Cet habitat très favorable au développement de *B. aegyptiaca* est essentiellement compris entre 12° et 7° de latitude Nord, ce qui correspond à presque toutes les zones climatiques du Niger. L'habitat moyennement favorable et l'habitat peu favorable à l'espèce se situent essentiellement dans le climat saharien (entre 17° et 20° de latitude Nord).

Le modèle climatique actuel montre que seul 16,2 % de la superficie du territoire nigérien constitue un habitat non favorable à *B. aegyptiaca* soit 205 536 Km².

Distribution future de *B. aegyptiaca* à l'horizon 2050 sous l'effet des différents scénarios climatiques

Selon les projections bioclimatiques du modèle CCCMA, *B. aegyptiaca* perdra près de 7,55% de son habitat qui est actuellement très favorable à l'horizon 2050 (Tableau 6, Figure 5B). Cet habitat sera essentiellement converti en habitat moyennement favorable (Figure 5B). Les modèles CSIRO et HadCM3 donnent des tendances similaires avec une réduction respectivement de 2,44 et 2,66 % de l'habitat très favorable et une extension de l'habitat moyennement et peu favorable (Figures 5C et 5D). La réduction de l'habitat très favorable au développement de *B. aegyptiaca* pour les trois modèles climatiques (CCCMA, CSIRO et HadCM3) à l'horizon 2050 sera essentiellement observée dans la partie Nord-est du pays entre 15° et 21° de latitude Nord (Figures 5B, 5C et 5D).

Aires protégées et conservation de *B. aegyptiaca* au Niger

La dynamique des habitats favorables de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées terrestres du Niger et leur efficacité à la conservation de l'espèce sous les conditions climatiques actuelles et futures a été analysée (Tableau 7, Figures 6, 7, 8 et 9). Dans le parc W situé au sud-ouest du pays, c'est l'habitat moyennement favorable sous les conditions climatiques actuelles qui sera converti en habitat peu favorable à 10,8 % (CCCMA), à 70 % (CSIRO) et à 25 % (HadCM3) à l'horizon 2050 (Figures 6A, 7A, 8A et 9A). Sous le climat actuel, 84,2 % de la superficie de

Tableau 5: Variables bioclimatiques utilisées et leurs contributions au modèle

Code	Variables bioclimatiques	Contribution (%)	Importance de la permutation (%)
BIO19	Précipitations du trimestre le plus froid	89,1	55,6
BIO13	Précipitations de la période la plus humide	3,7	1,3
BIO10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	2,8	13,0
BIO3	Isothermalité (BIO1/BIO7) * 100	1,7	16,4
BIO5	Température maximale de la période la plus chaude	1,4	5,4
BIO15	Saisonnalité des précipitations (Coefficient de variation)	0,9	7,6
BIO11	Température moyenne du trimestre le plus froid	0,5	0,6

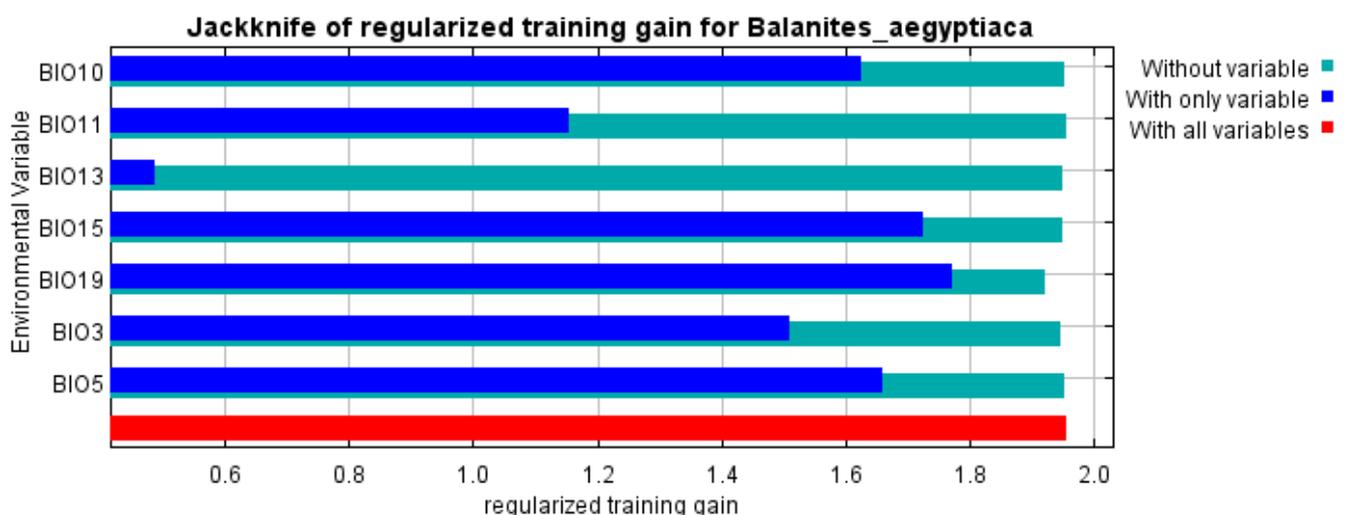


Figure 4: Résultat du test de Jackknife sur la contribution des modèles

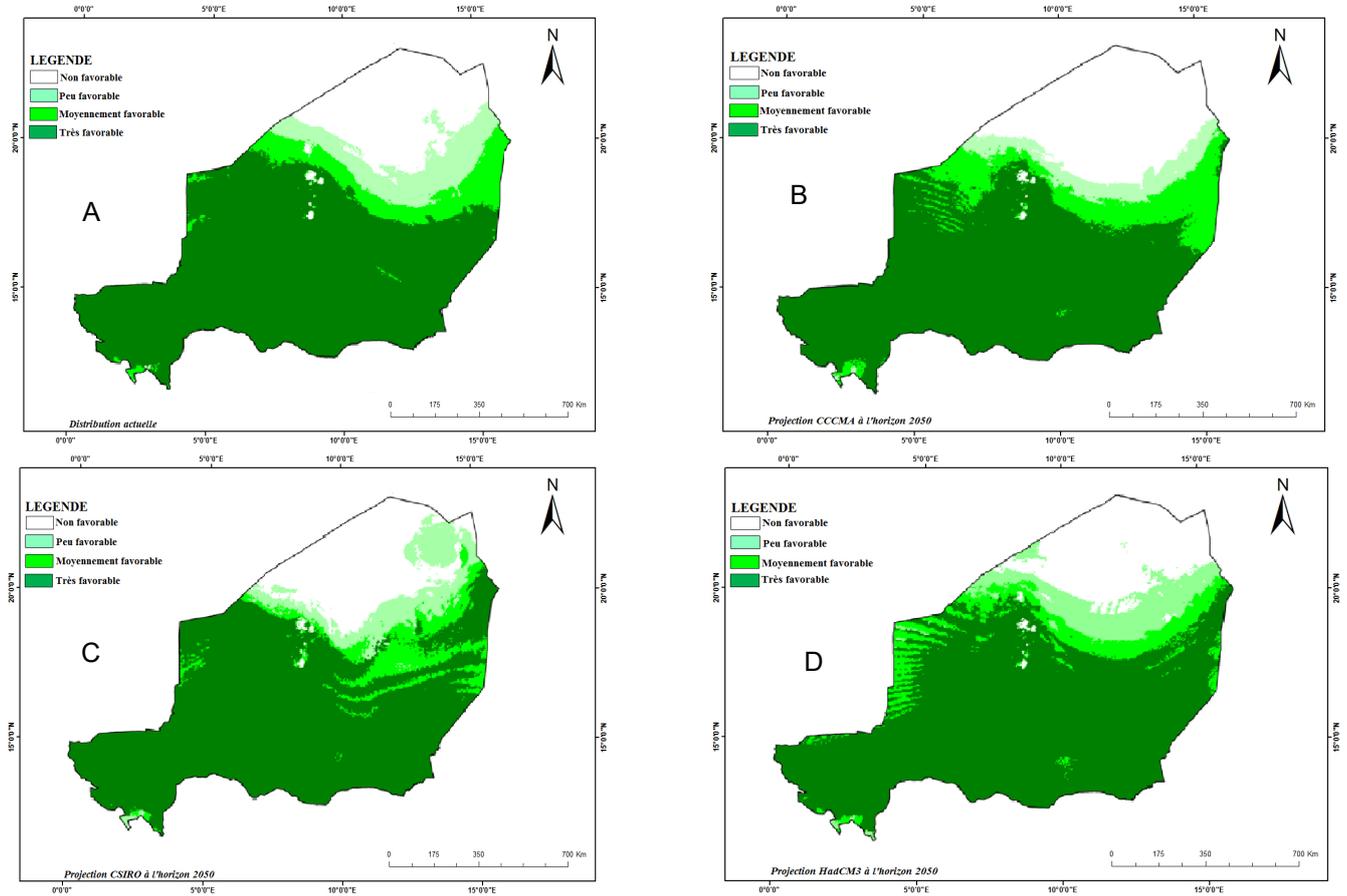


Figure 5: (A) Distribution de *B. aegyptiaca* sous conditions climatiques actuelles au Niger, (B) à l’horizon 2050 sous le modèle CCCMA, (C) à l’horizon 2050 sous le modèle CSIRO et (D) à l’horizon 2050 sous le modèle HadCM3

Tableau 6: Dynamique des aires favorables à la conservation de *B. aegyptiaca* au Niger

Modèles climatiques	Habitat très favorable		Habitat moyennement favorable		Habitat peu favorable	
	Superficie (km ²)	Tendance (%)	Superficie (km ²)	Tendance (%)	Superficie (km ²)	Tendance (%)
Présent	858744	-	95729	-	106991	-
CCCMA	763016	-7,55	225244	+10,22	84467	-1,78
CSIRO	827773	-2,44	123884	+2,22	113185	+0,49
HadCM3	824958	-2,66	137962	+3,33	143593	+2,89

Tableau 7: Dynamique des aires favorables à la conservation de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées du Niger

Aires protégées	Modèles climatiques	Habitat très favorable		Habitat moyennement favorable		Habitat peu favorable	
		Superficie (km ²)	Tendance (%)	Superficie (km ²)	Tendance (%)	Superficie (km ²)	Tendance (%)
Parc W	Présent	238	-	1742	-	220	-
	CCCMA	202	-1,67	1540	-9,16	458	+10,83
	CSIRO	73	-7,50	367	-62,50	1760	+70,00
	HadCM3	202	-1,67	1228	-23,33	770	+25,00
Réserve partielle de faune de Dosso	Présent	2580	-	281	-	204	-
	CCCMA	1277	-42,50	1481	+39,17	306	+3,34
	CSIRO	1890	-22,50	894	20,00	281	+2,50
	HadCM3	1916	-21,66	741	+15,00	409	+6,67
Réserve Totale de faune de Tamou	Présent	719	-	58	-	0	-
	CCCMA	725	+0,84	52	-0,84	0	-
	CSIRO	745	+3,33	32	-3,33	0	-
	HadCM3	772	+6,83	5	-6,83	0	-
Réserve totale de faune de Gadbé-dji	Présent	760	-	0	-	0	-
	CCCMA	760	-	0	-	0	-
	CSIRO	760	-	0	-	0	-
	HadCM3	760	-	0	-	0	-
Réserve naturelle nationale de Termit et Tin-Toumma	Présent	78621	-	14295	-	4084	-
	CCCMA	72495	-6,32	22865	+10,53	0	-
	CSIRO	62284	-16,84	33695	+20	1021	-3,16
	HadCM3	92405	+14,05	4595	-10,00	0	-
Réserves naturelles de l’Air et du Ténéré	Présent	32980	-	21579	-	13843	-
	CCCMA	24429	-11,00	14658	-8,95	13436	-0,53
	CSIRO	22801	-13,14	6922	-18,95	16286	+3,16
	HadCM3	28501	-5,79	21172	-0,53	22394	+11,05

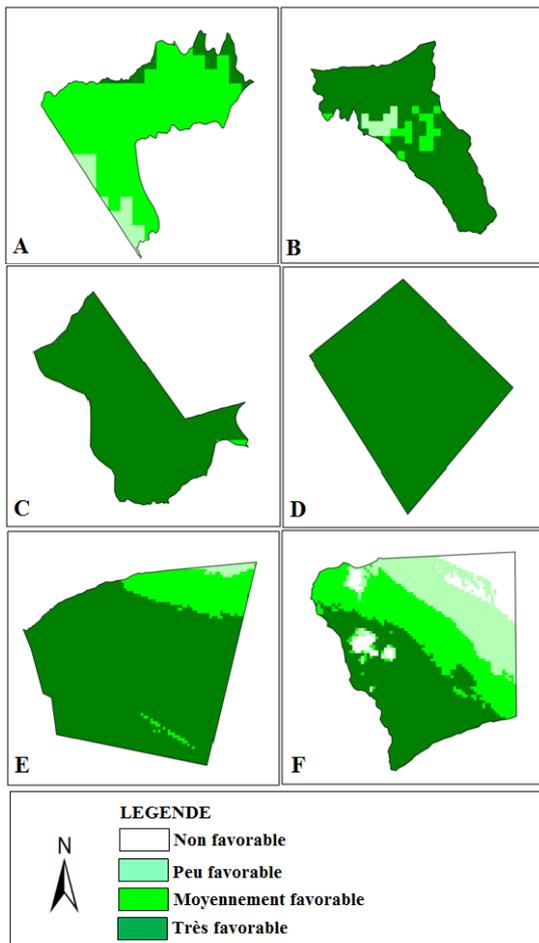


Figure 6: Distribution de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées du Niger sous les conditions climatiques actuelles

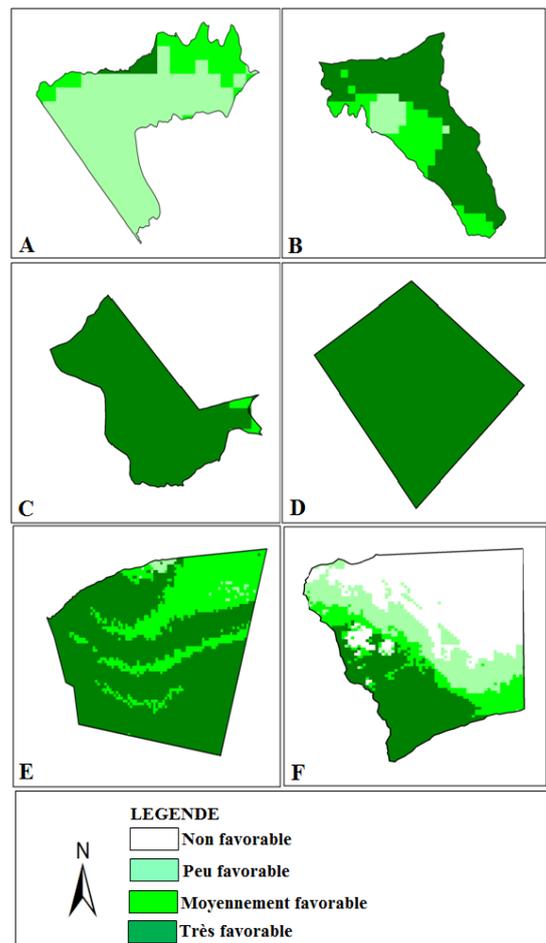


Figure 8: Distribution de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées du Niger à l'horizon 2050 sous modèle CSIRO

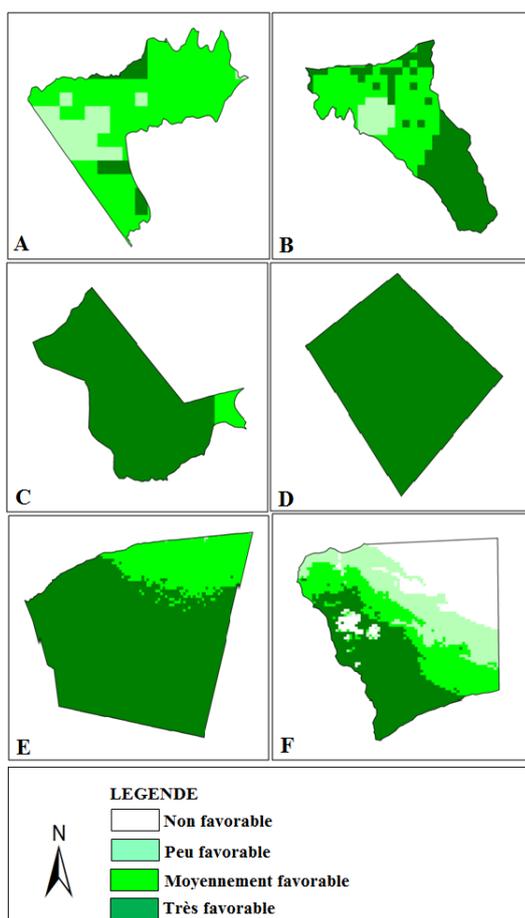


Figure 7: Distribution de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées du Niger à l'horizon 2050 sous modèle CCCMA

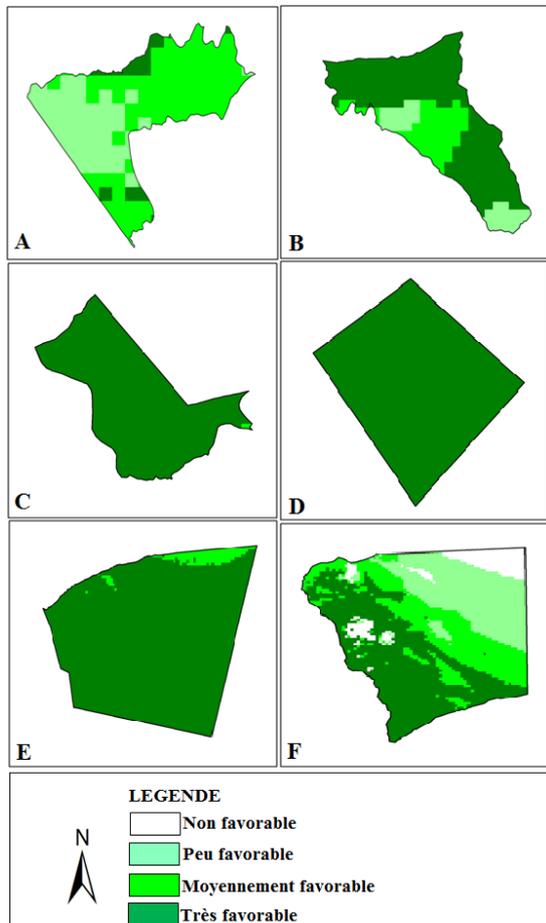


Figure 9: Distribution de *B. aegyptiaca* dans les aires protégées du Niger à l'horizon 2050 sous modèle HadCM3

la Réserve partielle de faune de Dosso est très favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* soit 2580 Km² (Figure 6B), mais les projections à l'horizon 2050 montrent une réduction de cette superficie très favorable allant de 21,7 à 42,5 % pour les trois modèles (Figures 7B, 8B et 9B). La Réserve totale de faune de Gadbedji située au centre-sud du Niger montre une grande efficacité à la conservation de l'espèce sous les conditions climatiques actuelles et futures. Tous les modèles ont montré que l'ensemble de la superficie de cette aire protégée constitue un habitat très favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* (Figures 6D, 7D, 8D et 9D). Quant à la Réserve totale de faune de Tamou (RTFT), les conditions climatiques actuelles et futures (CCCMA, CSIRO et HadCM3) ont montré que plus de 90 % de la superficie de cette réserve est très favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* (Figures 6C, 7C, 8C et 9C). Le scénario climatique actuel montre que 81,0 % de la superficie de la Réserve naturelle nationale de Termit et Tin-Toumma (RNNTT) est très favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* (Figure 6E). D'après les projections avec les modèles CCCMA et CSIRO, une réduction de cet habitat très favorable au profit de l'habitat moyennement et peu favorable sera observée dans cette aire protégée (Figures 7E et 9E). Le modèle HadCM3 prédit une augmentation de 14,0 % de la superficie de l'habitat très favorable à l'horizon 2050 dans la Réserve naturelle nationale de Termit et Tin-Toumma (Figure 9E). Dans la Réserve naturelle de l'Aïr et du Ténéré située plus au nord du pays, sous les conditions climatiques actuelles, seuls 42,6 % de la superficie de cette aire protégée est très favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* (Figure 6F). Cet habitat très favorable laissera place à l'habitat peu et non favorable à la conservation de *B. aegyptiaca* selon les projections avec les trois modèles climatiques à l'horizon 2050 (Figures 7F, 8F et 9F).

DISCUSSION

La modélisation des niches écologiques a souvent été citée comme un puissant outil pour analyser la répartition spatiale actuelle et future des espèces et prédire l'impact des changements climatiques sur leur distribution (Van Zonneveld *et al.*, 2009). L'approche utilisée dans la présente étude pour la cartographie des habitats favorables de *B. aegyptiaca* est celle d'entropie maximale (MaxEnt) utilisée par plusieurs auteurs dans la distribution des espèces en Afrique de l'Ouest (Abdou *et al.*, 2016; Asseh *et al.*, 2019; Toko, 2020; Adjonou *et al.*, 2020; Dimobe *et al.*, 2020). L'avantage de cette approche est sa facilité à accepter pour la modélisation des données quantitatives et qualitatives. En plus, des algorithmes déterministes efficaces ont été développés pour garantir une convergence vers la distribution optimale par le modèle (Elith *et al.*, 2011). Néanmoins, le modèle présente certaines limites dont entre autres, la forte auto-corrélation spatiale dans les données d'observation qui peut introduire des biais dans les prédictions (Peck *et al.*, 2010). En plus, MaxEnt n'intègre aucun paramètre démographique (fécondité, mortalité, croissance) et dynamique des populations (dispersion, compétition inter ou intraspécifique) (Elith *et al.*, 2006; Schwartz, 2012). Or, la capacité de dispersion des espèces ainsi que leur structure sont des facteurs déterminants dans l'impact potentiel du changement climatique sur leurs habitats (Loughbègnon,

2016). La qualité du modèle à prédire la distribution de *B. aegyptiaca* a été évaluée à travers la statistique AUC (Area Under Curve). La valeur obtenue (0,939) témoigne que le modèle est statistiquement fiable à prédire la distribution de l'espèce au Niger (Swets, 1988; Phillips *et al.*, 2006).

La plus forte contribution des précipitations du trimestre le plus froid et de la période la plus humide et de la température du trimestre le plus chaud dans la distribution de *B. aegyptiaca* au Niger confirment les résultats des études antérieures (Lyam *et al.*, 2012; Agbo *et al.*, 2019). En effet, ces auteurs ont montré que la température et les précipitations sont les facteurs prépondérants dans la distribution des espèces végétales et de la végétation. La réduction de près 72% du pouvoir prédictif observée lorsque la variable précipitations du trimestre le plus froid et la variable Isothermalité sont permutées traduit le rôle déterminant de la précipitation et de la variation de la température dans dynamique spatio-temporelle des habitats de *B. aegyptiaca*. Ces deux variables agissent directement dans la distribution de *B. aegyptiaca* et pourraient constituer des paramètres climatiques majeurs dans l'écologie de l'espèce.

Prédire comment les espèces pourraient réagir aux changements climatiques constitue des indicateurs précieux pouvant servir de base pour le développement des stratégies de conservation pour une utilisation durable des ressources végétales (Tosso, 2013). Les modèles de prédiction utilisés à l'horizon 2050 ont montré que les habitats très favorables au développement de *B. aegyptiaca* seront réduits au profit des habitats moyennement, peu ou non favorables. Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs auteurs qui ont utilisé ces mêmes modèles du scénario d'émission A2 pour prédire la distribution de niche potentielle des espèces végétales (Bourou, 2012; Fandohan *et al.*, 2013; Zakari *et al.*, 2017). Mais, des tels résultats ne devraient pas être attendus particulièrement avec les modèles CCCMA et HadCM3 qui prédisent une augmentation des précipitations à l'horizon 2050. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les modèles montrent des désaccords et incertitudes sur l'évolution des précipitations en Afrique de l'Ouest (Fandohan *et al.*, 2013). La distribution de *B. aegyptiaca* sous les différents scénarios climatiques actuels et futurs est moins étendue que celle suggérée par Bonnet *et al.* (2008). Ces auteurs ont montré que l'espèce est distribuée sur l'ensemble du territoire nigérien.

En considérant l'évolution des habitats avec les différents scénarios climatiques futurs (CCCMA, CSIRO et HadCM3), on peut dire que les changements climatiques ne constitueront qu'une menace mineure à la survie de *B. aegyptiaca* au Niger. Toutefois, ces modèles de prédiction utilisés ont été très critiqués compte tenu de leurs faiblesses quant à prédire l'impact des changements climatiques sur la répartition géographique des espèces. Au nombre de ces faiblesses, on peut citer les incertitudes liées aux modèles utilisés, les difficultés à paramétrer les interactions écologiques, les réponses idiosyncratiques individuelles des espèces aux changements climatiques, les limitations de disséminations spécifiques à chaque espèce, la plasticité des limites physiologiques et les réponses adaptatives des agents disséminateurs (Schwartz, 2012). En plus, le scénario d'émission A2 utilisé pour la projection future décrit un monde avec une population à fort taux de croissance (Williams *et al.*, 2007). Ce scénario ne prédit pas l'impact

des activités humaines particulièrement le changement d'occupation du sol en lien avec la croissance démographique, ce qui veut dire la réduction de l'habitat très favorable de *B. aegyptiaca* à l'horizon 2050 pourrait être beaucoup plus importante que celle obtenue avec les trois modèles dans la présente étude.

Avec la pression de plus en plus croissante sur les ressources naturelles et les espèces ligneuses en particulier, les aires protégées constituent les seuls espaces qui garantissent la conservation de la biodiversité. Bien que *B. aegyptiaca* soit classée parmi les espèces à préoccupation mineure dans la liste rouge de l'ICUN (BGCI et IUCN, 2019), l'espèce bénéficie d'un statut d'espèce protégée au Niger. Des mesures de protection dans les aires protégées vont contribuer et garantir une conservation durable de cette espèce. Les aires protégées du Niger, en fonction de leur situation géographique dans le territoire ont montré leur efficacité dans la conservation de *B. aegyptiaca*. Quel que soit les scénarios climatiques, la réserve de faune de Gadbedji située en zone sahélienne et la réserve partielle de faune de Tamou située en zone soudano-sahélienne se sont montrées plus efficace pour la conservation de *B. aegyptiaca*. Ces résultats confirment la distribution de *B. aegyptiaca* en zones Soudano-sahélienne et sahélienne en Afrique de l'Ouest et de l'Est (Arbonnier, 2000; Eyog et al., 2000).

CONCLUSION

Cette étude a permis de faire des prédictions des distributions sur les habitats actuels et futurs de *B. aegyptiaca*. L'utilisation de l'algorithme d'entropie maximale montre une grande performance dans la prédiction précise de la répartition de cette espèce. La modélisation avec les conditions climatiques actuelles montre que 67,77% du territoire nigérien constitue un habitat très favorable au développement de *B. aegyptiaca*. Tous les scénarios climatiques futurs utilisés ont montré que la superficie de l'habitat très favorable au développement de l'espèce sera séduit à l'horizon 2050. Cette réduction concerne essentiellement le Nord-est du pays. L'étude a également montré le rôle que peut jouer les aires protégées dans la conservation de cette espèce. Les aires qui conservent et qui conserveront le mieux l'espèce sont la Réserve totale de faune de Tamou et Réserve totale de faune de Gadbedji. Cette étude constitue un outil efficace pour la conservation, la surveillance et la gestion des peuplements naturels de *B. aegyptiaca* dans le contexte du changement climatique.

RÉFÉRENCES

- Abdou H. M. K., Rabiou H., Abdou L., Ibrahim M. M., Mahamane A., (2020). Connaissances ethnobotaniques et importance socioculturelle de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. dans le Centre-Est du Niger. *Afrique Science*, 16: 239-252.
- Abdou L., Diouf A., Inoussa M.M., Moussa M. B., Abdourahmane I. S. et Mahamane A., (2016). Modeling the Geographic Distribution of *Prosopis africana* (G. and Perr.) Taub. in Niger. *Environment and Natural Resources Research*, 6: 136-144.
- Abdourhamane H., Morou B., Mahamane A., Saadou M., Issaka A., (2012). Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres dans le complexe des forêts classées de Dan kada Dodo et de Dan Gado (région de Maradi, Niger). *Journal des Sciences de l'Environnement*, 1: 16-26.
- Adjonou K., Abotsi K. E., Segla K. N., Rabiou H., Houetcheignon T., Sourou K.N. B., Johnson B. N., Ouinsavi C. A. I. N., Kokutse A.D., Mahamane A., Kokou K., (2020). Vulnerability of African Rosewood (*Pterocarpus erinaceus*, Fabaceae) natural stands to climate change and implications for silviculture in West Africa. *Heliyon* 6:e04031.
- Agbo R. I., Idohou R., Vihotogbé R., Missihou A. A., Dagba R. A., Assogbadjo A. E., Agbangla C., (2019). Spatio-temporal dynamics of suitable habitats for *Detarium microcarpum* Guill. & Perr. (Caesalpiniaceae), a priority food tree species in Benin (West Africa). *Modeling Earth Systems and Environment*, 5:595–604.
- Asseh E. E., Aké-Assi E., Koffi K. J., (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: 676-692.
- Beka R. G., (2011). Une alternative végétale en fromagerie: Préparation d'un extrait coagulant à partir des fruits de *Balanites aegyptiaca*; Étude biochimique et application technologique. Thèse de doctorat, Université de Lille 1 (France) et Université de Ngaoundéré (Cameroun), 130 p.
- Boko M., Niang I., Nyong A. et Vogel C., (2007). Africa Climate change (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK; 433-467.
- Bonnet P., Arbonnier M., Grard P., (2008). Outil graphique d'identification V.1.0. CIRAD.
- Botanic Gardens Conservation International (BGCI) & IUCN Global Tree specialist Group, (2019). *Balanites aegyptiaca* (amended version of 2019) assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2019.
- Bourou S., (2012). Étude éco-physiologique du tamarinier (*Tamarindus indica* L.) en milieu tropical aride. Thèse de Doctorat (PhD), Faculté des Sciences en Bio-Ingénieries, Université de Gand, Belgique, 159p.
- Cramer J. M., Mesquita R. C. C. et Williamson G. B., (2007). Forest fragmentation differentially affects seed dispersal of large and small-seeded tropical trees. *Biological Conservation*, 137: 415-423.
- Dimobe K., Ouédraogo A., Ouédraogo K., Goetze D., Stein K., Schmidt M., Nacoulma B. M. I., Gnoumou A., Traoré L., Porembski S. and Tchiombiano A., (2020). Climate change reduces the distribution area of the shea tree (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn) in Burkina Faso. *Journal of Arids Environments*, 181:104237.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y. E., Yates, C. J., (2011). A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and distributions*, 17: 43-57.
- Fandohan B., Gouwakinnou G. N., Fonton N.H., 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. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 17(3), 450-462.

- Faye E., (2010). Diagnostic partiel de la flore et de la végétation des Niayes et du Bassin arachidier au Sénégal: application de méthodes floristique, phytosociologique, ethnobotanique et cartographique. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique, Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 253p.
- Giday M., (2001). An ethnobotanical study of medicinal plants used by Zay people in Ethiopia. *CBM: Skriftserie*, 3: 81-99.
- Gonzalez P., (2001). Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate Research*, 17: 217-228.
- Guisan A. et Thuiller W., (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993-1009.
- Guisan A. & Zimmermann N. E., (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135: 147-186.
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G. et Jarvis A., (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P & Jarvis A., (2006). The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces. Version 1.3. <http://biogeo.berkeley.edu>
- Hill J. L. et Curran P.J., (2005). Fragment shape and tree species composition in tropical forest: a landscape level investigation. *African Journal of Ecology*, 43: 35-43.
- IPCC, (2007). Climate change: synthesis report. New York, USA: Cambridge University Press.
- Jiménez-Valverde A., Lobo J. M. & Hortal J., (2008). Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modeling. *Diversity and Distributions*, 14: 885-890.
- Karim S., Zaman Allah M., Morou B., Mahamane A. et Saadou M., (2012). Land Cover/Use Dynamics and Vegetation Characteristics in the Rural District of Simiri (Tillabery Region, Niger), *The Functioning of Ecosystems*, ISBN: 978-953-51-0573-2.
- Lougbègnon O. T., (2016). Écologie et connaissances ethnozoologiques de quelques espèces d'oiseaux gibiers menaces des écosystèmes du sud du Bénin. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 132p.
- Lyam P. T., Adeyemi T. O. et Ogundipe O. T., (2012). Distribution Modeling of *Chrysophyllum Albidum* G. Don in South-West Nigeria. *Journal of Natural & Environmental Sciences*, 3: 7-14.
- Mama A., Bamba I., Sinsin B., Bogaert J. et De Cannière., (2014). Déforestation, savanisation et développement agricole des paysages de savanes-forêts dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Bois et forêts des tropiques*, 322: 65-75.
- Morou B., Ambouta J-M. K., Karim S., Mahamane A., Saadou M., Zaman Allah M. et Sinsin B., (2011). Etat de dégradation de l'habitat de la girafe (*Giraffa camelopardalis* peralta Linnaeus, 1758) au Niger. *Sécheresse*, 22: 57-64.
- Peck M., Thorn J., Mariscal A., Baird A., Tirira D. & Kniveton, D., (2010). Focusing conservation effort for the critically endangered Brown-headed Spider Monkey (*Ateles fusciceps*) using remote sensing, modeling, and playback survey methods. *Intern. J. Primatol.*, 32: 134-148.
- Phillips S. J., Anderson R. P., et Schapired, R. E., (2006). Maximum Entropy Modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Sadda A. S., Nouhou S. J., Issoufou H., B-H., Karim S., Saïdou A. A., Oumarou M. I., Diouf A., (2018). Modélisation prédictive d'un parasite des variétés de niébé au Niger: cas du *Striga gesnerioides* (Willd.) Vatke. 2^{ème} rencontre Francophone sur les Légumineuses, 17 et 18 Octobre à Toulouse (France).
- Schwartz M.W., (2012). Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biol. Conserv.*, 155: 149-156.
- Toko I. I., (2020). Spatial distribution and ecological niche modelling of *Triplochiton scleroxylon* K. Schum., in the Guineo-Congolese region of Benin (West Africa). *Int. J. Biol Chem. Sci.*, 14:32-44.
- UNEP- WCMC, (2020). Protected area profile from the world database of protected areas. www.protectedplanet.net.
- Van Zonneveld M., Koskela J., Vinceti B., Jarvis A. (2009). Impact of climate change on the distribution of tropical pines in Southeast Asia. *Unasylva*, 231/232: 24-29.
- Wezel A., (2004). Local knowledge of vegetation changes in Sahelian Africa - implications for local resource management. In The Sahel Current politics in West Africa- The use of local knowledge in applied research-Participation in project planning and capacity building. Serein occasional paper 17. Lykke A.M., Due M.K., Kristensen M. and, Nielsen I. (eds.) pp. 37-51.
- Williams J. W., Jackson S. T., Kutsbach J. E., (2007). Projected distribution of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104: 5738-5742.
- Young N., Carter L. et Evangelista P., (2011). A MaxEnt Model v3.3.3e Tutorial (ArcGIS v10). Laboratory at Colorado State University and the National Institute of Invasive Species Science. 30p.
- Zakari S., Arouna O., Imorou I. T. Yabi I. et Tente B. A. H., (2017). Impact des changements climatiques sur la distribution de deux espèces ligneuses fourragères (*Khaya senegalensis* et *Azelia africana*) dans le bassin versant de la Sota, Bénin. *Afrique Science*, 13: 1-14.