

Communauté française de Belgique



## Modélisation de la distribution de six espèces d'arbres multi-usages en Afrique et évaluation de l'effet des changements climatiques



**Félicien Dji-ndé TOSSO**

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER COMPLEMENTAIRE EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES  
PAYS EN DEVELOPPEMENT**

**Filière : Dégradation du milieu**

**ANNEE ACADEMIQUE 2012-2013**

**PROMOTEUR: Dr Alain HAMBUECKERS**

*"Le présent document n'engage que son auteur"*

*"Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique\* de l'Université de Liège"*

(\* Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg)

« Auteur du présent document : TOSSO Dji-ndé Félicien, [tfelicien@yahoo.fr](mailto:tfelicien@yahoo.fr) »



## **REMERCIEMENTS**

Il est de bon ton de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre Promoteur, le Dr Alain Hambuckers, qui a accepté de superviser ce travail. C'est ici le lieu de lui exprimer toute notre gratitude pour sa disponibilité et son ouverture d'esprit.

Toute notre reconnaissance à l'Unité de Modélisation du Climat et des Cycles Biogéochimiques de l'Université de Liège. Particulièrement, nos remerciements vont au Professeur Louis François et Madame Marie Dury qui ont mis à notre disposition les données climatiques et qui nous ont aidés dans le traitement des données pour le modèle CARAIB.

A la Coopération Universitaire pour le Développement pour les efforts consentis pour nous assurer une formation d'aussi grande qualité.

Nos sincères remerciements à Antoine Denis pour son appui technique en Système d'Information Géographique (SIG).

Nos chaleureux remerciements à notre famille, amis ainsi qu'aux camarades qui de près ou de loin nous ont soutenus.

## RESUME

La modélisation de la distribution de la niche potentielle des espèces végétales est un outil largement utilisé en écologie pour évaluer l'impact des changements globaux sur les écosystèmes. Dans le présent travail, une étude d'analyse comparative de trois modèles (Maxent, logistique et CARAIB) a été réalisée sur six espèces reconnues pour leurs services écosystémiques : *Acacia senegal* (L.) Wild, *Azelia africana* Smith, *Garcinia kola* Heckel, *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss, *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg et *Pterocarpus erinaceus* Poir. Les résultats démontrent que pour le modèle logistique ou pour Maxent, les pseudo-absences doivent être échantillonné à une distance de l'ordre de 1400 km de tout point de présence connu afin d'obtenir un modèle parcimonieux de bonne discrimination. Ce travail a testé l'interaction entre la température et les précipitations, laquelle est significative dans presque tous les modèles, sauf chez l'espèce de forêt tropicale dense humide *Garcinia kola* et a montré que les espèces du sahélien et du soudanien sont particulièrement sensibles à l'évapotranspiration potentielle. Cette étude a prouvé que les modèles statiques utilisés sont capables de simuler, avec un pourcentage d'accords élevé (plus de 65 %) par rapport à la réalité du terrain, la distribution présente (1950 – 2000) des espèces étudiées, contrairement au modèle dynamique de végétation CARAIB.

Les changements climatiques devraient provoquer une perte d'habitat favorable dans le futur, variable selon les modèles et les espèces, mais sans rendre celles-ci pour autant vulnérables selon le critère A3 de l'UICN. Toutefois, les modifications d'habitat suite aux pressions anthropiques devraient être prises en compte dans les modèles.

**Mots clés** : espèces tropicales, changements climatiques présents et futurs, modélisation.

## **ABSTRACT**

Modeling the potential distribution of plant species is a tool widely used in ecology to assess the impact of global change on ecosystems. In this work, we realize comparative analysis of three models (Maxent, logistic and CARAIB) using six species recognized for their ecosystem services: *Acacia senegal* (L.) Wild, *Azelia africana* Smith, *Garcinia kola* Heckel, *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss, *Milicia excelsa* (Welw.) CC Berg and *Pterocarpus erinaceus* Poir. The results show that for the logistic model or Maxent, pseudo-absences must be sampled at a distance of about 1400 km from any known point of presence to obtain a parsimonious model. This study tested the interaction between temperature and precipitation, which is significant in almost all models, except in the case of dense tropical rainforest species *Garcinia kola* and showed that the species of Sahelian and Sudanian regions are particularly sensitive to potential evapotranspiration. This study showed that static models are able to simulate correctly the present and the future distribution of the species, unlike the dynamics vegetation model CARAIB.

Furthermore, this study overall showed that it is not climate change that causes a danger to tropical species. Certainly, it causes a loss of suitable habitat in the future but not necessarily makes them vulnerable.

**Keywords:** tropical species, climate change present and future, modeling.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLE DES MATIERES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES .....	x
SIGLES ET ABBREVIATIONS .....	xii
1. Introduction.....	1
1.1. Problématique.....	1
1.2. Objectifs de la recherche .....	3
2. Aperçu bibliographique .....	5
2.1. Modèle de Circulation Générale.....	5
2.2. Facteurs environnementaux .....	6
2.2.1. Eau.....	6
2.2.2. Humidité atmosphérique .....	6
2.2.3. Température .....	6
2.2.4. Evapotranspiration .....	7
2.2.5. Sol.....	7
2.2.6. Atmosphère .....	7
2.2.7. Lumière .....	7
2.3. Changements climatiques en Afrique.....	7
2.4. Caractéristiques générales des espèces étudiées.....	9
2.4.1. <i>Acacia senegal</i> (L.) Wild. Fabaceae / Mimosaceae .....	9
2.4.2. <i>Azizelia africana</i> Smith. Fabaceae / Caesalpinaceae .....	10
2.4.3. <i>Garcinia kola</i> Heckel. Clusiaceae .....	11
2.4.4. <i>Khaya senegalensis</i> (Desr) A. Juss. Meliaceae .....	12
2.4.5. <i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C. Berg Moraceae .....	13

2.4.6.	<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir. Fabaceae .....	14
3.	Méthodologie .....	16
3.1.	Zone d'étude .....	16
3.2.	Données utilisées .....	16
3.2.1.	Données biologiques .....	16
3.2.2.	Données climatiques .....	18
3.2.3.	Modèle logistique .....	19
3.2.4.	Modèle Maxent .....	21
3.2.5.	Modèle CARAIB.....	22
4.	Résultats .....	24
4.1.	Les modèles .....	24
4.1.1.	<i>Acacia senegal</i> .....	24
4.1.2.	<i>Afzelia africana</i> .....	24
4.1.3.	<i>Garcinia kola</i> .....	24
4.1.4.	<i>Khaya senegalensis</i> .....	25
4.1.5.	<i>Milicia excelsa</i> .....	25
4.1.6.	<i>Pterocarpus erinaceus</i> .....	26
4.2.	Evaluation de la capacité prédictive des modèles statistiques en fonction de la distance d'échantillonnage .....	27
4.3.	Réponse écologique des espèces étudiées .....	28
4.3.1.	Réponse écologique d' <i>Acacia senegal</i> .....	29
4.3.2.	Réponse écologique d' <i>Afzelia africana</i> .....	29
4.3.3.	Réponse écologique de <i>Garcinia kola</i> .....	30
4.3.4.	Réponse écologique de <i>Khaya senegalensis</i> .....	31
4.3.5.	Réponse écologique de <i>Milicia excelsa</i> .....	31
4.3.6.	Réponse écologique de <i>Pterocarpus erinaceus</i> .....	31
4.4.	Distributions présentes et futures des espèces .....	33
4.4.1.	Distribution d' <i>Acacia senegal</i> .....	34
4.4.2.	Distribution d' <i>Afzelia africana</i> .....	36



4.4.3.	Distribution de <i>Garcinia kola</i> .....	37
4.4.4.	Distribution de <i>Khaya senegalensis</i> .....	39
4.4.5.	Distribution de <i>Milicia excelsa</i> .....	41
4.4.6.	Distribution de <i>Pterocarpus erinaceus</i> .....	42
5.	Discussion et conclusions .....	45
5.1.	Caractéristiques de l'échantillon à utiliser pour les modèles .....	45
5.2.	Réponse écologique des espèces étudiées .....	45
5.3.	Distribution présente et future des espèces étudiées .....	47
5.4.	Comparaison des modèles Maxent, logistique et CARAIB .....	48
6.	Conclusion générale .....	50
7.	Bibliographie.....	51
	Annexes .....	a

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Echantillon de points de présence des espèces étudiées.....	17
Tableau 2. Modèle logistique pour <i>Acacia senegal</i> .....	24
Tableau 3. Modèle logistique pour <i>Azelia africana</i> .....	25
Tableau 4. Modèle logistique pour <i>Garcinia kola</i> .....	25
Tableau 5. Modèle logistique pour <i>Khaya senegalensis</i> .....	26
Tableau 6. Modèle logistique pour <i>Milicia excelsa</i> .....	26
Tableau 7. Modèle logistique pour <i>Pterocarpus erinaceus</i> .....	27
Tableau 8. Aire relative par classe d'habitat, par modèle et par espèce.....	34

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Carte d'Afrique montrant les tendances linéaires de la température annuelle et des précipitations annuelles entre 1901 et 2000 en Afrique (Hulme <i>et al.</i> , 2001).....	9
<b>Figure 2.</b> Répartition d' <i>Acacia senegal</i> en Afrique.....	10
<b>Figure 3.</b> Répartition d' <i>Azalia africana</i> en Afrique.....	11
<b>Figure 4.</b> Répartition de <i>Garcinia kola</i> en Afrique.....	12
<b>Figure 5.</b> Répartition de <i>Khaya senegalensis</i> en Afrique .....	13
<b>Figure 6.</b> Répartition de <i>Milicia excelsa</i> en Afrique.....	14
<b>Figure 7.</b> Répartition de <i>Pterocarpus erinaceus</i> en Afrique.....	15
<b>Figure 8.</b> Carte de la zone d'étude.....	16
<b>Figure 9.</b> Composantes du modèle CARAIB .....	22
<b>Figure 10.</b> Modèle Maxent pour <i>Acacia senegal</i> .....	24
<b>Figure 11.</b> Modèle Maxent pour <i>Azalia africana</i> .....	25
<b>Figure 12.</b> Modèle Maxent pour <i>Garcinia kola</i> .....	25
<b>Figure 13.</b> Modèle Maxent pour <i>Khaya senegalensis</i> .....	26
<b>Figure 14.</b> Modèle Maxent pour <i>Milicia excelsa</i> .....	26
<b>Figure 15.</b> Modèle Maxent pour <i>Pterocarpus erinaceus</i> .....	27
<b>Figure 16.</b> Evolution de l'AUC des modèles logistiques en fonction de la distance maximum d'échantillonnage (km) des pseudo-absences par rapport aux présences pour chaque espèce étudiée	27
<b>Figure 17.</b> Evolution du AUC des modèles Maxent en fonction de la profondeur du tampon appliqué à l'aire de distribution des espèces étudiées pour déterminer le background l'entraînement de Maxent	29
<b>Figure 18.</b> Réponses écologiques d' <i>Acacia senegal</i> pour les facteurs (a) température, (b) humidité relative, (c) Pluviométrie mensuelle et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux. Réponses écologiques pour (e) température, (f) pluviométrie et (g) évapotranspiration calculées pour le modèle Maxent. ....	30
<b>Figure 19.</b> Réponse écologique d' <i>Azalia africana</i> pour les facteurs (a) température, (b) humidité relative et (c) Evapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.....	30
<b>Figure 20.</b> Réponse écologique de <i>Garcinia kola</i> pour les facteurs (a) température, (b) évapotranspiration et (c) humidité relative calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux. .	31
<b>Figure 21.</b> Réponse écologique de <i>Khaya senegalensis</i> pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) évapotranspiration et (d) humidité relative calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.....	32

<b>Figure 22.</b> Réponse écologique de <i>Milicia excelsa</i> pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) humidité relative et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.....	32
<b>Figure 23.</b> Réponse écologique de <i>Pterocarpus erinaceus</i> pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) humidité relative et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.....	33
<b>Figure 24.</b> Distribution d' <i>Acacia senegal</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	35
<b>Figure 25.</b> Distribution d' <i>Azelia africana</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	37
<b>Figure 26.</b> Distribution de <i>Garcinia kola</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	39
<b>Figure 27.</b> Distribution de <i>Khaya senegalensis</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	40
<b>Figure 28.</b> Distribution de <i>Milicia excelsa</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	42
<b>Figure 29.</b> Distribution de <i>Pterocarpus erinaceus</i> (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.....	44

## **SIGLES ET ABBREVIATIONS**

**ARPEGE :** Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

**AUC :** Area Under ROC Curve

**CARAIB :** Carbon Assimilation In Biophere

**CERFACS :** Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée

**CNRM:** Centre National de Recherches Météorologiques

**DVM :** Dynamic Vegetation Model

**FAO :** Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

**GAM :** Generalized Additive Model

**GAME:** Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique

**GARP :** Genetic Algorithm for Rule Set Production

**GELATO:** Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean

**GIEC:** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**GLM :** Generalized Linear Model

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change

**MAXENT :** Maximum-Entropy

**NEMO:** Nucleus for European Modelling of the Ocean

**RCP :** Representative Concentration Pathways

**ROC :** Receiver Operating Characteristics

**SURFEX:** Surface Externalisée

**TRIP:** Total Runo Integrated Pathways

**UICN :** Union Internationale pour la Conservation de la Nature

**ULg :** Université de Liège

# 1. Introduction

## 1.1. Problématique

La biodiversité, produit de plus de trois milliards d'années d'évolution, constitue un patrimoine naturel et une ressource vitale pour toute l'humanité (Barbault, 2005). En 2009, les signataires de l'accord de Copenhague ont souligné l'impact critique du changement du climat sur les pays du Sud, riche en biodiversité, qui auront donc besoin d'une assistance particulière pour établir un programme adéquat d'adaptation (Neuenschwander *et al.*, 2011). Les espèces végétales sont universellement reconnues comme une composante fondamentale de cette biodiversité. Or, les résultats des travaux de 2009 de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) démontrent que 36 % des 47 677 espèces recensées (tous règnes d'organismes confondus) sont menacées d'extinction dont 70 % de plantes. En Afrique subsaharienne, plus de 2000 espèces forestières sont considérées comme éteintes ou menacées de disparition (Hilton-Taylor, 2000) sans qu'elles ne bénéficient de stratégies de conservation efficaces.

Il est donc important d'établir des priorités parmi les espèces concernées afin d'identifier les espèces prioritaires (Maxted *et al.*, 2006). Cette étape est cruciale dans toute stratégie de conservation du fait des ressources financières généralement limitées (Brehm *et al.*, 2010). Cette priorisation est basée sur une évaluation multicritère qui traditionnellement utilise des critères d'endémicité, de rareté, de protection et particulièrement le statut (de menace) de l'espèce.

Au-delà du fait que la perte d'habitats de la flore serait actuellement due à la progression de l'agriculture, la destruction des milieux naturels liée à l'urbanisation, l'exploitation du bois et la récolte abusive de plantes médicinales, les changements climatiques pourraient affecter la distribution et entraîner l'extinction au cours du siècle prochain de nombreuses espèces végétales (Bradshaw *et al.*, 2009). Plusieurs chercheurs ont démontré que les évolutions prédites dans les concentrations en CO<sub>2</sub> atmosphérique et les changements climatiques qui en résultent sont susceptibles d'affecter la distribution et l'abondance de la plupart des espèces (Schroter *et al.*, 2005). Selon Boko *et al.* (2007), l'Afrique a de fortes chances de connaître des changements climatiques marqués au cours du 21<sup>ème</sup> siècle par la sécheresse et le réchauffement dans la plupart des régions subtropicales. Selon les mêmes auteurs, l'Afrique est également l'un des continents les plus vulnérables en raison du manque de capacités adaptatives et des défis auxquels elle est confrontée tels que la pauvreté, les faiblesses technologiques, les conflits politiques.

Quelques études ont dressé les conséquences potentielles des changements de climat sur la biodiversité en Afrique. Ainsi, McClean *et al.* (2005) estiment que plus de 5000 espèces de plantes africaines pourraient connaître des pertes d'habitats avant 2080. Parmi les taxa les

plus vulnérables à la réduction d'habitat adéquat, se trouvent les espèces qui: (1) ont un âge de maturité élevé, (2) produisent des diaspores en faibles quantités, (3) sont disséminées sur de faibles distances, (4) sont déjà soumises à une pression anthropique importante (Araujo *et al.*, 2006; Penman *et al.*, 2010). Parmi les taxa prioritaires figurent : *Acacia senegal* (L.) Wild, *Afzelia africana* Smith, *Garcinia kola* Heckel, *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss, *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg et *Pterocarpus erinaceus* Poir (Tosso *et al.*, Sous presse ; Zerbo, 2011). Ces espèces semblent en outre être des espèces idéales pour des études de modélisation de distribution de niche (*niche-based modelling*). Une telle modélisation à l'échelle de leur aire de répartition peut d'une manière plus générale servir à évaluer la sensibilité des espèces d'arbres au climat et les impacts éventuels des changements climatiques (Mbatudde *et al.*, 2012).

Aujourd'hui, la prédiction de la distribution des espèces est au centre de diverses applications en écologie, agriculture, horticulture, foresterie et conservation (Corsi *et al.*, 1999; Welk *et al.*, 2002; Elith *et al.*, 2006) et joue également un rôle clé dans l'évaluation de l'impact des changements globaux sur les écosystèmes (Salinger *et al.*, 2005). Selon Gaston (1996), la prédiction et la cartographie des habitats potentiellement adéquats pour les espèces menacées et en danger est nécessaire pour : (1) le contrôle et la restauration de leurs populations d'origine et de leurs habitats naturels, (2) les introductions artificielles, (3) la sélection des sites prioritaires de conservation, (4) la gestion de leur habitat naturel. Les outils de modélisation de la distribution des espèces sont devenus de plus en plus populaires en écologie et les modèles de distribution de niche deviennent largement utilisés dans bon nombre d'applications écologiques (Peterson *et al.*, 2006). Ces modèles établissent des relations entre l'apparition des espèces et les conditions biophysiques et environnementales de la zone d'étude.

Il existe de nombreuses méthodes de modélisation de la distribution des espèces en vue de prédire leur potentiel habitat adéquat (Guisan et Zimmermann, 2000; Guisan *et al.*, 2007; Wisz *et al.*, 2008). Cependant, très peu de modèles de prédiction sont adaptés pour les espèces de plantes rares et menacées (Engler *et al.*, 2004). Généralement, deux types de modèles statiques sont utilisés : ceux qui nécessitent des données de présence des espèces uniquement et ceux qui utilisent à la fois des données de présence et d'absence des espèces (Robertson *et al.*, 2001). Le modèle qui utilise uniquement les données de présence des espèces le plus connu est le modèle Maxent (Elith *et al.*, 2006; Ortega-Huerta et Peterson, 2008) tandis que celui le plus connu et qui utilise à la fois les données de présence et d'absence des espèces est le modèle logistique (Sydeman *et al.*, 1991 ; Bolger *et al.*, 1997 ; Gross et Kapuscinski, 1997 ; Wiser *et al.*, 1998). La plupart de ces méthodes de modélisation de la distribution des espèces est sensible à la dimension de l'échantillon (Wisz *et al.*, 2008). Ils permettent dans les

conditions actuelles d'application de prévoir généralement avec une bonne précision la distribution d'habitat pour des espèces.

A côté des modèles statiques qui permettent de déterminer les caractéristiques de la niche climatique (éventuellement d'autres variables comme des caractéristiques pédologiques), il a été développé d'autres types de modèles basés sur le calcul des processus physiques, chimiques et biologiques qui affectent les organismes végétaux. Il s'agit des modèles dynamiques de végétation. Ces modèles fonctionnent avec le même genre de données que les modèles statistiques mais calculent explicitement les conditions de croissance (stress hydrique, intensité lumineuse, gradient de CO<sub>2</sub> ...) et des processus physiologiques (photosynthèse, respiration, production de diaspoires ...) qui permettent de simuler le développement et la croissance de la végétation. Ces modèles permettent de prendre plus facilement en compte la connaissance préalable des phénomènes (comme les problèmes de dormance des graines ou la fertilisation par le CO<sub>2</sub>), mais sont beaucoup plus difficile à mettre en œuvre. Plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la distribution des espèces des dix dernières ont démontré qu'il n'existe pas de comparaison possible entre les modèles statiques et les modèles dynamiques de végétation (Morin et Thuiller, 2009). Ces derniers sont moins pessimistes que les modèles statiques qui se focalisent sur la niche réalisée et ont une représentation limitée de la physiologie des espèces. Un des modèles dynamiques de végétation, développé à l'ULg, est le modèle CARAIB (Dury *et al.*, 2011). Il est nécessaire de recourir aux deux approches pour obtenir de robustes prédictions.

Les questions de recherche que pose la présente étude sont les suivantes : quel est le modèle le plus approprié pour apprécier la distribution présente et future des espèces identifiées dans la présente étude ? Quels seront les impacts des changements climatiques à l'horizon 2041-2060 sur la distribution de ces espèces ?

## 1.2. Objectifs de la recherche

L'objectif général poursuivi par la présente étude est d'étudier la distribution potentielle de la niche présente et future de six espèces de plantes prioritaires en Afrique en vue de proposer des stratégies pour leur conservation. La zone d'étude dans le présent travail englobe l'Afrique occidentale et centrale où la cause principale de déforestation reste l'agriculture itinérante sur brûlis. A cette cause s'ajoute les feux de végétation, le pastoralisme, l'exploitation forestière illicite participent aussi à des degrés divers à la réduction de la diversité biologique. Une intégration de la composante changement climatique dans ce travail



scientifique permet d'évaluer le niveau de sensibilité des espèces étudiées aux variations des facteurs climatiques.

Spécifiquement, il s'agira :

- d'évaluer la capacité de prédiction des modèles en fonction de la dimension-distance d'échantillonnage ;
- de mettre en évidence au moyen des modèles la réponse écologique de chacune des six espèces étudiées ;
- d'étudier comment les changements climatiques pourraient affecter la distribution potentielle des six espèces à l'horizon 2041-2060 ;
- de comparer les modèles utilisés afin d'identifier celui qui est le plus approprié pour apprécier la distribution actuelle.

## 2. Aperçu bibliographique

### 2.1. Modèle de Circulation Générale

Les modèles de circulation générale sont des outils utilisés pour comprendre le climat mais aussi pour faire des projections climatiques futures (Voldoire *et al.*, 2012). On considère cependant aujourd'hui que ces modèles présentent d'importants biais dans leur représentation de l'état moyen et de la variabilité du climat. Ces biais deviennent source d'incertitudes majeures dans les projections (IPCC, 2007).

Dans le but d'améliorer la compréhension du système climatique, le modèle CNRM-CM a été développé à partir de 1990 (Déqué *et al.*, 1994). Il s'agit d'un modèle qui est le résultat d'une collaboration entre le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), le Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique (GAME) et le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée (CERFACS) (Oueslati, 2012). Il est composé de plusieurs modules (ARPEGE, NEMO, GELATO, SURFEX, TRIP et ISBA) conçus indépendamment et couplé via le logiciel OASIS. Il intègre la composante atmosphérique via ARPEGE-Climat qui est un modèle spectral ayant à une résolution horizontale de 1,4° à l'équateur (Déqué *et al.*, 1994). Les échanges avec l'atmosphère des surfaces continentales, des lacs, des fleuves et des océans sont pris en compte au niveau de la plate forme SURFEX (*Surface externalisée*). Le calcul des échanges d'énergie et d'eau entre les surfaces continentales et l'atmosphère est effectué dans le modèle ISBA (*Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere*) (Noilhan et Planton, 1989; Noilhan et Mahfouf, 1996). La modélisation du transport de l'eau douce des fleuves vers les océans est faite par le modèle TRIP (Oki et Sud, 1998). En ce qui concerne le modèle NEMO, il est utilisé pour l'océan (Madec, 2008) et GELATO est utilisé pour la glace de mer. Selon Voldoire *et al.* (2012), la nouvelle version, CNRM-CM5, présente plusieurs avantages pour la description de l'atmosphère, à savoir : un accroissement de résolution horizontale, un nouveau noyau dynamique, un nouveau régime radiatif, une conservation de l'eau et un traitement amélioré pour l'ozone et les aérosols. Il est utilisé pour effectuer des expériences dans le cadre du Projet de comparaison des modèles couplés et servira de base pour le prochain rapport d'évaluation du GIEC. Le modèle CNRM-CM5 représente un outil fondamental pour simuler le climat de la période historique (1850 à nos jours) et pour réaliser des études sur le changement climatique. Il permet de simuler le climat futur en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O etc.) et est performant dans la simulation du paléoclimat (interglaciaire, glaciaire, holocène). Aussi, ce modèle qui décrit de façon spécifique le climat de l'Afrique permet-il d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur les différents secteurs socio-économiques, la biodiversité et de réaliser des prévisions saisonnières. Ce sont les simulations produites par ce modèle qui ont été utilisées pour le calcul du climat futur dans le présent travail.

## 2.2. Facteurs environnementaux

Selon Lebrun (1947), le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point de la surface terrestre. Il est un déterminant essentiel de la végétation, à l'instar d'autres facteurs notamment liés au sol (Marshall., 1987). Ainsi plusieurs auteurs ont lié l'autoécologie des essences forestières tropicales qui sont des plantes en C<sub>3</sub> (Guillet *et al.*, 2003) aux facteurs climatiques (précipitations, température, humidité atmosphérique, lumière, évapotranspiration), pédologique (sol) ainsi qu'aux facteurs biotiques, et au feu (Lewis, 1969 ; Daubenmire, 1974 ; Christie et Deltling, 1982).

### 2.2.1. Eau

L'eau est nécessaire à toute vie et détermine la croissance et la survie des plantes (Guyot, 1999 ; Brown, 1977. Le stress hydrique provoque : (i) la réduction de la taille des feuilles et des entrenœuds, (ii) le rabougrissement, (iii) la suppression de la croissance racinaire, (iv) le retard de la floraison et (v) et potentiellement la mort (Slatyer, 1974). De la même manière un excès peut asphyxier le système et perturber leur métabolisme inhibant ainsi leur développement (Feldman, 1984 ; Kozlowski, 1984).

En conséquence, toute modification de la pluviométrie pourrait entraîner une évolution des communautés végétales (McGuire *et al.*, 1995). Aussi, est-il important de mentionner que les modèles prédisent une importante variabilité régionale avec des incertitudes qui sont plus grandes que pour les températures (Reichstein, 2007).

### 2.2.2. Humidité atmosphérique

Chez les essences forestières tropicales en général, les échanges de vapeurs d'eau dépendent de l'humidité de l'air atmosphérique (Crétinon, 1994). En effet, la transpiration ne s'effectue pas de la même manière en présence d'air sec ou d'air humide. Selon Tousignant et Delorme (2006), plus l'air est sec et plus il y a d'échanges gazeux entre la feuille et son environnement.

### 2.2.3. Température

La température joue un rôle important dans la régulation des processus physiologiques influençant la croissance et le développement des plantes (Laude, 1974 ; Larcher, 1980). L'optimum de l'activité photosynthétique des végétaux varie selon la latitude (Noble, 1980) et la capacité des plants à tolérer les variations de température est influencée par des facteurs génétiques (Smith, 1964).

#### 2.2.4. *Evapotranspiration*

L'évaporation représente le processus par lequel l'eau précipitée sur la surface de la terre est retournée à l'atmosphère par évaporation, tandis que la transpiration est un processus similaire qui s'effectue au niveau des êtres vivants dont les plantes (Hussein et Junmin, 2013). L'évapotranspiration est un phénomène combiné traduisant le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux dans les conditions naturelles (Guyot, 1999). Fort utilisé en agrométéorologie pour l'estimation des besoins en eau de la culture, elle est déterminée par les paramètres environnementaux et les caractéristiques de la plante. De nos jours, l'effet conjugué de l'élévation des températures et du changement dans les précipitations sera déterminant dans l'évapotranspiration des végétaux.

#### 2.2.5. *Sol*

Il est un support important et un intermédiaire entre l'eau et les végétaux. Ainsi, il agit comme un réservoir pour suppléer aux besoins en eau des plantes. A travers ses propriétés d'absorption, de rétention et de libération de l'eau, le sol influence l'efficacité des précipitations (FAO, 1978). Les types de sols peuvent déterminer les types de végétation rencontrés (Volkoff, 1976). Dans le sol, la déficience des nutriments essentiels comme l'azote et le phosphore par exemple affecte la productivité des plantes (Vallentine, 1980). Dans de nombreux écosystèmes naturels, l'azote est l'un des facteurs principaux pouvant limiter la croissance des plantes. (Hikosaka et Hirose, 2001).

#### 2.2.6. *Atmosphère*

Elle contient évidemment le gaz nécessaire à la photosynthèse ( $\text{CO}_2$ ). Le vent représente une autre composante de l'atmosphère qui module l'évapotranspiration et peut créer des dommages physiques aux plants surtout au niveau de la canopée (Marshall, 1987).

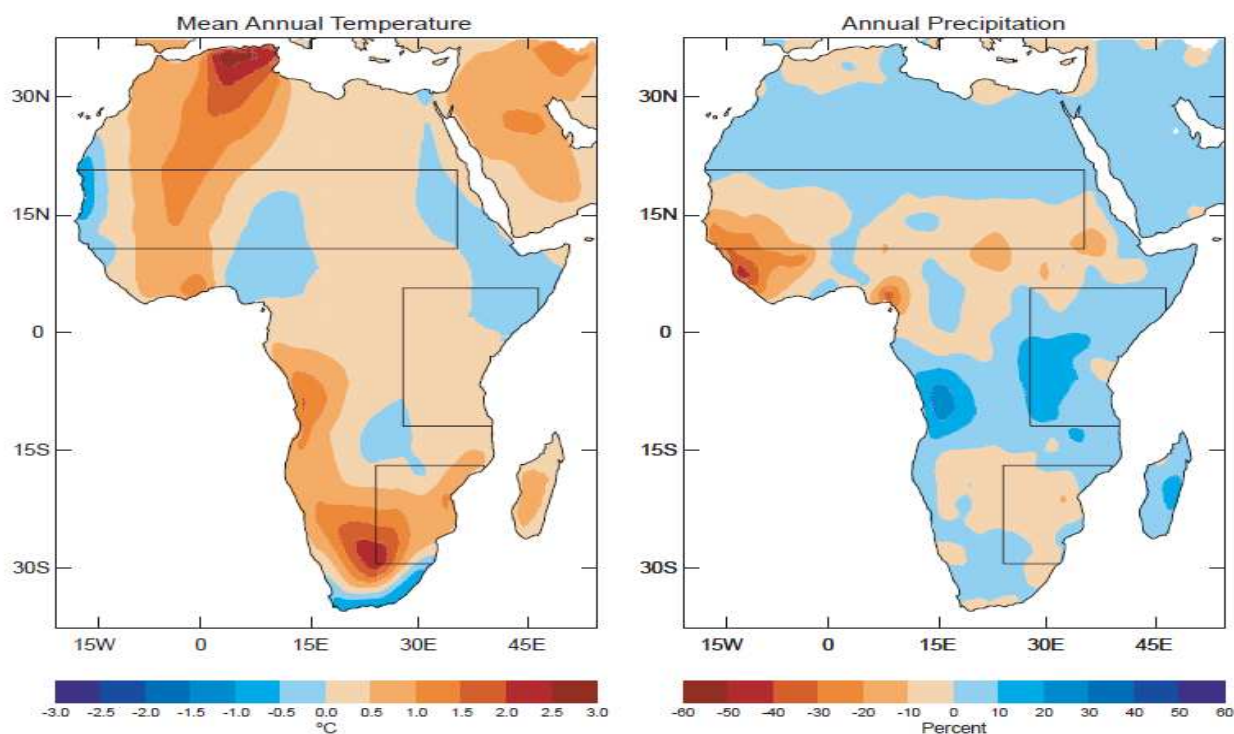
#### 2.2.7. *Lumière*

Les plantes supérieures à sont tributaires de la lumière pour leur survie (Smith, 1982). En effet, chaque espèce capte les radiations solaires en fonction de certaines caractéristiques des feuilles à savoir : la taille, l'angle d'exposition, l'âge, la pubescence et les conditions physiologiques (Risser, 1985).

### 2.3. Changements climatiques en Afrique

Les gaz à effet de serre ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{O}_2$ ) piègent le rayonnement infrarouge du soleil dans notre atmosphère, ce qui provoque une augmentation des températures de surface

moyennes mondiales (Verdin *et al.*, 2005). Ce phénomène connu sous le vocable de réchauffement climatique menace la stabilité du système climatique de la terre ainsi que des écosystèmes qui en dépendent (IPCC, 2001). Plusieurs projections du GIEC ont été réalisées pour ce siècle. Ces projections reposent sur quatre familles de scénarii climatiques (A1, A2, B1 et B2) qui recouvrent quatre combinaisons de variations : démographiques, développement socio-économique, et évolutions technologiques majeures. Pour 2100, il ressort de ces projections une augmentation de la température moyenne mondiale comprise entre 1,4 °C selon le scénario B1 et 5,8 °C selon le scénario A1. Les modifications de l'intensité et de la fréquence des précipitations seront tout aussi importantes. A l'échelle régionale, les augmentations et diminutions prévues sont de l'ordre de 5 à 20 % (IPCC, 2001). L'Afrique n'est pas épargnée par ce phénomène. En effet, l'ampleur des changements d'état des écosystèmes en réponse à la modification des précipitations a été documentée par Good et Caylor (2011). Le continent s'est réchauffé au cours des 100 dernières années et fait face à d'éventuelles futures augmentations de 2 à 6 °C (Hulme *et al.*, 2001). Les travaux de ces chercheurs ont confirmé (figure 1) que déjà durant le 20<sup>ème</sup> siècle, le continent africain s'est réchauffé. Plusieurs autres modèles climatiques ont démontré une aridité accrue sur toute l'Afrique à partir du 21<sup>ème</sup> siècle (Dai, 2011). En ce qui concerne les précipitations, l'analyse régionale montre une aggravation de la sécheresse au niveau des régions occidentale, orientale et sahélienne. Au vu de ces résultats, Hare (2005) a suggéré que l'Afrique sera parmi les zones les plus touchées par le réchauffement du climat. Collins (2011) a également mis en évidence un réchauffement plutôt conséquent pour le Nord de l'Afrique ce qui pourrait conduire à la perte d'habitats favorables des espèces allant de 10,4 % à 42,4 %. Il devient pertinent d'évaluer l'influence de ces variations du climat sur les écosystèmes forestiers principalement sur la distribution des espèces ligneuses.



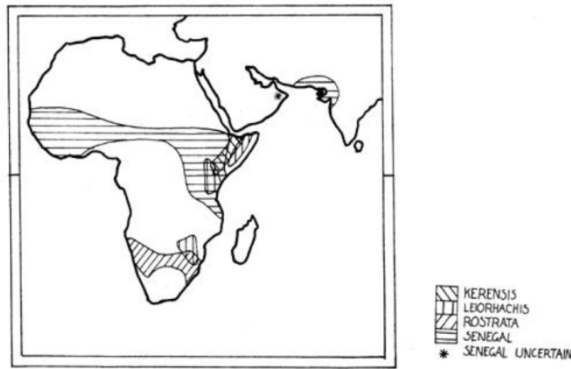
**Figure 1.** Carte d'Afrique montrant les tendances linéaires de la température annuelle et des précipitations annuelles entre 1901 et 2000 en Afrique (Hulme *et al.*, 2001)

## 2.4. Caractéristiques générales des espèces étudiées

### 2.4.1. *Acacia senegal* (L.) Wild. Fabaceae / Mimosaceae

Elle est désignée en français comme le gommier blanc et en anglais comme gum arabic tree. Il s'agit d'un arbuste épineux de 2 à 6 m et qui peut atteindre 10 m de hauteur (Arbonnier, 2002). Ses rameaux sont velus et l'écorce est grise. L'arbuste possède une cime étalée et ouverte à branches très ramifiées et étroites. Ses feuilles sont composées bipennées et groupées en petites fascicules de 6 à 15 paires de foliolules ovales arrondies aux deux extrémités larges de 1-2mm, longues de 3 à 6 mm (Giffard, 1974). Ses fleurs sont sessiles et sont composées d'un calice non velu, long de 2 mm et d'une corolle de 4 mm de long (Adjanohoun *et al.*, 1989). Son fruit est une gousse aplatie de 5 à 7,5 cm de long et de 1,7 à 2,5 cm de large avec un bec recourbé court à l'extrémité.

*Acacia senegal* a une aire de distribution qui est très vaste. L'espèce est distribuée non seulement du Sénégal jusqu'en Namibie mais aussi de l'est de l'Afrique jusqu'au Soudan (figure 2). Il s'agit d'une espèce résistante à la sécheresse et supporte des pluviométries comprises entre 100 et 800 mm avec une tolérance à une gamme de température allant de 4 à 45°C (Maydell, 1983).



**Figure 2.** Répartition d'*Acacia senegal* en Afrique

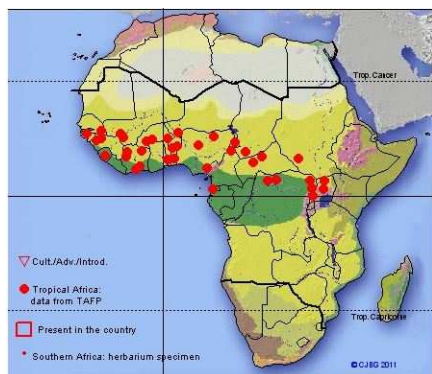
**Source :** Brenan (1983)

L'importance de *Acacia senegal* pour les populations locales n'est plus à démontrer. En effet, sa gomme est un produit très prisé dans l'industrie agroalimentaire (Zerbo, 2011). Son écorce est sollicitée dans la pharmacopée comme anti-inflammatoire et pour soigner les maladies comme la diarrhée, l'angine, les hémorroïdes, le panaris etc. (Kaboré, 1998). Elle joue également un rôle important dans les systèmes agroforestiers. Etant une légumineuse, elle fixe l'azote et sa forte teneur en protéines en fait un aliment de choix pour le bétail. *Acacia senegal* n'a pas de statut au niveau de l'UICN.

#### 2.4.2. *Afzelia africana* Smith. Fabaceae / Caesalpiniaceae

Le genre *Afzelia* Sm. comporte plusieurs espèces dont *Afzelia africana* est l'une des plus connues (Aubreville, 1950). Elle est connue sous le nom de Lingué (français). Il s'agit d'un grand arbre de 25 à 30 m voire 35 m de haut, à cime dense, large et étalée; le fût est droit et le diamètre peut dépasser les 2 m. C'est un arbre à branches massives et à écorce grise plus ou moins foncé. Le feuillage est vert brillant; les feuilles alternes, paripennées mesurant jusqu'à 30 cm de long, portent 3 à 8 paires de folioles opposées ou sub-opposées, glabres et luisantes, vert-foncé au-dessus, largement espacées sur le rachis. L'inflorescence est une panicule terminale d'environ 20 cm de long; les fleurs sont blanches, striées de pourpre. Les fruits sont des gousses (Adjanohoun *et al.*, 1989).

*Afzelia africana* est une espèce africaine disséminée dans toute l'actuelle zone de savane boisée de l'Afrique occidentale et orientale (figure 3). Elle est retrouvée en galerie forestière, en forêt guinéenne et en savane soudanienne, sur terrains secs, sols sableux profonds et sols alluvionnaires. Elle tolère une pluviométrie comprise entre 900 et 1400 mm/an ainsi qu'une température allant de 25 à 30 °C (Gérard et Louppe, 2011).



**Figure 3.** Répartition d'*Afzelia africana* en Afrique

Source : <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>

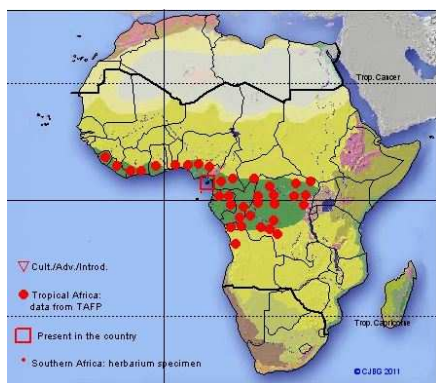
En ethnobotanique, l'espèce est utilisée pour guérir plusieurs maladies. Le décocté de l'écorce de tronc seule ou en association avec d'autres plantes telle que le *Berlinia grandiflora*, *Bombax costatum* et *Burkea africana*, est administré *per os* dans le traitement des œdèmes, de l'épilepsie, des névralgies intercostales etc. (Adjanohoun *et al.*, 1989). Les racines sont utilisées pour soigner la blennorrhagie et la trypanosomyase (Arbonnier, 2002) ; elles sont aussi employées contre l'hypertension, en mélange avec celles d'*Annona senegalensis*, et pour le traitement des plaies extérieures, en mélange avec celles de *Morinda lucida* (Ahouangonou et Bris, 1997). *Afzelia africana* est considéré comme vulnérable selon les catégories de menaces de l'UICN de 2013

#### 2.4.3. *Garcinia kola* Heckel. Clusiaceae

*G. kola* fait est connue sous le nom de faux colatier (français) et *bitter cola* (anglais). *Garcinia kola* est un arbre de 25 à 35 m voir 40 m de haut et dont le diamètre peut atteindre 1 m. Il possède des branches angulaires et de lourdes couronnes. Les feuilles opposées, à pétiole de 10-15 mm de long, articulé près de la base, entières, coriaces montrant des canaux sécréteurs noirs visibles à la face inférieure et parallèles aux nervures latérales. Espèce dioïque, ses fleurs mâles et ses femelles sont à pédicelle de 10-25 mm de long, pubescents. Les fleurs mâles possèdent 4 sépales inégaux, tomenteux extérieurement, glabres intérieurement tandis que les fleurs femelles semblables aux fleurs mâles sépales accrescents et persistants sous les fruits. Le fruit est une baie globuleuse à pulpe jaune orange contenant 3-4 graines ellipsoïdes (Adjanohoun *et al.*, 1989).

*Garcinia kola* est disséminée de la Sierra Leone au Congo (figure 4). Elle est à la région guinéo-congolaise où elle requiert une pluviométrie comprise entre 1300 - 1600 mm/an et une température de  $28 \pm 2^\circ$  C. (Beer et McDermott, 1989).





**Figure 4.** Répartition de *Garcinia kola* en Afrique

Source : <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>

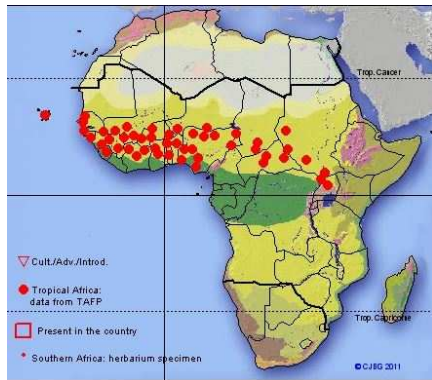
Plusieurs études en ethnobotanique effectuées sur *Garcinia kola* ont démontré qu'elle a une place importante dans la tradition africaine. Fortement sollicité dans les cérémonies de mariage, elle est utilisée dans de nombreux rituels traditionnels. En phytopharmacie, l'espèce occupe une position non moins négligeable car elle intervient dans la guérison de nombreuses maladies (toux, angines, diabète, palpitations, dysménorrhés etc.) et son bois est utilisé comme brosse végétale (Adjanouhoun *et al.*, 1991). De lourde pression subsiste sur *Garcinia kola* qui est classé comme vulnérable (UICN, 2013) et qui dans certain pays comme le Bénin est une espèce presque éteinte à cause de son haut niveau de sollicitation.

#### 2.4.4. *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss. Meliaceae

*Khaya senegalensis* est connu sous le nom de Cailcédrat (français) et African mahogany (anglais). *Khaya senegalensis* est un grand arbre de 25 – 35 mètres de haut, à fut généralement court et trapu, mais pouvant atteindre 10 m de haut et 2 m de diamètre, parfois avec un faible empatement à la base, à cime arrondie et dense avec les feuilles disposées au bout des rameaux. Son écorce est grise et lisse devenant plus ou moins ferrugineuse et écailleuse à tranche rose plus ou moins carmin exsudant un peu de liquide rougeâtre. Les feuilles sont alternes, paripennées, glabres, à 3-4 (voir 6) paires de folioles opposées ou sub-opposées, oblongues à oblongues elliptiques. L'inflorescence est un fascicule de panicules à l'aisselle des jeunes feuilles, de 15-20 cm de long. Les fleurs sont blanches, pédicellée. Les fruits sont dressés vers le haut, globuleux, et contenant des graines plates, rectangulaires, ailées et plus ou moins boursouflées (Adjanouhoun *et al.*, 1989).

Il s'agit d'une espèce à large distribution du Sénégal au Cameroun jusqu'au Soudan (figure 5). C'est un arbre très répandu dans les aires boisées des savanes soudaniennes à guinéennes, dans les zones plus humides (650 -1300 mm) et dans les types de végétation des zones de transition. Il préfère les sols profonds et bien drainés, mais s'adapte aussi aux sols

superficiels et latéritiques. Il supporte une température comprise entre 15 et 41 °C (Nikiema et Pasternak, 2008).



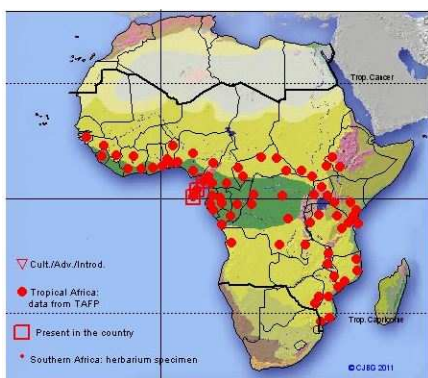
**Figure 5.** Répartition de *Khaya senegalensis* en Afrique  
(Source : <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>)

La plante est surtout utilisée comme fébrifuge (Arbonnier, 2002). Le bois rouge, à grain fin, ayant tendance à se fendre est plus lourd et d'une qualité inférieure à celui de *Khaya ivorensis*, mais il est très utilisé dans les zones de savane (construction, ébénisterie et menuiserie, pirogues, mortiers, bois de feu). Les racines sont utilisées comme aliment pour animaux et l'écorce a des vertus médicinales (vermifuge, abortive, paludisme, fièvre, ictère, coliques, ulcère phagédénique, dysménorrhée etc.). Le fruit est un calmant pour la toux, les feuilles servent comme fourrage pour le bétail et luttent contre la variole, diarrhée, ictère, lumbago, rhumatismes etc. Une protection légale existe dans divers pays. Cette espèce est considérée comme vulnérable selon les catégories de menaces de l'UICN (2013).

#### 2.4.5. *Milicia excelsa* (Welw.) C.C. Berg Moraceae

*Milicia excelsa* est connu sous le nom de « Iroko » en français et de Teck africain en Anglais (Aubreville, 1950). Il s'agit d'un arbre de 20 à 30 m voir 50 m de haut. Son fût droit peut atteindre 2-2,5m de diamètre (Ofori 2007a). L'écorce a une teinte allant du gris au brun foncé, et présente des lenticelles jaunâtres. Le tronc cylindrique et généralement droit, est dépourvu de branches sur une hauteur de 15 à 30 m. Chez les arbres adultes, les racines sont souvent superficielles et proéminentes (Dainou, 2012). Les feuilles de *Milicia excelsa* sont longues et assez étroites. Les feuilles alternes sont vertes clair, avec une pubescence très fine sur la face inférieure, à l'aspect velouté, douces au toucher et possèdent 12 à 22 nervures secondaires (Aubréville, 1959). Arbre dioïque, son inflorescence mâle de l'iroko est longue de 17 cm de longueur et le calice de ses fleurs femelles est entouré à la base d'une collerette dense de longs poils raides. Les graines sont petites (environ 2 mm de diamètre) et contenues dans des fruits juteux et sucrés consommés par divers animaux (Osmaston 1965).

*Milicia excelsa* a un patron de distribution large qui s'étend de la Guinée Bissau à l'Ethiopie et jusqu'en Angola et au Zimbabwe en direction du Sud (figure 6). Elle est rencontrée dans les forêts sempervirentes et semi-décidues, voire dans des forêts galeries en savanes (Nichols *et al.*, 1998). L'espèce supporte une pluviométrie comprise entre 900 et 1900 mm/an avec une température comprise entre 25 et 35 °C (Ofori, 2007a). Recherchée pour la qualité de son bois d'œuvre, pour ses nombreuses utilisations en médecine traditionnelle (stérilité chez les femmes, aphrodisiaque, tonique, purgatif, contre les affections cutanées, douleurs au ventre) et dans les rituels (abritent les génies), l'espèce a une importance socio-économique importante et est surtout utilisé pour son bois d'œuvre (Daïnou, 2012) . L'espèce est classée dans la catégorie « presque menacée » par l'UICN (IUCN 2013).



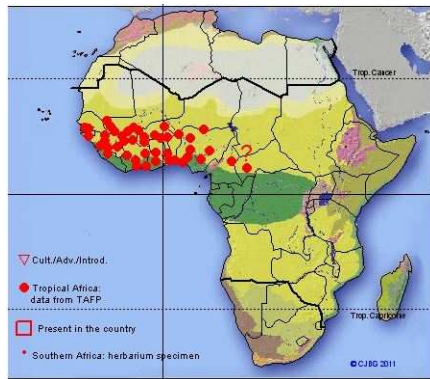
**Figure 6.** Répartition de *Milicia excelsa* en Afrique

Source : <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>

#### 2.4.6. *Pterocarpus erinaceus* Poir. Fabaceae

*Pterocarpus erinaceus* est connue sous le nom de Palissandre du Sénégal (français), barwood (anglais). C'est un arbre de 8-12 (15) mètres de haut à fût droit et cylindrique et ouvert. Son écorce est noirâtre, crevassée et très lamelleuse, à tranche brune striée de rouge exsudant une résine translucide. Les feuilles sont alternes, imparipennées à 3-5 (7) paires de folioles alternes. La plante présente une inflorescence en grappe lâche. La fleur est hermaphrodite et le fruit est une samare plate, entourée d'une aile circulaire membraneuse et plus ou moins plissée, portant sur les deux faces de la graine de nombreux poils épineux, rigides et enchevêtrés.

L'espèce est présente du Sénégal au Cameroun et à la République Centrafricaine (figure 7). Elle est disséminée et localement grégaire. L'espèce est rencontrée dans les savanes soudano-guinéennes et guinéennes sur tous types de sol y compris latéritiques. Elle prospère dans des conditions de pluviométrie comprise entre 600 et 1200 mm/an et de température allant de 15 à 32 °C (Duvall, 2008).



**Figure 7.** Répartition de *Pterocarpus erinaceus* en Afrique

Source : <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>

Le bois a un aubier jaunâtre, bois de cœur brun foncé veiné lourd et durable et est utilisé en construction, ébénisterie et tournage, sculpture et est également utilisé comme bois de feu et charbon. L'écorce a plusieurs usages. Elle sert pour le tannage, et permet de guérir carie dentaire, toux, ulcère chronique, anémie, hématurie et également diarrhée chez la volaille. Les racines sont utiles contre la toux et les plaies tandis que les feuilles sont fébrifuges et sont surtout utilisées comme fourrage car très appréciées par le bétail. De plus de part sa symbiose avec les rhizobiums du sol, le vène est capable de fixer l'azote atmosphérique (Bonkougou, 1999). Cette espèce n'a pas de statut au niveau de l'UICN (UICN, 2013). Toutefois, plusieurs auteurs sont d'avis de son importance et des multiples pressions et menaces qui la rendent vulnérable dans la sous-région.

### 3. Méthodologie

#### 3.1. Zone d'étude

La présente étude est réalisée à l'échelle de l'aire de distribution des six espèces étudiées. La zone d'étude s'étend de la zone sahélienne au centre d'endémisme guinéo-congolais (figure 8). En effet, selon la classification de Köppen, la zone sahélienne où l'on retrouve *Acacia senegal* est caractérisée par un climat sec où les précipitations sont comprises entre 250 et 760 mm/an avec une température annuelle supérieure à 18°C (Hufty, 2001). Les espèces *Azelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*, *Khaya senegalensis* sont retrouvées dans le centre d'endémisme soudanien caractérisé par un climat tropical sec avec une pluviométrie (1000-1500 mm/an) supérieure à l'évapotranspiration et une température supérieure à 18°C. C'est le centre d'endémisme guinéo-congolais qui abrite *Garcinia kola* qui est classé dans un climat tropical humide où les pluviométries sont supérieures à 1500 mm de pluie par an. *Milicia excelsa* quant à elle a une distribution plurirégionale s'étendant principalement du centre guinéo-congolais aux zones de transition voisines et à la région zambézienne (Nichols *et al.*, 1998).

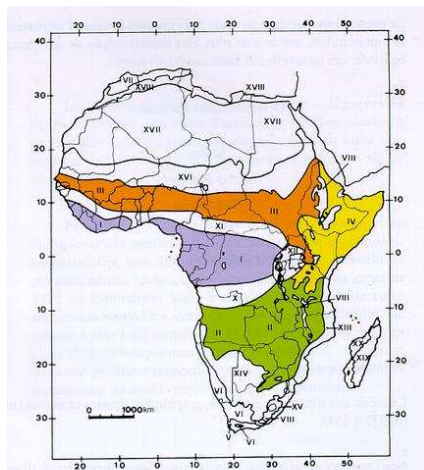


Figure 1.3 – Les territoires phytogéographiques de l'Afrique. Le centre régional d'endémisme zambézien (II) est figuré en vert; citons encore les centres soudanien (III) en orange, guinéo-congolais (I) en violet et Somalie-Masai (IV) en jaune. Les territoires X et XI sont des zones régionales de transition.

#### Figure 8. Carte de la zone d'étude

Source : <http://www.br.fgov.be/research/COLLECTIONS/HERBARIUMS/SP/katanga.html>

#### 3.2. Données utilisées

##### 3.2.1. Données biologiques

Elles sont de deux types à savoir : les données de présence des espèces ou données d'occurrence des espèces et les données de pseudo-absence.

### 3.2.1.1. Données de présence des espèces étudiées

Il s'agit des données d'occurrence qui décrivent la distribution connue des espèces choisies. Ces données sont des coordonnées géo-référencées des points où l'espèce considérée est observée. Ainsi, pour les obtenir, une revue bibliographique a été faite pour chaque espèce considérée, complétée par des collectes de données d'occurrence obtenues sur les herbariums en ligne. Le tableau 1 indique les effectifs des points d'occurrence et les références consultées pour les obtenir.

Notons qu'en Afrique, se pose avec acuité le problème de confusion taxonomique pour plusieurs genres. Dans le cas de notre travail, nous avons considéré les anciennes espèces connues alors que des révisions taxonomiques de certains genres sont régulièrement publiées. Selon Daïnou (2012), *Milicia excelsa* a été généralement confondue avec une espèce morphologiquement très proche, *Milicia regia* (A. Chev). Plusieurs autres travaux sont actuellement en cours sur les genres *Afzelia*, *Khaya*, etc. Etant donné que les données ont été collectées sur les publications en ligne, il est bien possible que cette confusion soit prise en compte. Ainsi, nous ne pourrions pas totalement garantir la bonne identification des 6 taxons traités. Le risque de confusion est toutefois nuancé étant donné que la majeure partie des points proviennent de Flores de référence.

**Tableau 1.** Echantillon de points de présence des espèces étudiées

Espèces	Nombre de points de présence	Références
<i>Acacia senegal</i>	259	Zerbo (2011), Edingburg Botanical garden specimen, Ali (1973), Yusuf <i>et al.</i> (2011), Schreier (2009), Herzog (1998), Al Flora of Zimbabwe 2012, Royal botanical Garden Kew, K00024436, The virtual herbarium (2012), Southern Africa herbarium specimens
<i>Afzelia africana</i>	209	Bayala <i>et al.</i> (2002), Ejikeme <i>et al.</i> (2010), Jiofack <i>et al.</i> (2009), Soaga <i>et al.</i> (2010), Souleymane <i>et al.</i> (2010), Koné <i>et al.</i> (2008), Sinsin <i>et al.</i> (2004), Fournier <i>et al.</i> (2003), GBIF
<i>Garcinia kola</i>	132	GBIF, Lebrun et Stork (1991-2012)
<i>Khaya senegalensis</i>	152	GBIF, Lebrun et Stork (1991-2012)
<i>Milicia excelsa</i>	206	GBIF, Lebrun et Stork (1991-2012)
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	156	Appiah (2013), GBIF, Lebrun et Stork (1991-2012)

### 3.2.1.2. Données de pseudo-absence (modèles logistiques)

Contrairement aux données d'occurrence, elles représentent les points où l'espèce considérée est supposée être absente. Nous avons appliqué la méthode suggérée par Van der Wal *et al.* (2009a) qui semble la mieux cerner les facteurs climatiques majeurs influençant la distribution de chaque espèce. En utilisant le logiciel *ArcMap 9.3* et l'outil *Hawths tools* des points ont été sélectionnés aléatoirement en nombres identiques aux effectifs de coordonnées de chaque espèce, à partir d'une grille de coordonnées aléatoires couvrant l'Afrique. Les sélections ont été réalisées depuis la zone d'occurrence jusqu'à une distance donnée de tout point d'occurrence ; pour chaque espèce, on a produit x jeux de pseudo-absences dont la distance maximale par rapport aux occurrences variait entre 500 et 2400 km et l'on a, pour chaque espèce, calculé plusieurs modèles en utilisant les différents jeux de pseudo-absences.

### 3.2.2. Données climatiques

Les simulations du modèle CARAIB nécessitent comme données d'entrée les variables climatiques mensuelles suivantes : la température moyenne (°C), les précipitations (mm), la couverture nuageuse (convertie en pourcentage d'ensoleillement), l'humidité relative (%), l'amplitude thermique journalière (°C) et la vitesse du vent (m/s). Les données climatiques utilisées dans ce travail sont celles générées par le modèle climatique global CNRM-CM5 du Centre National de Recherches Météorologiques à une résolution spatiale de 1.4° x 1.4 °, préparées dans le cadre du CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) en vue du cinquième rapport du GIEC (AR5). Ces données ont été interpolées spatialement de manière à obtenir une résolution plus fine de 10'x10' (avec la même procédure que dans François *et al.*, 2006). Les valeurs journalières sont ultérieurement obtenues par le générateur stochastique de variables météorologiques du DVM CARAIB (Hubert *et al.*, 1998) à partir des valeurs mensuelles du modèle climatique. La projection climatique couvre la période historique allant de 1950 à 2005 et le reste du 21e siècle de 2006 à 2100. Nous avons choisi d'utiliser le scénario climatique RCP 8.5 avec une concentration en CO2 atmosphérique supérieure à 936 ppm en 2100. En effet, ce scénario qui a été utilisé dans plusieurs travaux réalisés sur les écosystèmes de l'Afrique (Panitz *et al.*, 2013 ; Wu *et al.*, 2013) est une version actualisée du scénario de type A2. Ce scénario, présente les caractéristiques demandées pour les analystes d'incidences, d'adaptation et de vulnérabilité (Moss *et al.*, 2010). Comme tous les scénarii A, il suppose que l'aspect économique prime sur l'aspect environnemental dans la motivation des décisions politiques. Le 2 décrit un monde très hétérogène : les identités locales sont préservées et le développement économique a une orientation principalement régionale avec un accroissement de la population.

Pour éviter les éventuels biais (de température, de pluviosité,...) du modèle climatique sur la période historique (i.e., le modèle simule peut-être des températures trop chaudes ou trop froides par rapport à ce qui a été réellement observé), seules les anomalies projetées par le CNRM-CM5 GCM entre chaque année et la période 1961-1990 ont été conservées et ajoutées à la climatologie 1961-1990 du *Climatic Research Unit* (CRU CL 1.0 ; New *et al.*, 1999). La base de données CRU peut être considérée comme la vérité terrain étant donné qu'elle reprend l'ensemble des observations acquises par des stations météorologiques qu'elle interpole sur une grille globale. Il est à noter que pour les températures, ce que l'on ajoute ce sont des anomalies absolues et pour les précipitations sont des anomalies relatives pour éviter les précipitations négatives. Finalement, les moyennes mensuelles des 7 variables climatiques à savoir : température (°C), précipitations (mm), évapotranspiration potentielle (mm), humidité relative (%), amplitude thermique journalière (°C), vitesse du vent (m/s) et ensoleillement (%) ont été obtenues. Seules les 4 premières variables ont été utilisées pour les modèles logistiques afin de limiter le nombre d'effets et pour obtenir des estimateurs robustes.

### 3.2.3. Modèle logistique

Le modèle logistique est l'un des modèles les plus utilisés aujourd'hui en écologie. Il permet sur base des données de présence et d'absence de l'espèce, d'obtenir une probabilité de présence en fonction de variables climatiques ou autres. Le calcul du modèle logistique est basé sur la variable dépendante qui est qualitative P(x) ou Y et suit une loi binaire « 0 pour Absence » et « 1 pour présence » avec des variables explicatives X quantitatives (ou éventuellement qualitative). La fonction *logit* relie les valeurs des variables explicatives à la variable dépendante. Le modèle logistique s'écrit sous la forme :

$$P(x) = \frac{1}{1+e^{-(\alpha+\sum \beta_i X_i)}} \quad \text{Kleinbaum et Klein (2010)}$$

Il calcule une valeur comprise entre 0 et 1 qui peut être assimilée à une probabilité de présence. Il est donc nécessaire de fixer un seuil de coupure au-dessus duquel on considère la présence. En utilisant *Arcmap 9.3*, nous avons associé les valeurs des variables climatiques aux coordonnées de présence et de pseudo-absence pour chaque niveau de distance au moyen de l'outil *Hawthstool*. Les modèles ont été calculés dans *Statistica 10*. Les modèles complets comprenaient les effets quadratiques des variables climatiques et les interactions deux à deux. Le modèle le plus parcimonieux a chaque fois été retenu en choisissant celui qui avait l'AIC (*Akaike Information Criterion*) le plus faible.

$$AIC = 2k - n \times \ln (SCE/n) \quad (\text{Schwarz, 1978})$$

où k est le nombre de paramètres, SCE est la somme des carrés des écarts et n le nombre d'observations. La validation du modèle a été réalisée sur base de l'AUC (Area Under ROC



Curve), du test de vraisemblance de type I et du  $\chi^2$  de Pearson. La matrice de confusion a été utilisée pour estimer la fidélité des prédictions. L'AUC est reconnu comme étant l'un des évaluateurs indépendants pertinents de seuil de pouvoir discriminant des modèles (Fielding et Bell, 1997). Il varie entre 0 et 1. Une valeur de AUC de 0,5 indique que le modèle a une prédiction aléatoire (pas mieux que le hasard). Les modèles avec un AUC de 0,7 sont acceptables, tandis qu'un AUC=0,8 signifie que dans les zones d'occurrence de l'espèce, dans 80 % des cas, les valeurs prédites sont plus élevées comparativement à celles des pseudo-absences. Pour une valeur de AUC comprise entre 0,8 et 0,9 nous sommes dans le cas d'une bonne discrimination, et lorsque AUC est comprise entre 0,9 et 1 nous sommes dans le cas d'une excellente discrimination (Kleinbaum et Klein, 2010). Une fois le modèle retenu, les coefficients inconnus sont déterminés en recalculant le modèle le plus parcimonieux. On obtient une équation de régression multiple qui fournit  $P(x)$  par application de la réciproque de la fonction logit (la fonction sigmoïde).

Ensuite, on établit pour chaque espèce, la variation de AUC en fonction de la distance maximale des pseudo-absences par rapport aux occurrences. On choisit le modèle qui a l'AUC le plus élevé avec la distance maximale la plus faible. Ce choix permet d'obtenir une capacité prédictive optimale des variables climatiques (Van der Wal *et al.*, 2009b).

Au moyen du logiciel *SigmaPlot 11.0*, la réponse écologique des espèces étudiées aux facteurs climatiques  $f$  retenus par les modèles a été calculée. Cette réponse a été calculée en utilisant l'équation et en fixant les valeurs de toutes les autres variables égales à leur moyenne dans les observations. On trace le graphe de  $P(x)$  en fonction du facteur  $f$  en superposant les distributions de fréquences du facteur des présences et des pseudo-absences comme le suggère Inouye (2004).

Une projection future avec les données climatiques de 2041-2060 a été effectuée en recalculant la probabilité  $P(x)$  de présence des espèces avec les nouvelles données. Au moyen de ArcMap 9.3 les cartes de distribution pour le présent et pour le futur ont été réalisées et des classes de probabilité ont été définies afin de faciliter les interprétations. Aussi l'aire de chaque classe de probabilité pour chaque espèce a-t-elle été calculée pour le présent et pour le futur dans le but de déduire les tendances évolutives des habitats. Sur base des probabilités de présence des espèces générées par le modèle utilisé, trois classes de niches ont été définies. Le seuil de coupure absolu doit être proche de 0.5 car pour chaque espèce étudiée, il y a autant de données de présence que de pseudo-absences. Dès lors, les zones où l'espèce a une probabilité inférieure à 0,4 sont considérées comme des habitats inappropriés pour l'espèce considérée. Lorsque la probabilité est comprise entre 0,4 et 0,6 l'habitat est dit moyennement adéquat pour l'espèce considérée. La troisième classe est celle définie par l'espace où les variables

environnementales sont favorables à la persistance de l'espèce (habitat hautement adéquat). Pour apprécier l'intensité de la menace, nous avons considéré le critère de l'UICN relatif à la réduction des populations dans le futur (A3). Ce critère tient compte des tendances évolutives des habitats pour déduire l'ampleur de la réduction et ensuite répartir les espèces en quatre classes à savoir : espèces non menacées (< 30 %), espèces vulnérables ( $\geq 30$  %), espèces en danger ( $\geq 50$  %), espèces en danger critique d'extinction ( $\geq 80$  %) (UICN, 2001).

#### 3.2.4. *Modèle Maxent*

Le programme MAXENT 3.3.3 (Phillips *et al.*, 2006) a été utilisé pour établir l'enveloppe climatique actuelle et future pour l'apparition naturelle des espèces prioritaires. Le modèle Maxent est une méthode qui utilise le principe de *maximum entropy* avec des formules mathématiques simples qui ont été appliquées avec succès pour la modélisation de la distribution de diverses espèces (Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006). Maxent établit un rapport entre la niche de l'espèce et les jeux de données climatiques dans le but de déterminer la probabilité de réponse d'apparition des espèces aux gradients environnementaux. Ces réponses environnementales sont appliquées aux jeux de données géographiques pour reconstruire la distribution géographique de la probabilité d'apparition des espèces (Trabucco *et al.*, 2010). Maxent a été présenté comme étant le modèle le plus performant parmi les modèles de modélisation de la distribution des espèces (Elith *et al.*, 2006).

Le modèle décrit par Phillips *et al.* (2004) s'écrit :

$$H(p) = - \sum_{x \in A \times B} p(x) \log p(x)$$

$p$  étant la fonction de distribution sur  $\mathcal{E}$  avec  $f_j : \mathcal{E} \rightarrow \{0,1\}$ ,  $\mathcal{E} = A \times B$

$\mathcal{E}$  étant l'espace géographique contenant les points  $x = (a,b)$ , où  $a \in A \wedge b \in B$  avec  $a$  et  $b$  représentant le couple de coordonnées des points  $x$ .

Pour chaque évaluation, 25 % de la totalité des données enregistrées pour chaque espèce seront utilisés pour tester le modèle alors que les 75 % restants seront utilisés pour la calibration. Une procédure jackknife a été exécutée sur les variables climatiques pour déterminer les grands contributeurs au modèle de prédiction.

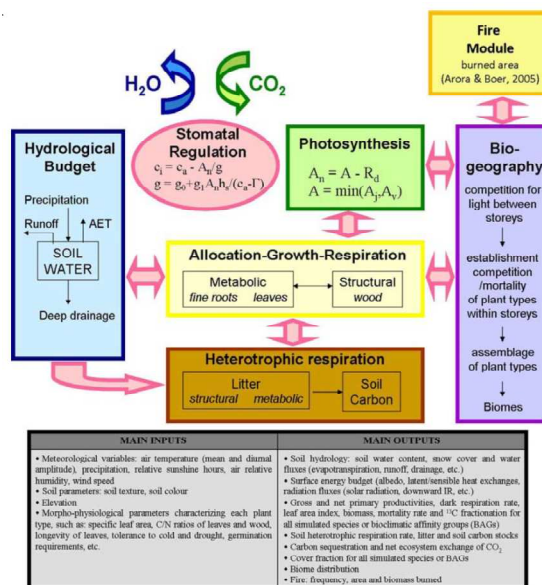
Les critères AUC et ROC ont été utilisés pour évaluer la capacité prédictive du modèle. Comme pour la régression logistique, nous avons fait varier la taille de la zone de background qui correspond en réalité aux absences. Dans ce cas, une connaissance de l'aire de distribution même approximative est importante pour effectuer de bonne prévision. Nous avons ainsi pris comme zones de background les aires de distribution actuelle des espèces étudiées et y avons

ajoutés des zones tampons de 500 km à 2400 km de profondeur. De la même manière que pour les modèles logistiques, nous avons retenus les modèles qui avaient le plus grand AUC avec le plus petit background.

Les projections pour le présent et le futur ont été réalisées sur l'ensemble de l'Afrique.

### 3.2.5. Modèle CARAIB

Le modèle CARAIB pour *Carbon Assimilation in Biosphere* est un modèle dynamique de végétation destiné à étudier le rôle de la végétation dans le cycle global du carbone dans le passé ou dans le présent (Nemry *et al.*, 1996 ; Warnant, 1999; Gérard, 1999 ; François, 2006 ; Galy *et al.*, 2008). C'est un modèle mécaniste complet composé de plusieurs modules (figure 9) qui établit des liens explicites entre les variables de l'environnement, les processus physico-chimiques et la physiologie. Le modèle est explicité par Dury *et al.* (2011). Il tient compte de l'hydrologie du sol, de la physiologie et de la phénologie de la végétation, du bilan de carbone de la dynamique végétale (effet de compétition pour l'eau et la lumière), de la sénescence et des perturbations les feux ; il peut être utilisé pour étudier la gestion des écosystèmes (François *et al.*, 2011).



**Figure 9.** Composantes du modèle CARAIB

Source : François *et al.*, 2011

Le modèle CARAIB a été utilisé avec les 7 variables climatiques mensuelles de 1950 à 2060 obtenues selon la méthodologie sus-expliquée. Contrairement à ce que nous avons réalisé

avec les modèles statiques on a corrigé les variables climatiques en utilisant les gradients climatiques altitudinaux avec le modèle GTOPO 30. En effet, le climat calculé par pixel grâce à CNRM-CM5 et CARAIB est un climat moyen par pixel de 10'x10'. Or la plupart des coordonnées de présence des espèces apparaissent avec une précision bien supérieure qui peut être exploitée en déterminant l'altitude moyenne du pixel 30''x30'' de GTOPO30 correspondant. La différence d'altitude entre les deux types de pixels est alors traduite en gradients climatiques altitudinaux en calculant les gradients verticaux dans les basses couches de l'atmosphère pour tous les pixels de la zone considérée.

En ce qui concerne les espèces étudiées, en plus de leurs coordonnées de présence, la nature décidue ou persistante des feuilles ainsi que l'indice foliaire spécifique de chaque espèce ont été renseignés soit à partir de données de la littérature, soit en utilisant des valeurs par défaut habituelles du modèle. En effet, seul l'indice foliaire spécifique pour *Milicia excelsa* a été trouvé dans la littérature et est de 0,52 cm<sup>2</sup>/g (Agyeman *et al.*, 2009). Pour les espèces (i) *Acacia senegal*, *Azelia africana*, *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*, et (ii) *Garcinia kola*, les valeurs par défaut du modèle sont respectivement : 0,15 cm<sup>2</sup>/g et 0,3 cm<sup>2</sup>/g. Les autres constantes bioclimatiques nécessaires au modèle reposent également sur les valeurs par défaut (choisies en fonction de la latitude). Parmi les sorties du modèle, nous avons retenu la productivité primaire nette (g de carbone par cm<sup>2</sup>) et avons retenu comme seuil de présence la valeur de 800g/cm<sup>2</sup>/an.

## 4. Résultats

### 4.1. Les modèles

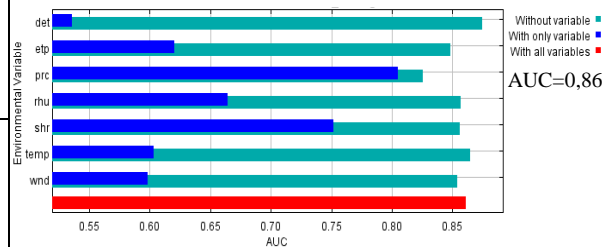
#### 4.1.1. *Acacia senegal*

Le modèle logistique retient significativement pour *Acacia senegal* les effets quadratiques des variables température, humidité relative et précipitation ainsi que les interactions entre température-humidité relative, humidité relative-précipitation, humidité relative-évapotranspiration et précipitation et évapotranspiration (tableau 2) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont : précipitation et ensoleillement (figure 10).

**Tableau 2.** Modèle logistique pour *Acacia senegal*

	Coefficients	P-valeur du test de vraisemblance de type I	P-valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	-11,4016		0,000510	0,79
temp	0,3882	0,827102	0,000779	
rhu	0,1271	0,033834	0,043959	
prc	0,1139	0,793241	0,000000	
temp*rhu	-0,0084	0,000058	0,000083	
rhu*prc	-0,0013	0,000000	0,000000	
rhu*etp	0,0014	0,000000	0,000000	
prc*etp	-0,0006	0,000023	0,000061	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc),  
Évapotranspiration (etp)



**Figure 10.** Modèle Maxent pour *Acacia senegal*

**Légende :** Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc), Évapotranspiration (etp), Amplitude thermique journalière (det), Vitesse du vent (wnd), Ensoleillement (shr)

#### 4.1.2. *Afzelia africana*

Le modèle logistique retient significativement pour *Afzelia africana* l'effet quadratique des variables température, précipitation et évapotranspiration ainsi que les interactions entre humidité relative-précipitation, humidité relative-évapotranspiration (tableau 3) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont précipitation et évapotranspiration (figure 11).

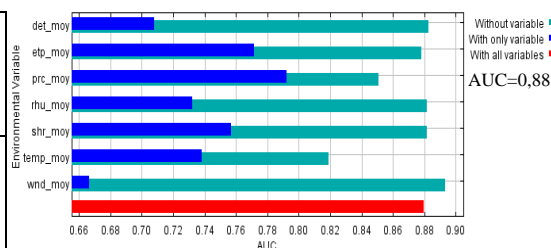
#### 4.1.3. *Garcinia kola*

Le modèle logistique retient significativement pour *Garcinia kola* l'effet quadratique de la variable humidité relative ainsi que les interactions entre température-évapotranspiration et humidité relative-évapotranspiration (tableau 4) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont : ensoleillement et humidité relative (figure 11).

**Tableau 3.** Modèle logistique pour *Afzelia africana*

	Coefficients	P valeur du test de vraisemblance de type I	P valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	-7,33136		0,001621	0,75
temp	0,40571	0,000000	0,000001	
prc	0,11929	0,762699	0,000004	
etp	-0,16737	0,060527	0,000000	
rhu*prc	-0,00180	0,751761	0,000001	
rhu*etp	0,00218	0,000000	0,000000	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc)  
Evapotranspiration (mm)



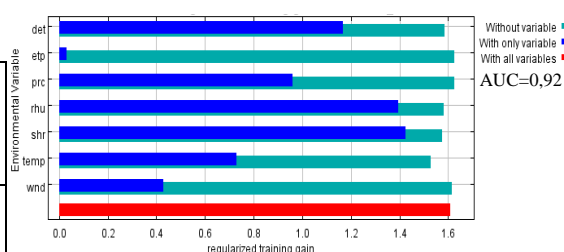
**Figure 11.** Modèle Maxent pour *Afzelia africana*

**Légende :** Température (temp\_moy), Humidité relative (rhu\_moy), Précipitation (prc\_moy), Evapotranspiration (etp\_moy), Amplitude thermique journalière (det\_moy), Vitesse du vent (wnd\_moy), Ensoleillement (shr\_moy)

**Tableau 4.** Modèle logistique pour *Garcinia kola*

	Coefficients	P valeur du test de vraisemblance de type I	P valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	-30,4651		0,000000	0,93
rhu	0,4280	0,000000	0,000000	
temp*etp	0,0040	0,177855	0,000741	
rhu*etp	-0,0016	0,000449	0,001761	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Evapotranspiration (etp)



**Figure 12.** Modèle Maxent pour *Garcinia kola*

**Légende :** Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc), Evapotranspiration (etp), Amplitude thermique journalière (det), Vitesse du vent (wnd), Ensoleillement (shr)

#### 4.1.4. *Khaya senegalensis*

Le modèle logistique retient significativement pour *Khaya senegalensis* les effets quadratiques des variables température, humidité relative, précipitation et évapotranspiration ainsi que les interactions entre température-humidité, humidité relative-précipitation et précipitation-évapotranspiration (tableau 5) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont : température et précipitation (figure 13).

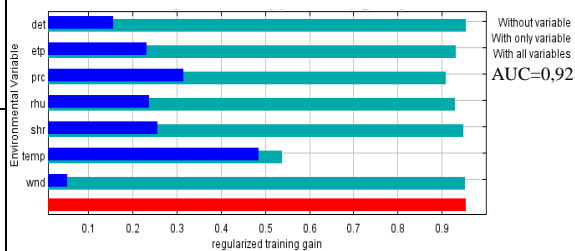
#### 4.1.5. *Milicia excelsa*

Le modèle logistique retient significativement pour cette espèce les effets quadratiques des variables température, humidité relative, précipitation et évapotranspiration ainsi que les interactions entre température-humidité, humidité relative-précipitation et précipitation-évapotranspiration (tableau 6) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont : ensoleillement et précipitation (figure 14).

**Tableau 5.** Modèle logistique pour *Khaya senegalensis*

	Coefficients	P valeur du test de vraisemblance de type I	P valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	36.47174		0.009288	0,89
temp	-1.75295	0.000034	0.000926	
rhu	-1.03941	0.000000	0.000049	
prc	0.14936	0.000001	0.000000	
etp	0.07885	0.000000	0.001048	
temp *rhu	0.03934	0.000000	0.000022	
prc *etp	-0.00047	0.000000	0.017522	
rhu *prc	-0.00113	0.000434	0.000854	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Evapotranspiration (etp)  
Précipitation (prc)



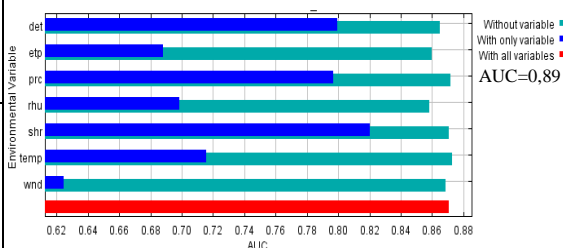
**Figure 13.** Modèle Maxent pour *Khaya senegalensis*

**Légende :** Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc), Evapotranspiration (etp), Amplitude thermique journalière (det), Vitesse du vent (wnd), Ensoleillement (shr)

**Tableau 6.** Modèle logistique pour *Milicia excelsa*

	Valeur de coefficients	P valeur du test de vraisemblance de type I	P valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	1,989506		0,502203	0,86
temp	-0,940542	0,103903	0,000001	
rhu	-0,237987	0,000000	0,000057	
prc	0,141864	0,001732	0,000093	
etp	0,064866	0,001047	0,003936	
temp *rhu	0,017525	0,000000	0,000000	
rhu *prc	-0,001245	0,000913	0,004234	
prc *etp	-0,000393	0,027791	0,025303	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Evapotranspiration (etp)  
Précipitation (prc)



**Figure 14.** Modèle Maxent pour *Milicia excelsa*

**Légende :** Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc), Evapotranspiration (etp), Amplitude thermique journalière (det), Vitesse du vent (wnd), Ensoleillement (shr)

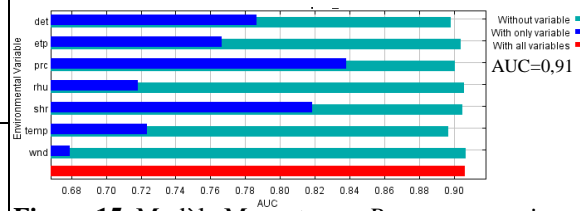
#### 4.1.6. *Pterocarpus erinaceus*

Le modèle logistique retient significativement pour *Pterocarpus erinaceus* l'effet quadratique de la variable précipitation et humidité relative ainsi que les interactions entre température-humidité, humidité relative-précipitation et précipitation-évapotranspiration (tableau 7) alors que les deux principales variables dans le modèle Maxent qui expliquent la présence de l'espèce dans un milieu sont : précipitation et ensoleillement (figure 15).

**Tableau 7.** Modèle logistique pour *Pterocarpus erinaceus*

	Valeur de coefficients	P valeur du test de vraisemblance de type I	P valeur du test de Wald	AUC
Ord.Orig	-18,3004		0,000000	0,92
rhu	-0,0146	0,000000	0,845371	
prc	0,1680	0,039864	0,000001	
temp *rhu	0,0113	0,000000	0,000005	
rhu *prc	-0,0028	0,000000	0,000000	
prc *etp	0,0003	0,023340	0,031091	

Température (temp), Humidité relative (rhu), Evapotranspiration (etp)  
Précipitation (prc)

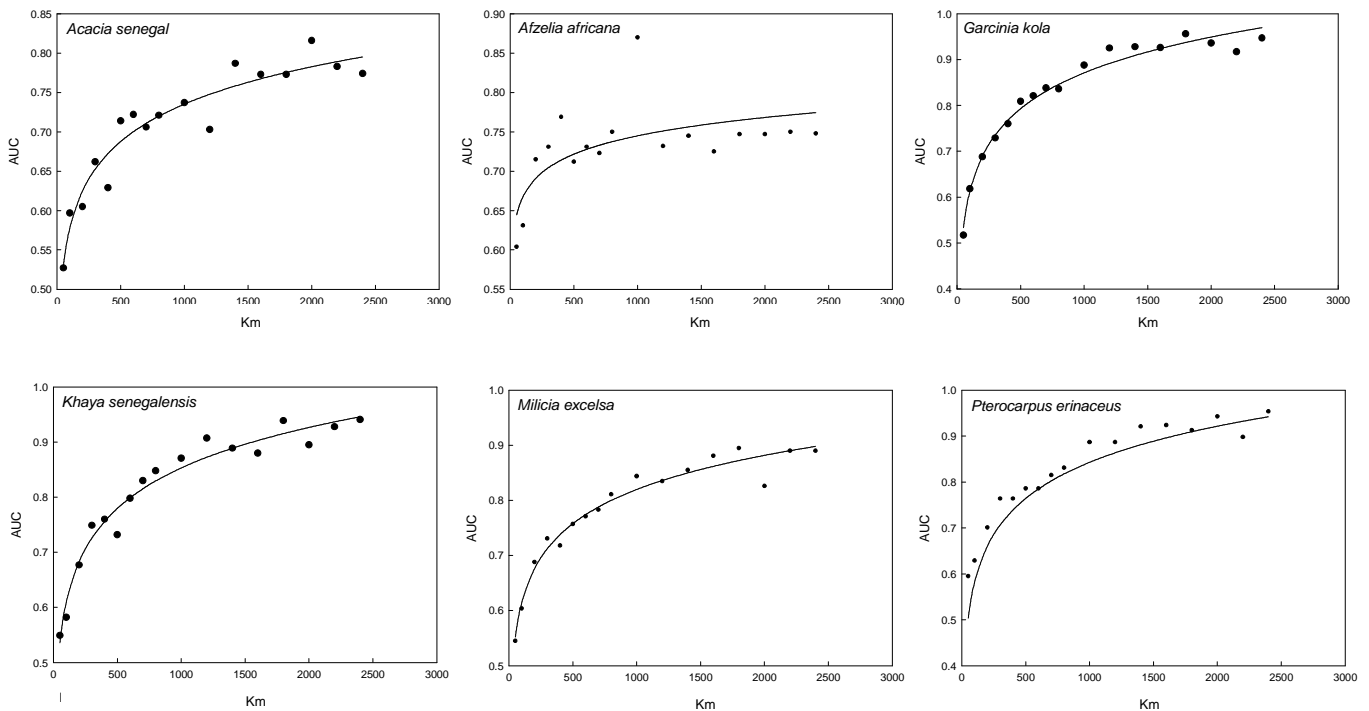


**Figure 15.** Modèle Maxent pour *Pterocarpus erinaceus*

**Légende :** Température (temp), Humidité relative (rhu), Précipitation (prc), Evapotranspiration (etp), Amplitude thermique journalière (det), Vitesse du vent (wnd), Ensoleillement (shr)

#### 4.2. Evaluation de la capacité prédictive des modèles statistiques en fonction de la distance d'échantillonnage

La figure 16 indique pour chaque espèce l'évolution de l'AUC en fonction des distances maximum d'échantillonnage des pseudo-absences par rapport aux présences pour les modèles logistiques. Une courbe de tendance logarithmique a été utilisée pour une meilleure mise en évidence de l'allure de la relation entre les deux paramètres.



**Figure 16.** Evolution de l'AUC des modèles logistiques en fonction de la distance maximum d'échantillonnage (km) des pseudo-absences par rapport aux présences pour chaque espèce étudiée



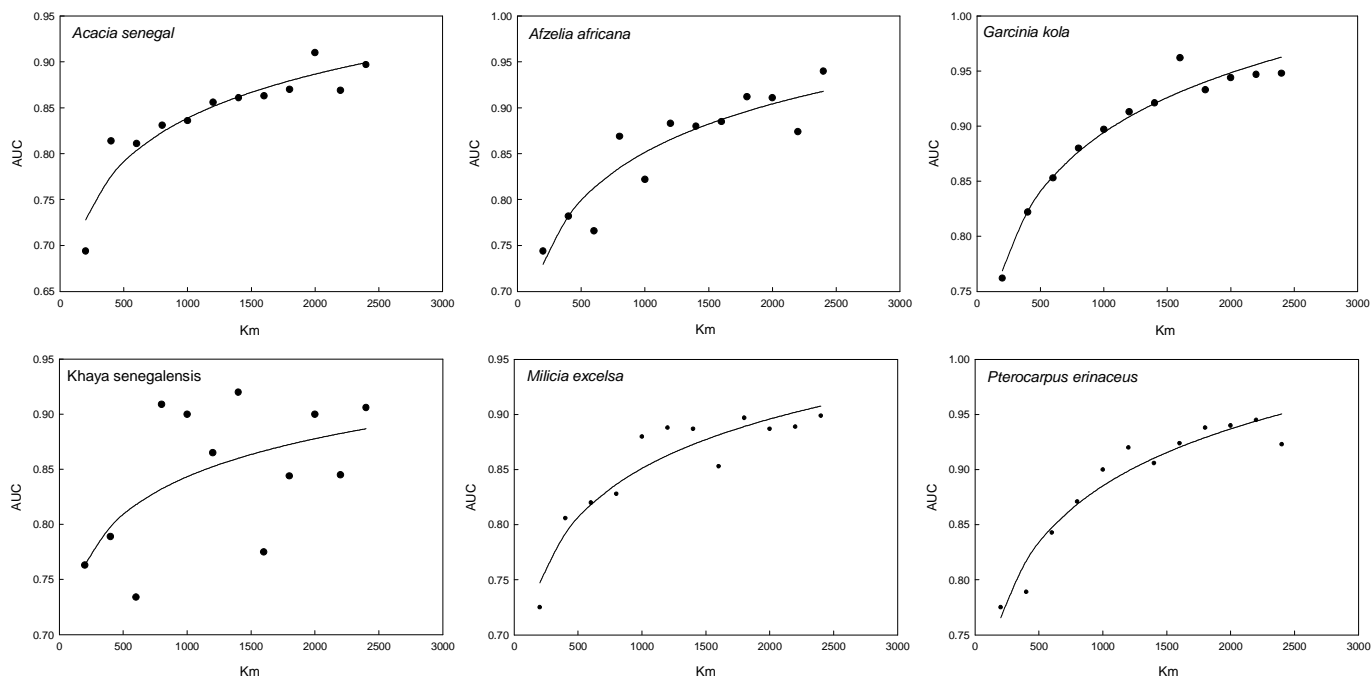
La qualité du modèle logistique s'améliore quand la distance d'échantillonnage des pseudo-absences s'accroît. Une analyse de variance à deux critères (espèces et distance) a indiqué une différence significative entre la distance et l'AUC au seuil de 5 % ( $F_{(16;86)}=33,21$  ;  $P<0,001$ ) et une différence significative entre les espèces et l'AUC ( $F_{(5;96)}=26,26$  ;  $P<0,001$ ). Ces résultats ont indiqué que l'AUC suit une évolution différente d'une espèce à une autre. En effet, un modèle à bonne discrimination a été obtenu pour *Acacia senegal*, *Azelia africana*, *Garcinia kola*, *Khaya senegalensis*, *Milicia excelsa* et *Pterocarpus erinaceus* respectivement à une distance de 2000 km (AUC=0,816), 1000 km (AUC=0,87), 1400 km (AUC=0,928), 1200 km (AUC=0,907), 1600 km (AUC=0,881) et 1400 km (AUC=0,921). Une modélisation rigoureuse de la distribution présente et future de la niche potentielle des espèces étudiées doit tenir compte également d'une même distance maximum d'échantillonnage des pseudo-absences afin d'obtenir des résultats pouvant être comparé d'une espèce à une autre. Ainsi, l'analyse des résultats a suggéré que la quasi-totalité des espèces étudiées ont un  $AUC>0,8$  à une distance maximum d'échantillonnage de 1400 km. Nous resterons donc à cette distance pour effectuer nos simulations pour le modèle logistique.

La figure 17 présente la variation de l'AUC en fonction de la profondeur du tampon appliqué à l'aire de distribution des espèces étudiées pour déterminer le background nécessaire à l'entraînement de Maxent.

L'analyse de variance à deux facteurs (espèce et distance maximum de variation d'aire de distribution) a indiqué au seuil de 5% que l'AUC varie significativement d'une distance à une autre ( $F_{(5;67)}=8,93$  ;  $P<0,001$ ) et d'une espèce à une autre ( $F_{(11;61)}=8,93$  ;  $P<0,001$ ). L'ensemble des graphes a montré que plus l'aire de distribution de l'espèce est élargie, plus l'on obtient un modèle performant (figure 17). Les valeurs les plus élevées du AUC ont été obtenue pour *Acacia senegal*, *Azelia africana*, *Garcinia kola*, *Khaya senegalensis*, *Milicia excelsa* et *Pterocarpus erinaceus* respectivement à 2000 km (AUC=0,91), 1800 km (AUC=0,91), 1600 km (AUC=0,96), 1400 km (0,92), 2400 km (AUC=0,89) et à 2200 km (AUC=0,94). Une analyse des données a montré qu'à une distance maximum de variation de l'aire de distribution de 1400 km 50 % que l'on obtient pour toutes les espèces un modèle Maxent de bonne capacité de discrimination ( $0,8<AUC<0,95$ ).

#### 4.3. Réponse écologique des espèces étudiées

Les deux modèles statiques Maxent et le modèle logistique, ont été mis à contribution pour apprécier la réponse écologique des espèces étudiées vis-à-vis des variables climatiques.



**Figure 17.** Evolution du AUC des modèles Maxent en fonction de la profondeur du tampon appliqué à l'aire de distribution des espèces étudiées pour déterminer le background l'entraînement de Maxent

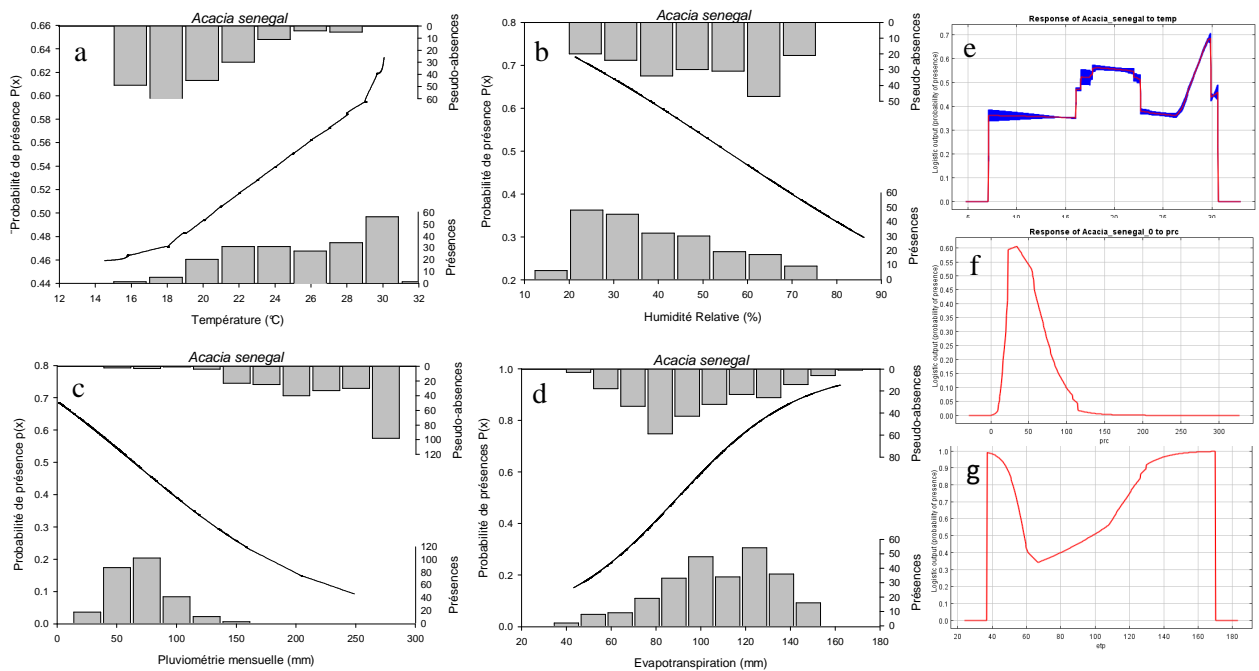
#### 4.3.1. Réponse écologique d'*Acacia senegal*

Les résultats du modèle logistique illustrés sur les graphes de la figures 18 indiquent que *Acacia senegal* a une abondance dans les biotopes où la température comprise entre 26 et 30 °C, l'humidité relative comprise entre 20 et 50 %, la pluviométrie mensuelle entre 40 et 80 mm avec une évapotranspiration estimée entre 100 et 130 mm. Ces résultats confirment ceux obtenu par le modèle Maxent où les valeurs moyennes pour la température, l'humidité relative, la pluviométrie mensuelle et l'évapotranspiration sont respectivement : 24,4 °C ; 60 % ; 54,2 mm et 98,6 mm. Les réponses écologiques obtenues avec Maxent sont plus complexes et liées aux effets des variables qu'il est possible de choisir, mais globalement, les variables agissent dans le même sens. Vu cette complexité, seules les réponses écologiques des modèles logistiques sont renseignées pour les autres espèces.

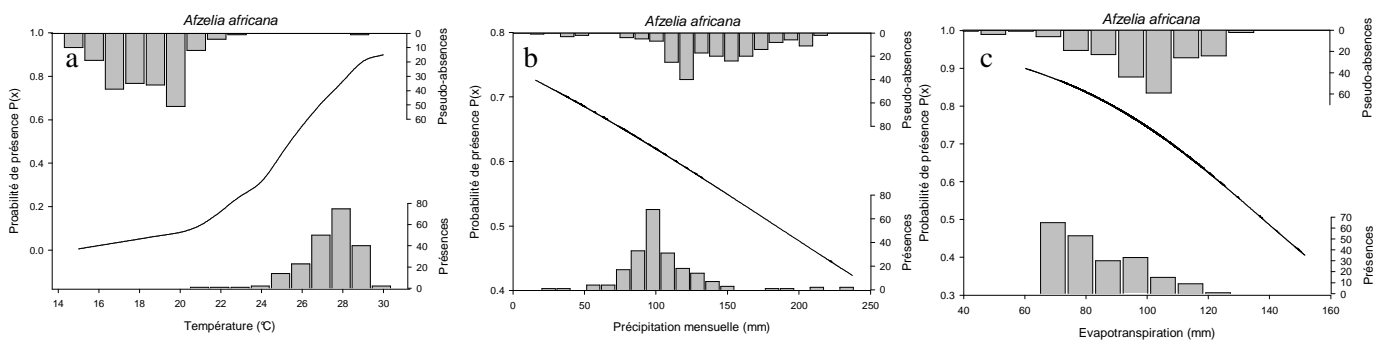
#### 4.3.2. Réponse écologique d'*Afzelia africana*

*Afzelia africana* est présente avec une relative abondance dans les biotopes qui présentent des caractéristiques suivantes : température comprise entre 26 et 30 °C, précipitation mensuelle comprise entre 60 et 130 mm et une humidité relative allant de 60 à 80 % (figure 19). Les résultats du modèle Maxent ont indiqué que les moyennes pour les variables température,

précipitations mensuelles, évapotranspiration et humidité relative sont respectivement 26,9 °C, 103,1 mm, 63,4 % et 96,2 mm (annexe 1).



**Figure 18.** Réponses écologiques d'*Acacia senegal* pour les facteurs (a) température, (b) humidité relative, (c) Pluviométrie mensuelle et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux. Réponses écologiques pour (e) température, (f) pluviométrie et (g) évapotranspiration calculées pour le modèle Maxent.

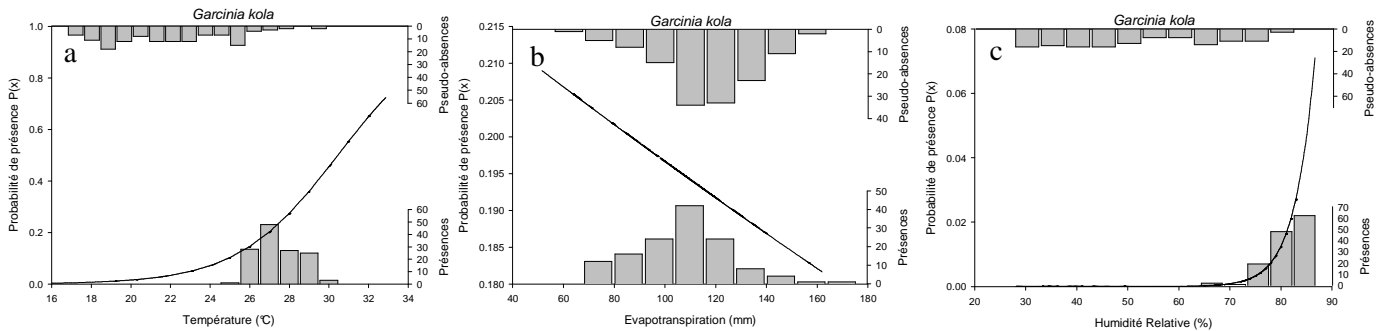


**Figure 19.** Réponse écologique d'*Afzelia africana* pour les facteurs (a) température, (b) humidité relative et (c) Evapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.

#### 4.3.3. Réponse écologique de *Garcinia kola*

Les résultats du modèle logistique (figure 20) indiquent que *Garcinia kola* est retrouvé dans une niche potentielle dont les caractéristiques se déclinent ainsi qu'il suit : température (26 – 29 °C), évapotranspiration (90 – 120 mm) et humidité relative supérieur à 75 %. Les

moyennes calculées par le modèle Maxent pour les variables température, évapotranspiration et humidité relative sont respectivement 25,2 °C ; 92,1 mm et 78,7 % (annexe 2).



**Figure 20.** Réponse écologique de *Garcinia kola* pour les facteurs (a) température, (b) évapotranspiration et (c) humidité relative calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.

#### 4.3.4. Réponse écologique de *Khaya senegalensis*

Une interprétation des graphes de la figure 21 illustrant la fonction logistique avec la distribution des présences et des pseudo-absences de l'espèce *Khaya senegalensis* a montré que l'espèce est présente dans les régions où la température est comprise entre 26 et 30 °C, les précipitations mensuelles entre 75 et 125 mm, l'évapotranspiration allant de 90 à 115 mm et l'humidité relative comprise entre 47 et 65 %. Les moyennes obtenues par le modèle Maxent pour la température, les précipitations mensuelles, l'évapotranspiration et l'humidité relative sont respectivement 26,9 °C ; 99,3 mm ; 100,7 mm et 59,1 % (annexe 3).

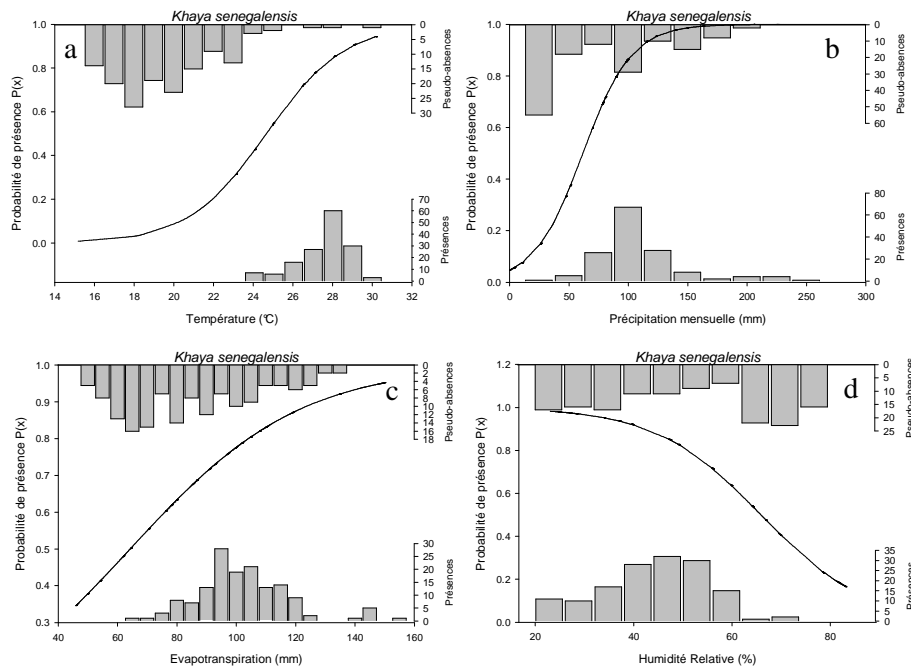
#### 4.3.5. Réponse écologique de *Milicia excelsa*

Selon les résultats du modèle logistique (figure 22), l'espèce *Milicia excelsa* est rencontrée dans au moins 50 % des cas en Afrique dans les régions ayant des caractéristiques climatiques suivantes : température (26 – 30 °C), pluviométrie mensuelle (104 – 210 mm), Humidité relative (68 – 85 %) et l'évapotranspiration (115 – 154 mm). Les moyennes obtenues par le modèles Maxent pour les mêmes paramètres sont respectivement : 25 °C ; 121 mm ; 70,7 % et 103,4 mm (annexe 4).

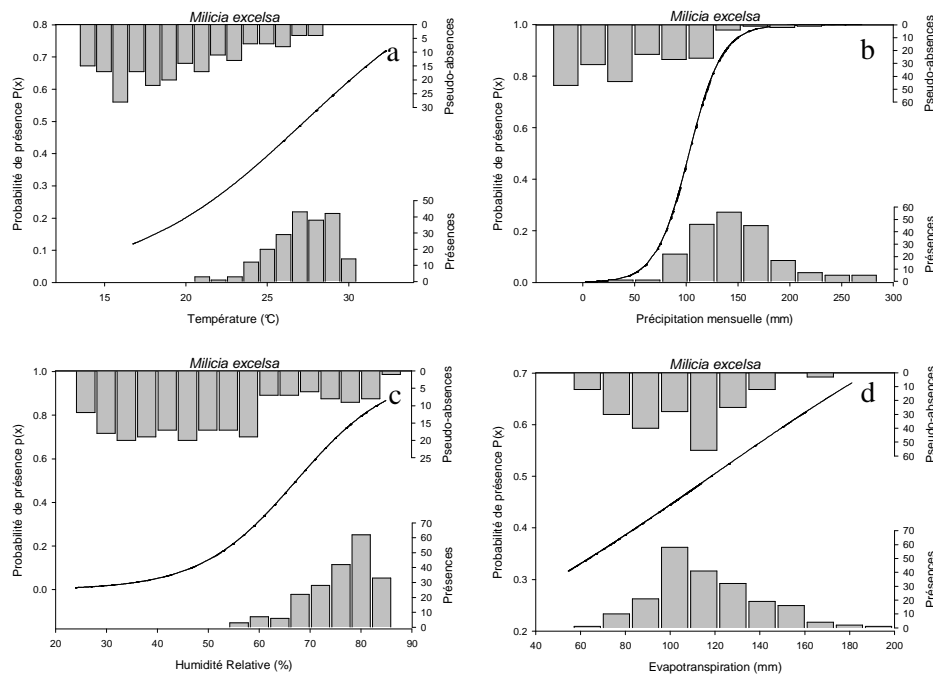
#### 4.3.6. Réponse écologique de *Pterocarpus erinaceus*

Le modèle logistique (figure 23) a indiqué avec une probabilité supérieure à 0,8 que l'espèce *Pterocarpus erinaceus* est retrouvée dans les biotopes où la température se situe entre 28 et 31 °C, la pluviométrie mensuelle entre 75 et 150 mm, l'humidité relative comprise entre 20 et 55 % et l'évapotranspiration allant de 95 à 130 mm. Les moyennes pour les différentes

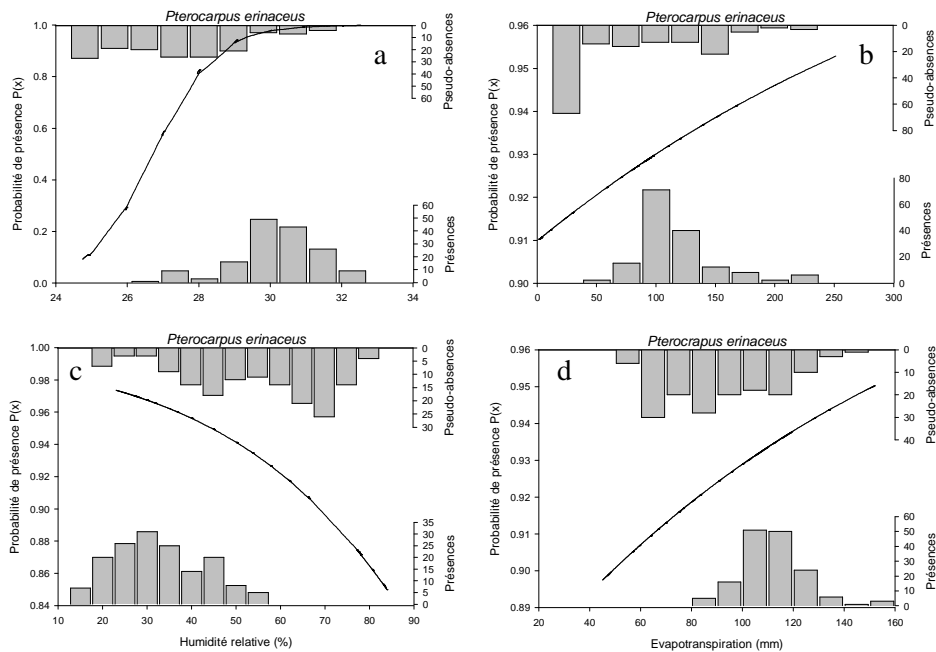
variables climatiques générées par le modèle Maxent sont respectivement : 27,2 °C, 104 mm, 52 % et 98,4 mm (annexe 5).



**Figure 21.** Réponse écologique de *Khaya senegalensis* pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) évapotranspiration et (d) humidité relative calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.



**Figure 22.** Réponse écologique de *Milicia excelsa* pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) humidité relative et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.



**Figure 23.** Réponse écologique de *Pterocarpus erinaceus* pour les facteurs (a) température, (b) Précipitation mensuelle, (c) humidité relative et (d) évapotranspiration calculées par le modèle logistique le plus parcimonieux.

#### 4.4. Distributions présentes et futures des espèces

Les résultats obtenus qui sont résumés dans le tableau 8 ont indiqué globalement que la distribution des espèces sous l'influence des conditions présentes et futures varie d'une espèce à une autre.

**Tableau 8.** Aire relative par classe d'habitat, par modèle et par espèce

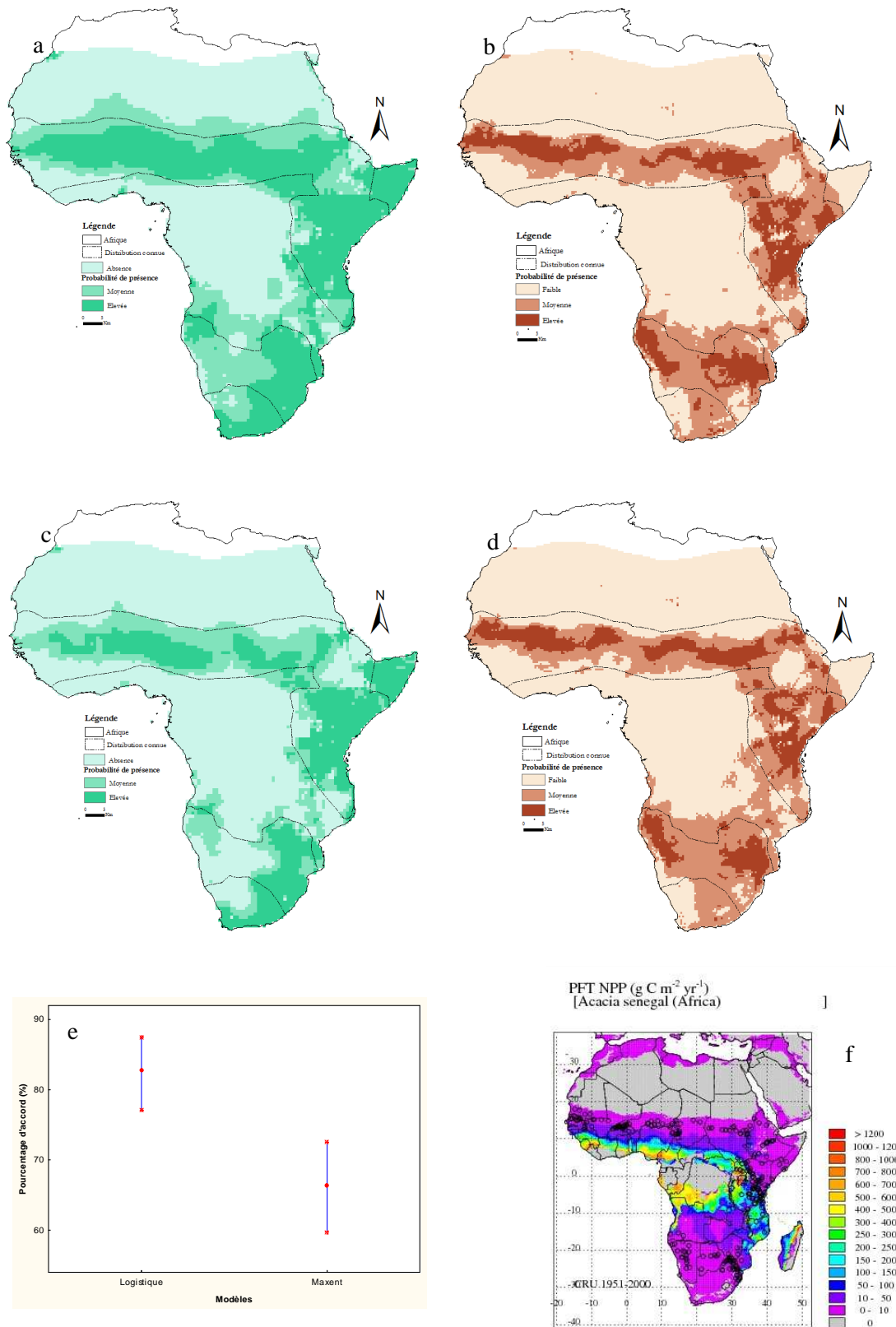
Modèles	Espèces	Présent (1950 – 2000)			Future (2041 – 2060)			Tendances			Critère UICN
		[0 - 0,4]	] 0,4 – 0,6]	] 0,6 - 1]	[0 - 0,4]	] 0,4 – 0,6]	] 0,6 - 1]	[0 - 0,4]	] 0,4 – 0,6]	] 0,6 - 1]	Intensité de la menace
Modèle Maxent	<i>Acacia senegal</i>	62,22 %	26,40 %	11,38 %	63,27 %	23,91 %	12,58 %	1,05 %	-2,49 %	1,20 %	NM
Modèle logistique	<i>Acacia senegal</i>	5,15 %	26,64 %	68,21 %	63,85 %	16,07 %	20,08 %	58,69 %	-10,57 %	-48,13 %	VU
Modèle Maxent	<i>Azelia africana</i>	77,93 %	15,41 %	6,66 %	76,11 %	15,39 %	8,49 %	-1,82 %	-0,01 %	1,84 %	NM
Modèle logistique	<i>Azelia africana</i>	70,24 %	9,68 %	20,08 %	76,30 %	16,44 %	7,26 %	6,06 %	6,76 %	-12,82 %	NM
Modèle Maxent	<i>Garcinia kola</i>	82,03 %	10,51 %	7,46 %	83,08 %	11,80 %	5,12 %	1,05 %	1,29 %	-2,34 %	NM
Modèle logistique	<i>Garcinia kola</i>	50 %	8,03 %	41,97 %	100 %	2 %	5 %	50 %	-6,03 %	-36,97 %	VU
Modèle Maxent	<i>Khaya senegalensis</i>	62,59 %	22,70 %	14,71 %	73,16 %	14,96 %	11,88 %	10,57 %	-7,73 %	-2,83 %	NM
Modèle logistique	<i>Khaya senegalensis</i>	67,62 %	10,72 %	21,66 %	80,33 %	6,92 %	12,75 %	12,71 %	-3,81 %	-8,91 %	NM
Modèle Maxent	<i>Milicia excelsa</i>	68,29 %	22,59 %	9,12 %	67,59 %	22,68 %	9,73 %	0,71 %	-0,09 %	-0,61 %	NM
Modèle logistique	<i>Milicia excelsa</i>	28,03 %	20,87 %	51,10 %	22,17 %	22,01 %	55,83 %	5,86 %	-1,13 %	-4,73 %	NM
Modèle Maxent	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	84,32 %	9,88 %	5,80 %	82,95 %	11,16 %	5,89 %	-1,36 %	1,27 %	0,09 %	NM
Modèle logistique	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	74,59 %	7,60 %	17,81 %	84,85 %	5,40 %	9,75 %	10,27 %	-2,20 %	-8,06 %	NM

Légende : Non Menacée (NM) ; Vulnérable (VU)

#### 4.4.1. Distribution d'*Acacia senegal*

Les résultats des deux modèles ont indiqué pour le présent (1950-2000) une absence d'*Acacia senegal* dans les territoires phytogéographiques du guinéo-congolais et de transition entre le guinéo-congolais et le soudanien (voir figure 8). *Acacia senegal* a une probabilité d'occurrence élevée dans les zones tropicales sèches où les formations végétales non désertiques sont rencontrées. Le modèle logistique projeté sur l'aire distribution connue de l'espèce décrite par Giffard (1975) a prédit que seulement 5,15 % de l'aire considérée constitue une zone d'absence pour *Acacia senegal* et que 68,21 % représente un habitat hautement favorable à l'espèce (figure 24a). Une analyse de consensus réalisée a indiqué qu'il existe un accord d'appréciation de 60,45 % entre le modèle logistique et le modèle Maxent. L'analyse de la performance de chaque modèle (figure 24e) a montré que le modèle logistique a une meilleure prédiction (82,67 %) comparativement au modèle Maxent (66,32 %). Contrairement aux modèles précédents, le modèle CARAIB n'a obtenu que de très faibles productivités (0-10g/cm<sup>2</sup>/an) dans l'aire de distribution connue d'*Acacia senegal*.

En ce qui concerne les projections futures (2041-2060), le modèle logistique a indiqué une perte d'habitat favorable de plus de 45 % par rapport à l'aire de distribution actuelle alors que le modèle Maxent prédit une réduction de 1,2 % à l'horizon 2060 (figures 24c et 24d). En considérant le critère A3 de l'UICN, il y a pas de risque selon le modèle Maxent que *Acacia senegal* soit classé parmi les espèces menacées sous l'effet des changements climatiques, contrairement au modèle logistique qui prédit que cette espèce sera classée parmi les espèces vulnérables.



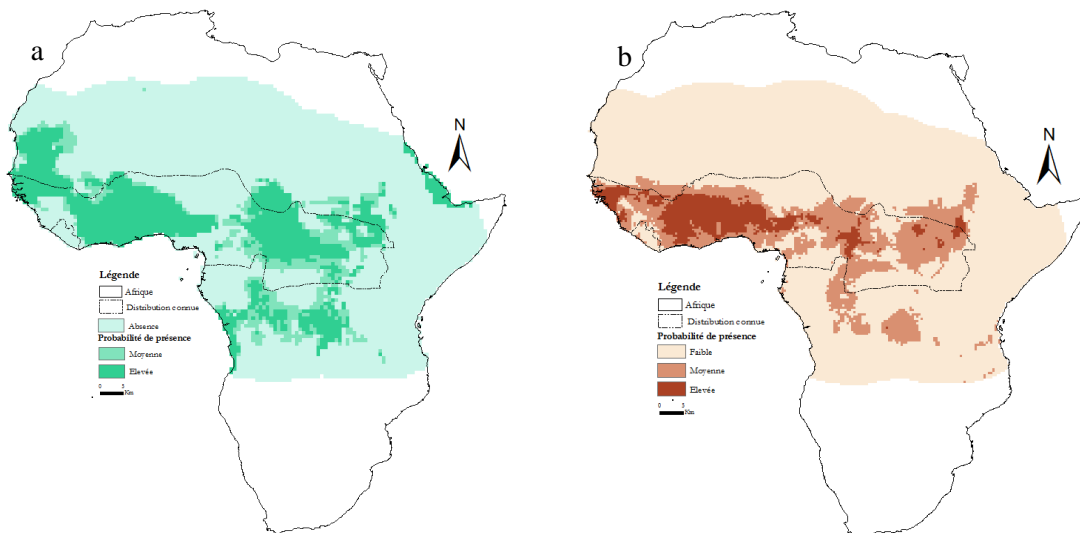
**Figure 24.** Distribution d'*Acacia senegal* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

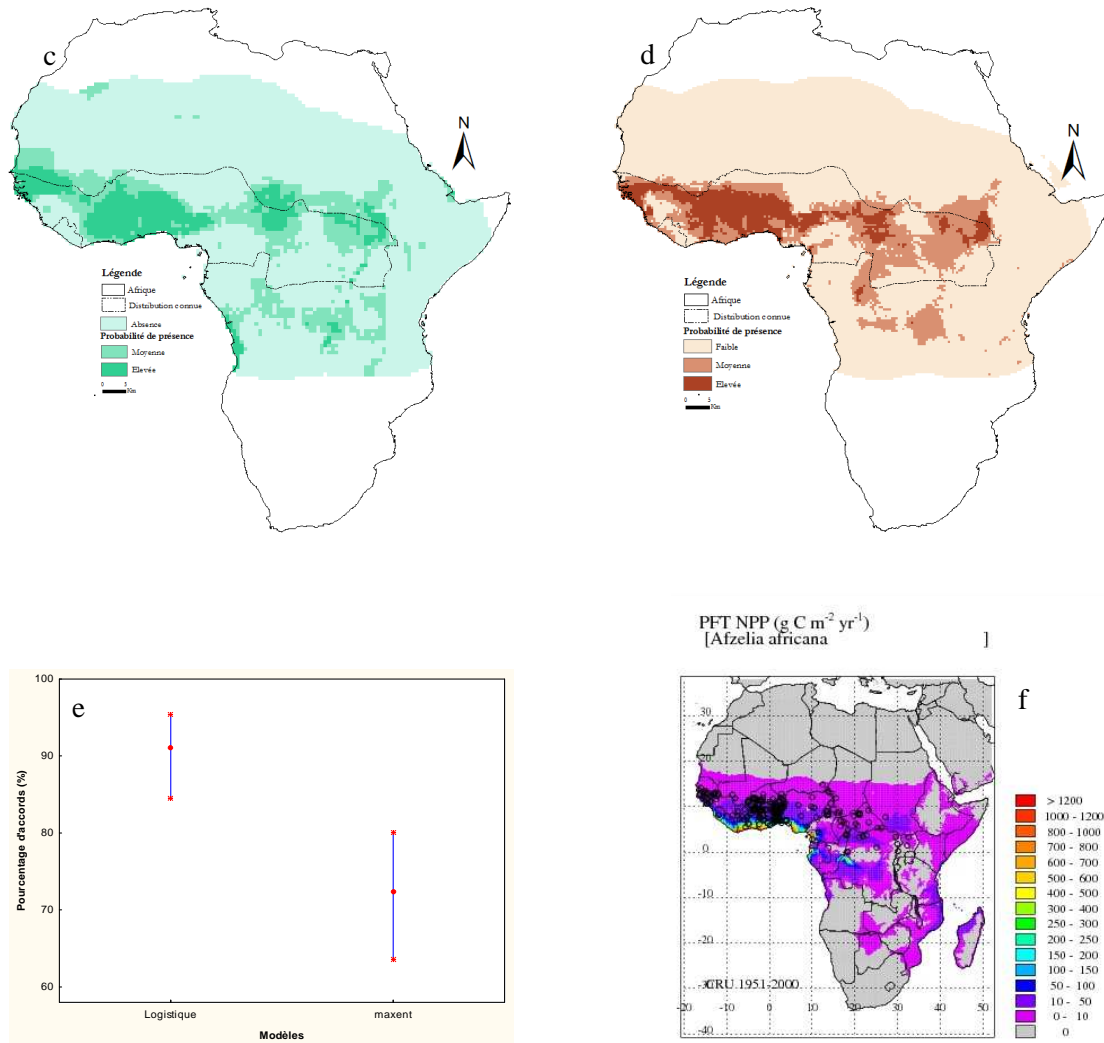


#### 4.4.2. Distribution d'*Afzelia africana*

Les résultats des modèles Maxent et logistique ont montré que *Afzelia africana* est présent dans zone de transition soudano-guinéo-congolaise. L'Afrique de l'Ouest en particulier selon les deux modèles semble offrir à cette espèce un habitat hautement adéquat (figure 25). Le modèle Maxent à la différence du modèle logistique a prédit que la région nord de l'Afrique centrale regroupant la République Centre Afrique, la République Démocratique Congo, le Cameroun offre un habitat moyennement adéquat à l'espèce. Le test de consensus a indiqué un accord de 75,61 % entre les deux modèles. Mieux, le coefficient de concordance de Kendall indique une forte relation significative d'accord entre les deux modèles ( $w=0,76$  ;  $P<0,001$ ). Toutefois, le modèle logistique prédit mieux la distribution actuelle de *Afzelia africana* (figure 25c) avec 97,01 % d'accords contre 72,18 % pour le modèle Maxent. Pour ce qui concerne le modèle CARAIB, de très faibles productivités ont été obtenu dans l'aire de distribution connue de l'espèce.

Une projection future avec les données de 2041 à 2060 par le modèle logistique a indiqué comparativement à la situation actuelle une perte de 12,82 % au niveau des actuels habitats hautement favorables à l'espèce. Le modèle Maxent a suggéré l'apparition de conditions favorables au niveau de la zone guinéo-congolaise (figure 25e). Selon le critère A3 de l'UICN, les deux modèles ont prédit que *Afzelia africana* n'est pas menacé sous l'effet des changements climatiques à l'horizon 2041-2060. Cette espèce pourra probablement maintenir son statut UICN actuel.





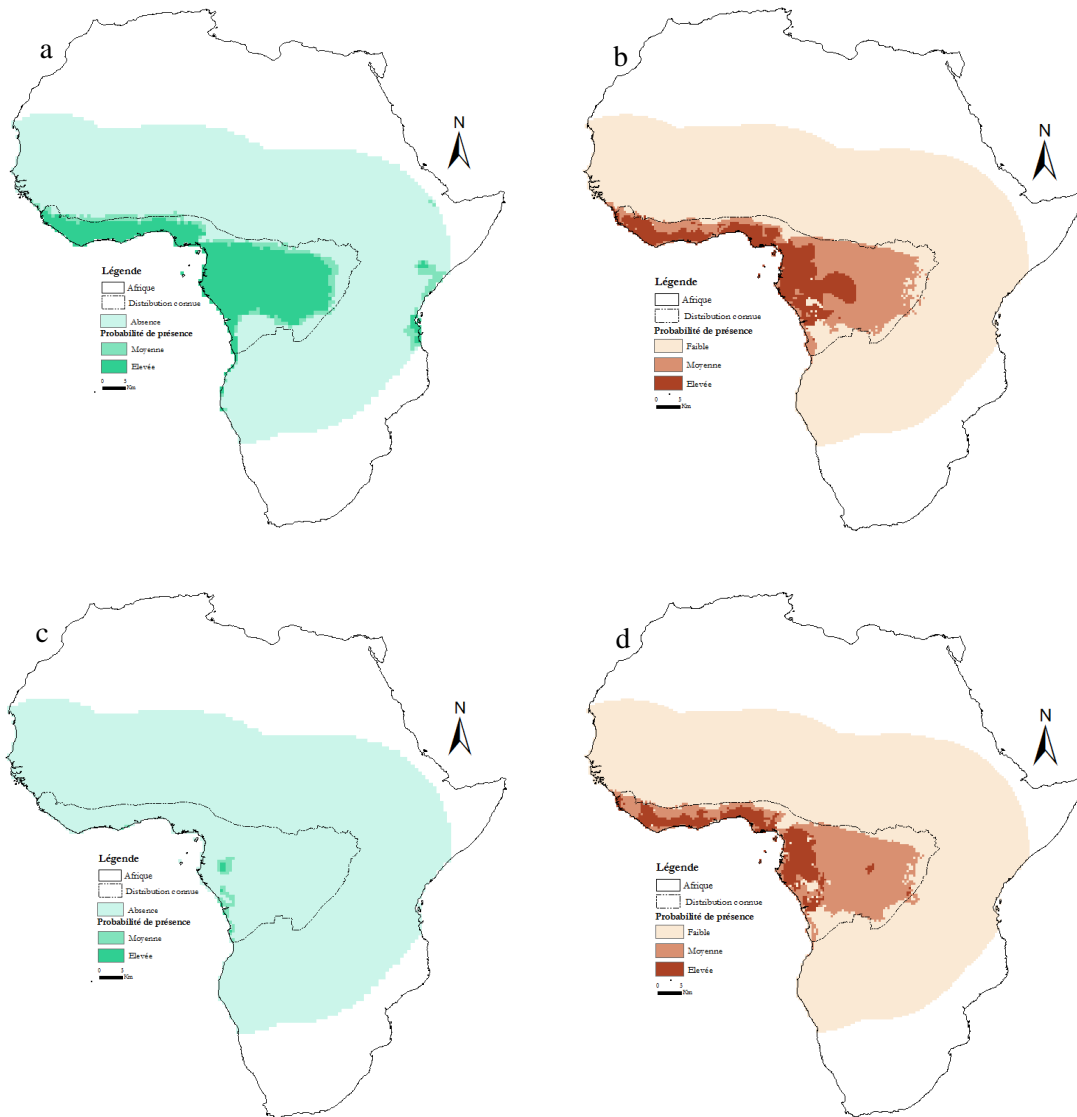
**Figure 25.** Distribution d'*Afzelia africana* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

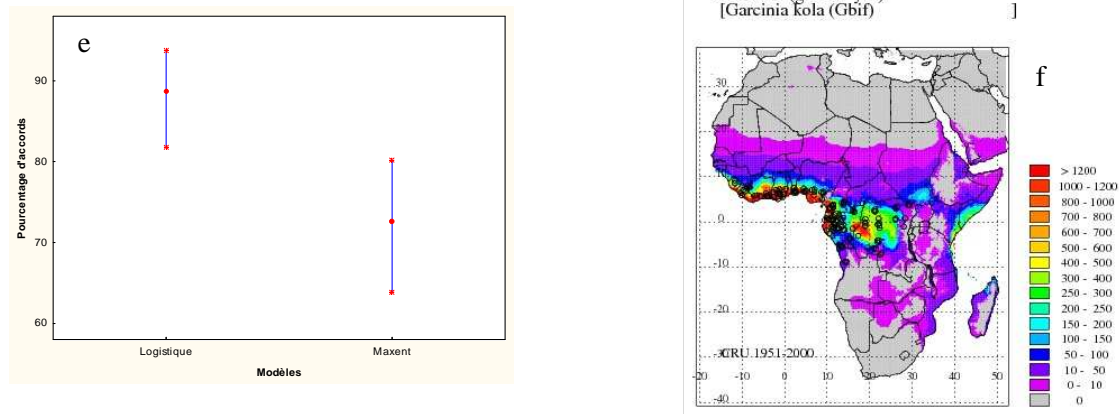
#### 4.4.3. Distribution de *Garcinia kola*

Les modèles Maxent et logistique, avec un pourcentage d'accords de 77,42 %, ont montré que *Garcinia kola* est une espèce dont l'habitat hautement adéquat est dans la zone guinéo-congolaise et proche de la côte. Toutefois, le modèle Maxent a indiqué, contrairement au modèle logistique, que la zone de la République Démocratique du Congo et le sud de la République Centre Afrique constitue un habitat moyennement adéquat pour *Garcinia* (figure 26b). La statistique de Kappa de Fleiss a indiqué pour l'habitat faiblement adéquat un consensus parfait entre les deux modèles ( $K=1$  ;  $P<0,001$ ). Aussi pour toutes les classes, le coefficient de concordance de Kendall a indiqué une relation très hautement significative

entre les deux modèles ( $w=0,68$  ;  $P=0,004$ ). Le modèle logistique a été indiqué comme celui qui prédit mieux la distribution actuelle de *Garcinia kola* (figure 26e) avec 88,81 % d'accords contre 72,59 % pour le modèle Maxent. A l'instar de Maxent, le modèle CARAIB a simulé moyennement la distribution actuelle de *Garcinia kola*.

Les projections (2041-2060) du modèle logistique, contrairement à Maxent, ont indiqué une perte totale de l'habitat hautement adéquat. 36,97 % de l'aire actuelle occupée par l'espèce sera convertie en zone d'absence ce qui laisserait peser d'importantes menaces sur cette espèce. Le modèle Maxent également a abouti aux mêmes conclusions mais avec des pourcentages nettement plus faibles (moins de 3 % de perte d'habitat hautement adéquat). En considérant le critère A3 de l'UICN, il y a pas de risque selon le modèle Maxent que *Garcinia kola* soit classé parmi les espèces menacées sous l'effet des changements climatiques, contrairement au modèle logistique qui prédit que cette espèce sera classée parmi les espèces vulnérables.



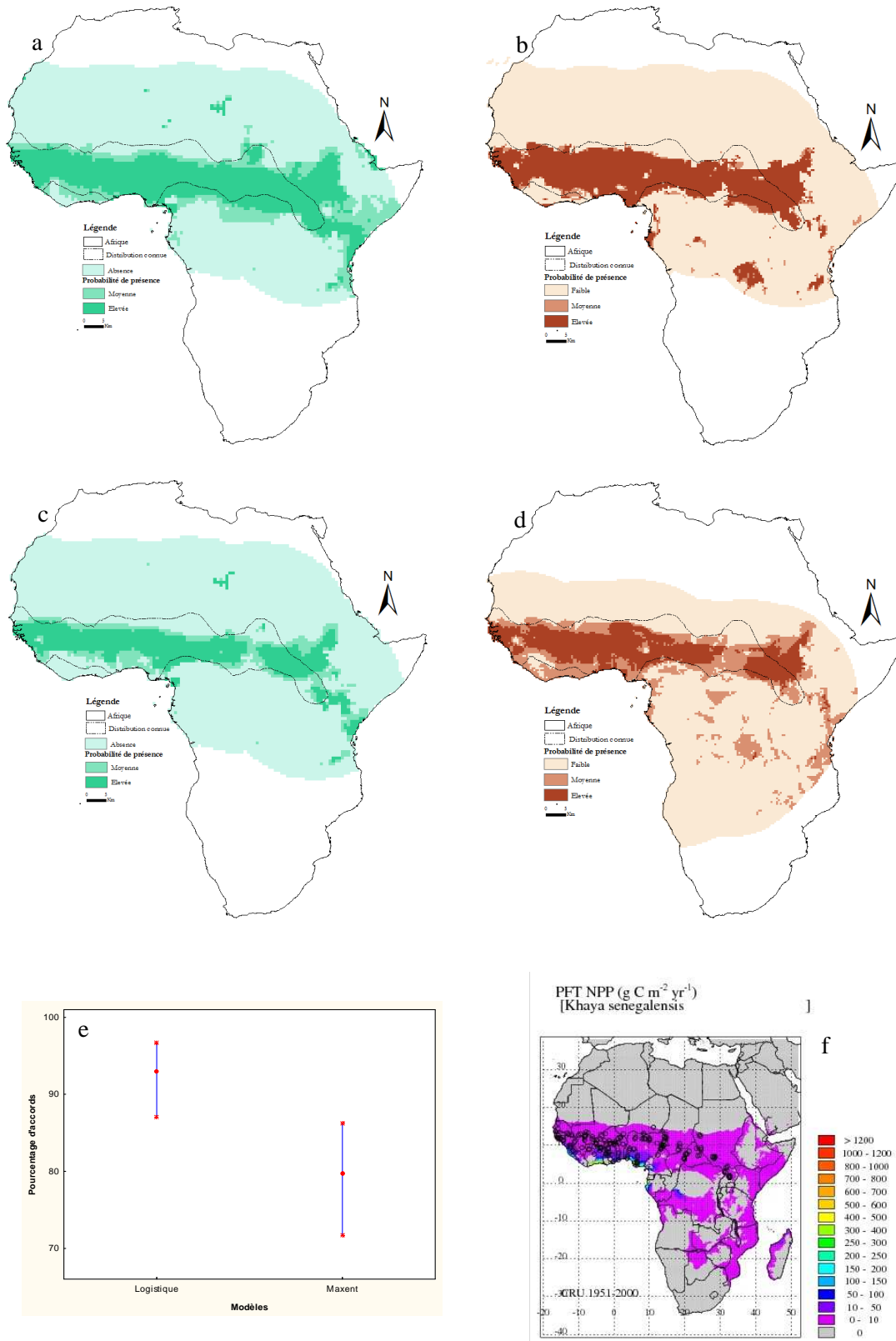


**Figure 26.** Distribution de *Garcinia kola* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

#### 4.4.4. Distribution de *Khaya senegalensis*

Les deux modèles présentent un accord de 83,59 % (figure 27). L'espèce a une probabilité de présence élevée dans la zone soudanienne et dans la zone transition soudano-guinéenne. Le coefficient de concordance de Kendall a indiqué une relation très hautement significative entre les deux modèles ( $w=0,72$  ;  $P<0,001$ ). Le modèle logistique a été indiqué comme celui qui prédit mieux la distribution actuelle de *Khaya senegalensis* (figure 27e) avec 92,72 % d'accords contre 79,79 % pour le modèle Maxent. Quant au modèle CARAIB, de très faibles productivités ont été obtenues dans l'aire de distribution connue de l'espèce.

A l'horizon 2041-2060, il y aura selon le modèle logistique une réduction de 8,91 %, par rapport à la situation actuelle, de l'habitat hautement adéquat au profit de l'habitat moyennement adéquat. Ce dernier devrait également subir une réduction de 3,81 %. Par contre le modèle Maxent prévoit une réduction de l'habitat hautement adéquat et moyennement adéquat respectivement de 2,83 % et 7,73 % au profit d'un habitat faiblement adéquat, celui-ci qui augmentant en conséquence de 10,57 % (figure 27d). Selon le critère A3 de l'UICN, les deux modèles ont prédit que *Khaya senegalensis* n'est pas menacé sous l'effet des changements climatiques à l'horizon 2041-2060.

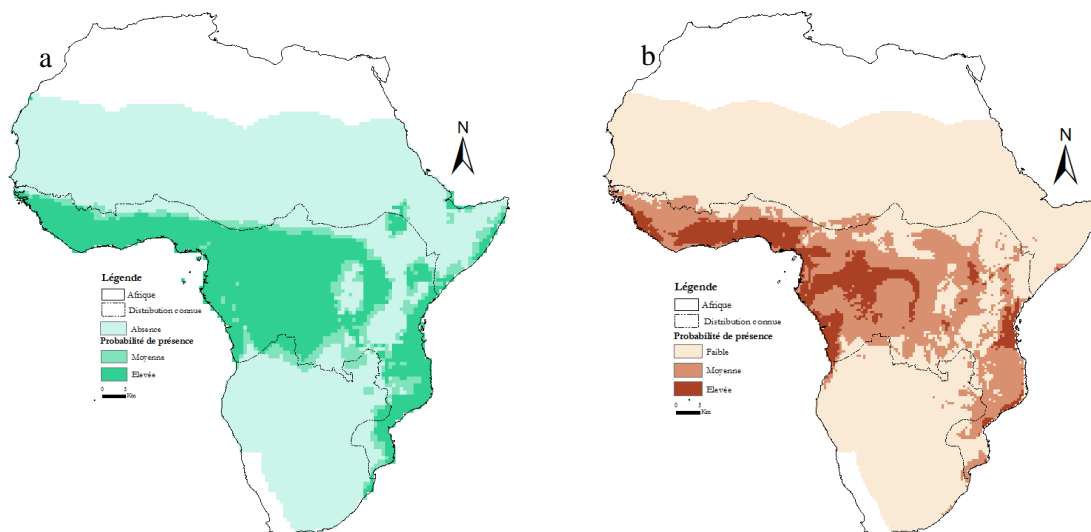


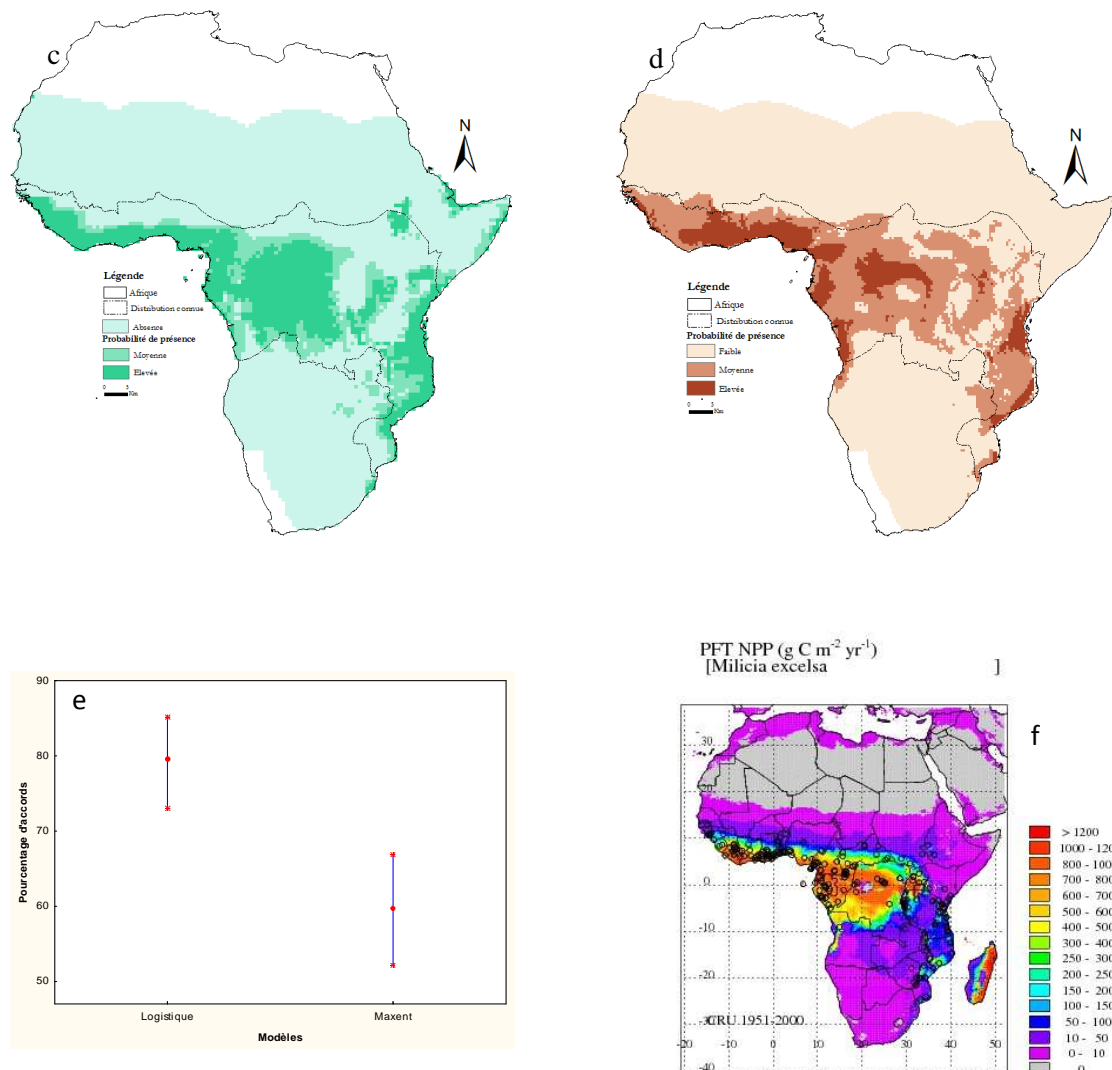
**Figure 27.** Distribution de *Khaya senegalensis* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

#### 4.4.5. Distribution de *Milicia excelsa*

Le modèle Maxent et le modèle logistique ont un pourcentage d'accords de 67,96 % pour la prédiction de la distribution actuelle de *Milicia excelsa*. Selon les deux modèles, l'espèce est totalement absente dans la zone sahélienne. La région guinéo-congolaise (y compris l'intervalle de Dahomey) lui offre un habitat hautement adéquat avec quelques poches de région à habitat moyennement adéquat (figure 28). Pour les trois classes d'habitat prises isolément, les deux modèles ont un kappa faible ( $k < 0,5$ ,  $P = 0,004$ ). Toutefois, les deux modèles sont restés concordant avec un coefficient de Kendall élevé ( $w = 0,73$  ;  $P < 0,001$ ). Le meilleur modèle a été le modèle logistique avec un pourcentage d'accord de 79,63 % contre 59,58 % pour le modèle Maxent. Le modèle CARAIB a simulé passablement la distribution actuelle de *Milicia excelsa*.

A l'horizon 2041-2060, les deux modèles Maxent et logistique prédisent une faible réduction de l'habitat hautement adéquat de l'espèce, respectivement 0,61 % et 4,73 % par rapport à la situation actuelle. Aussi ont-ils indiqué une probable augmentation de l'aire d'absence de l'espèce, c'est-à-dire des augmentations respectives de 0,71 % pour Maxent et 5,86 % (figure 28c et 28d). En considérant le critère A3 de l'UICN, les deux modèles ont prédit que *Milicia excelsa* n'est pas menacé sous l'effet des changements climatiques à l'horizon 2041-2060.





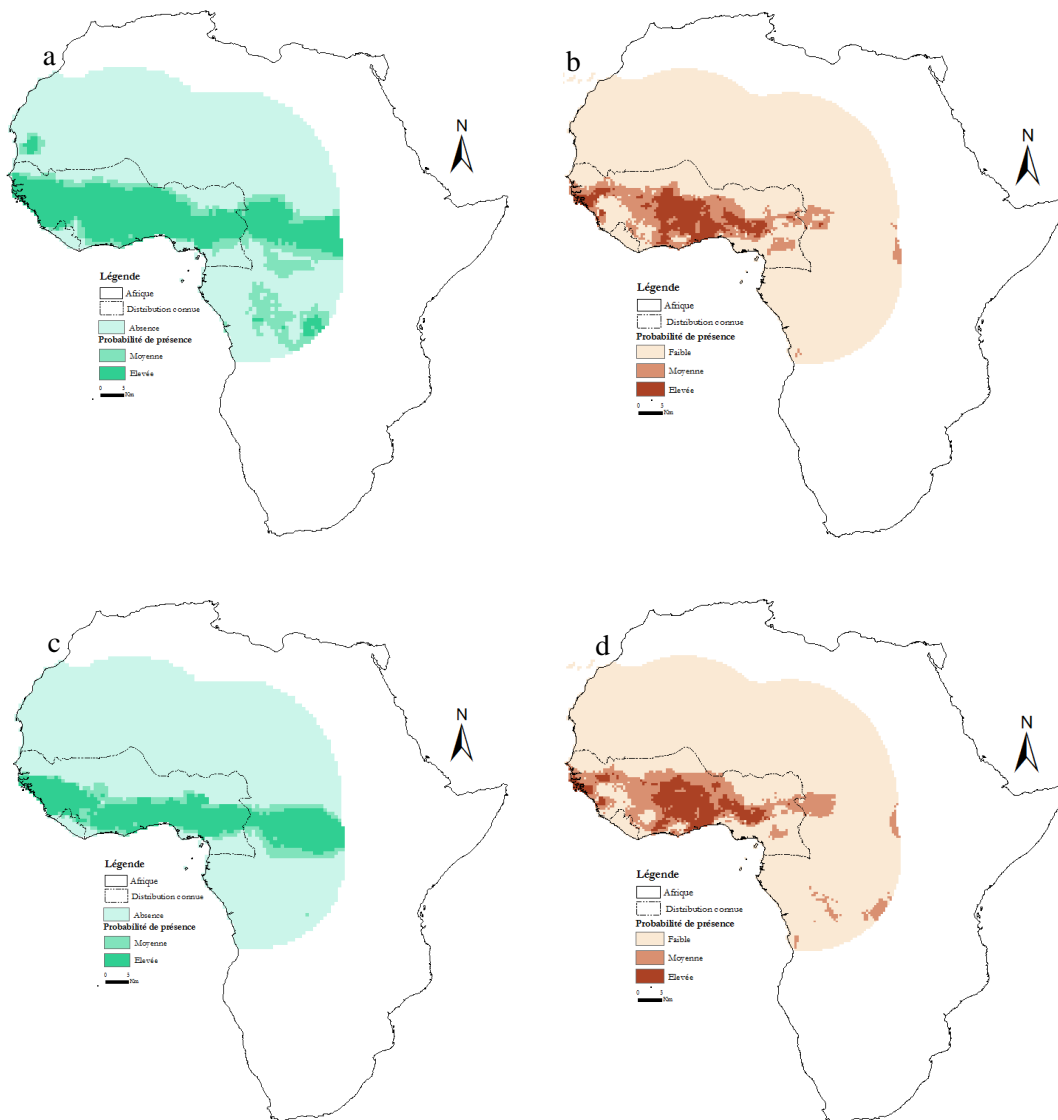
**Figure 28.** Distribution de *Milicia excelsa* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

#### 4.4.6. Distribution de *Pterocarpus erinaceus*

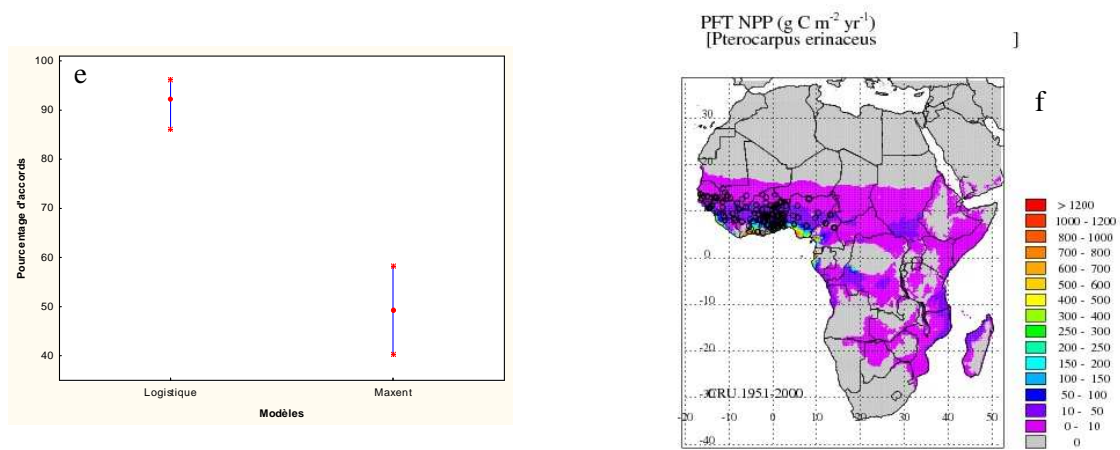
Les modèles Maxent et logistique ont un pourcentage d'accords faible de 52,34 % au sujet de la prédiction de la distribution actuelle. Toutefois le modèle Maxent a prédit que la région de l'Afrique occidentale comprenant la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Burkina-Faso, le Togo et le Bénin constitue un habitat hautement adéquat pour l'espèce (figure 29b). Le calcul du

coefficient de concordance de Kendall a montré une bonne relation significative d'accord entre les deux modèles ( $w=0,60$ ,  $P=0,01$ ). Le meilleur modèle a été le modèle logistique avec un pourcentage d'accord de 90 % contre 51 % pour le modèle Maxent (figure 29e). Les simulations de la distribution actuelle (1950-2000) effectuées avec le modèle CARAIB pour *Pterocarpus erinaceus* ont indiqué de très faibles productivités dans l'aire de distribution connue de l'espèce.

La projection de 2041-2060 a indiqué pour le cas de cette espèce une réduction par rapport à la situation actuelle de l'aire de l'habitat hautement adéquat de 8,06 % pour le modèle logistique et environ 1 % pour le modèle Maxent (figures 29c et 29d). En considérant le critère IUCN relatif à la réduction des populations dans le futur (A3), les deux modèles ont prédit que *Pterocarpus erinaceus* n'est pas menacé sous l'effet des changements climatiques à l'horizon 2041-2060.







**Figure 29.** Distribution de *Pterocarpus erinaceus* (a) distribution actuelle avec le modèle logistique, (b) distribution actuelle avec le modèle Maxent, (c) distribution future avec le modèle logistique, (d) distribution future avec le modèle Maxent, (e) test de comparaison des deux modèles et (f) distribution actuelle avec le modèle CARAIB.

## 5. Discussion et conclusions

### 5.1. Caractéristiques de l'échantillon à utiliser pour les modèles

En modélisation de niche, il est crucial de définir en amont du processus la taille de l'aire de background à considérer lorsqu'il s'agit d'un modèle utilisant uniquement les données de présence (Chefaoui et Lobo, 2008). Il importe donc de connaître la distance à laquelle il faut échantillonner les données de pseudo-absences par rapport à la position géographique connue des données de présence (Van der Wal *et al.*, 2009a). Il ressort que les modèles de niches sont sensibles à l'étendue de la zone d'étude. Van der Wal *et al.* (2009a), en étudiant essentiellement des espèces animales, ont conclu que les modèles statiques ont de faibles performances lorsque les points de pseudo-absences sont choisis dans les zones de présence de l'espèce, ou lorsque l'échelle de distribution est petite. Notre travail a donc l'originalité de confirmer ces résultats sur des espèces ligneuses des forêts d'Afrique. Nos résultats démontrent que pour les modèles logistique et Maxent, les pseudo-absences doivent être échantillonnées à une distance de l'ordre de 1400 km de tout point de présence connu afin d'obtenir un modèle parcimonieux de bonne discrimination. Ces valeurs de distances sont beaucoup plus grandes que les 200 km obtenus par Van der Wal *et al.* (2009b) pour des mammifères. Cette différence pourrait s'expliquer par des aires de distribution bien plus restreintes pour les espèces fauniques étudiées.

### 5.2. Réponse écologique des espèces étudiées

En 2004, Guan et Krone ont publié un travail qui a prouvé l'importance de l'utilisation des analyses de régression logistique dans les études d'écologie des espèces. Manel *et al.* (2001) soulignent d'ailleurs que le modèle logistique est la méthode de référence pour obtenir les réponses écologiques des espèces. Dans la présente étude, il a été étudié la réponse écologique des espèces ligneuses en utilisant à la fois les modèles Maxent et logistique. Une analyse espèce par espèce des résultats indique que les modèles obtenus ont prédits des valeurs qui sont généralement très proches de ce que d'autres chercheurs ont obtenu après des études écologiques.

Nos résultats montrent que le modèle logistique utilisé est plus performant que Maxent, ce qui va à l'encontre des conclusions de Segurado et Araujo (2004) ou de Wisz *et al.* (2008). Toutefois, ce résultat confirme ceux de Wisz et Guisan (2009) qui ont suggéré que les

modèles qui utilisent à la fois les données de présence et d'absence ou des pseudo-absences sont plus robustes que ceux utilisant uniquement les données de présence.

Pour l'espèce *Acacia senegal*, les précipitations ont été identifiées comme variable principale. Le modèle logistique met en évidence que l'espèce peut supporter une gamme de précipitations mensuelle moyenne allant de 40 à 80 mm de pluie ce qui équivaut à une moyenne de 720 mm/an. Selon Maydell (1983), cette espèce peut effectivement supporter des précipitations comprises entre 100 et 800 mm/an. Pour *Afzelia africana*, le modèle logistique met en évidence une moyenne annuelle comprise entre 1080 à 1440 mm/an et une température comprise entre 26 et 30 °C. Ces valeurs sont en concordance avec celles trouvées par Gérard et Louppe (2011) qui estiment que *Afzelia africana* supporte une pluviométrie comprise entre 900 et 1400 mm/an et une température allant de 25 à 30 °C. Les résultats obtenus pour *Garcinia kola* ont montré que l'espèce est sensible à l'humidité relative (humidité supérieur à 70 %) avec une température comprise entre 26 et 29 °C. Beer (1989) le confirme en précisant que l'espèce est retrouvée en forêt dense humide où l'humidité relative varie entre 50 et 100 % et tolère une température de  $28 \pm 2$  °C. De la même manière, les valeurs obtenues par les modèles utilisés pour les autres espèces à savoir : *Khaya senegalensis*, *Milica excelsa* et *Pterocarpus erinaceus* sont en accords avec les résultats des travaux d'autoécologie de ces espèces (Ofori, 2007a ; Duvall, 2008 ; Nikiema et Pasternak, 2008).

Les facteurs les plus importants lors des modélisations se sont avérés être les précipitations, l'évapotranspiration et la température pour les zones sahélienne, soudanienne et de transition soudano-guinéenne, de même que l'humidité relative pour la région guinéo-congolaise. Cette analyse est en concordance avec les travaux de Zerbo (2011) sur *Acacia senegal* qui a conclu que ce sont la température et les précipitations qui sont les facteurs prépondérants. L'originalité de notre étude a été de tester l'interaction entre la température et les précipitations, laquelle est significative dans presque tous les modèles, sauf chez l'espèce de forêt tropicale dense humide *Garcinia kola*. En effet, les espèces de régions sèches sont davantage sensibles aux précipitations et à leur répartition au cours de l'année (Fitter et Hay, 2000 ; Good et Caylor, 2011). Ce travail a également montré que les espèces du sahélien et du soudanien sont particulièrement sensibles à l'évapotranspiration potentielle.

### 5.3. Distribution présente et future des espèces étudiées

Prédire comment les espèces pourraient réagir aux changements climatiques devraient permettre de développer des stratégies de conservation pour une utilisation durable des ressources végétales, dont l'importance n'est plus à démontrer en Afrique subsaharienne.

L'importance d'utiliser des modèles prédictifs de niches pour délimiter avec une probabilité associée les aires où les espèces sont à même de persister n'est plus à démontrer. Ainsi, la délimitation de la distribution potentielle des espèces est un outil de prise de décision pour définir les zones prioritaires où les espèces pourront être réintroduites (Gouwakinnou *et al.*, 2011). Il a été observé pour la quasi-totalité des espèces étudiées une réduction de leur habitat favorable à l'horizon 2041-2060 sous l'effet des changements climatiques. Cette réduction varie selon les modèles et les espèces. De tels résultats ont été obtenus par plusieurs chercheurs (par exemple Araujo et New, 2007; Pittock, 2009) qui ont utilisé le scénario A2 pour prédire la distribution de la niche potentielle des espèces de plantes. Ces auteurs ont lié cette variation aux types de modèles ainsi qu'au scénario utilisé. Notre travail n'a testé qu'un scénario, le plus plausible, mais il a comparé deux modèles qui n'ont pas donné exactement les mêmes résultats. En effet, le modèle Maxent a prédit de faibles variations contrairement au modèle logistique, dont les variations prédites sont plus importantes. Nos résultats confirment donc que les prédictions varient en fonction des techniques de modélisation utilisées. Cette tendance de réduction d'habitat a été déjà mise en évidence par plusieurs auteurs pour un plus grand nombre d'espèces de la zone tempérée (Thuiller, 2004; Lenoir *et al.*, 2008; Zonnveld *et al.*, 2009) que de la zone tropicale Gouwakinnou *et al.*, 2011 ; Nakao *et al.*, 2011). Le travail le plus inquiétant, est celui de McLeman et Smit (2005) qui ont utilisé les modèles de distribution d'espèces (*Box model, simple genetic algorithm et Bayes-based genetic algorithm*) et ont conclu que d'ici l'an 2085, environ 2000 espèces de plantes africaines devraient être touchées négativement par les changements climatiques.

Toutefois, en se basant sur le critère A3 de l'UICN conçu pour l'évaluation des taxa, nos résultats ont montré que pour le modèle Maxent, les espèces étudiées ne seront pas menacées sous l'effet des changements climatiques à l'horizon 2041-2060. A la différence de Maxent, le modèle logistique a identifié que *Acacia senegal* et *Garcinia kola* comme des espèces vulnérables aux changements climatiques. De ces résultats, il ressort la nécessité de d'apporter une nuance importante. En effet, si les modèles utilisés suggèrent une réduction des habitats favorables dans le futur, ils ne confirment pas pour autant que c'est le

changement du climat qui fait peser un danger sur toutes les espèces étudiées. Les résultats renvoient aux conclusions de plusieurs auteurs (Wright 2005 ; Bogaert *et al.*, 2008; Wasseige *et al.*, 2012) qui ont affirmé que c'est plutôt le changement d'occupation du sol en lien avec la croissance démographique qui pourrait être la première cause de l'extinction des espèces.

#### 5.4. Comparaison des modèles Maxent, logistique et CARAIB

La présente recherche a permis de tester les modèles de niches Maxent et logistique et le DVM CARAIB sur des espèces tropicales. Il ressort que le modèle logistique est le plus performant comparativement à Maxent et CARAIB. Le modèle logistique est limité par la nécessité de disposer de données d'absence qui semble pouvoir être correctement remplacées par des pseudo-absences judicieusement distribuées selon la méthode proposée par Van der Wal *et al.* (2009a). L'autre limite du modèle logistique est l'effectif de l'échantillon. En effet, la procédure de calcul du modèle logistique (Modèle général linéaire/non-linéaire ou GLZ) est basée sur la méthode du maximum de vraisemblance qui réclame de 30 à 50 observations par effet à inclure dans le modèle (Hart, non-publié), ce qui limite évidemment le nombre de variables qui peuvent être prises en compte en particulier lorsque l'on veut tester ou inclure des effets quadratiques et des interactions. Maxent semble beaucoup moins souffrir de ce problème puisqu'il s'est révélé le plus efficace particulièrement lorsque le nombre de données était limité (Wisz *et al.*, 2008).

Contrairement aux deux modèles de niches utilisés dans ce travail, le modèle dynamique de végétation CARAIB n'a pas permis d'obtenir de résultats concluants surtout pour les espèces des zones sahélienne, soudanienne et de transition soudano-guinéenne. Quant aux espèces de la zone guinéo-congolaise, les résultats de simulations étaient passables. Ces résultats confirment ceux de Morin et Thuiller (2009) qui avaient démontré que les comparaisons entre les modèles statiques et les modèles dynamiques de végétation étaient difficiles.

Les causes du peu de capacités de CARAIB à simuler des espèces semi-décidues des régions tropicales doivent être recherchées et testées. Les faibles productivités obtenus par le modèle CARAIB qui pourtant est reconnu pour sa grande efficacité dans la simulation de la distribution des espèces tempérées (François, 2006 ; Galy *et al.*, 2008 ; Dury *et al.*, 2011) pourrait s'expliquer par : (1) une sous-estimation de la photosynthèse nette qui conditionne la croissance de la plante, (2) le manque de paramétrisations physiologiques sur les espèces étudiées, (3) la non intégration d'un modèle hydrologique dans CARAIB et (4) la non prise en

compte de la profondeur racinaire des espèces. Chaque espèce présente en effet des réponses physiologiques et morphologiques spécifiques selon les conditions environnementales auxquelles elle est soumise (Bonal *et al.*, 2000 ; Gratani *et al.*, 2003; Pesoli *et al.*, 2003). Dans le présent travail, les constantes physiologiques n'ont pas été adaptées (on a utilisé les valeurs par défaut du modèle). Dans les conditions chaudes où l'on retrouve les espèces comme *Acacia senegal*, *Azelia africana*, *Khaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, les coûts de maintenances (respiration) sont très importants (Fitter et Hay, 2002). Or, les plantes s'acclimatent dans leur milieu par optimisation de la respiration (Niu *et al.*, 2012). Ces auteurs ont démontré que la température optimale à laquelle ce phénomène se réalise correspond plus ou moins à la température moyenne du cycle végétatif de l'espèce. Or, la version actuelle de CARAIB ne prend pas en considération ce phénomène d'acclimatation. Enfin, un autre facteur important qui pourrait expliquer les mauvais résultats de CARAIB pourrait résider dans le calcul des conditions hydrologiques locales. L'intégration d'un modèle hydrologique dans CARAIB semble s'avérer nécessaire pour améliorer ses capacités prédictives les régions subtropicales. En effet, l'eau ruisselle le long des pentes, ce qui alimente les zones plus basses où la végétation sera potentiellement plus abondante (François, communication personnelle).

## 6. Conclusion générale

La modélisation constitue un outil précieux au service de la préservation de la biodiversité de notre planète. Elle permet d'anticiper les variations que connaîtront les aires de répartition des espèces peut offrir des pistes pour leur sauvegarde. Dans le présent travail, nous avons pu mettre en évidence l'importance des modèles de niche (Maxent et logistique) en écologie végétale et de leur grande capacité à simuler la distribution présente et future des essences tropicales, comparativement au modèle dynamique de végétation CARAIB. Parmi les trois modèles utilisés, le modèle logistique est le plus performant.

Le présent travail a montré globalement que ce n'est pas le changement du climat qui fait peser un danger sur les espèces tropicales. Certes, il provoque une perte d'habitat favorable dans le futur, variable selon les modèles et les espèces, mais il ne rend pas forcément ces dernières vulnérables.

A notre connaissance et à l'échelle de notre zone d'étude une telle étude n'a pas encore été réalisée et pourra servir de base pour d'autres exercices de modélisation de niches qui pourront être fait fondamentalement en Afrique occidentale et centrale. Cette étude n'a pas intégré aux modèles la composante occupation de sol qui pourrait leur permettre d'avoir une plus grande capacité de prédiction. Cette opération pourrait s'effectuer par la superposition à nos prédictions pour le futur d'une carte d'occupation actuelle du sol. Cela aiderait à comprendre la place qu'occupent les réseaux d'aires protégées dans la conservation des ressources phylogénétiques. Aussi, une étude physiologique fine des espèces tropicales pourra permettre d'améliorer particulièrement la qualité prédictive des modèles dynamiques de végétation.

## 7. Bibliographie

1. Adjanohoun E., Adjakidjè V., Ahyi M.R.A., Aké Assi L., Akoègninou A., Dalmeda J., Akpovo F., Boukef K., Chadaré F., Cusset G., Dramane K., Eyme J., Gassita J-N, Gbaguidi N., Goudoté E., Guinko S., Hounnon P., Issa L., Keita A., Kiniffo H.V., Koné Bamba D., Musampa Nseyya A., Saadou N., Sdogandji TH., De Souza S., Tchabi A., Zinsou Dossa C. et Zohoun Th. (1989) Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques en République Populaire du Bénin. ACCT. Paris. 895p.
2. Adjanohoun E., Ahiyi M.R.A., Ake Assi L., Dramane K., Elewude J.A., Fadoju S.O., Gbile Z.O., Goudote E., Johnson C.L.A., Keita A., Morakinyo O., Ojewole J.A.O., Olatunji A.O., Sofowora E.A. (1991) Traditional Medicine and Pharmacopoeia: Contribution to Ethnobotanical and Floristic Studies in Western Nigeria. Organisation of African Unity/Scientific Technical and Research Commission, Lagos, 420 pp.
3. Agyeman V.K., Ofori D.A., Cobbinah J.R. et Wagner M.R. (2009) Influence of phytolyma lata (Homoptera: Psyllidae) on seedling growth of *Milicia excels.* Ghana Journal of Forestry 25: 28-39.
4. Ahouangonou S., et Bris B. (1997) *Afzelia africana*. Le Flamboyant N° 42: 7-10.
5. Akoègninou A., Van der Burg W.J., Van der Maesen L.J.G., Adjakidjè V., Essou J.P., Sinsin B., et Yédomonhan H. (2006) Flore analytique du Bénin. Backhuys Publishers. 1034p.
6. Ali SI. (1973) Flora of West Pakistan, No. 36 Mimosaceae. Univ. of Karachi, Karachi Pakistan.
7. Appiah M. (2013) Understanding the Complexities and Resource Sustainability in Afram Plains, Ghana. Environmental Management and Sustainable Development. ISSN 2: 2164-7682.
8. Araújo M. B., Pearson R.G., Thuiller W. et Erhard M. (2005) Validation of species-climate impact models under climate change. Global Change Biol. 11: 1504-1513.
9. Araújo M.B. et New M. (2007) Ensemble forecasting of species distributions. Trends in Ecology and Evolution 22:42-47.
10. Arbonnier M. (2002) Arbres arbuste et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. CIRAD-MNHN. 573p.
11. Aubreville, A. (1950) Flore forestière soudano-guinéenne. Orstom, Paris., 533p.
12. Barbault R. (dir.) (2005) Déclaration de Paris sur la biodiversité. International Conference: Biodiversity: science and governance, Paris. 24-28.
13. Barbet-Massin M., Thuiller W. et Jiguet F. (2010) How much do we overestimate future local extinction rates when restricting the range of occurrence data in climate suitability models? Ecography, 33, 878–886.
14. Bayala J, Teklehaimanot Z, et Ouedraogo SJ. (2002) Millet production under pruned tree crowns in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems.*, 54:203-214.
15. Beer de J. et McDermott M.J. (1989) The economic Value of Non-Timber Forest Products in Southeast Asia. Netherlands Committee for IUCN. Amsterdam, the Netherlands. 175 p.



16. Belesi H. (2009) Etude floristique, Phytogéographique et Phytosociologique de la végétation de Bas-Kasaï en République Démocratique du Congo. Thèse de doctorat, p.555
17. Bogaert J., Bamba I., Kabulu J. P., Koffi K. J., De Cannière C., Visser M. et Sibomana S. (2008) Fragmentation of Forest Landscapes in central Africa : causes, consequences and management. In: Patterns and Processes in Forest Landscapes: Multiple Use and Sustainable Management. Laforteza, R., Chen, J., Sanesi, G., Crow, Th. R. (Eds.), pp. 67-87. Springer, Verlag, New York.
18. Boko M., Niang I., Nyong A., Vogel C., Githeko A., Medany M., Osman-Lasha B., Tabo R. et Yanda, P. (2007) Africa. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Change (Eds M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van Der Linden and C.E. Hanson). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
19. Bolger D. T., Alberts A. C., Sauvajot R. M., Potenza P., McCalvin C., Tran D., Mazzoni S. et Soule M. E. (1997) Response of rodents to habitat fragmentation in coastal southern California. *Applied Ecology* 7:552–563.
20. Bonal D., Atger C., Barigah T.S., Ferhi A., Guehl J.M. et Ferry B. (2000) Water acquisition patterns of two wet tropical canopy trees of French Guiana as inferred from H<sub>2</sub><sup>18</sup>O extraction profiles. *Annals of Forest Science* 57:717-724.
21. Bonkougou E.G. (1999) A quick guide to multipurpose trees from around the world. [http://food-security.info/food-security.info/Winrock%20Archive/p\\_erinaceus.html](http://food-security.info/food-security.info/Winrock%20Archive/p_erinaceus.html). FACT net, Arkansas, USA. Cited 3 April 2007.
22. Bradshaw C.J.A., Sodhi N.S. et Brook B.W. (2009) Tropical turmoil: a biodiversity tragedy in progress. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 79–87.
23. Brehm J. M., Maxted N., Martins-Loução M. A. et Ford-Lloyd, B. V., 2010. New approaches for establishing conservation priorities for socio-economically important plant species. *Biodiversity and Conservation* 19:2715–2740.
24. Brenan J.P.M. (1983) Manuel sur la taxonomie des espèces d'acacias. Etat actuel de la taxonomie de quatre espèces d'Acacia (*A. albidia*, *A. senegal*, *A. nilotica*, *A. tortilis*). Rome FAO 47p.
25. Brown R.W. (1977) Water relations of range plants. p. 97-140. In: R.E. Sosebee (ed.), Rangeland plant physiology. Range Sci. Ser. 4. Society For Range Manage, Denver, Colo.
26. Burke M.J., Gusta L.V., Quamne H.A., Weiser C.J., Li P.H. (1976) Freezing and injury in plants. *Plant Physiology* 27:507-528.
27. Chefaoui R.M., Lobo J.M. (2008) Assessing the effects of pseudo-absences on predictive distribution model performance. *Ecology Modelling* 210: 478–486.
28. Christie E.K. et Detling J.K. (1982) Analysis of interference between C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses in relation to temperature and soil nitrogen supply. *Ecology* 63:1277-1284.
29. Collins J. M. (2011) Temperature Variability over Africa. *American Meteorological Society* 24: 3649-3666.
30. Corsi F., Dupre, E. et Boitani, L. (1999) A large-scale model of wolf distribution in Italy for conservation planning. *Conservation Biology*. 13, 150–159.

31. Cretinon B. (1994) Méthodes d'étalonnage et de vérification des hygromètres. Bulletin du Bureau national de métrologie. ISSN 0982-2232. n°98, pp. 43-49.
32. Dai A. (2011) Drought under global warming: a review. *Climate Change* 2: 45–65.
33. Daïnou K. (2012) Structuration de la diversité génétique du genre *Milicia*: taxonomie, phylogéographie, dynamique des populations. Thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. 178 pp.
34. Daubenmire R.F. (1974) Plant and environment a textbook of plant autecology. John Wiley and Sons, New York.
35. De Wasseige C, De Marcken P, Bayol N *et al.* (eds). (2012) Les forêts du bassin du Congo - Etat des Forêts 2010. Office des publications de l'Union Européenne. Luxembourg. 276 p. ISBN : 978-92-79-22717-2.
36. Déqué M, Drevet C, Braun A, Cariolle D (1994) The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the french community climate modelling. *Climate Dynamics* 10 : 249–266
37. Dury M., Hambuckers A., Warnant P., Henrot A., Favre E., Ouberdous M., François L. (2011). Responses of European forest ecosystems to 21<sup>st</sup> century climate: assessing changes in interannual variability and fire intensity. *Italian Society of Silviculture and Forest Ecology* 4:82-99.
38. Duvall C. S. (2008) *Pterocarpus erinaceus* Poir. In: Louppe D., Oteng-Amoako A. A., Brink M. (éd.). Protas 7 (1): Timbers/Bois d'œuvre 1. Wageningen, Pays-Bas, Protas.
39. Ejikeme PM, Obasi LN et Egbuonu AC. (2010) Physico-chemical and toxicological studies on *Azalia africana* seed and oil. *African Journal Biotechnology* 9:1959-1963.
40. Elith J., Graham C.H., Anderson R.P., Dudik 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.Mc.C., Peterson A.T., Phillips S.J., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Schapire R.E., Soberon J., Williams S., Wisz M.S. et Zimmermann N.E. (2006) Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129–151.
41. Engler R., Guisan A., Rechsteiner L. (2004) An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Applied Ecology* 41: 263-274.
42. FAO (1978) FAO Irrigation and Drainage Papers: Effective rainfall in irrigated agriculture. ISSN 0254-5284. 25p
43. FAO (1989) Plant genetic resources: their conservation in situ for human use. Rome.
44. FAO (2001) Situation des forêts dans le monde. 181 p.
45. Feldman L.J. (1984) Regulation of root development. *Plant Physiology* 35:223-242.
46. Fitter A. et Hay R. (2002) Environmental physiology of plants: *Third Edition*. Academic Press. ISBN: 01-22-577663,358p.
47. Fitter A.H. et Hay R.K.M. (2002) Environmental physiology of plants. Academic Press. San-Diego.

48. Fournier A, Sinsin B et Mensah G A. (2007) Quelles aires protégées pour l'Afrique de l'Ouest? Conservation de la biodiversité et développement. Institut de Recherche pour le Développement : collection Colloques et séminaires. 27p.
49. François L., Ghislain M., Otto D., Micheels A. (2006). Late Miocene vegetation reconstruction with the CARAIB model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 238 (1-4), 302-320.
50. François L.M., Dury Marie, Warnant P., Henrot A, Hambuckers A. (2011). The CARAIB dynamic vegetation model. BIOSERF seminar Institut de Zoologie, Université de Liège, 45p.
51. François L.M., Ghislain M., Otto D., Micheels A. (2006). Late Miocene vegetation reconstruction with the CARAIB model. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 238: 302-320.
52. Galy V, Francois LM, France-Lanord C, Faure P, Kudrass H, Palhol F, Singh SK (2008). C4 plants decline in the Himalayan basin since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 27: 1396-1409.
53. Gaston K.J. (1996). Species richness: measure and measurement. Biodiversity: a biology of numbers and difference (ed. K.J. Gaston), Blackwell Science, Oxford pp. 77–113.
54. Gérard J.C., Nemry B., Francois L.M., Warnant P. (1999). The interannual change of atmospheric CO<sub>2</sub>: contribution of subtropical ecosystems? *Geophysical Research Letters* 26: 243-246.
55. Gérard, J. et Louppe, D. (2011) *Afzelia africana* Sm. ex Pers. [Internet] Fiche de PROTA4U. Lemmens, R.H.M.J., Louppe, D. & Oteng-Amoako, A.A. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas. <<http://www.prota4u.org/search.asp>>. Visité le 1 août 2013.
56. Giffard P.L. (1974) L'arbre dans le paysage sénégalais. Dakar Sénégal Centre technique forestier tropical.432p.
57. Good S.P. et Caylor K.K. (2011) Climatological determinants of woody cover in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(12): 4902–4907.
58. Good S.P. et Caylor K.K., 2011. Climatological determinants of woody cover in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (12):4902-4907.
59. Gouwakinnou G.N. (2011). Population ecology, uses and conservation of *Sclerocarya birrea* (a. rich.) Hochst. (Anacardiaceae) in Benin, West Africa. PhD Thesis. University of Abomey-Calavi. Pp 176.
60. Gratani L., Meneghini M., Pesoli P., Crescente M.F. (2003) Structural and functional plasticity of *Quercus ilex* seedlings of different provenances in Italy. *Trees - Structure and Function* 17: 515–521.
61. Guan Y. er Krone S. (2004) WinSSS: Stochastic Spatial Simulator. *Bulletin of Ecological Society of America* 85(3): 102-104.
62. Guillet B., Robbes D., Méchin L. (2003) Low noise temperature control: application to an active cavity radiometer. *Scientific Instruments* 74 (1): 243-249.

63. Guisan A. et Zimmermann N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecology Modelling* 135: 147–186.
64. Guisan A., Zimmermann N.E., Elith J., Graham C.H., Phillips S.J., et Peterson A.T. (2007). What matters for predicting the occurrences of trees: techniques, data, or species characteristics? *Ecological Monographs* 77: 615-630.
65. Guyot G (1999) Climatologie de l'environnement : cours et exercices corrigés. 525p.
66. HARE B. (2005) Communication on Global Warming: The Ball is Now in the US Court, *Global Change, Peace and Security* 17 (1): 87-94.
67. Hasen-Yusuf M, Treydte AC, Abule E, Sauerborn J. (2011) Predicting aboveground biomass of woody encroacher species in semi-arid rangelands, Ethiopia. *Journal of Arid Environments* 96: 64-72
68. Herzog M. (1998) Shrubland Management in Tribal Islamic Yemen. Social Forestry as Development of a Local and Sustainable (Sylviculture. An Essay in Practical Philosophy. <http://www.brainworker.ch/reports/yemen/43FOR.htm>
69. Hikosaka K., Hirose T. (2001) Nitrogen uptake and use by competing individuals in a *Xanthium canadense* stand. *Oecologia* 126: 174-181.
70. Hilton-Taylor C. (2000). IUCN red list of threatened species. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 61pp.
71. <http://www.br.gov.be/research/COLLECTIONS/HERBARIUMS/SP/katanga.html>
72. <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa>
73. Hubert B., François L., Warnant P., Strivay D. (1998). Stochastic generation of meteorological variables and effects on global models of water and carbon cycles in vegetation and soils. *Journal of Hydrology* 212-213 (1-4), 318-334.
74. Hufty M. (2001) La gouvernance internationale de la biodiversité. *Etudes internationales* 32 (1): 5-29.
75. Hulme M., Doherty R., Ngaro T., New M. et Lister D. (2001) African climate change: 1900-2100. *Climate Research* 17: 145-168.
76. Hussein I. A., Junmin L. (2013). Evaluating Reference Crop Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in the Centre of Guanzhong Basin: Case of Xingping and Wugong, Shaanxi, China. *Engineering* 5: 459-468.
77. Hutchinson G.E. (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harb. Symp. Quantitative Biology* 22: 415–457.
78. IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 944p. [www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm).
79. IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Cambridge University Press, New York.
80. IUCN (2013). IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013.1. <[www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)>. Downloaded on 14 August 2013.
81. Jiofack T, Ayissi I, Fokunang C, Guedje N et Kemeuze V. (2009) Ethnobotany and phytomedicine of the upper Nyong valley forest in Cameroun. *African Journal of Pharmacology* 3(4):144-150.

82. Kabore A. (1998) Etude socio-économique de la gestion de *Acacia senegal* (L) Willd. Au Burkina Faso. Mémoire de fin d'étude IDR option agronomie Université Polytechnique de Bobo Dioulasso.96p.
83. Kleinbaum D.G. et Klein M. (2010) Logistic regression: a self-learning text (third edition). Department of epidemiology, Emory University.706p.
84. Kozlowski T.T. (1984) Plant responses to flooding of soil. *BioScience* 34:162-167.
85. Larcher W. (1980) *Physiological plant ecology*. Springer-Verlag, Berlin.
86. Laude H.M. (1974) Effect of temperature on morphogenesis.p. 25-35. *In*: K.W. Krietlow and R.H. Hart (eds.), *Plant morphogenesis as the basic for scientific management of range resources*. Proceedings of the workshop of the United States-Australia rangelands panel, Berkeley, CA, March 29-April 5, 1971. U.S. Dep. Agr. Misc. Publ. N° 1271.
87. Lebrun J. (1947) La végétation de la plaine alluviale au sud Lac Edouard. Inst. Parc Nat. Congo-Belge, Mission, J. Lebrun 1 et 2 : 800 p.
88. Lebrun JP et Stork AL. (1991-2012). Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale et *Tropical African Flowering Plants: Ecology and Distribution*, vol. 1-7. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève. <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa/index.php?langue=fr>
89. Lenoir J., Gegout J.C., Marquet P.A., Ruffray P. et Brisse H. (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20<sup>th</sup> century. *Science* 320(5884):1768–1771.
90. Lewis J.K. (1969) Range management viewed in the ecosystem framework.p 97-188. *In*: G.M. Van Dyne (ed.), *The ecosystem concept in natural resource management*. Academic Press, New York.
91. Madec G. (2008) NEMO ocean engine. Note du Pole de modélisation 27, Institut Pierre-Simon Laplace, 193 pp.
92. Manel S., Williams H.C. et Ormerod S.J. (2001) Evaluating presence–absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology* 38 : 921–931.
93. Marshall R. H. (1987) Environmental factors affecting plant productivity. White R.S. et Short R.E. (Eds), Publ. by Montana Agr. Exp. Sta., Bozerman, Feb. 1988. 132p.
94. Maxted N., Ford-Lloyd B.V., Jury S, Kell SP et Scholten M.A. (2006) Towards a definition of a crop wild relatives. *Biodiversity and Conservation* 15(8):2673–2685.
95. Maydell H.J. (1983) Arbres et arbustes du Sahel : leurs caractéristiques et leurs utilisations. Edition Eschorn. 531p.
96. Mbatudde M., Mwanjololo M., Kakudidi K. E. et Dalitz H. (2012). Modelling the potential distribution of endangered *Prunus africana* (Hook.f.) Kalkm. in East Africa. *African Journal of Ecology* 50 (4): 393–403.
97. McClean C.J., Lovett J.C., Kuper W., Hannah L., Sommer J.H., Barthlott W., Termansen M., Smith G.E., Tokamine S. et Taplin J.R.D. (2005) African Plant Diversity and Climate Change. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 92:139–152.

98. McGuire, A.D., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W. et Joyce, L.A. (1995) Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *Biogeography* 22: 785-796.
99. McLeman R. et Smit B. (2005) Assessing the security implications of climate change-related migration. Paper presented at an international workshop on Human Security and Climate Change: Oslo.
100. Miller L. et Kapuscinski A. R. (1997) Historical analysis of genetic variation reveals low effective population size in a northern pike. *Esox lucius*, *population Genetics* 147:1249-1258.
101. Morin X. et Thuiller W. (2009) Comparing Niche- and Process-Based Models to Reduce Prediction Uncertainty in Species Range Shifts under Climate Change. *Ecology* 90( 5): 1301-1313.
102. Nakao K., Matsui T., Horikawa M., Tsuyama I. et Tanaka N. (2011) Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecology* 212: 229-243.
103. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G. (2000). Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
104. Nemry B, François LM, Warnant P, Robinet F, Gérard J.C. (1996). The seasonality of the CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and the land biosphere: a study with a global mechanistic vegetation model. *Journal Geophysical Research* 101: 7111-7125.
105. Neuenschwander P., Sinsin B. et Goergen G. (2011). Protection de la Nature en Afrique de l'Ouest: Une liste Rouge pour le Bénin, Ibadan, Nigeria. 365p.
106. New M., Hulme M., Jones P. (1999). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12 (2-3), 829-856.
107. Nichols J.D., Agurgo F.B., Agyeman V.K., Wagner M.R., Cobbinah J.R. (1998) Distribution and abundance of *Milicia excelsa* species in Ghana. *Forestry* 6: 1-7.
108. Nikiema A. et Pasternak D. (2008). *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. In: Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A. and Brink, M. (Eds.) Plant resources of tropical Africa. pp. 339-344. Wageningen: PROTA Foundation; 7.
109. Niu S., Luo Y., Fei S., Yuan W., Schimel D, Law B.E., Ammann C., Arain M.A., Arneth A., Aubinet M, Barr A., Beringer J., Bernhofer C., Black T.A., Buchmann N., Cescatti A., Chen J., Davis K.J., Dellwik E., Desai A.R., Etzold S., Francois L., Gianelle D., Gielen B., Goldstein A., Groenendijk M., Gu L., Hanan N., Helfter C., Hirano T., Hollinger D.Y., Jones M.B., Kiely G., Kolb T.E., Kutsch W.L., Lafleur P., Lawrence D.M., Li L., Lindroth A., Litvak M., Loustau D., Lund M., Marek M., Martin T.A., Matteucci G., Migliavacca M., Montagnani L., Moors E. Munger J.W., Noormets A., Oechel W., Olejnik J., Paw K.T., Pilegaard K., Rambal S., Raschi A., Scott R.L., Seufert G., Spano D., Stoy P., Sutton M.A., Varlagin A., Vesala T., Weng E., Wohlfahrt G., Yang B., Zhang X.Z. (2012) Thermal optimality of net ecosystem exchange of carbon dioxide and underlying mechanisms. *New Phytologist* 194: 775–783.

110. Noble P.S. (1980) Water vapor conductance and CO<sub>2</sub> uptake for leaves of a C<sub>4</sub> desert grass *Hilaria rigida*. *Ecology* 6:252-258.
111. Noilhan J. et Planton S. (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather* 117: 536-549.
112. Noilhan J., Mahfouf J.F. (1996) The ISBA land surface parameterization scheme. *Global Planetary Changes* 13:145-159.
113. Ofori D.A. (2007b) *Milicia excelsa* (A.Chev.) C.C.Berg. In: Louppe D., Oteng-Amoako A.A., Brink M., eds. *Prota: Timbers/Bois d'oeuvre 1*. PROTA, Wageningen, Netherlands.
114. Oki T. et Sud Y.C. (1998). Design of total runoff integrating pathways (TRIP) a global river channel network. *Earth Interactions* 2: 1–37.
115. Ortega-Huerta M. et Peterson A.T. (2008) Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Mexico Biodiversity* 79: 205-216.
116. Osmaston H.A. (1965) Pollen and seed dispersal in *Chlorophora excelsa* and other Moraceae, and in *Parkii filicoidea* (Mimosaceae), with special reference to the role of the fruit bat, *Eidolon helvum*. *Commonwealth For. Rev.* 44, 96-104.
117. Ouédraogo-Koné S, Kaboré-Zoungrana CY, Ledin I. (2008) Important characteristics of some browse species in an agrosilvopastoral system in West Africa. *Agroforestry Systems* 74:213-221.
118. Oueslati B. (2012) Interaction entre convection nuageuse et circulation de grande échelle dans les tropiques. Thèse de doctorat. Doctorat de l'Université de Toulouse. 122p.
119. Panitz H.J., Schubert-Frisius M., Meier-Fleischer K., Lenzen P., Legutke S., Keuler K., Luethi D., Lettenbauer A. et Dosio A. (2013) CORDEX Climate Simulations for Africa using COSMO-CLM (CCLM). *Geophysical Research Abstracts* 15: 1387.
120. Pesoli P., Gratani L., Larcher W. 2003. Responses of *Quercus ilex* from different provenances to experimentally imposed water stress. *Biologia Plantarum* 46: 577–581.
121. Phillips S.J., Anderson R.P. et Schapire R.E. (2006) Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecology Modelling* 190: 231–259.
122. Phillips S.J., Dudik M. et Schapire R.E. (2004) A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*. ACM Press, New York, pp. 655–662.
123. Pittock B.A. (2009) *Climate change: the science, impacts and solutions* 2<sup>nd</sup> Edition ed. CSIRO Publishing, Earthscan
124. Reichstein, M. (2007) Impacts of climate change on forest soil carbon: principles, factors, models, uncertainties. *Forestry and climate change* 127-135.
125. Risser P.G. (1985) Grasslands.p. 232-256. In: B.F. Chabot and H.A. Mooney (eds.), *Physiology ecology of North American plant communities*. Chapman and Hall, New York.

126. Robertson M.P., Caithness N. et Villet M.H. (2001) A PCA-based modeling technique for predicting environmental suitability for organisms from presence records. *Diversity and Distributions* 7:15-27.
127. Salinger M.J., Sivakumar M.V.K. et Motha R. (2005) Reducing vulnerability of agriculture and forestry to climate variability and change: workshop summary and recommendations. *Climate Change* 70: 341–362.
128. Schreier A.L. (2009) The influence of resource distribution on the social structure and travel patterns of wild hamadryas baboons (*Papio hamadryas*) in Filoha, Awash National Park, Ethiopia. Ph.D. Thesis, City University of New York.
129. Schroter D., Cramer W., Leemans R., Prentice I.C., Araújo M.B., Arnell N.W., Bondeau A., Bugmann H., Carter T.R., Gracia C.A., De La Vega-Leinert A.C., Erhard M., Ewert F., Glendinning M., House J.I., Kankaanpaa S., Klein R.J.T., Lavorel S., Lindner M., Metzger M.J., Meyer J., Mitchell T.D., Reginster I., Rounsevell M., Sabate S., Sitch S., Smith B., Smith J., Smith P., Sykes M.T., Thonicke K., Thuiller W., Tuck G., Zaehle S. et Zierl B. (2005) Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310: 1333–1337.
130. Schwarz G. (1978) Estimating the dimension of a model, *Ann. Statist.* 6 461-464.
131. Sinsin B, Matig O E, Assogbadjo AE, Gaoue OG et Sinadouwirou T. (2004) Dendrometric characteristics as indicators of pressure of *Azelia africana* Sm. dynamic changes in trees found in different climatic zones of Benin. *Biodiversity and Conservation* 13: 1555–1570
132. Smith D. (1964) Winter injury and the survival of forage plants. *Herb. Abstr.* 34:203-209.
133. Soaga JA, Oluwalana SA et Adekunle MF. (2010) exploratory survey of traditional forest industries in ogun state, Nigeria: Implication for sustainable forest management. *Journal of Tropical Forest Science* 22(4): 370–377.
134. Souleymane P, Savadogo P, Tigabu M, Ouadba JM, Oden PC. (2010) Consumption values and local perception of dry forest decline in Burkina Faso, West Africa. *Environment, Development and Sustainability* 12:277-295.
135. Sydeman W. J., Hester M. M., Gress F., Martin P., et Buffa J. (2001) Climate change, reproductive performance and diet composition of marine birds in the southern California Current system, 1969–1997. *Progress in Oceanography* 49: 309–329.
136. Thuiller W. (2003). Biomod-optimizing predictions of species and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biodiversity* 9:1353-1362.
137. Thuiller W. (2004) Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* 10:2020–2027.
138. Tousignant M.E. Delorme M. (2006) Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. Québec Vert : IQDHO. 3p.
139. Trabucco A., Achten W.M.J., Bowe C., Aerts R., Van Orshoven J., Norgrove L. et Muys B. (2010) Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate . *Global Change Biology. Bioenergy* 2: 139–151.

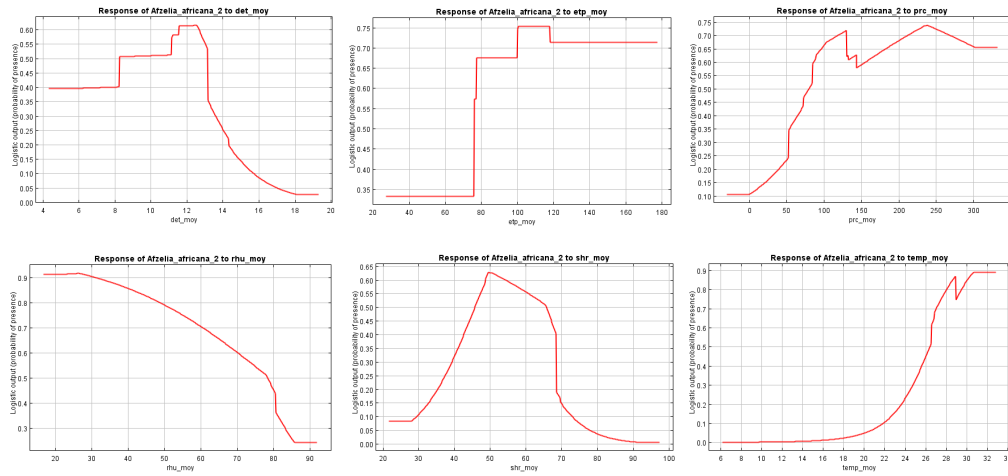


140. UICN (2001) Catégories et critères de l'UICN pour la Liste Rouge. Version 3.1. Commission de la sauvegarde des espèces de l'UICN, Gland, Suisse ; Cambridge, Royaume-Uni, ii + 32 p.
141. Valentine J.F. (1980) Range development and improvements. Brigham Young Univ. Press, Provo, Utah.
142. Van der Wal J., Shoo L.P., Graham C. et Williams S.E. (2009b) Selecting pseudo-absence data for presence-only distribution modeling: how far should you stray from what you know? *Ecological Modelling* 220: 589–594.
143. Van Der Wal J., Shoo L.P., Johnson C.N. et Williams S.E. (2009a) Abundance and the Environmental niche: Environmental suitability estimated from niche models predicts the upper limit of local abundance. *American Naturalist* 174:282–291.
144. van Zonneveld M., Jarvis A., Dvorak W., Lema G. et Leibing C. (2009) Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management* 257(7):1566–1576.
145. Verdin J., Funk C., Senay G., Choularton R. (2005) Climate science and famine early warning. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 360(1463):2155–2168.
146. Voldoire A, Sanchez-Gomez E, Salas y Melia D, Decharme B, Cassou C, Sénési S, Valcke S, Beau I, Alias A, Chevallier M, Déqué M, Deshayes J, Douville H, Fernandez E, Madec G, Maisonnave E, Moine MP, Planton S, Saint-Martin D, Szopa S, Tyteca S, Alkama R, Belamari S, Braun A, Coquart L, Chauvin F (2012) The CNRM-CM5.1 global climate model : description and basic evaluation. *Climate Dynamics* in press
147. Volkoff B. (1976) Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : feuille d'Abomey. ORSTOM, notice explicative, n°66, (2), 40 p.
148. Warnant P. (1999). Modélisation du cycle du carbone dans la biosphère continentale à l'échelle globale. PhD thesis, Université de Liège, Liège, Belgium.
149. Welk E., Schubert K. et Hoffmann M.H. (2002) Present and potential distribution of invasive mustard (*Alliaria petiolata*) in North America. *Divers. Distrib.* 8, 219–233.
150. Wiser S., Peet R.K., White P.S. (1998) Prediction of rare-plant occurrence: a southern Appalachian example. *Applied Ecology* 8:909–920.
151. Wisz M.S. et Guisan A. (2009) Do pseudo-absence selection strategies influence species distribution models and their predictions? An information-theoretic approach based on simulated data. *BMC Ecology* 9(8): 1472-6785.
152. Wisz M.S., Hijmans R., Li J., Peterson A.T., Graham C.H., et Guisan A. (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* 14: 763-773.
153. Wright J.S. (2005) Tropical forests in a changing environment. *Trends in Ecology and Evolution* 20(10): 553-560.
154. Wu M., Smith B., Schurgers G., Lindström J, Rummukainen M., et Samuelsson P. (2013) Vegetation-climate feedback causes reduced precipitation in CMIP5 regional Earth system model simulation over Africa. *Geophysical Research Abstracts* 15: 3281.

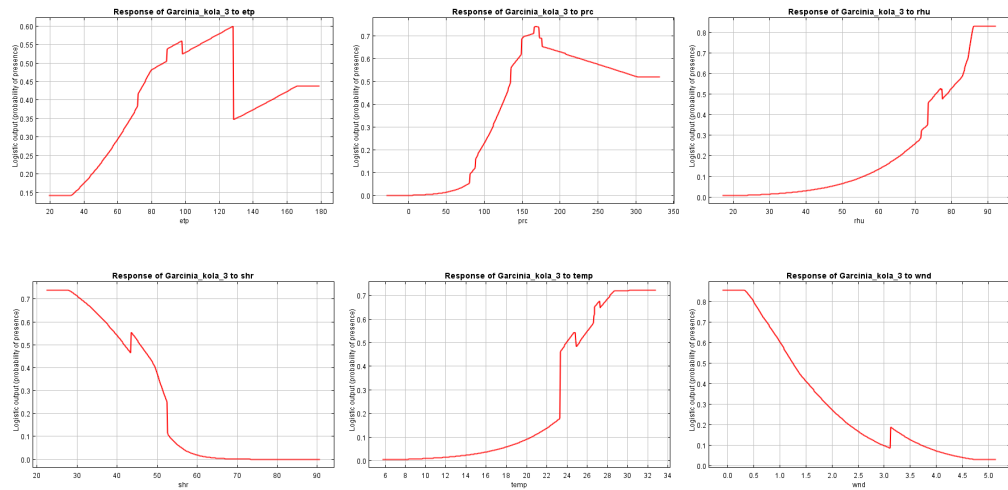
155. Yost A.C., Petersen S.L., Gregg M. et Miller R. (2008) Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using maximum entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecological Informatics*. 3: 375–386.
156. Zerbo G.C. (2005) Etude préliminaire de la sélection « arbres plus » de *Acacia senegal* (L) Willd. Au Burkina : Essai de greffage et production de gomme. Mémoire de fin d'étude. Institut de Développement Rural. Université Polytechnique de Bobo Dioulasso.57p.
157. Zerbo G.C. (2011) Influence du climat sur la dynamique de peuplement de *Acacia senegal* (L) Willd. au Burkina Faso. Travail de Fin d'Etude McSGE/PED.62p.

## Annexes

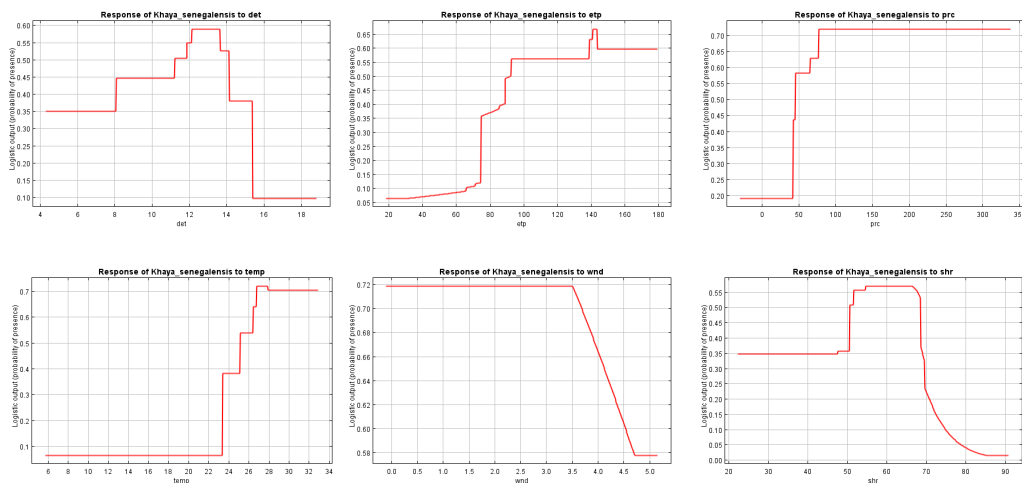
### Annexe 1 : Réponses écologiques d'*Afzelia africana* avec le modèle Maxent



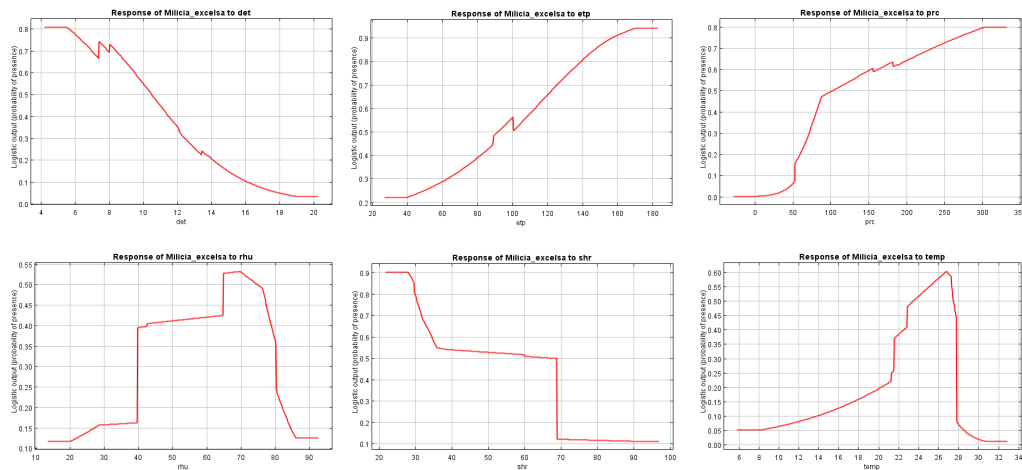
### Annexe 2: Réponses écologiques de *Garcinia kola* avec le modèle Maxent



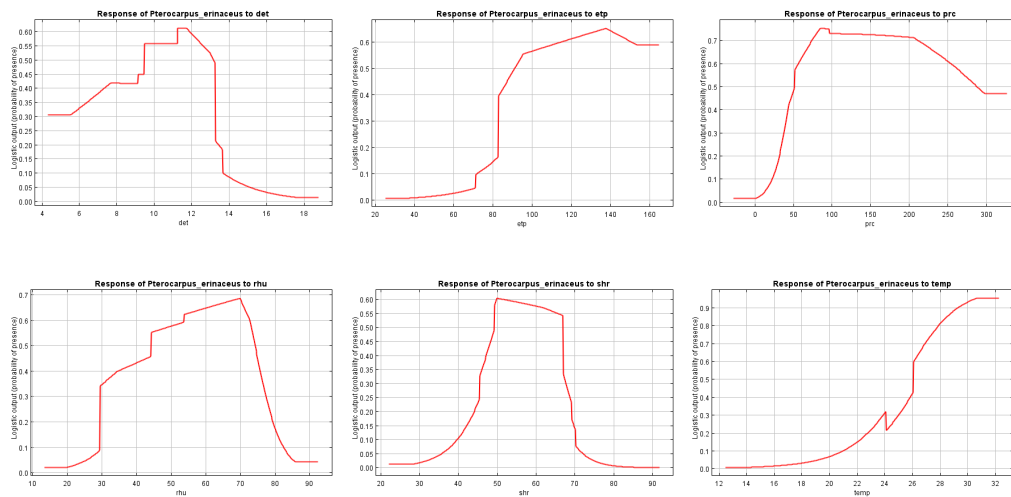
### Annexe 3: Réponses écologiques de *Khaya senegalensis* avec le modèle Maxent



#### Annexe 4: Réponses écologiques de *Milicia excelsa* avec le modèle Maxent



#### Annexe 5: Réponses écologiques de *Pterocarpus erinaceus* avec le modèle Maxent



#### Annexe 6. Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Acacia senegal*

Accords d'Appréciation				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
220	133	60.45	53.66	66.96
Stats du Kappa de Fleiss				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	-0.020882	0.067420	-0.309725	0.6216
2	-0.001412	0.067420	-0.020938	0.5084
3	-0.030052	0.067420	-0.445747	0.6721
Total	-0.016382	0.062469	-0.262243	0.6034
Coef. de Concordance de Kendall				
Coefficient	Chi <sup>2</sup>	DL	P(vs > 0)	
0.500279	219.122232	219	0.4850	

**Annexe 7.** Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Afzelia africana*

Accords d'Appréciation				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
123	93	75.61	67.05	82.90
Stats du Kappa de Fleiss				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	0.166102	0.090167	1.842157	0.0327
2	0.033988	0.090167	0.376943	0.3531
3	0.374461	0.090167	4.152974	0.0000
Total	0.214476	0.075756	2.831129	0.0023
Coef. de Concordance de Kendall				
Coefficient	Chi²	DL	P(vs > 0)	
0.761326	185.763474	122	0.0002	

**Annexe 8.** Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Garcinia kola*

Accords d'Appréciation				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
124	96	77.42	69.04	84.44
Stats du Kappa de Fleiss				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	1.000000	0.089803	11.135529	0.0000
2	0.197411	0.089803	2.198276	0.0140
3	0.276667	0.089803	3.080830	0.0010
Total	0.295168	0.080664	3.659216	0.0001
Coef. de Concordance de Kendall				
Coefficient	Chi²	DL	P(vs > 0)	
0.685076	168.528668	123	0.0041	

**Annexe 9.** Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Khaya senegalensis*

Accords d'Appréciation				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
128	107	83.59	76.02	89.55
Stats du Kappa de Fleiss				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	0.492063	0.088388	5.567063	0.0000
2	0.229247	0.088388	2.593637	0.0047
3	0.371170	0.088388	4.199309	0.0000
Total	0.315944	0.080507	3.924407	0.0000
Coef. de Concordance de Kendall				
Coefficient	Chi²	DL	P(vs > 0)	
0.722026	183.394486	127	0.0008	

**Annexe 10.** Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Milicia excelsa*

<b>Accords d'Appréciation</b>				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
181	123	67.96	60.63	74.68
<b>Stats du Kappa de Fleiss</b>				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	0.346098	0.074329	4.656276	0.0000
2	0.195300	0.074329	2.627494	0.0043
3	0.347042	0.074329	4.668971	0.0000
Total	0.281549	0.064757	4.347758	0.0000
<b>Coef. de Concordance de Kendall</b>				
Coefficient	Chi <sup>2</sup>	DL	P(vs > 0)	
0.730440	262.958304	180	0.0001	

**Annexe 11.** Analyse d'accords d'appréciation entre les modèles Maxent et logistique pour *Pterocarpus erinaceus*

<b>Accords d'Appréciation</b>				
# Inspecté	# Correspondant	Pourcentage	95% IC Inf.	95% IC Sup.
128	67	52.34	43.34	61.24
<b>Stats du Kappa de Fleiss</b>				
Réponse	Kappa	ErT Kappa	Z	P(vs > 0)
1	0.060742	0.088388	0.687217	0.2460
2	-0.025367	0.088388	-0.286997	0.6129
3	-0.112634	0.088388	-1.274303	0.8987
Total	-0.043780	0.066710	-0.656286	0.7442
<b>Coef. de Concordance de Kendall</b>				
Coefficient	Chi <sup>2</sup>	DL	P(vs > 0)	
0.607234	177.097521	127	0.001	