

LE RÉSEAU D'AIRES PROTÉGÉES BÉNIN-TOGO ASSURE-T-IL LA CONSERVATION DE *THUNBERGIA ATACORENSIS* (ACANTHACEAE)?

Titre court : Conserver *Thunbergia atacorensis*

Adané Belarmain Fandohan^{1,2,3}, Jacob Koundounon Moutouama⁴, Samadori S. Honoré Biaou⁴, Gérard Nounagnon Gouwakinnou^{2,5}, Cossi Aristide Adomou^{2,6}

RESUME

La conservation des espèces menacées et/ou rares est primordiale car en théorie elles courent un plus grand risque d'extinction. Cependant, la capacité des aires protégées à conserver ces espèces est souvent peu documentée. Par ailleurs la connaissance des dynamiques spatio-temporelles que les changements climatiques pourraient induire sur leurs niches écologiques est assez limitée. Le principe de « maximum entropie » combiné au SIG a été utilisé pour modéliser la niche écologique de *Thunbergia atacorensis*, et l'impact potentiel des changements climatiques sur la répartition géographique future (horizon 2055) de ses habitats favorables. Les modèles ont été utilisés pour évaluer la capacité du réseau d'aires protégées locales à conserver l'espèce. Pour ce faire 365 coordonnées de présence ont été collectées et combinées aux données bioclimatiques et géomorphologiques actuelles et futures. La majeure partie de la niche écologique modélisée de *T. atacorensis* se trouve hors du réseau d'aires protégées et couvre moins de 1% de la superficie du milieu d'étude. Cela suggère l'inefficacité du réseau d'aires protégées de la zone à conserver l'espèce. Sous les projections climatiques futures pour les forçages radiatifs RCP 4.5 et RCP 8.5, les modèles indiquent une importante dynamique spatiale des habitats favorables à l'espèce, du Bénin vers le Togo. Une élévation modérée des températures (RCP4.5) aurait un effet positif sur la probabilité d'occurrence de l'espèce contrairement à une augmentation plus élevée (RCP 8.5). Cette étude confirme la nécessité de prioriser la zone de la chaîne de montagne de l'Atacora (qui apparaît comme le principal habitat de l'espèce) dans le cadre d'une éventuelle extension du réseau d'aires protégées de la zone d'étude.

Mots clés : *Thunbergia atacorensis*, MaxEnt, modélisation, niche écologique, changements climatiques, Chaîne de l'Atacora.

ABSTRACT

Does the Benin-Togo protected areas network ensure conservation of *Thunbergia atacorensis* (Acanthaceae)?

Conservation of endangered or rare species is important because in theory they are the most threatened by extinction risks. However, the effectiveness of protected areas to preserve them is often poorly documented. In addition, knowledge on the spatio-temporal effects of climate change on the breadth of their niches is limited. The Maximum entropy principle combined with GIS was used to model the ecological niche of *Thunbergia atacorensis* and how climate change could affect the future geographical range (2055) of its suitable habitats. Models were used to assess the effectiveness of the local protected areas network to conserve the species. To this end, 365 presence records were collected and combined with current and future bioclimatic and geomorphological data of the study area. Under radiative forcing RCP 4.5 and RCP 8.5, the models suggested important spatial dynamics of suitable habitats for this species from Benin towards Togo. A moderate temperature rise (RCP4.5) would favor relative occurrence rate of the species in contrast to greater increases (RCP8.5). There was nearly no overlap between the protected areas network and the modeled ecological niche of the species, which covered less than 1% of the study area. This would suggest the local protected areas network to be ineffective in conserving this species. This study evidenced the need for prioritizing the Atacora Mountain Chain (which appeared to be the target species' main habitat) if an extension of the local bio-reserve system is to be considered.

Key words: *Thunbergia atacorensis*, MaxEnt, ecological niche modeling, climate change, Atacora Mountain Chain

¹Unité de Foresterie Agroforesterie et Biogéographie, Ecole de Foresterie et Ingénierie du Bois, Université d'Agriculture de Kétou, BP 43, Kétou, Bénin ;

²Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey Calavi, 01 BP 526, Cotonou, Bénin ;

³Laboratoire de Biomathématiques et d'Estimations Forestières, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey Calavi, 01 BP 526, Cotonou, Bénin ;

⁴Laboratoire d'Ecologie, de Botanique et de Biologie Végétale, Faculté

d'Agronomie, Université de Parakou, 03 BP 125, Parakou, Bénin ;

⁵Ecole Nationale Supérieure d'Aménagement et de Gestion des Aires Protégées, Université de Parakou, BP 287, Kandi, Bénin.

⁶Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 4521 Cotonou, Bénin.

Auteur correspondant : bfandohan@gmail.com, belarmain_fandohan@uakbenin.org

Introduction

Une grande partie de l'impressionnante biodiversité de l'Afrique est à ce jour conservée dans les aires protégées au moyen d'un très vaste système de différents types de bio-réserves. Dans la plupart des cas, les espèces animales à forte valeur écotouristique étaient les principales cibles de la conservation (Fandohan *et al.*, 2011). Peu d'intérêt

avait donc été accordé aux espèces végétales, fussent-elles rares ou endémiques. Il urge alors d'évaluer l'efficacité des réseaux d'aires protégées à conserver les espèces végétales, notamment celles rares, endémiques ou dont l'aire de distribution est assez réduite (Kumar *et al.*, 2009) (exemple, *Thunbergia atacorensis*, *Bittneria dahomensis*). Par ailleurs, les changements climatiques sont aujourd'hui

reconnus comme l'une des principales menaces à la survie des espèces et à l'intégrité des écosystèmes partout dans le monde. Il est probable que les fluctuations des variables climatiques telles que les précipitations et la température aient une incidence sur la diversité biologique et sur la répartition géographique des habitats favorables aux espèces (IPCC, 2007). En Afrique, 25 à 42% des espèces végétales pourraient être menacées d'extinction du fait d'une perte de 81 à 97% des habitats favorables d'ici 2085 (IPCC, 2007). D'après les projections, 20 à 30% des espèces végétales et animales feront face à un plus grand risque d'extinction si le réchauffement global excède 1,5° à 2,5°C dans cette région (Busby *et al.*, 2010). Ces changements pourraient réduire la capacité des aires protégées à conserver les espèces.

En Afrique sub-saharienne, les investigations sur l'impact potentiel des changements climatiques sur l'efficacité des aires protégées à conserver les espèces rares, endémiques ou sur la liste rouge de l'union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) demeurent assez rares. Or, ces changements représentent un stress fondamentalement différent des autres stress car jamais par le passé les perturbations d'ordre écologique n'ont remis en cause l'efficacité des réseaux d'aires protégées à conserver des populations représentatives des espèces (Fandohan *et al.*, 2013), ou à couvrir les habitats qui leurs sont favorables. La question fondamentale est : comment ces aires statiques continueront à conserver les espèces concernées ou à leur offrir des habitats favorables, avec la dynamique spatio-temporelle des conditions environnementales (Fandohan *et al.*, 2013) ? Les informations relatives à l'impact potentiel des changements climatiques sur la répartition géographique des habitats favorables à ces espèces s'avèrent donc importantes pour mieux raisonner les choix des zones où elles seront conservées aujourd'hui et dans le futur (Gouwakinnou, 2013).

Diverses méthodes statistiques sont utilisées pour modéliser la distribution des espèces, la distribution des habitats qui leur sont favorables ou encore pour estimer la probabilité de présence/absence d'une espèce donnée à une position géographique donnée (Guisan *et al.*, 2000). MaxEnt (*maximum entropy modeling*) constitue l'un des algorithmes de modélisation susceptibles de générer des informations biogéographiques utiles sur les habitats favorables et ceux non favorables à une espèce d'un point de vue bioclimatique (Phillips *et al.*, 2006). Cependant, cet algorithme a aussi été très critiqué compte tenu de certaines faiblesses quant à prédire l'impact des changements climatiques sur la dynamique spatio-temporelle des habitats favorables aux espèces (Fandohan *et al.*, 2013). 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 (Elith *et al.*, 2006 ; Schwartz, 2012). Malgré ces faiblesses, MaxEnt procurent des informations bioclimatiques très importantes en matière de prise de décisions. Notamment, il peut permettre l'identification de zones potentiellement favorables à la conservation d'une espèce donnée (Schwartz, 2012) ou aider à évaluer l'efficacité d'un système de réseaux d'aires

protégées à conserver une espèce. Des travaux de recherches ont récemment évalué l'efficacité des aires protégées à conserver certains taxa, ex. *Tamarindus indica* (Fandohan *et al.*, 2011), *Sclerocarya birrea* (Gouwakinnou, 2013), le genre *Acacia* (Marshall *et al.*, 2012), ou l'impact des changements climatiques sur la distribution des habitats des espèces (*Adansonia digitata*; Cuni-Sanchez *et al.*, 2011). Cependant, les études ayant combiné les deux approches pour mieux orienter les prises de décision en matière de conservation sont rares sur le continent Africain (Fandohan *et al.*, 2013 ; Padonou *et al.*, 2015). La présente étude se propose alors d'évaluer la capacité du réseau d'aires protégées au Bénin et au Togo à conserver *Thunbergia atacorensis* (Acanthaceae) dans les conditions bioclimatiques actuelle et sous celles projetées à l'horizon 2055, avec les changements climatiques. Spécifiquement, cette étude a pour objectif de : Modéliser la niche écologique actuelle de *T. atacorensis*; Projeter la dynamique spatio-temporelle potentielle des habitats de l'espèce (à l'horizon 2055), imputable aux changements climatiques; Et enfin, faire une analyse de lacune actuelle et future de représentation (*gap analysis*) des habitats favorables à l'espèce dans le réseau Bénin-Togo d'aires protégées. Les questions de recherches suivantes ont été abordées. Quelle est l'étendue des habitats favorables à la conservation de *T. atacorensis* ? Au regard des projections climatiques, quel est l'effet potentiel des changements climatiques sur l'étendue de ces habitats et leur distribution géographique à l'horizon 2055 ? Quelle proportion des habitats favorables à l'espèce est présentement couverte par les réseaux nationaux d'aires protégées et qu'elle pourrait être la situation en 2055 ? Quelles sont les implications des résultats pour l'élaboration de politiques futures de conservation de l'espèce ?

2. Méthodologies

2.1. *Thunbergia atacorensis*

Le genre *Thunbergia* Retz., regroupe des plantes à fleurs de la famille des Acanthaceae, natives de l'Afrique Tropicale, de Madagascar et du Sud de l'Asie. *Thunbergia atacorensis* Akoègninou Lisowski & Sinsin (Photo 1) est une herbe vivace suffrutescente, dressée, de 40-80 cm de hauteur, à petite souche ligneuse souterraine et à tige et feuilles hispides. Elle est typique des galeries forestières. Précédemment dite endémique à la chaîne de l'Atacora au Bénin, elle fut également observée dans l'extension de la chaîne au Togo (Dourma *et al.*, 2012). Aussi fut-elle observée hors de cette chaîne de montagne, par exemple sur le mont Soubakpérou au centre Bénin (Akoègninou *et al.*, 2006). Il serait alors plus commode de la présenter comme endémique aux inselbergs du Bénin et du Togo en attendant des fouilles plus détaillées. Elle est officiellement classée en danger d'extinction sur la liste rouge du Bénin (Neuenschwander *et al.*, 2011). Depuis sa découverte, et bien qu'une étude sommaire ait récemment soupçonné sa présence dans une des aires protégées au Bénin (Assédé *et al.*, 2012), aucune étude n'a évalué l'étendue de sa niche écologique.

2.2. Milieu d'étude

La présente étude a été conduite au Bénin et au Togo. Les deux pays sont situés dans le Dahomey Gap, un corridor d'écosystèmes savaniques interrompant le bloc Ouest Africain de forêts denses sempervirentes (0°-3°E), créé



Photo 1. Pied fleuri de *Thunbergia atacorensis* dans une galerie forestière de la rivière Yarpao (Chaîne de l'Atacora, Nord-Ouest Bénin).

suite aux changements climatiques intervenus au cours de l'Holocène (Salzmann *et al.*, 2005). La collecte de données de terrain a été essentiellement faite au Bénin dans la zone climatique soudanienne (entre les latitudes 11°5' N et 12° 25' N) notamment la chaîne de montagnes de l'Atacora et la zone Soudano-Guinéenne caractérisée par plusieurs inselbergs (entre les latitudes 7°N et 9°N) (Figure 1).

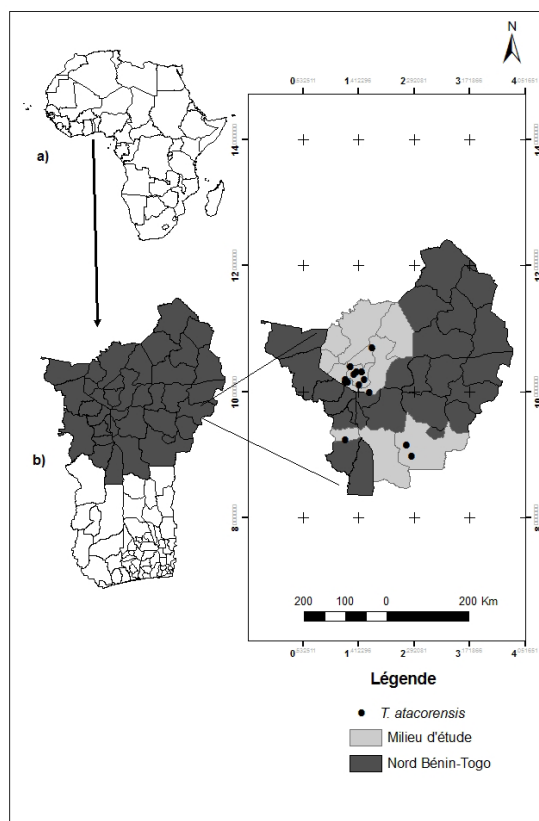


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (a) Afrique ; (b) Bénin-Togo.

2.3. Données

Coordonnées de présence de l'espèce

Les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de présence de *T. atacorensis* ont été enregistrées à partir d'une expédition à l'intérieur des aires protégées et dans les systèmes agroforestiers à travers la chaîne de montagnes de l'Atacora et autres inselbergs de la zone soudanienne. A ces données ont été ajoutée les coordonnées de points de contacts de l'espèce, antérieurement collectés et disponibles à l'Herbier Nationale de Bénin. L'expédition a été faite avec des membres des confréries de chasseurs des principaux villages et /ou sites à l'intérieur de la chaîne de montagnes (notamment, Bondjagou, Kobli, Konkombri, Kouandé, Koussoukouangou, Perma, Tanguieta, Tanougou, Tora et Yarpao). Ces confréries ont une grande réputation en matière de connaissance de la distribution des plantes rares et une longue tradition de collaboration avec nos unités de recherche. Aux données du Bénin, il a été ajouté des informations récentes sur la présence de l'espèce au Togo sur la base des travaux de Dourma *et al.* (2012). Au total, 365 coordonnées de présences de l'espèce ont été utilisées pour la modélisation.

Choix des variables environnementales et des scénarii climatiques

Un grand nombre de variables bioclimatiques sont disponibles sur plusieurs sites web (exemple : <http://www.york.ac.uk/environment/research/kite/resources/>) pour la modélisation de la distribution des espèces ou de leur habitat. Cependant, il est conseillé de réduire la liste à un minimum de variables relativement peu corrélées (ex. $r < 0,70$; Elith *et al.*, 2010) et importante pour l'espèce étudiée. Dans le milieu d'étude, il a été démontré que la distribution des plantes est essentiellement fonction de la disponibilité en eau et du gradient d'aridité (Adomou *et al.*, 2006). Sur cette base, les quatre variables les moins corrélées (test de corrélation de Pearson) et rendant mieux compte du gradient d'aridité ont été sélectionnées : L'évapotranspiration potentielle (pet), la saisonnalité de la température (bio4), l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et la durée de la plus longue saison sèche (llds) (Platt *et al.*, 2015).

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. Pour les projections climatiques futures, le modèle ensemble de circulation régionale « *AFRICLIM 3.0: high-resolution ensemble climate projections for Africa* » a été utilisée. Ce modèle est plus raffiné comparativement aux modèles de circulation globale et se prête mieux notamment aux analyses pour les régions montagneuses et les inselbergs (Platt *et al.*, 2015). Pour ce modèle, il a été utilisé les projections faites pour 2055 sous les scénarii de forçage radiatif RCP 4.5 et RCP 8.5. Le premier scénario stipule une augmentation modérée des émissions de gaz à effet de serre alors que le second

présente une augmentation plus dramatique des émissions (IPCC, 2014). Les autres scénarii (RCP 2.6 et RCP 6.2) n'ont pas été utilisés compte tenu de la faible variation entre les scénarii à l'horizon 2055 pour la zone d'étude (IPCC, 2013). Les couches climatiques utilisées sont celle de résolution 30 seconde (soit une grille de résolution d'approximativement 1 km x 1 km). Aux données bioclimatiques, il a été ajouté les données sur la radiation solaire dans le milieu, compte tenu de l'importance des galeries forestière au creux des inselbergs pour l'espèce (Adomou *et al.*, 2010). La variabilité de la pente (SV) a été utilisée comme indicateur de la radiation solaire. Elle a été calculée à partir des données sur le Modèle Numérique de Terrain (disponible sur le site <http://srtm.csi.cgiar.org/>). L'intégration de cette variable au modèle a permis d'affiner les résultats et de limiter les extrapolations biologiquement irréalistes éventuelles (Fandohan *et al.*, 2013).

2.4. Techniques de modélisation et validation

Les données préparées et mis sous format raster ont été traitées au moyen du logiciel R (<http://cran.r-project.org/>; version 3.2.2.; notamment les packages Dismo et Raster). MaxEnt modélise la niche d'une espèce à partir du principe suivant. Supposons un ensemble de coordonnées d'occurrence d'une espèce dans un milieu Ω , où l'espèce a été observée. Admettons que "y = 1" désigne la présence de l'espèce et que "v" est un vecteur contenant les variables environnementales caractérisant le milieu. Donnons comme base au modèle (*background*) toutes les conditions environnementales possibles dans le milieu Ω . Définissons $f(v)$ comme la densité de probabilité des variables environnementales explicatives (de prédiction) à travers Ω , et $f_1(v)$ la densité de probabilité des variables explicatives aux points où l'espèce a été observée. En combinant les données de présences et le « *background* », MaxEnt estime la probabilité de présence de l'espèce en fonction des conditions environnementales :

$$\Pr(y=1|v) = \Pr(y=1) \times \frac{f_1(v)}{f(v)}$$

$\Pr(y=1|v)$ est la probabilité de présence de l'espèce en fonction des conditions environnementales, et $\Pr(y=1)$, la proportion de site occupée.

Plusieurs méthodes de validation de modèles existent. Cependant, la plupart sont fondamentalement peu ou pas appropriées (voir Merow *et al.*, 2013 pour plus de détails). Pour la modélisation, le paramétrage de base de MaxEnt (*Default setting*) considère 10000 points du milieu Ω considéré. Cependant, il a été montré que la prise en compte d'un très grand nombre de points de base (> 100.000) est nécessaire pour atteindre une bonne convergence du modèle, un calibrage stable et un bon pouvoir discriminant (Renner *et al.*, 2014). Nous avons alors utilisé 204.887 points de calibrage au lieu des 10.000 conventionnels. Aussi, afin de pouvoir interpréter les résultats comme probabilités d'occurrence de l'espèce, les sorties brutes du modèle ont été utilisées en lieu et place de la transformation logistique conventionnelle (Renner *et al.*, 2014).

2.5. Cartographie et analyse des données

Les résultats de la modélisation ont été importés dans le logiciel ArcGIS 10.2 pour cartographier l'étendue des habitats favorables à l'espèce et leur dynamique spatio-temporelle potentielle sous l'effet des changements climatiques.

Pour évaluer la capacité présente et future du réseau d'aires protégées à conserver l'espèce, une analyse des lacunes de représentation (*gap analysis*) des habitats favorables à l'espèce dans les aires protégées a été effectuée en superposant chaque résultat issu de la modélisation à la carte du réseau d'aires protégées. Pour ce faire, les cartes du réseau d'aires protégées du Bénin et du Togo ont été extraites de la carte globale du réseau mondial des aires protégées (IUCN et UNEP, 2009). La distribution de probabilité brute générée par le modèle a été considérée comme mesure de la probabilité d'occurrence de l'espèce. L'étendue des habitats favorables et leurs dynamiques spatio-temporelles ont été estimées en utilisant l'outil "spatial analyst" du logiciel ArcGIS 10.2.

Résultats

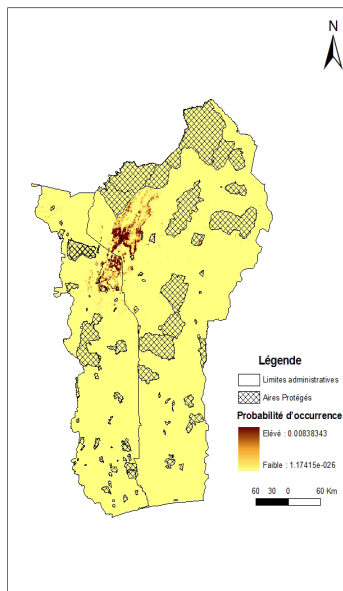
L'analyse de la contribution des variables au modèle suggère que la variabilité de la pente (SV), l'indice d'aridité du trimestre le plus humide (mimq) et l'évapotranspiration potentielle (pet) sont dans cet ordre les variables les plus importantes avec une contribution supérieure à 10% (Tableau 1, deuxième colonne). Ces valeurs de contribution étant influencées par l'ordre d'intégration des variables dans le modèle, une autre statistique évaluant leur contribution a été également calculée : L'importance de permutation (Tableau 1). 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. Les valeurs obtenues confirment la hiérarchie d'importance des variables suggérées par leur contribution en pourcentage. La permutation des valeurs de la variabilité de la pente entraîne une réduction de près de 80% du pouvoir prédictif du modèle (Tableau 1). SV, mimq et pet sont donc les variables plus prédictives de l'occurrence de l'espèce. De

Tableau 1 : Variables environnementales et contribution à la distribution de *T. atacorensis*

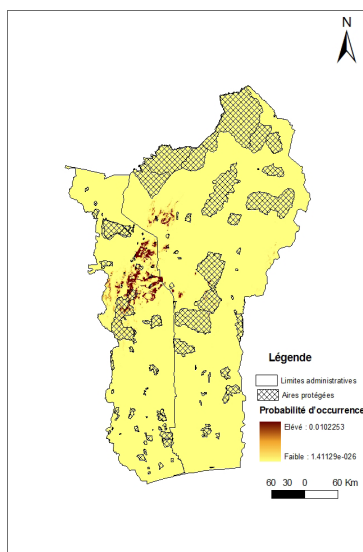
Variables	Définition	Contribution (%)	Importance de permutation (%)
SV	Variabilité de la pente	50,9	79
mimq	Indice d'aridité du trimestre le plus humide	18,5	8,7
pet	Evapotranspiration potentielle	13,6	6,3
bio4	Saisonnalité de la température (Coefficient de variation)	9,5	4,9
llds	Durée de la plus longue saison sèche	7,5	1,1

même, la permutation des valeurs de la durée de la plus longue saison sèche (lls) entraîne une très faible réduction du pouvoir prédictif du modèle (à peine 1%). Cette variable a donc une assez faible incidence sur le modèle de niche écologique *sensu* habitats favorables à l'espèce.

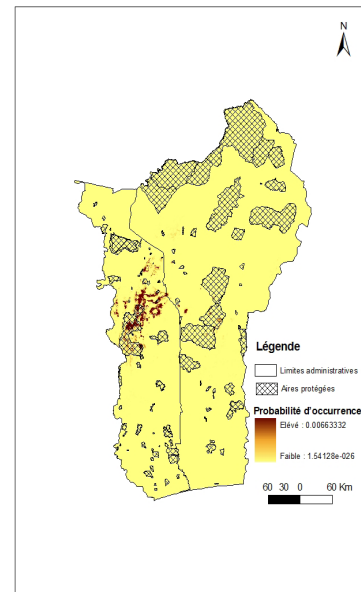
Dans les conditions environnementales actuelles, le modèle de niche écologique de l'espèce met en évidence un quasi confinement des habitats qui lui sont très favorables aux massifs de la chaîne de l'Atacora (Figure 2a). Cette aire couvre une superficie totale d'environ 748 km², soit à peine de 0,44% du milieu d'étude (Bénin, Togo). Déjà très rare dans ses habitats naturels avec une probabilité relative d'occurrence de 0,008 (conditionnelle à l'échelle de l'étude 1km x 1km) dans les meilleurs des cas, *T. atacorensis* présente une très faible probabilité d'observation dans le réseau d'aires protégées (1,41.10⁻²⁶) à l'exception de la réserve de faune de Djamdé et de la forêt Classée de Sirka au Togo. Avec un



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Carte montrant la distribution actuelle (a) et future (b=RCP 4.5 et c = RCP 8.5 ; horizon 2055) des habitats de *Thunbergia atacorensis* à l'horizon 2055.

forçage radiatif entraînant une élévation de la température de 1,4°C et un niveau de CO₂ atmosphérique atteignant 500ppm (scénario climatique RCP 4.5), le modèle prédit une remarquable dynamique spatiale des habitats favorables à l'espèce du Bénin vers le Togo (Figure 2b). Le modèle suggère également une augmentation de la probabilité relative d'occurrence de l'espèce comparée à celle actuelle (0,01 vs. 0,008). On note également l'apparition d'habitats favorables à l'espèce dans le Parc National de Fazao Malfakassa (Togo) et une petite, extension de l'aire globale favorable à l'espèce (+0,16%). Avec un forçage radiatif plus sévère (+2°C et un niveau de CO₂ atmosphérique = 550ppm, RCP8.5), l'espèce perdrait quasiment tous ces habitats au Bénin (Figure 2c). Dans les aires protégées du Bénin, seule la forêt classée de Wari Maro présenterait encore des habitats favorables. Elle trouverait néanmoins des habitats favorables au Togo et en particulier dans le Parc National de Fazao Malfakassa. Le RCP 8.5 prédit également une légère extension de l'aire globale favorable à l'espèce (+0,04%) mais une diminution de sa probabilité relative d'occurrence par rapport au niveau actuel (0,006 vs. 0,008).

Discussion

La modélisation de la niche écologique est l'un des moyens efficaces pour évaluer la distribution des habitats favorables et projeter l'impact des changements climatiques sur une espèce. Elle permet de conduire des analyses complexes combinant différentes sources de données spatiales et de générer des cartes lisibles, facilitant l'assimilation des résultats par les conservateurs et les décideurs, encourageant ainsi le développement et la mise en œuvre des politiques de conservation.

De nombreuses méthodes utilisant seulement des données de présence, comme l'algorithme MaxEnt ont été développées et peuvent rendre possible la modélisation de la niche écologique quel que soit l'échelle (Elith *et*

al., 2006). Des études récentes sur le modèle MaxEnt ont montré qu'il avait de moins bonnes performances face au modèle CLIMEX pour les projections de distribution sur un nouveau continent ou sous les scénarii climatiques futures (Webber *et al.*, 2011). Ces études ont révélé qu'à l'échelle globale, MaxEnt fait des projections biologiquement irréalistes, alors que CLIMEX est plus conservateur des limites de tolérances des espèces. Cependant, ces problèmes notés pour le modèle MaxEnt n'en constituent pas un dans la présente étude car elle couvre une échelle réduite et l'aire de référence pour tester et calibrer le modèle a été limitée aux conditions climatiques où l'espèce est sous l'influence de mêmes facteurs climatiques. Aussi, l'utilisation du modèle CLIMEX aurait nécessité la disponibilité de données de bonne qualité sur les tolérances éco-physiologiques de l'espèce étudiée. De telles données ne sont pas encore disponibles pour *T. atacorensis*.

L'interprétation des modèles de distribution des espèces le long des gradients environnementaux est délicate. Ceci est en partie dû aux variables environnementales qui ont tendance à co-varier (Poorter *et al.*, 2004) ou à la non prise en compte d'une variable importante. Cependant, lorsque l'objectif est la prédiction de la niche et non l'explication de la niche, ces problèmes sont d'ordre mineur (Shmueli, 2010), tant que les variables utilisées présentent un bon pouvoir pour faire une classification des habitats en favorables vs. non favorables. L'importance de la variabilité de la pente (SV) et de l'indice d'aridité (mimq) est cohérente avec la préférence de l'espèce pour les galeries forestières aux creux des collines (Natta, 2003 ; Akoègninou *et al.*, 2006 ; Dourma *et al.*, 2012). La préférence de l'espèce pour ce type d'habitat pourrait également expliquer, la faible contribution de la durée de la plus longue saison sèche (llds) et de la saisonnalité de la température (bio4) au modèle.

La présente étude a révélé que la majeure partie de la niche écologique de l'espèce est hors du réseau d'aires protégées et suggère donc l'inefficacité du réseau d'aires protégées à la conserver. Ces observations confirment la nécessité de prioriser la zone de la chaîne de montagne de l'Atacora pour l'extension du réseau d'aires protégées (Adomou *et al.*, 2010). Hormis *T. atacorensis* d'autres espèces internationalement rares et ou localement en danger critique comme *Chrysobalanus icaco* subsp. *atacorensis*, et *Synsepalum passargei* pourraient également être de *facto* mieux conservées. Du point de vue des changements climatiques, l'espèce pourrait faire face à une perte importante de ses habitats au Bénin par réduction de leurs qualités, sous un forçage radiatif modéré. Toutefois, d'après les résultats, un forçage radiatif modéré aurait également un effet positif sur la probabilité relative d'occurrence de l'espèce. La réduction des habitats favorables à l'espèce serait très prononcée au Bénin pour un niveau de forçage radiatif élevé. Par contre, les résultats suggèrent, que ces changements pourraient conduire à la création de nouveaux habitats favorables à l'espèce au Togo. Bien que les modèles de niche écologique des espèces permettent de projeter la dynamique spatio-temporelle des habitats qui leurs sont favorables, ils ne peuvent prédire les réponses des espèces à ces changements en terme d'adaptation, dispersion, migration, ou extinction. Ainsi, la projection d'habitats favorables à l'espèce à l'intérieur d'une des aires protégées

du milieu d'étude (ex., Park National de Fazao Malfakassa, Togo) n'implique pas que l'espèce y migrera naturellement. Ceci est dû à la non prise en compte dans le paramétrage du modèle, de la réaction des espèces face aux variations environnementales. Par exemple, pour deux espèces co-occurentes ayant différentes stratégies d'adaptation (ex., *Adansonia digitata* et *Tamarindus indica*; Van den Bilcke *et al.*, 2013a,b), les modèles environnementaux de niche écologique prédiront le même impact des changements climatiques. Ce qui est peu vraisemblable au regard du caractère idiosyncratique de la réponse des espèces aux changements de leurs milieux. Une telle investigation nécessite une analyse approfondit de l'écophysiologie et des stratégies spécifiques des espèces au moyen : soit d'une étude de la dynamique des populations de l'espèce sous différentes conditions environnementales ; soit d'un test expérimental de la réponse de différents écotypes de l'espèce à différentes conditions environnementales.

Conclusion

La présente étude a permis la réalisation de la première carte de distribution des habitats potentiels et de probabilité d'occurrence de *T. atacorensis*, une espèce rare et endémique aux inselbergs du Bénin et du Togo. Cette carte pourrait être utilisée pour intensifier les recherches visant à mieux caractériser les habitats de cette espèce. Nos résultats mettent en évidence l'incapacité du réseau d'aires protégées de la zone à conserver l'espèce. Cette carte pourrait alors aussi être utilisée dans le cadre de l'extension du réseau d'aires protégées de la région. Nous suggérons des investigations approfondies sur l'écophysiologie et la démographie de cette espèce en fonction des conditions environnementales afin d'affiner l'étude relative à l'impact que pourrait avoir les changements climatiques sur sa distribution et sa survie dans ses écosystèmes.

Remerciements

Cette étude a été financée grâce à une bourse de la Fondation Internationale pour la Science (FIS), Suède (Grant D/5464-1) et une bourse de la fondation Alexander von Humboldt (Fellowship no 3.4-BEN/1155509 STP) accordées à Adandé Belarmain Fandohan. Nous remercions Armand K. Natta et Akoègnignan Idelphonse Sodé pour leur assistance technique.

Références Bibliographiques

- Akoègninou, A., W. J. van der Burg, and L. J. G. van der Maesen., 2006. Flore analytique du Bénin. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Assédé E.P.S., Adomou A.C., Sinsin B., 2012. Magnoliophyta, Biosphere Reserve of Pendjari, Atacora Province, Benin. *Check List* 8(4): 642–661.
- Adomou A.C., Sinsin B., Akoègninou A.A., van der Maesen J., 2010. Plant species and ecosystems with high conservation priority in Benin. *In: Systematics and Conservation of African Plants.* van der Burgt X., van der Maesen J., Onana J.-M., ed. 429–44. Kew: Royal Botanic Gardens.
- Adomou A.C., Sinsin B., van der Maesen L.J.G., 2006. Phytosociological and chorological approaches to

- phytogeography: a meso-scale study in Benin. *Syst. Geogr. Plants* 76: 155-178.
- Busby J.W., Smith T.G., White K.L., Strange S.M., 2010. Locating climate insecurity: Where are the most vulnerable places in Africa? University of Texas, Austin, USA: The Robert Strauss Center for International Security and Law, Climate Change and African Political Stability (CCAPS) Programme.
- Cuni Sanchez A., Osborne P.E., Haq N. 2011. Climate change and the African baobab (*Adansonia digitata* L.): the need for better conservation strategies. *Afr. J. Ecol.* 49 : 234-245.
- Dourma M., Batawila K., Guelly K.A., Bellefontaine R., de Foucault B., Akpagana K., 2012. La flore des forêts claires à *Isobertia* spp. en zone soudanienne au Togo Titre courant: Flore des forêts claires à *Isobertia*. *Acta Bot. Gall.: Botany Letters* 159(4): 395-409.
- Elith J., Graham C.H., Anderson R.P., Dudík M., Ferrier S., Guisan A., Hijmans R.J., Huettmann F., Leathwick J.R., Lehmann A., Li J., Lohmann L.G., Loiselle B.A., Manion G., Moritz C., Nakamura M., Nakazawa Y., Overton J.M.M., Peterson A.T., Phillips S.J., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Schapire R.E., Soberón J., Williams S., Wisz M.S., Zimmermann N.E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.
- Elith J., Kearney M., Phillips S., 2010. The art of modeling range-shifting species. *Methods Ecol. Evol.* 1: 330-342.
- 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.
- Fandohan B., Assogbadjo A.E., Glèlè Kakaï R.L., Sinsin B., 2011. Effectiveness of a protected areas network in the conservation of *Tamarindus indica* L. (Leguminosae-Caesalpinioideae) in Benin. *Afr. J. Ecol.* 49 : 40-50.
- Gouwakinnou G.N., 2013. Using niche modeling to plan conservation of an indigenous tree species under changing climate: example of *Sclerocarya birrea* in Benin, West Africa. *Research and Development in sub-Saharan Africa* 5: 1-8.
- Guisan A., Zimmermann N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135: 147-186.
- IPCC., 2014. Summary for Policymakers, In: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC., 2007. Climate change: synthesis report. Cambridge University Press, New York, USA.
- IUCN, UNEP., 2009. The world database on protected areas (WDPA). Cambridge, UK: UNEP-WCMC. <http://protectedplanet.net>
- Kumar S., Stohlgren T.J., 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ.* 1(4): 094-098.
- Marshall A.R., Platts P.J., Gereau R.E., Kindeketa W., Kang'ethe S., Marchant R., 2012. The genus *Acacia* (Fabaceae) in East Africa: distribution, diversity and the protected area network. *Plant Ecol. Evol.* 145(3): 289-301.
- Merow, C, M. J. Smith, and J. A. Jr. Silander. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058-1069.
- Natta A.K., 2003. Ecological assessment of riparian forests in Benin: Phytodiversity, phytosociology and spatial distribution of tree species. PhD. Thesis Wageningen University.
- Neuenschwander P., Sinsin B., Georgen G. (Eds), 2011. Protection de la nature en Afrique de l'Ouest: Une Liste Rouge pour le Bénin. IITA Ibadan, Nigeria.
- Padonou E.A., Teka O., Bachmann Y., Schmidt M., Mette Lykke A., Sinsin B. 2015. Using species distribution models to select species resistant to climate change for ecological restoration of bowé in West Africa. *Afr. J. Ecol.* 53(1): 83-92.
- Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E., 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190: 231-259.
- Platts P.J., Omeny P.A., Marchant R., 2015. AFRICLIM: high-resolution climate projections for ecological applications in Africa. *Afr. J. Ecol.* 53: 103-108.
- Poorter L., Bongers F., Kouamé FN., Hawthorne W.D., 2004. Biodiversity of West African forests An Ecological atlas of woody Plants Species. CABI Publishing.
- Renner I.W., Baddeley A., Elith J., Fithian W., Hastie T., Phillips S., Popovic G., Warton D.I., 2014. Point process models for presence-only analysis – a review. *Methods in Ecology and Evolution*, [Epub ahead of print].
- Schwartz M.W., 2012. Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biol. Conserv.* 155: 149-156.
- Shmueli G., 2010. To explain or to predict? *Stat. Sci.* 25(3): 289-310.
- Van den Bilcke N., De Smedt S., Simbo D.J., Samson R., 2013a. Sap flow and water use in African baobab (*Adansonia digitata* L.) seedlings in response to drought stress. *South Afr. J. Bot.* 88: 438-446.
- Van den Bilcke N., Simbo D.J., Samson R., 2013b. Water relations and drought tolerance of young African tamarind (*Tamarindus indica* L.) trees. *South Afr. J. Bot.* 88: 352-360.
- Webber B.L., Yates C.J., Le Maitre D.C., Scott J.K., Kriticos D.J., Ota N., McNeill A., Le Roux J.J., Midgley G.F., 2011. Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models. *Diversity Distrib.* 17: 978-1000.