

Communauté Française de Belgique



**Modélisation climatique et pédologique de la distribution de *Mimosa pigra*
L. : Analyse de sa dynamique invasive en Afrique et au Parc National du
Niokolo Koba**

Mallé GUEYE

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

Filière : Nature et Biodiversité

Année académique 2013 – 2014

Promoteur : Dr. Alain HAMBUCKERS

« 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) membres du personnel enseignant de l'ULg.)

« Auteur du présent document : Malle GUEYE, mallegueye@yahoo.fr »

Communauté Française de Belgique



**Modélisation climatique et pédologique de la distribution de *Mimosa pigra*
L. : Analyse de sa dynamique invasive en Afrique et au Parc National du
Niokolo Koba**

Mallé GUEYE

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

Filière : Nature et Biodiversité

Année académique 2013 - 2014

Promoteur : Dr. Alain HAMBUCKERS

REMERCIEMENTS

Cette modeste contribution à l'œuvre scientifique en général et à la recherche en biologie des invasions et en écologie en particulier est le fruit de la collaboration entre l'Université de Liège et la Commission Universitaire pour le Développement du CIUF (Conseil interuniversitaire de la Communauté française) devenue ARES (Académie de Recherche et d'Enseignement supérieur) depuis le 1er janvier 2014.

Je rends grâce à ALLAH, le TOUT PUISSANT, de m'avoir donné une santé de fer durant toute la formation, je remercie mon guide spirituel Serigne Saliou TOURE.

J'exprime toute ma gratitude à l'ARES dont l'appui financier m'a permis de participer à cette formation et d'avoir un séjour agréable en Belgique.

Je tiens aussi à remercier très sincèrement Dr Alain HAMBUCKERS pour avoir accepté de superviser ce travail et pour son appui combien appréciable en modélisation de la distribution des espèces.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit des membres du jury notamment Prof. Grégory MAHY et Dr. Francis ROSSILLON pour avoir accepté de faire partie du jury.

Une mention spéciale est réservée à Monsieur Antoine DENIS pour son appui technique en cartographie et aussi au Prof Louis FRANCOIS pour avoir mis à notre disposition des données climatiques indispensables pour la construction des modèles.

J'exprime également toute ma gratitude à mon ami et frère Idrissa KANE, son épouse Fatsar DIOP, à leur fille Rokhaya et à travers eux toute la communauté sénégalaise de Belgique.

Je ne terminerai pas sans remercier mes collègues de service notamment Ibrahima GUEYE, Amar FALL, Babacar DIOP, Mandiaye NDIAYE, Adjia Aïssatou SY et l'ensemble du personnel de la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal.

Enfin, je remercie tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à accomplir ce travail.

RESUME

Cette étude a pour objectif d'étudier la niche écologique de *Mimosa pigra* L. en Afrique en vue de définir une stratégie de contrôle des populations invasives de cette espèce au Sénégal notamment au Parc National du Niokolo Koba. Elle a été réalisée en modélisant, au moyen de la régression logistique, sa distribution avec l'utilisation de variables climatiques d'une part et pédoclimatiques d'autre part.

Les modèles obtenus sont satisfaisants et les variables pédologiques semblent améliorer légèrement la capacité prédictive. Les résultats révèlent que *Mimosa pigra* est globalement retrouvée sous les mêmes climats en Afrique, qu'en Amérique, dans son aire originelle. De plus, elle est largement présente en climat tropical de part et d'autre de ces deux aires de distribution. Au plan des réponses écologiques, en Afrique, *Mimosa pigra* a une amplitude écologique globalement inférieure à ce qui est observé en Amérique. Les résultats des prédictions à l'horizon (2041 – 2060), sous l'effet des changements climatiques prévoient une dynamique de régression spontanée des populations de *Mimosa pigra* par rapport à leur répartition actuelle en Afrique. Par ailleurs, de manière spécifique, la situation actuelle d'invasion biologique du Parc National du Niokolo Koba pourrait se régler d'elle-même.

Les résultats de ce travail pourraient être améliorés en recherchant avec plus de précision la distribution de l'espèce dans ses aires d'origine et envahie.

Mot-clés : Modélisation, Climat, Pédologie, *Mimosa pigra*, Afrique, Parc National du Niokolo Koba.

ABSTRACT

This study aims to investigate the ecological niche of *Mimosa pigra* L. in Africa and to develop a strategy for control of invasive populations of this species in Senegal including Niokolo Koba National Park. It was conducted by modeling its distribution by using climatic variables on the one hand and soil and climatic variables on the other, using logistic regression.

The models obtained are satisfactory and soil variables seem slightly improve the predictive ability. The results reveal that *Mimosa pigra* is generally found in the same climates in Africa than in America, in its original area. Furthermore, it is widely distributed in tropical climates on these two distribution areas. In Africa, in terms of ecological responses *Mimosa pigra* has ecological amplitude generally less than in America. The results of the predictions on the future (2041-2060), on climate changes effects provide a dynamic spontaneous regression of populations of *Mimosa pigra* from their current distribution in Africa. Moreover, the current situation of biological invasion in Niokolo Koba National Park could be resolved itself.

The results of this work could be improved by looking more precisely the distribution of the species in its original and invaded areas.

Key-words: Modeling, Climate, Pedology, *Mimosa pigra*, Africa, Niokolo Koba National Park.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DES ESPECES VEGETALES.....	3
1. Les modèles de végétation.....	3
1.1. Les modèles dynamiques.....	3
1.2. Les modèles statiques.....	4
2. Performances des modèles.....	6
3. L'apport de données pédologiques dans les SDM.....	7
II. MIMOSA PIGRA L.....	8
1. Position systématique.....	8
2. Origines et distribution.....	8
3. Biologie de l'espèce.....	10
3.1. Caractéristiques botaniques.....	10
3.1.1. <i>Tige</i>	10
3.1.2. <i>Feuille</i>	10
3.1.3. <i>Fleur</i>	10

3.1.4.	<i>Graine</i>	11
3.1.5.	<i>Racine</i>	11
3.2.	Reproduction.....	11
3.2.1.	<i>Reproduction sexuée</i>	11
3.2.2.	<i>Production de graines</i>	12
3.2.3.	<i>Reproduction végétative</i>	12
3.3.	Dissémination.....	12
3.4.	Compétition.....	13
4.	Ecologie de l'espèce.....	13
4.1.	Précipitations et températures.....	13
4.3.	Types de sols.....	15
5.	Impacts de <i>Mimosa pigra</i> sur les écosystèmes.....	15
6.	Utilités et utilisations.....	16
7.	Méthodes de contrôle.....	16
7.1.	Mesures préventives.....	16
7.2.	Mesures curatives.....	16
7.2.1.	<i>Méthode de contrôle physique</i>	17
7.2.2.	<i>Contrôle chimique</i>	17
7.2.3.	<i>Contrôle biologique</i>	17
7.2.4.	<i>Contrôle intégrée</i>	18
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES		19
1.	Zone d'étude.....	19
2.	Données utilisées.....	22

2.1.	Données biologiques : présences et pseudo-absences.....	22
2.2.	Données climatiques.....	23
2.3.	Données pédologiques.....	24
2.4.	Association des coordonnées et des facteurs de l'environnement.....	24
3.	Construction du modèle de distribution de <i>Mimosa pigra</i>	25
4.	Modélisation.....	26
4.1.	Construction des modèles de distribution sur l'aire d'origine.....	27
4.2.	Construction des modèles de distribution sur l'aire envahie (Afrique).....	28
4.3.	Projection dans le présent des modèles I et II sur les aires d'origine et envahie.....	28
4.4.	Projection dans le futur (2041 - 2060) des modèles sur l'aire envahie.....	29
5.	Comparaison des modèles construits.....	29
6.	Réponses écologiques.....	29
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....		31
1.	RESULTATS.....	31
1.1.	Délimitation de l'aire de distribution de <i>Mimosa pigra</i>	31
1.1.1.	<i>Aire de distribution de Mimosa pigra en Amérique centrale et du Sud.....</i>	<i>31</i>
1.1.2.	<i>Aire de distribution de Mimosa pigra en Afrique.....</i>	<i>32</i>
1.2.	Modèles construits avec les données de l'aire d'origine.....	33
1.2.1.	<i>Modèle I sur le continent américain.....</i>	<i>33</i>
1.2.2.	<i>Modèle II sur le continent américain.....</i>	<i>35</i>
1.2.3.	<i>Projection des modèles I et II de l'aire d'origine sur l'Afrique.....</i>	<i>37</i>
1.3.	Modèles construits avec les données africaines.....	39
1.3.1.	<i>Modèle I sur le continent africain.....</i>	<i>39</i>

1.3.2.	<i>Modèle II sur le continent africain.....</i>	41
1.4.	Comparaison des modèles construits (Amérique et Afrique).....	42
1.5.	Réponses écologiques des facteurs selon les modèles.....	44
1.5.1.	<i>Réponses écologiques pour Mimosa pigra selon le modèle I sur l'aire d'origine....</i>	44
1.5.2.	<i>Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle II sur l'aire d'origine.....</i>	44
1.5.3.	<i>Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle I sur l'aire envahie.....</i>	44
1.5.4.	<i>Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle II sur l'aire envahie.....</i>	44
1.6.	Distribution future de <i>Mimosa pigra</i> en Afrique.....	52
2.	DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	54
	CONCLUSION GENERALE.....	57
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Distribution globale de <i>Mimosa pigra</i>	9
Figure 2: Distribution de <i>Mimosa pigra</i> en Afrique	9
Figure 3: Distribution de <i>Mimosa pigra</i> en fonction du climat, basée sur la classification climatique de Whittaker (1975).....	14
Figure 4: Carte de la zone d'étude.....	20
Figure 5: Carte des domaines climatiques de l'Afrique selon Köppen-Geiger.....	20
Figure 6: Localisation du Sénégal et du Parc National du Niokolo Koba.....	21
Figure 7: Etapes dans la réalisation d'un modèle (Guisan et Zimmermann, 2000).....	26
Figure 8: Les principales étapes de la méthodologie.....	30
Figure 9: Aire de distribution (alpha-hull) de <i>Mimosa pigra</i> en Amérique centrale et du Sud.....	31
Figure 10: Aire de distribution (alpha-hull) de <i>Mimosa pigra</i> en Afrique.....	33
Figure 11: Distribution actuelle de <i>Mimosa pigra</i> dans son aire d'origine en fonction des variables climatiques.....	35
Figure 12: Carte de distribution actuelle de <i>Mimosa pigra</i> en fonction des variables climatiques et pédologiques.....	37
Figure 13: Carte de distribution actuelle de <i>Mimosa pigra</i> en Afrique suite à la projection du modèle I	38
Figure 14: Carte de distribution actuelle de <i>Mimosa pigra</i> en Afrique suite à la projection du modèle II	39
Figure 15: Réponses écologiques de <i>Mimosa pigra</i> calculées par le modèle I sur l'aire d'origine pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c) et précipitations (d).....	46
Figure 16: Réponses écologiques de <i>Mimosa pigra</i> calculées par le modèle II sur l'aire d'origine pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c), précipitations (d), CaCO ₃ (e) et pH (f).....	47

Figure 17: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle I sur l'aire envahie pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c) et précipitations (d).....49

Figure 18: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle II sur l'aire envahie pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c), précipitations (d), CaCO₃ (e) et pH (f).....50

Figure 19: Carte de distribution future de *Mimosa pigra* selon le modèle I.....52

Figure 20: Carte de distribution future de *Mimosa pigra* selon le modèle II.....53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Position taxonomique.....8

Tableau 2: Données d'occurrences de *Mimosa pigra* disponibles.....23

Tableau 3: Les variables climatiques utilisées.....23

Tableau 4: Variables pédologiques de la base de données de la FAO.....24

Tableau 5: Résultats du modèle logistique sur les variables climatiques sur l'aire d'origine.....34

Tableau 6: Résultats du Test de vraisemblance de type I sur les variables climatiques sur l'aire d'origine.....34

Tableau 7: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques et pédologiques sur l'aire d'origine.....36

Tableau 8: Résultats du Test de vraisemblance de type I sur les variables climatiques et pédologiques sur l'aire d'origine.....36

Tableau 9: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques sur l'aire envahie.....40

Tableau 10: Résultats du test de vraisemblance de type I des variables climatiques sur l'aire envahie 40

Tableau 11: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques et pédologique sur l'aire envahie.....41

Tableau 12: Résultats du test de vraisemblance de type I des variables climatiques et pédologiques sur l'aire envahie.....41

Tableau 13: Résultats du test de comparaison de variance entre les modèles I Amérique et Afrique...42

Tableau 14: Résultats du test de comparaison de variance entre les modèles II Amérique et Afrique..43

Tableau 15: Résultat t-test effectué sur la variable CaCO₃ des deux modèles.....43

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Inflorescence de *Mimosa pigra*10

Photo 2: Infructescence de *Mimosa pigra*11

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANN : Artificial Neural Networks

ARES : Académie de Recherche et d'Enseignement supérieur

AIC : Akaike Information Criterion

AUC : Area Under Curve

BRT : Boosted Regression Trees

CARAIB : CARbon Assimilation In the Biosphere

CART : Classification and Regression Trees

DGVM : Dynamic Global Vegetation Model

DVM : Dynamic Vegetation Model

ENFA : Ecological Niche Factor Analysis

GAM : Generalized Additive Model

GARP : Genetic Algorithm for Rule Set Production

GBM : Gradient Boosting Machines

GLM : Generalized Linear Model

MARS : Multivariate Adaptive Regression Splines

MaxEnt : Maximum Entropy

MLR : Multiple Logistic Regression

NPP : Productivité Primaire Nette

PFT : Plant Functionnal Types

PNNK : Parc National du Niokolo Koba

RF : Random Forest

ROC : Receiver Operating Characteristic

SDM : Static Distribution Model

SVM : Support Vector Machines

INTRODUCTION

Les espèces exotiques invasives sont des espèces qui s'établissent et répandent leurs menaces sur des écosystèmes et des habitats variés. Ce sont des espèces à nuisance économique et environnementale (McNeely *et al.*, 2001). Pimentel *et al.* (2001) estiment que le coût économique mondial associé aux espèces invasives, se chiffre en milliards de dollars chaque année. L'impact économique de ces espèces est directement lié à l'impact de celles-ci sur les écosystèmes. Perte de biodiversité, et altération du fonctionnement des écosystèmes sont les dommages les plus fréquemment associés aux espèces invasives.

C'est le cas de l'amourette (*Giant sensitive* en anglais), *Mimosa pigra* qui est native d'Amérique centrale (Mexique) et du Nord de l'Amérique du Sud. Elle a été introduite en Afrique, en Asie du sud-est, sur certaines îles du Pacifiques et en Australie vraisemblablement à partir de jardins botaniques et/ou en tant que curiosité à cause du mouvement de ses feuilles (Lonsdale *et al.*, 1989 ; Walden *et al.*, 1999). *Mimosa pigra* est présente à l'heure actuelle dans 34 pays africains (Germplasm Resources Information Network, USDA-ARS) et fait partie des 100 espèces invasives les plus problématiques au monde (Global Invasive Species Database). Au Sénégal, elle a été observée pour la première fois en 1824 (Hutchinson et Dalziel, 1958) et est présente au Nord, au Centre-ouest, au Sud et au Sud-est du pays.

Mimosa pigra est considérée comme l'espèce végétale la plus invasive dans les zones marécageuses tropicales (Cronk et Fuller, 1995). Elle forme des bosquets impénétrables, denses et épineux dans les milieux humides, comme les prairies naturelles inondables et les pâturages, les transformant ainsi en milieux quasi monospécifiques et improductifs. En Australie elle envahit aussi les forêts marécageuses à *Melaleuca spp.* bordant les plaines inondables, où elle forme un sous-bois dense, et ombre les plantules d'arbres indigènes (Braithwaite *et al.*, 1989).

Au Sénégal, cette espèce est présente dans les vallées et les dépressions qui restent inondées pendant une bonne partie de l'année ou sur les rivages des cours d'eau (Bâ *et al.*, 2008). Des observations dans le Parc National du Niokolo Koba, ont montré que les dégâts occasionnés par cette espèce sont considérables. Elle ne serait devenue problématique qu'à partir des années 1990. Selon nos propres observations réalisées au cours de nos tournées d'inspection, l'espèce a colonisé en quelques années la plupart des mares. Or, celles-ci sont des zones de biodiversité remarquables, du fait du nombre important d'espèces végétales et de poissons qui

s'y développent et de la faune sauvage (mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens) qui les fréquentent. Cette colonisation a entraîné la fermeture de ces mares, empêchant ainsi ces milieux de remplir leurs fonctions écologiques. Des observations non-systématiques donnent à penser qu'il y a une augmentation de la présence de *Mimosa pigra* les années de faible pluviométrie.

L'hypothèse que l'invasion rapide de certains écosystèmes est favorisée par les changements climatiques doit être prise en compte pour être en mesure d'assurer la meilleure gestion possible de ces populations d'invasives. Les changements climatiques peuvent défavoriser certaines espèces (Bellard *et al.*, 2013) ou en favoriser puis ultérieurement les défavoriser (Bertelsmeier *et al.*, 2013). Ces problèmes sont étudiés en utilisant les modèles de distribution, le plus souvent ceux décrivant la niche écologique. Le plus connu de ces modèles est MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). Celui possédant la meilleure assise théorique est le modèle de régression logistique qui est un cas particulier des modèles linéaires généraux (Elith *et al.*, 2006). Ces modèles sont largement utilisés pour étudier les modifications de distribution des espèces induites par les changements climatiques et il a été montré que l'ajout de variables pédologiques aux variables indépendantes améliorerait les capacités prédictives de ces modèles (Coudun *et al.*, 2006 ; Willems, 2011). Ils sont aussi utilisés comme un outil de gestion (Willems, 2011) car ils permettent aussi d'évaluer le risque d'invasion d'espèces non désirables (Smolik *et al.*, 2010 ; Ward, 2007).

Ce travail a pour objectif général d'étudier la niche écologique de *Mimosa pigra* L. en Afrique en vue de définir une stratégie de contrôle des populations invasives au Sénégal notamment au Parc National du Niokolo Koba.

Il s'agira de manière spécifique :

- de comprendre les réponses écologiques (climat et pédologie) de *Mimosa pigra* dans son aire de distribution initiale (Amérique du Sud et Amérique centrale) puis dans ses nouvelles aires de distribution (Afrique).
- de déterminer si les facteurs environnementaux agissent pareillement dans les nouvelles aires de distribution. Cette étape permettra d'examiner les bases sur lesquelles reposent le succès de *M. pigra* en tant que plante invasive;
- d'étudier la dynamique invasive de *Mimosa pigra* face aux changements climatiques ;

- de proposer une stratégie de contrôle de cette espèce invasive au sein du Parc National du Niokolo Koba.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DES ESPECES VEGETALES

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité où seules des variables considérées comme essentielles ou dominantes sont sélectionnées (Bordin, 2002). D'autres auteurs comme Cronk et Fuller (1995) soutiennent qu'un modèle est une description simplifiée d'un processus ou d'un système, souvent sous la forme mathématique, qui facilite la compréhension et peut permettre souvent des prédictions nécessaires compte tenu aux conditions initiales spécifiées. La plupart des modèles de plantes invasives ne distinguent pas la différence entre les habitats naturels ou semi-naturels et ceux perturbés naturellement ou par les actions anthropiques. La définition des caractéristiques et facteurs pour les invasions typiques des plantes est difficile en considérant la variété écologique des plantes invasives et des habitats naturels.

1. LES MODÈLES DE VÉGÉTATION

Il existe deux grandes classes principales dans les modèles de végétation. Il s'agit des modèles dits :

- « dynamiques » car ils possèdent une relation concrète avec le temps : ces modèles utilisent les liens mécanistes qui peuvent exister entre les caractéristiques d'une espèce et son environnement (Kearney et Porter, 2009).
- « statiques » ou SDM (Static Distribution Model), c'est-à-dire représentant des événements indépendants du temps (Peng, 2000), utilisant la corrélation entre des données spatiales de l'environnement et des relevés de distribution d'espèces (Guisan et Zimmermann, 2000).

1.1. Les modèles dynamiques

Les modèles dits « dynamiques » sont basés sur des processus et fournissent des informations relatives à l'écologie de l'espèce, comme sa production biologique, son indice foliaire ou le flux d'eau qu'elle évapore (Kearney, 2006). Ils reposent essentiellement sur le calcul de la photosynthèse et de la respiration pour finalement arriver à l'évaluation de la productivité primaire nette (NPP), c'est-à-dire le taux net d'absorption de carbone par la végétation

(Laurent *et al.*, 2004). Ces modèles sont qualifiés de « Dynamic Vegetation Model » (DVM) s'ils prennent en considération une portion précise de la surface terrestre ou de « Dynamic Global Vegetation Model » (DGVM) si leur domaine d'application est considéré sur l'entièreté du globe.

Le modèle de végétation CARAIB (CARbon Assimilation In the Biosphere) est un exemple de modèle dynamique. Il a été réalisé dans le but d'estimer la productivité primaire nette de la végétation continentale à l'échelle globale (Francois *et al.*, 2011; Warnant *et al.*, 1994) et de déterminer l'implication de la flore dans le cycle de carbone. CARAIB est capable de modéliser la croissance de la végétation en fonction des données climatiques mensuelles classiques telles que les précipitations, l'amplitude thermique du jour ($T^{\circ}\text{C}$ maximum – $T^{\circ}\text{C}$ minimum), la température moyenne journalière, la vitesse du vent, l'humidité relative de l'air et le pourcentage d'ensoleillement.

1.2. Les modèles statiques

La modélisation de niche écologique, également connu sous le nom de modélisation de la distribution des espèces, de modélisation des niches, de modélisation prédictive de la répartition des habitats, ou encore de modélisation de l'enveloppe climatique se réfère au processus d'utilisation d'algorithmes pour prédire la distribution des espèces dans l'espace géographique sur la base d'une représentation mathématique de leur aire de répartition connue dans l'environnement spatial. L'environnement est dans la plupart des cas représenté par des données climatiques (tels que la température et les précipitations), mais d'autres variables telles que le type de sol, la profondeur de l'eau, et la couverture du sol peuvent également être utilisées (Elith & Leathwick, 2009).

Les modèles statiques (SDM) ne mènent qu'à une probabilité d'occurrence et permettent d'estimer les exigences biologiques et écophysologiques d'une espèce, selon le type de variables utilisées pour la prédiction. Les SDM sont régulièrement utilisées à ces fins, en particulier pour les études écologiques non quantitatives (Leathwick et Austin, 2001 ; Elith & Leathwick 2009) et de biologie évolutive (Graham *et al.*, 2004b). Ils sont largement utilisés dans la biogéographie, la biologie de la conservation et l'écologie (Elith & Leathwick, 2009a; Elith *et al.*, 2011). Les meilleures prédictions de répartition spatiale d'espèces concernent principalement les espèces communes et spécialistes (exigences écologiques restreintes), contrairement aux espèces rares et aux espèces généralistes (Lancia *et al.*, 1986).

Il existe plusieurs méthodes d'algorithmes de modélisation de la niche. Selon (Elith & Leathwick 2009), ces dernières comprennent les :

- méthodes dites « profil » telles que [BIOCLIM](#), [DOMAINE](#), Distance de [Mahalanobis](#), Analyse Factorielle de la [Niche Ecologique](#) (en anglais *Ecological Niche Factor Analysis* ou ENFA), etc.;
- méthodes basées sur la régression : le [Modèle Linéaire Généralisé](#) (en anglais *Generalized linear model* ou GLM), le [Modèle Additif Généralisé](#) (en anglais *Generalized Additive Model* ou GAM), la Régression [Multivariée Adaptative en Splines](#) (en anglais *Multivariate Adaptive Regression Splines* ou MARS), etc. ;
- méthodes dites «learning machine» comme l'Entropie Maximale (en anglais *Maximum entropy* ou [MaxEnt](#)), les [Réseaux de Neurones Artificiels](#) (en anglais *Artificial Neural Networks* ou ANN), l'[Algorithme Génétique pour l'Ensemble des Règles de Production](#) (en anglais *Genetic Algorithm for Rule Set Production* ou GARP), les [Forêts Aléatoires](#) (en anglais *Random Forest* ou RF) entre autres.

Différents auteurs (Guisan *et al.*, 1999; Guisan *et al.*, 2002; Lechmere-Oertel and Cowling, 1999; Thuiller *et al.*, 2003) rapportent que sur l'ensemble des procédés employés dans les SDM, l'emploi de la régression statistique, « modèles linéaires généralisés » (GLM – Generalized Linear Model), apparaît comme étant l'une des techniques les plus largement répandues dans le domaine de la modélisation. La GLM a été reconnue en écologie depuis un certain temps comme ayant de grands avantages pour le traitement des données avec différentes erreurs de structure particulièrement des données de présence / absence qui sont le type commun de données disponibles pour la modélisation spatiale de la répartition des espèces (Nicholls, 1989 ; Nicholls, 1991; Rushton *et al.*, 2004). Les GLM englobent quatre types de modèles : la régression linéaire, la régression log- linéaire, la régression logistique et la régression de Poisson (Albert, 2005). Ces régressions sont fondées sur une relation supposée entre la moyenne de la variable de réponse et la combinaison linéaire des variables explicatives. Selon le type de réponse étudiée (présence-absence d'espèces, richesse spécifique, abondances relatives des espèces), une distribution lui est supposée, permettant alors de choisir la régression la plus appropriée dans la famille des GLM (Lancia *et al.*, 1986). La fonction de lien est une fonction qui permet de transformer la réponse et de la lier au prédicteur linéaire qui est une combinaison des variables explicatives.

Les données relatives aux espèces, employées dans les SDM, peuvent être de trois types selon Guisan et Thuiller (2005) : présence uniquement (Zaniewski *et al.*, 2002; Brotons *et al.*, 2004), présence et absence (Fielding et Bell, 1997, Manel *et al.*, 2001) et mesures d'abondance établies par échantillonnage aléatoire, stratifié ou encore obtenu dans des collections de muséums (Graham *et al.*, 2004a).

Dans le cas de la prédiction de la répartition spatiale des espèces, la réponse est le plus souvent binaire (espèce présente ou absente) ; la distribution de cette réponse est donc de type binomial et la fonction de lien appropriée est alors la fonction logistique (*logit*) qui contraint la variable prédite à une valeur comprise entre 0 et 1 qui peut être interprétée comme une probabilité de présence. Les variables explicatives (variables indépendantes X_i) peuvent être soit qualitatives, soit quantitatives (Preux *et al.*, 2005). La régression logistique utilise la méthode du maximum de vraisemblance pour estimer les coefficients des variables indépendantes (Burns & Burns, 2008). Les GAM (Generalized Additive Model) (Hastie et Tibshirani, 1986, 1990) sont des extensions semi-paramétriques de GLM, la seule hypothèse faite est que les fonctions sont additives et que les composantes sont lisses. Les modèles additifs généralisés (Hastie et Tibshirani, 1990), une puissante extension de GLM, sont de plus en plus utilisés pour la modélisation des espèces (Yee et Mitchell, 1991; Leathwick et Whitehead, 2001). Ils fournissent une flexibilité supplémentaire utile pour le montage des relations écologiquement réalistes dans les SDM (Elith & Leathwick, 2009). Durant les dernières décennies, de nombreux développements ont été introduits tant sur les méthodes de calcul avec l'apparition de modèles basés sur des algorithmes génétiques (GARP : Stockwell 1999) ou sur la méthode d'optimisation du maximum d'entropie (MaxEnt : Stevens *et al.*, 2006) que sur l'introduction de nouveaux processus, comme celui de la dispersion (MigClim : Engler et Guisan, 2009). Comme le modèle logistique, 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. L'avantage est que seul des données de présence sont nécessaires et c'est « l'ensemble des points sans présence » de l'espace étudié appelé « background », qui sert de référence (Phillips *et al.*, 2004, 2006 ; Bedia *et al.*, 2011). Un autre avantage remarquable de MaxEnt est la simplicité relative de son algorithme qui conduit à un coût de calcul réduit (Bedia *et al.* 2011).

1. PERFORMANCES DES MODÈLES

Différents travaux ont évalué les performances relatives des modèles. Les résultats sont contrastés, selon les études, le même modèle n'apparaît pas toujours comme étant le meilleur. Trois groupes de méthodes sont reconnues avec différents niveaux de succès prédictif, les plus récentes méthodes de BRT (Boosted Regression Trees), GBM (Gradient Boosting Machines) et MaxEnt sont les meilleures, suivies par MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines), GLM, GAM, et la nouvelle version du GARP (OM- GARP), tandis que d'autres méthodes, par exemple GARP, VIES, BIOCLIM et le DOMAIN sont moins satisfaisants. L'évaluation est basée sur l'AUC (Area Under ROC Curve) et le point de corrélation bisérielle (Elith *et al.*, 2006). D'après Bedia *et al.*, (2011), la performance prédictive de MARS a été étudiée en comparaison avec les modèles GAM pour plusieurs espèces de poissons d'eau douce par Leathwick *et al.*, (2006), révélant sa capacité à identifier efficacement le plus parcimonieux et le plus robuste des prédicteurs environnementaux à décrire la répartition des espèces. De même, MARS a montré de meilleures performances que MLR (Multiple Logistic Regression) dans une étude comparative réalisée par Munoz et Felicísimo (2004). Les modèles CART (Classification and Regression Trees) ont révélé de meilleures performances que MLR pour prédire la distribution des trois principales espèces de chênes en Californie (Vayssières *et al.*, 2000) et offrent des propriétés intéressantes telles que la flexibilité, la facilité de mise en œuvre et l'interprétation des résultats produisant une partition de l'espace de fonction entièrement décrit par un seul arbre (Hastie *et al.*, 2009). Toutefois, selon Bedia *et al.*, (2011) il a été montré que leur performance est plus faible par rapport aux GAM et aux modèles MLR d'ordre élevé dans le cas des données simulées sur les espèces dont le prédicteur dominant a eu une réponse linéaire (Santika & Hutchinson 2009). Selon Bedia *et al.* (2011) les SVM (Support Vector Machines) sont considérés aussi universel et puissant que les ANN (Artificial Neural Networks) (Cortes et Vapnik, 1995) et, sur le plan conceptuel, ils peuvent être assimilés à la définition classique de Hutchinson (1957) de la niche écologique comme un espace multidimensionnel de l'environnement (Drake *et al.*, 2006). Bien que leur application dans la modélisation de la répartition des espèces est encore rare, il s'est avéré un outil utile pour la définition de la niche d'habitat, par exemple, la prévision de l'invasion biologique par les moules zébrées dans les plans d'eau douce nord-américains (Drake & Bossenbroek, 2009).

2. L'APPORT DE DONNÉES PÉDOLOGIQUES DANS LES SDM

Coudun *et al.*, (2006), rapportent que dans la plupart des cas de figure, la réponse écologique et la distribution spatiale d'espèces végétales sont analysées avec les facteurs climatiques uniquement et que ces derniers sont considérés comme étant essentiels et dominants dans la distribution des plantes à l'échelle terrestre. Parallèlement, les facteurs édaphiques sont aussi considérés comme importants pour les espèces végétales et la modélisation de leur distribution (Pinto et Gegout, 2005 ; Bragazza et Gerdol, 1996 ; Coudun et Gegout, 2007). Cependant, selon ces mêmes auteurs, ils sont encore très peu utilisés. Les travaux de Coudun *et al.* (2006), Coudun et Gégout (2007) révèlent que la modélisation de la distribution de l'érable champêtre et la myrtille est nettement affinée avec l'apport de variables pédologiques. Cependant, selon Willems (2011) l'approche reste limitée par la disponibilité de données pédologiques digitalisées suffisamment précises.

I. MIMOSA PIGRA L.

1. POSITION SYSTÉMATIQUE

Mimosa pigra est une espèce appartenant à la famille des Fabaceae. Sa position taxonomique est consignée dans le tableau ci-après :

Tableau 1: Position taxonomique

Embranchement	Sous- embranchement	Classe	Ordre	Famille	Tribu	Genre
Spermaphytes	Angiospermes	Dicotylédones	Fabales	Fabaceae	Mimoseae	Mimosa

Source: The Plant List.org

Le genre *Mimosa* renferme environ 1383 espèces et est représenté au Sénégal par deux espèces : *Mimosa pigra* L. *pigra* et *Mimosa pudica* (Bâ *et al.*, 2008). *Mimosa asperata* L. est connu sous le synonyme *Mimosa pigra* L. var. *berlandieri* (A. Gray) B.L. Turner. mais *Mimosa pigra* var. *pigra* est l'espèce (variété) la plus répandue dans le monde. Ces deux espèces diffèrent légèrement par la pubescence des gousses et la morphologie des épines.

2. ORIGINES ET DISTRIBUTION

Mimosa pigra est native d'Amérique centrale (Mexique) et du Nord de l'Amérique du Sud (Figure 1). Elle a été introduite en Afrique, en Asie du sud-est, dans certaines îles du Pacifiques et en Australie et vraisemblablement à partir de jardins botaniques et/ou en tant que curiosité à cause du mouvement de ses feuilles (Lonsdale *et al.*, 1989; Walden *et al.*, 1999).

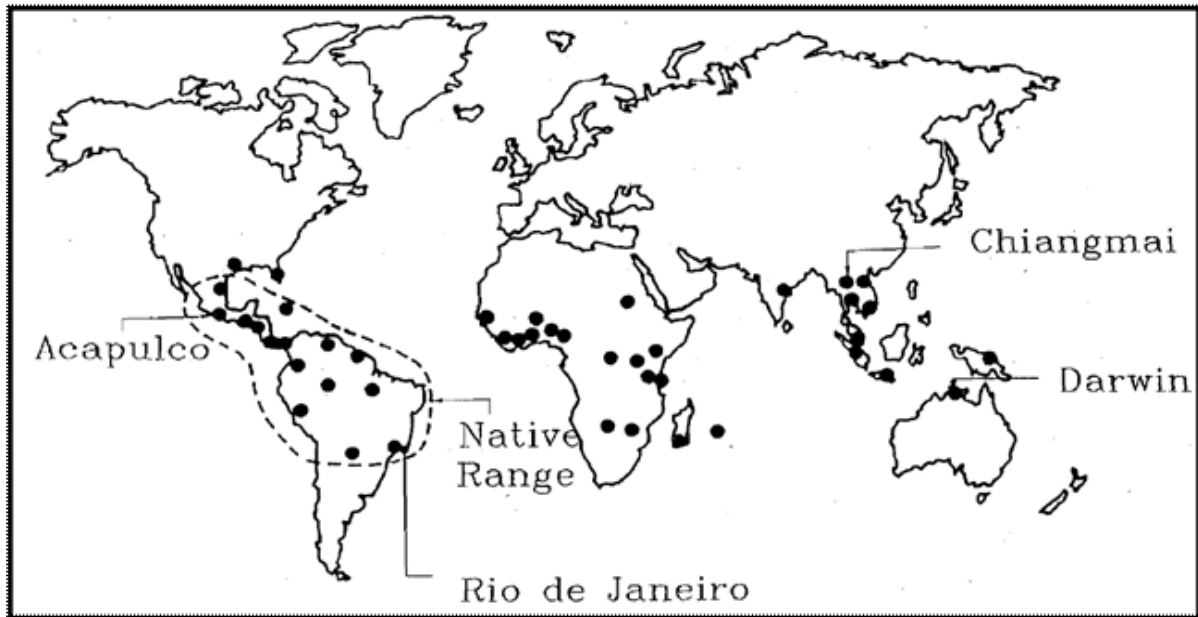


Figure 1: Distribution globale de *Mimosa pigra* (Source : CSIRO, Australie)

Selon Melki (2007), *Mimosa pigra* se trouve presque dans tous les continents : Océanie (Australie, Papouasie Nouvelle Guinée, etc.), Asie (Cambodge, Indonésie, Malaisie, Sri Lanka, Thaïlande, Vietnam, etc.), Amérique du nord (Etats-Unis), Afrique (Afrique du sud, Ghana, Guinée, Kenya, Ouganda, Swaziland, Sénégal, Tanzanie, etc.).

Elle est présente à l'heure actuelle dans 34 pays africains (Figure 2) dont le Sénégal (Germplasm Resources Information Network, USDA-ARS) où elle a été observée pour la première fois en 1824 (Hutchinson et Dalziel, 1958).



Figure 2: Distribution de *Mimosa pigra* en Afrique (Source : CSIRO, Australie)

3. BIOLOGIE DE L'ESPÈCE

1.1. Caractéristiques botaniques

1. Tige

Mimosa pigra est un arbuste buissonnant, drageonnant (Berhaut, 1967). Elle atteint généralement 2 à 3 m de haut (Bâ *et al.*, 2008). Toutefois, selon Lonsdale *et al.* (1995) cette légumineuse peut atteindre jusqu'à 6 m de hauteur. La tige est verte quand la plante est jeune, et ne devient ligneuse que quand elle arrive à maturité (Weed Management Guide, 2008). Elle est armée de piquants à large assise pouvant atteindre 7 mm de long (Lonsdale *et al.*, 1995).

2. Feuille

Les feuilles alternes, composées bipennées, sont constituées de 5 à 16 paires de pinnules de 3 à 8 cm avec 12 à 30 paires de foliolules (Bâ *et al.*, 2008). Elles sont sensibles et présentent un rachis qui mesure 8 à 12 cm de long. Les foliolules sont linéaires ou lancéolées, longues de 4 à 7 mm et larges de 1 mm. La base est dissymétrique et le sommet est cuné. Elles sont pubescentes sur les deux faces et sur les bords. Le pétiole présente une base épaissie et mesure 5 à 15 mm de long.

3. *Fleur*

Les inflorescences sont en capitules sphériques axillaires de 15 mm de diamètre et sont portées par un pédoncule de 15 à 30 mm de long. Chaque inflorescence peut porter jusqu'à 100 fleurs qui ont une couleur mauve pâle ou blanc rosé (Photo 1). Le calice est très petit (0,75 à 1 mm) et lacinié. La corolle est longue de 2,25 à 3 mm. Les étamines sont au nombre de 8 (Bâ *et al.*, 2008).



Photo 1: Inflorescence de *Mimosa pigra* (Source : Colin G. Wilson)

4. *Graine*

L'infructescence peut porter une grappe de 1 à 30 fruits pubescents. Les fruits sont des gousses plates articulées, de couleur marron à maturité, étalées en éventail par 5 à 10 au sommet d'un pédoncule de 4 cm (Photo 2). Ils sont longs de 3 à 8 cm et larges de 1 à 1,3 mm. La surface du fruit est couverte de longs poils dorés, hirsutes et entrecroisés (Lonsdale *et al.*, 1995).



Photo 2: Infructescence de *Mimosa pigra* (Source : Colin G. Wilson)

Chaque fruit renferme 8 à 25 graines. Les graines mûres sont brunes-claires à brunes ou vertes olive (Lonsdale et *al.*, 1995). Chaque anneau contient une graine oblongue de 4 à 5 mm de long, et 2 mm de large avec un poids moyen de 0,09 mg.

5. *Racine*

C'est une large racine pivotante qui pénètre jusqu'à 2 m dans le sol. Le système racinaire est aussi latéral et s'étend jusqu'à 3,5 m de la tige, à une profondeur d'environ 5 cm. Ce système traçant produit de nombreuses fines racines qui présentent des nodules occasionnels (Indira, 2007).

1.2.Reproduction

6. *Reproduction sexuée*

Dans des conditions idéales, les plantes peuvent commencer à fleurir 6 à 8 mois après la germination. Dans sa région d'origine, la plante est pollinisée par les abeilles (Janzen, 1983) et des visites occasionnelles par des abeilles indigènes ont été observées au nord de l'Australie. Il semble probable que les fleurs soient auto-compatibles. Le manque apparent de vecteurs de pollen suggère que la majorité de la production de graine est effectuée par autogamie. Il est possible que la pollinisation par le vent se produise, étant donné que c'est dans ce genre que les plus petits pollens chez les angiospermes (6 μm) ont été trouvés (Elias, 1981). Une forme de viviparité a été observée en conditions humides, les graines ont germé tout en étant sur la branche (Miller, 1988).

7. *Production de graines*

Au nord de l'Australie, le nombre moyen de graines par gousse est 21, avec 7,1 gousses par infructescence (Lonsdale et Segura, 1987). La production de graines par unité de surface de la canopée a été mesurée à 9.103 $\text{m}^{-2} \text{an}^{-1}$ dans un peuplement mature typique sur sol argileux noir à fissuration en Australie (Lonsdale, 1988). Elle a été prouvée invariante sur deux ans et suivant un gradient d'humidité du sol (Lonsdale, 1988) et la densité du peuplement. Ainsi, en prenant une densité de peuplement égale à 1 m^{-2} (Lonsdale and Segura, 1987), cette estimation donnerait une production annuelle typique d'environ 9.000 graines par plante.

En Australie, les plantes, d'une surface de couronne d'environ 8 m^2 , les plus productives en milieu réel ont été trouvées dans un fourré au bord d'un lac peu profond. Une telle plante

produirait donc environ 11.000 gousses par an, contenant environ 220.000 graines (Lonsdale, 1992). Dans une situation un peu plus sèche, dans une plaine inondable à proximité, les plantes les plus productives ont sur une zone similaire, une production de seulement 3.100 gousses par an, soient environ 63.000 graines. Les graines matures de *Mimosa pigra* ont une durée de vie d'environ 20 à 23 ans dans les sols sableux. Cette viabilité des graines diminue (9 semaines) dans les sols de type argileux (Walden *et al.*, 2004).

8. Reproduction végétative

Mimosa pigra ne se reproduit pas naturellement par voie végétative bien que la reproduction à partir de tiges coupées, laissées sur le sol, ait été observée au Mexique. La plante repousse vigoureusement à partir des souches coupées. La multiplication végétative se fait par rejets de souches ou de racines après leur coupe à blanc (Walden *et al.*, 2004). Ce mode de propagation est noté généralement à la suite d'une attaque mécanique ou manuelle des peuplements de l'espèce.

1.3.Dissémination

La forte production de semences assure une propagation rapide de l'espèce par régénération naturelle. Les graines de *Mimosa pigra* s'établissent rapidement sur les sols nus, où il y a peu de concurrence (Melki, 2007) peut doubler la taille de son infestation tous les 18 mois si toutes les conditions sont réunies. Sa dispersion dans l'espace se réalise selon trois voies : le transport par les eaux (eau de ruissellement, d'inondations) le transport par zoochorie y compris l'homme (toisons, tubes digestifs des animaux, chaussures...) et le transport par les véhicules et les engins de labours tels que les tracteurs et les houes (Land Protection, 2006). Ce sont les poils des gousses qui leur permettent de flotter sur l'eau et d'adhérer aux cheveux ou vêtements, donc à aider à la dispersion (Agnote, 2001). Selon Indira (2007), l'importance des inondations, la différence d'altitude et le mouvement des animaux facilitent la dissémination des graines vers des lieux éloignés.

1.4.Compétition

C'est une compétitrice féroce de la végétation basse qui est capable de former des populations denses venant à bout de prairies d'herbes hautes. *Mimosa pigra* peut interférer avec la culture de plantes économiquement importantes. Par exemple, elle est en mesure de rivaliser avec les jeunes palmiers à huile immatures. Ceci peut provoquer une diminution de la production

d'huile de palme (Praneetvatakul, 2001). Malgré qu'elle soit connue pour être une plante très compétitive, *Mimosa pigra* ne peut pas concurrencer des plantes qui ont une croissance rapide et un système racinaire bien établi (Janzen, 1983).

2. ECOLOGIE DE L'ESPÈCE

2.1. Précipitations et températures

Mimosa pigra préfère un climat tropical humide et sec (figure 3). Cette espèce ne serait probablement pas un problème majeur dans les régions à précipitations annuelles inférieures à 750 mm sauf autour des barrages et des cours d'eau (Miller, 1983). *Mimosa pigra* semble être peu apte à réussir, à cause de la compétition des plantes, dans les zones de forêt tropicale humide, où généralement les précipitations sont supérieures à 2250 mm. D'après Indira (2007), cette espèce se rencontre dans toute la zone intertropicale où la pluviométrie est comprise entre 750 et 2250 mm. La température optimale pour la germination des graines est de 35°C (Sheded et Hassan, 2008). Par ailleurs, Dillon et Forcella (1985) relèvent que les fluctuations de températures de 20°C améliorent la germination au laboratoire.

Des études comparatives sur *Mimosa pigra* réalisées par au Mexique, en Australie et en Thaïlande montrent que cette espèce se développe dans des zones identiques au plan climatique. En effet, selon Lonsdale et Segura (1987), les précipitations et températures moyennes annuelles enregistrées au niveau de trois régions où *Mimosa pigra* est présente sont quasiment similaires : 1330 mm et 27,7°C pour Darwin (Australie), 1377 mm et 28°C pour Acapulco (Mexique) et 1217 mm et 25,8°C pour Chiang Mai (Thaïlande).

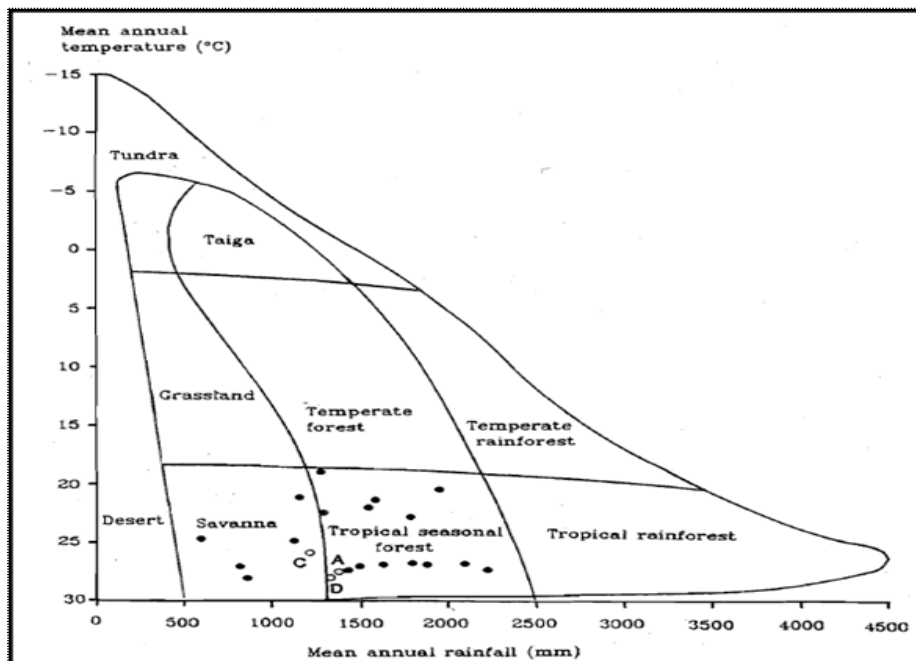


Figure 3: Distribution de *Mimosa pigra* en fonction du climat, basée sur la classification climatique de Whittaker (1975)

2.2. Humidité et lumière

Les paramètres régulant son établissement semblent être l'humidité (ambiante ou du sol) et les régimes de perturbation qui lui donnent accès à la pleine lumière. Son amplitude écologique est relativement importante, puisqu'elle supporte des conditions de sécheresse jusqu'à 7 mois consécutifs ou des périodes d'inondations en saison humide (Indira, 2007).

En Australie, *Mimosa pigra* est strictement héliophile, se développe dans les milieux ouverts sous un climat tropical sec (précipitations annuelles supérieures à 750 mm) (Lonsdale *et al.*, 1989). Elle exige la pleine lumière pour fleurir et fructifier et survivre (Indira, 2007). Il n'y a pas d'exigence de gel, ni aucune sensibilité à la lumière, dans la réponse de germination (Harper, 1977). Les graines de *Mimosa pigra* peuvent germer toute l'année si le sol est humide mais non inondée. La plupart des germinations a lieu au début et à la fin de la saison humide (Chin, 2009). Elle est grandement intolérante à l'ombrage et demande de la pleine lumière pour sa survie. Probablement, c'est la raison pour laquelle *Mimosa pigra* n'a pas réussi à prospérer et concurrencer dans les zones ombragées où les arbustes sont présents (Janzen, 1983).

2.3.Types de sols

L'espèce *Mimosa pigra* est trouvée sur une grande variété de sols. Elle ne semble pas se développer préférentiellement sur un type de sol particulier, mais est le plus souvent trouvée dans les lieux humides tels que les plaines inondables et les berges, sur les sols allant des argiles noires à fissuration en passant aux sols argilo-sableux jusqu'à ceux de type gros sable siliceux le long des rivières (Lonsdale, 1988). En Australie, les populations de *Mimosa pigra* sont localisées au Nord sur les zones humides, à la bordure de la lagune dans la région de Darwin et se développent sur de l'argile noire à fissuration. Par contre, au Mexique, elles sont diverses et sont rencontrées sur du sol sablo-limoneux dans des fossés en bordure de route et sur du sol sablo-limoneux sur un pâturage humide près de ruisseaux (Lonsdale et Segura, 1987).

3. IMPACTS DE MIMOSA PIGRA SUR LES ÉCOSYSTÈMES

C'est une mauvaise herbe, qui a reçu une reconnaissance internationale en raison de ses installations existantes et de son impact sur la diversité biologique. Cette espèce a un impact direct sur la biodiversité de prairies mais également sur leur production primaire et donc sur l'élevage (Praneetvatakul, 2001). Outre la diminution qualitative des pâtures, *Mimosa pigra* empêche l'accès de la faune à l'eau en créant des barrières végétales infranchissables. Elle colonise également les écosystèmes aquatiques, assèche les mares, réduit les débits des cours d'eau et augmente la rétention de vase. Le fonctionnement des réservoirs d'eau et des canaux d'irrigation est alors perturbé ainsi que toute l'économie adjacente.

En Thaïlande, *Mimosa pigra* diminue la productivité des rizicultures et de l'agriculture de subsistance en envahissant les réseaux d'irrigation. Au Vietnam, elle a envahi les prairies saisonnières inondées des aires protégées, menaçant ainsi leur biodiversité. Le tourisme est également touché, par la restriction de l'accès à certaines zones touristiques, la réduction des attractions de la faune, la limitation de l'accès à la pêche et à la chasse. La présence de *Mimosa pigra* a provoqué un déclin à la fois de la taille des populations et du nombre d'espèces de plantes et d'animaux (Praneetvatakul, 2001). Au Parc National de Tram Chim (Vietnam) son apparition a réduit la densité des *Poaceae* et des *Cyperaceae*, telles que *Panicum repens*, *Ischaemum rugosum* et *Eleocharis dulcis*. L'invasion dans les pâturages à *Eleocharis dulcis* menace l'oiseau précieux *Grus antigone sharpii*, l'une des 16 espèces les plus fortement protégées du monde. Par contre, *M. pigra* a réduit la présence d'autres espèces

envahissantes comme *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* et *Ludwigia adscendens* (Triet et Dung, 2001). En Australie, *Mimosa pigra* a envahi près de 80.000 ha de terres inondables et de marais dans le Nord du pays, altérant alors le fonctionnement hydrologique de la région, changeant la structure de l'écosystème et réduisant la diversité animale et végétale (Braithwaite *et al.*, 1989). Au Sénégal, selon nos propres observations, cette espèce est devenue problématique dans le Parc National du Niokolo Koba dans les années 1990. Elle colonise l'intérieur des mares en y formant des fourrés denses impénétrables.

4. UTILITÉS ET UTILISATIONS

En dépit de ses effets préjudiciables, *Mimosa pigra* a des avantages. Elle a été d'un intérêt botanique depuis le 19^{ème} siècle en Australie, ce qui a conduit à son introduction et sa culture dans les jardins botaniques en dehors de son aire de répartition naturelle (Miller, 2002). La valeur ornementale de l'espèce a connu une promotion depuis les années 1980. Selon cette même source, en Australie, les populations extraient du tannin de la plante, et plus récemment, la biomasse a été utilisée pour produire de l'électricité dans des conditions bien contrôlées.

Au plan ethnobotanique, l'espèce présente plusieurs usages au Sénégal. Elle est utilisée comme fortifiant et stimulant dans le traitement de nombreuses maladies dont la fièvre, le rhume de cerveau, le rhumatisme, l'obésité, les maux de dents (Bâ *et al.*, 1997

5. MÉTHODES DE CONTRÔLE

Le contrôle efficace de *Mimosa pigra* est difficile en raison de l'ampleur des infestations, de la production de graines, de la nature agressive de la plante et du type de terrain où elle se développe.

5.1. Mesures préventives

Selon Walden *et al.* (1999), des études complètes devraient veiller à identifier des infestations isolées et ciblées avant qu'elles ne s'étendent à des niveaux incontrôlables. A cela s'ajoute l'éducation de la communauté, qui est également un outil important. La restriction de la circulation des véhicules, du matériel, du sol et du sable provenant de zones infestées sont importants afin de prévenir la propagation des graines de *Mimosa*.

5.2. Mesures curatives

Plusieurs méthodes de contrôle ont été expérimentées un peu partout à travers le monde et particulièrement en Australie. Il s'agit des méthodes de contrôle physique, chimique, biologique et intégrée.

9. Méthode de contrôle physique

- Contrôle thermique

L'usage du feu provoque une érosion de la biodiversité végétale et animale. Le brûlage n'empêche pas la repousse des plantes et ne tue que les semences à la surface du sol, qui ne sont pas enterrées (Miller et Lonsdale 1992). De plus, ces mêmes auteurs rapportent que *Mimosa pigra* est difficile à brûler et les plants repoussent souvent après le passage du feu. Ceci est dû au fait que sous les fourrés, il y a moins de végétation herbacée.

- Contrôle manuel

Il a été montré à partir d'expériences menées au Parc National Nam Cat Tien que l'extirpation de la plante pourrait permettre d'obtenir un contrôle complet. Toutefois, cette opération est possible uniquement avec des plants à un stade précoce (Chin, 2009). Selon Schatz (2001) la plante peut être tuée si elle est coupée à environ 10 cm au-dessous du niveau du sol. Cependant, si la coupe est effectuée trop haut, la plante ne meurt pas et repousse. Les coupes-coupes à longue manche, les haches et les machettes peuvent être utilisées, mais en appliquant immédiatement un herbicide après le retrait (Walden *et al.*, 1999).

- Contrôle mécanique

Elle passe par la coupe des peuplements à l'aide d'un bulldozer avant les périodes d'inondations. Le labour est une méthode de contrôle physique qui coupe la plante en dessous du niveau du sol. Il s'est avéré très efficace dans la prévention des repousses (Walden *et al.*, 1999). Toutefois, l'élimination de l'espèce demande plusieurs années de lutte continue.

10. Contrôle chimique

Les herbicides sont largement utilisés pour contrôler *Mimosa pigra*, notamment en Australie. Ils doivent être appliqués durant la période de croissance active des plantes et avant la maturation des graines (Miller, 1992). Cependant, l'impact de Tébuthiuron (herbicide

largement utilisé dans le nord de l'Australie pour contrôler *Mimosa pigra*) sur les plantules de cette espèce dépend de la teneur en argile du sol. C'est dans les sols à plus faible teneur en argile que le Tébuthiuron est le plus efficace pour tuer les plants (Miller et Siriworakul, 1992).

11. Contrôle biologique

Malacorhinus iregularis Jacoby, un coléoptère originaire du Mexique a été identifié comme un agent potentiel de lutte biologique. Les adultes se nourrissent sur les feuilles de l'hôte, et les larves se développent sur les plantules et sur les racines. Les dommages subis par la plante hôte sont importants, ce qui indique que cet insecte pourrait être un agent de lutte efficace (Heard *et al.*, 2005). La présence de *Brachiaria humidicola* réduit la hauteur, le diamètre des tiges, le nombre de feuilles, le poids sec par unité de hauteur et le rendement en matière sèche de *Mimosa pigra* (Miller, 1992).

12. Contrôle intégrée

En Australie, l'intégration de méthodes de contrôle a été testée sur une parcelle de 128 ha de *Mimosa pigra* avec l'application d'herbicides et la coupe avec un bulldozer. Ces traitements ont été appliqués séparément avec répétition, ou en combinaison. Cinq agents de contrôle biologique ont été dénombrés dans la parcelle. Au bout de trois saisons, un traitement au feu a été effectué sur l'ensemble de la parcelle (Paynter et Flanagan 2004). Les résultats ont révélé que ces traitements (herbicides, coupe, feu) sont inefficaces s'ils sont appliqués seuls. Mais plusieurs combinés entre eux ont favorisé le nettoyage des bosquets de *Mimosa* et l'établissement de la végétation concurrente qui a empêché la régénération de *Mimosa pigra* à partir de graines. Ces mêmes auteurs en ont conclu que l'intégration des techniques peut contrôler avec succès les fourrés denses de *Mimosa pigra*. La lutte biologique s'intègre bien avec les autres moyens de contrôle et devrait permettre des réductions de coûts significatives pour la gestion de *Mimosa pigra*.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

1. ZONE D'ÉTUDE

L'étude est réalisée sur base de données provenant de l'aire de distribution originale et d'Afrique. *Mimosa pigra* est caractérisé sur le continent africain par des régions phytogéographiques diverses. Selon White (1986), les principales subdivisions chorologiques de l'Afrique et de Madagascar sont (Figure 4) :

- les centres régionaux d'endémisme : guinéo-congolais (I), zambézien (II), soudanien (III), de la Somalie et du pays Masai (IV), du Cap (V), du Karoo-Namib (VI), méditerranéen (VII), malgache oriental (XIX), malgache occidental (XX) ;
- le centre morcelé d'endémisme afromontagnard (VIII) ;
- la région morcelée afroalpine d'appauvrissement floristique extrême (IX) ;
- les zones de transition régionale guineocongolaise/zambézienne (X), guineocongolaise/ soudanienne (XI), du Sahel (XVI), du Sahara (XVII), méditerranéo-saharienne (XVIII) et Kalahari-Highveld (XIV) ;
- les mosaïques régionales du lac Victoria (XII), de Zanzibar-Inharnbane (XIII) et du Tongaland-Pondoland (XV).

De manière plus précise, la zone d'étude s'étend sur les centres régionaux d'endémisme soudanien (III), guinéo-congolais (I), zambézien (II) et sur les zones de transition régionale guinéo-congolaise/soudanienne et guinéo-congolaise/zambézienne (X et XI) (Figure 4). Selon la classification climatique de Köppen (Figure 5), le centre régional d'endémisme soudanien (Aw) est caractérisé par un climat tropical sec avec une pluviométrie (1000-1500 mm/an) supérieure à l'évapotranspiration et une température supérieure à 18°C. Le centre d'endémisme guinéo-congolais quant à lui est caractérisé par un climat tropical humide où les pluviométries sont supérieures à 1500 mm de pluie par an (Af). Les zones de transition régionale guinéo-congolaise/soudanienne et guinéo-congolaise/zambézienne (Am) correspondent au climat de type tropical avec une température moyenne de chaque mois de l'année supérieure à 18°C et une saison sèche peu importante et des fortes précipitations annuelles (supérieures à l'évaporation annuelle). Enfin, le centre régional d'endémisme zambézien est caractérisé par un climat tempéré chaud avec des températures moyennes des 3

mois les plus froids comprises entre -3 et 18°C . La température moyenne du mois le plus chaud est supérieure à 10°C . Les saisons été et hiver sont bien définies (Cwa et Cwb).

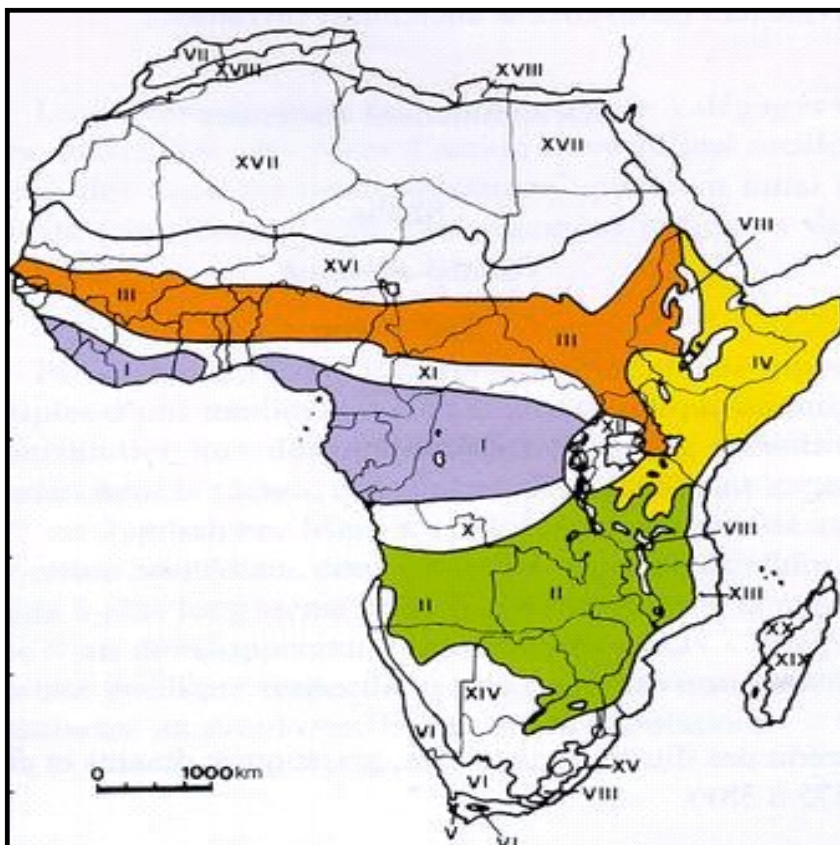


Figure 4: Carte de la zone d'étude (I, II, III, X et XI) ;

Source : http://www.br.fgov.be/research/COLLECTIONS/HERBARIUMS/SP/IMG/afri_phyto.jp

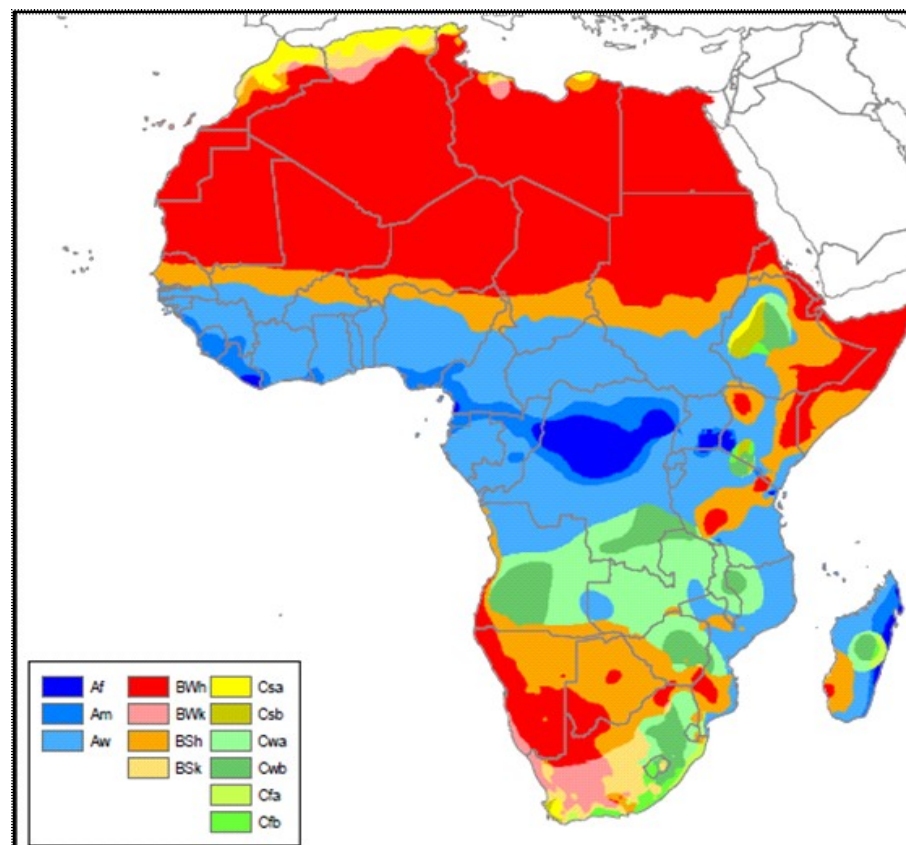


Figure 5: Carte des domaines climatiques de l'Afrique selon Köppen-Geiger; Source : M. C. Peel et al., 2007

La zone d'étude englobe également le Parc National du Niokolo Koba (PNNK) qui est situé au Sud-est du Sénégal qui lui-même est situé à l'extrémité ouest du continent africain (Figure 6). Cette aire protégée (PNNK) localisée aux coordonnées géographiques 13°04' N et 12°43'O, est le plus grand parc du pays, avec une superficie de 8 282 km² (9 130 km² en comptant la zone tampon) (Ndiaye, 2012).

Le relief est constitué de plusieurs unités géomorphologiques telles que des plateaux, des vallées et des collines. Le climat est de type soudano-guinéen influencé par deux masses d'air, les alizés et la mousson, mais également par les précipitations et les températures (DPN, 2000). Il correspond au domaine climatique de type tropical avec saison sèche en hiver (Aw) d'après la classification de Köppen. Les hauteurs de pluies varient entre 900 et 1200 mm avec une saison pluvieuse allant de juin à octobre alors que les températures oscillent entre 25°C en décembre et 33°C en mai (Ndiaye, 2012).

L'hydrographie est constituée par le fleuve Gambie et ses principaux affluents, le Niokolo Koba et la Koulountou, ainsi que plusieurs mares et étangs.

Le PNNK renferme plus de 1500 espèces de plantes à fleurs (Adam., 1971; Schneider & Sambou., 1982), soit 62 % des espèces de plantes à fleurs du Sénégal.



Source :

http://www.worldmapfinder.com/Wiki_Contents.php?ID=/Fr/Africa/Senegal



Source : Mallé GUEYE

Figure 6: Localisation du Sénégal et du Parc National du Niokolo Koba

1. DONNÉES UTILISÉES

1.1. Données biologiques : présences et pseudo-absences

Il s'agit de données de présence et de pseudo-absence de *Mimosa pigra* à l'échelle de l'aire d'origine (Amérique centrale et du Sud) et de la zone d'étude (Afrique) (Tableau 2). Les présences sont obtenues à partir de la base de données en ligne « Global Biodiversity Information Facility » (GBIF; www.gbif.org). Elles ont été complétées par d'autres données d'observations venant de musées et d'herbiers à travers le monde. A cet effet, le portail des herbiers du monde¹ a été également consulté pour les herbiers dont les références sont connues et 44 bases de données en ligne d'herbiers ont été accédées à travers les 5 continents. Une fois les données acquises, elles ont fait l'objet d'un traitement minutieux à l'aide du logiciel tableur *Excel 2007* afin de supprimer tous les points de présence redondants ou hors de l'aire de distribution américaine et africaine. De plus, comme Willems (2011), des données d'herbaria ou de muséums ont été retirées de la base de données car les coordonnées associées ne correspondaient pas à une occurrence naturelle mais bien à celle de la localité de stockage.

En outre, le programme *Google Earth* a été mis en contribution pour rechercher les coordonnées géographiques des occurrences qui n'en disposent pas et dont des informations sur le nom de la localité et du pays où l'espèce a été observée sont disponibles dans les bases de données consultées.

Par ailleurs, du fait que les coordonnées géographiques des données d'occurrence n'ont pas été exprimées à la même unité, nous avons fait recours à un utilitaire de conversion² de la latitude et de la longitude pour les convertir en degrés décimaux.

Les pseudo-absences sont des localités où l'on peut supposer que l'espèce est absente. Elles sont obtenues en tirant des coordonnées au hasard, y compris dans l'aire de distribution de l'espèce ; en effet, une espèce n'occupe que de manière exceptionnelle tout l'espace de son aire. Nous avons néanmoins ajouté comme restriction que les pseudo-absences devaient être éloignées au maximum de 2000 km de tout point de présence de manière à conserver dans le modèle les facteurs de l'environnement qui décrivent finement la distribution (Van der Wal *et al.*, 2009). La distance maximale choisie est basée sur les résultats de Tosso (2013) pour 6

¹ <http://sweetgum.nybg.org/ih/>

² <http://transition.fcc.gov/mb/audio/bickel/DDDMMS-decimal.html>

espèces d'arbres africains. Pratiquement, les pseudo-absences ont été générées au moyen d'*ArcMap 10.1* à l'intérieur d'un tampon de 2000 km créé autour des occurrences.

Tableau 2: Données d'occurrences de *Mimosa pigra* disponibles

Aire de distribution	Nombre d'occurrences	Source
Amérique Centrale et Amérique du Sud	571	GBIF, Herbiers
Afrique	281	GBIF, Herbiers

1.2. Données climatiques

Les données climatiques du présent (1951- 2000) proviennent de la base de données de l'Unité de Recherche Climatique de l'Université d'East-Anglia (*Climatic Research Unit* ou CRU). Ces données concernent la température moyenne (°C), les précipitations (mm), la couverture nuageuse (convertie en pourcentage d'ensoleillement), l'humidité journalière (%), l'amplitude thermique journalière (°C) et la vitesse du vent (m/s). Elles ont été interpolées avec une résolution de 10°x10'. Ainsi, la base de données CRU peut être considérée comme la vérité de terrain étant donné qu'elle reprend l'ensemble des observations acquises par des stations météorologiques qu'elle interpole sur une grille globale

Afin de pouvoir disposer de l'évapotranspiration potentielle qui représente une variable clef pour les modèles de distribution de niche (Piedallu *et al.*, 2013), des simulations de croissance des PFT (pour « plant fonctionnal types ») ont été réalisées sur les deux zones d'intérêt avec le modèle CARAIB et les variables climatiques du CRU (Dury *et al.*, 2011). Les données climatiques du futur quant à elles ont été obtenues à partir des ajouts à la climatologie du présent (1951 – 2000) d'anomalies du model climat du CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique global) sous le scénario RCP 8.5, afin d'obtenir les valeurs moyennes de la période 2041 et 2060. Nous n'avons utilisé que 4 variables climatiques dans cette étude (Tableau 3).

Tableau 3: Les variables climatiques utilisées

Variabes	Code	Source	Unité
----------	------	--------	-------

Amplitude thermique diurne moyenne (Tmax – Tmin)	det	CRU	° Celsius
Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle	etp	CARAIB	mm
Précipitations moyennes annuelles	prc	CRU	mm
Température moyenne mensuelle	temp	CRU	° Celsius

1.3. Données pédologiques

La base de données pédologiques harmonisée mondiale (« Harmonized World Soil Database » ou HWSD) extraite du portail GeoNetwork de la FAO³, fournit une grande quantité d'informations pédologiques. La carte mise à notre disposition, au format shapefile, est constituée de 34112 polygones à l'échelle mondiale dont chacun est associé à un code SNUM. A chaque SNUM sont associés les proportions des différents types de sols reconnus, classés en fonction la pente (plat : 0-8 % ; ondulant : 8-30 % ; pentu : > 30 %) et de la texture (grossière, moyenne ou fine). Il y a ainsi par SNUM jusqu'à 9 profils desquels proviennent les informations pédologiques.

Hambuckers (non-publié) a recalculé les moyennes par classes de pentes, pondérées en fonction des proportions des classes de texture, pour chacun des facteurs pédologiques. Il reste donc par SNUM, 3 profils correspondant aux 3 classes de pentes. Nous avons systématiquement utilisé les informations correspondant au sol « plat » puisque *M. pigra* est une plante de fonds humides. Dans le cadre de cette étude seulement deux variables pédologiques ont été retenues (Tableau 4). Il s'agit du pH et de la concentration en carbonate de calcium (CaCO₃) de la couche supérieure du sol.

³ <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>

Tableau 4: Variables pédologiques de la base de données de la FAO

Variable	Code	Unité
Potentiel hydrogène eau	pH water	-
Carbonate de calcium	CaCO ₃	%

1.4. Association des coordonnées et des facteurs de l'environnement

Nous avons, au préalable, préparé les fichiers raster contenant les données climatiques ; puis ces dernières ont été associées aux coordonnées géographiques (X, Y) des points de présence et de pseudo-absences, contenues dans un fichier *Excel*, à l'aide de l'outil « Spatial analysis tools – Extraction – Extraction values to points » d'*ArcMap 10.1*. Les fichiers ainsi créés sont tous regroupés dans un seul et unique fichier de format *Excel*. Ensuite, les données pédologiques ont été associées, à leur tour, à cet ensemble de données en utilisant sur *Excel* la fonction suivante :

= **RECHERCHEV (SNUM; Soil data 4; N° colonne; FAUX)**

Où **SNUM** est le code de sol correspondant, **Soil data 4** est la table contenant les variables pédologiques et leurs valeurs et **N° colonne** étant celui de la variable recherchée dans la table *Soil data 4*. Après cette étape, il a fallu vérifier et éliminer les valeurs aberrantes. Enfin, le fichier *Excel* associant les coordonnées géographiques et les facteurs de l'environnement (variables climatiques et pédologiques) est prêt à être utilisé pour la construction du modèle.

2. CONSTRUCTION DU MODÈLE DE DISTRIBUTION DE MIMOSA PIGRA

Ce processus comprend cinq étapes nécessitant l'utilisation des logiciels d'analyses statistiques (*R 3.0.3* utilisé dans *RStudio*, *STATISTICA 10*) et de cartographie (*ArcMap 10.1*).

Guisan et Zimmermann (2000) suggèrent une série d'étapes pour la construction d'un modèle (Figure 7). La première étape est la formulation conceptuelle du modèle, la deuxièmement, sur base de la formulation, se pose le choix du modèle statistique ad hoc pour modéliser ce que l'on recherche. Une fois le modèle conçu, la troisième étape consiste à utiliser un premier set de données pour la calibration, c'est-à-dire qu'une probabilité est attribuée à chaque valeur

de présence et d'absence du jeu de données suivant la relation qu'elle possède avec les variables prédictives et il est dès lors possible de quantifier la qualité de l'ajustement (une présence est-elle bien estimée comme telle et idem pour les absences). Ensuite, à l'aide d'un deuxième set de données contenant les mêmes variables que le précédent, le modèle permet la prédiction de présences et d'absences sur l'étendue étudiée. La dernière étape, l'évaluation des prédictions, est effectuée en comparant ces prédictions aux vraies occurrences du deuxième set.

Dans notre cas, nous avons utilisé toutes les données américaines pour construire le modèle, ce qui en principe doit permettre d'obtenir le meilleur modèle possible. Nous avons recherché un modèle climatique puis un modèle climatique et pédologique. Les modèles ont été construits en y intégrant les effets linéaires, quadratiques et les interactions deux-à-deux des 4 variables climatiques et les effets linéaires et quadratiques des 2 variables pédologiques.

Nous avons ensuite imposé ce modèle aux données africaines pour le recalculer mais nous l'avons aussi utilisé tel quel avec les données africaines. Nous avons confronté les projections des modèles à des polygones délimitant l'aire de distribution. Ceux-ci ont été obtenus selon la procédure de « l'alpha-hull polygon » de Burgmann et Fox (2003) en prenant $\alpha = 4$. Ils ont été tracé au moyen du package R « alphahull » de Pateiro-López et Rodríguez-Casal (2010). Nous obtenons des objets polylines qui ont été ensuite transformé en polygone dans *ArcMap 10.1*.

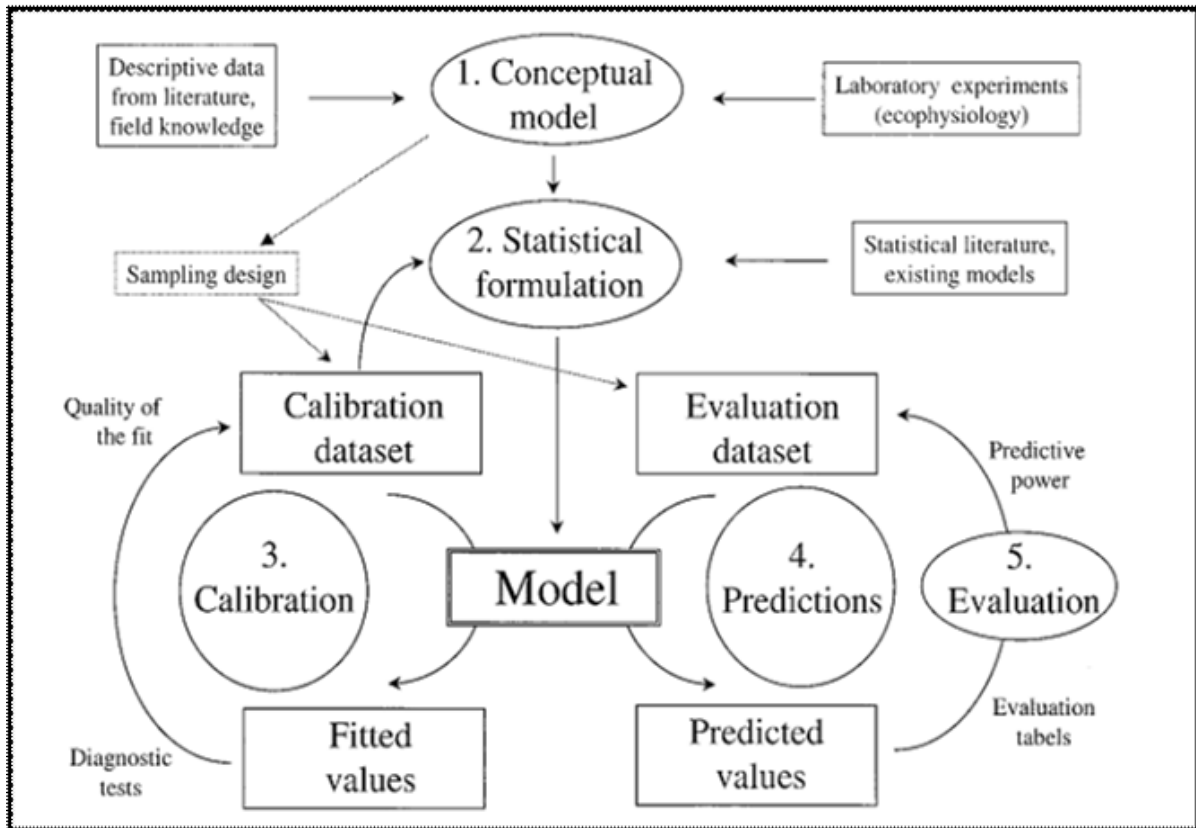


Figure 7: Etapes dans la réalisation d'un modèle (Guisan et Zimmermann, 2000)

3. MODÉLISATION

Dans le cadre de cette étude, le choix a été porté sur le modèle de régression logistique car il s'agit d'un modèle robuste et facile d'utilisation. 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 et s'écrit sous la forme ci-dessous :

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum \beta_i X_i)}}$$

Finalement, le modèle logistique calcule une valeur comprise entre 0 et 1 pour chaque combinaison de variables explicatives. Cette valeur peut être assimilée à une probabilité de présence selon Kleinbaum et Klein (2010). On fixe alors un niveau de coupure au-dessus duquel on estime qu'il y a présence et en dessous absence. Le choix de ce seuil peut être arbitraire (Pearce & Ferrier, 2000) et par exemple fixé à 0,5 (ce qui convient bien lorsque le set de calibration contient autant de présences que d'absences, il peut être déterminé visuellement (Fielding & Bell, 1997), ou encore mathématiquement, selon Bonn et Schröder (2011). Dans notre cas, nous avons choisi 0,5 comme seuil de coupure puisque nous avons pratiquement le même nombre de présences que d'absences.

3.1. Construction des modèles de distribution sur l'aire d'origine

Nous avons d'abord recherché un modèle climatique optimal puis un modèle climatique et pédologique optimal. En effet, différents auteurs comme Guisan *et al.* (2002) soutiennent que le meilleur modèle est celui qui explique le maximum de variance au sein des données avec un minimum de prédicteurs; ce choix peut être guidé par diverses méthodes, les plus courantes sont : le critère d'Information d'Akaike (« *Akaike Information Criterion* » ou *AIC*) *AIC*, la mesure de la déviance D^2 (équivalent du coefficient de détermination R^2 des régressions linéaires) et des procédures automatiques de régression. La sélection des effets a été basée sur l'*AIC* :

$$AIC = 2k - n \times \ln (SCE/n)$$

k représente le nombre de paramètres, **SCE** est la somme des carrés des écarts et **n** le nombre d'observations (Schwart, 1978). La recherche des modèles optimaux a été réalisée au moyen du package R *glmulti* (Calcagno et de Mazancourt 2010) qui utilise un algorithme génétique pour explorer un très grand nombre (plusieurs milliers) de combinaisons possibles d'effets.

Par ailleurs, l'*AUC* (*en anglais Area Under the ROC Curve*) qui est une évaluation du succès d'un modèle pour des données de présence/absence (Pearce et Ferrier, 2000; Rushton *et al.*, 2004; Thuiller, 2003) est aussi pris en considération. La courbe ROC est obtenue en évaluant sur le set de calibration la proportion de présences correctement détectées en fonction de la proportion d'absences détectées comme des présences pour des niveaux de coupure compris entre 0 et 1. Lorsque le niveau de coupure est faible, par exemple 0, on détecte correctement

toute les présences, mais de manière fautive toutes les absences. Lorsque le niveau de coupure augmente, un bon modèle est capable de détecter correctement une proportion élevée de présences et pareillement pour les absences (mieux que le hasard). Les modèles avec un AUC compris entre 0,7 et 0,8 sont acceptables ; un AUC supérieur à 0,8 et inférieur à 0,9 a une bonne capacité de discrimination ; lorsque l'AUC est supérieur à 0,9, le modèle peut être considéré comme excellent (Hosmer et Lemeshow, 2000). La validation du modèle a été complétée par le test de vraisemblance de type I et du Chi² de Pearson. La matrice de confusion a été, par ailleurs, utilisée pour estimer la fidélité des prédictions.

3.2.Construction des modèles de distribution sur l'aire envahie (Afrique)

En ce qui concerne la construction du modèle africain, nous avons imposé les variables sélectionnées dans les deux modèles de l'aire d'origine. Après ce choix, nous avons construit le modèle conformément aux étapes décrites plus haut pour la construction des modèles américains. Les résultats obtenus en ce qui concerne les écarts-types (moyennes) ont fait l'objet d'une comparaison de variances afin de vérifier si les coefficients de variables entre les modèles des deux aires sont statistiquement différents.

3.3.Projection dans le présent des modèles I et II sur les aires d'origine et envahie

Après la construction des modèles, nous avons tenté de les valider en vérifiant si ces derniers conduisent effectivement aux résultats escomptés, c'est-à-dire s'ils prédisent correctement l'aire de distribution dans l'aire d'origine. Pour ce faire, nous avons fait une projection des deux modèles sur l'aire d'origine (Amérique centrale et du Sud) pour voir le comportement de l'espèce par rapport à l'aire de distribution connue. Après cela, nous avons fait une autre projection de ceux-ci sur l'aire envahie, l'Afrique.

Le principe de la projection est de reprendre tout l'espace d'intérêt pixélisé et de recalculer la valeur de P(x) à partir du modèle. Pour ce faire, il faut au préalable créer une grille de coordonnées couvrant les espaces de projection. A chacune de ces coordonnées géographiques, on associe les valeurs des variables explicatives. Cette jointure se fait à l'aide de l'outil « Join and relates » (Join spatial, option : closes) de *ArcMap*. Ensuite, la probabilité

de présence $P(x)$ est calculée en utilisant les équations retenues. Cela peut se faire dans *ArcMap* à partir de la table des attributs par le biais de l'outil « Field calculator ». Les résultats sont visualisés sur en adaptant les propriétés (Symbology - Quantities) avec des points de coupure ou seuil de probabilité de 0,45 et 0,51 pour un nombre de classes égal à 3. En fait, ce que nous avons réalisé est semblable à une binarisation des probabilités comme le recommandent (Pearce & Ferrier, 2000), mais nous avons utilisé une classe intermédiaire pour mettre en évidence les zones d'incertitudes.

3.4. Projection dans le futur (2041 - 2060) des modèles sur l'aire envahie

Cette partie est marquée par la prédiction pour le futur de l'aire de distribution de *Mimosa pigra* en Afrique. En effet, il s'est agi de remplacer, sur les deux modèles américains (I et II) déjà construits, les variables climatiques du présent (1951 – 2000) par celles du futur (2041 – 2060). Ensuite, une nouvelle probabilité de présence $P(x)$ est calculée et visualisée sous forme de carte de distribution.

4. COMPARAISON DES MODÈLES CONSTRUITS

Il s'agit de comparer les modèles I des aires d'origine et envahie deux à deux et les modèles II entre eux également pour vérifier si les coefficients des variables sont statistiquement différents. Cette comparaison fait appelle à un F -test selon la formule :

$$F(n_1-k_1 ; n_2-k_2) = \frac{\text{La variance la plus grande entre } S_1^2 \text{ et } S_2^2}{\text{La variance la plus petite entre } S_1^2 \text{ et } S_2^2}$$

avec $(n_1 - k_1)$ et $(n_2 - k_2)$ degrés de liberté avec n_1 et n_2 les effectifs des échantillons (sommées des présences et des pseudo-absences) et, k_1 et k_2 , le nombre de coefficients estimés dans les modèles, selon laquelle la variance est plus grande. Les variances des coefficients sont statistiquement différentes, nous concluons que les coefficients sont statistiquement différents. Si les variances ne sont significativement différentes, nous procédons à un t -test :

$$s^2 = \frac{S_1^2 (n_1 - 1) + S_2^2 (n_2 - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)} \quad t_{\text{obs}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\left(\frac{s^2(n_1 + n_2)}{n_1 n_2}\right)}}$$

avec $(n_1 + n_2 - 2)$ degrés de liberté. La probabilité associée à t_{obs} est obtenue en la calculant sur *STATISTICA*.

5. RÉPONSES ÉCOLOGIQUES

La réponse écologique d'une variable s'apprécie en faisant varier une variable du modèle dans la gamme des conditions rencontrées et en considérant que toutes les autres variables de l'équation du modèle sont égales à leur moyenne. La probabilité $P(x)$ est recalculée avec ces nouvelles valeurs et les résultats obtenus sont présentés graphiquement en fonction de la variable considérée par une courbe. Cette courbe est superposée sur le même axe des abscisses et à la même échelle à deux histogrammes de fréquences ; l'un représentant les présences et l'autre les pseudo-absences. Ce dernier histogramme est renversé par rapport au premier (car l'axe des ordonnées est inversé) pour avoir pour meilleure lecture des trois graphiques superposés selon la méthode suggérée par Smart *et al.* (2004). Les graphiques obtenus permettent de déterminer l'optimum écologique de l'espèce pour la variable considérée (valeur de la variable pour laquelle on obtient la plus grande probabilité de présence) ainsi que son amplitude (gamme où l'espèce peut survivre).

La figure synoptique ci-dessous, construite à l'aide du logiciel Cmap Tools, présente les principales étapes de la méthodologie adoptée dans cette étude.

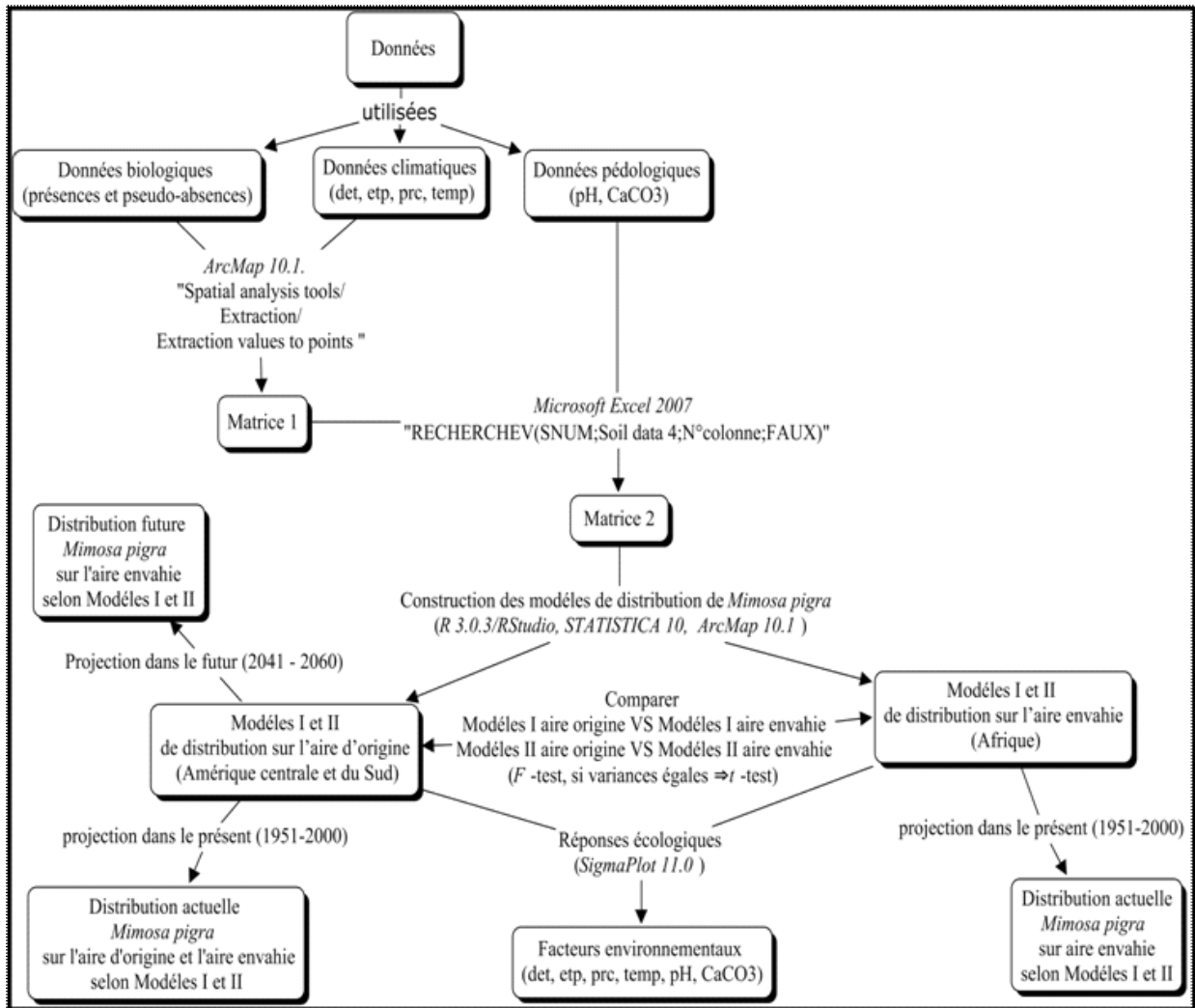


Figure 8: Les principales étapes de la méthodologie

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

1. RESULTATS

1.1.Délimitation de l'aire de distribution de *Mimosa pigra*

Aire de distribution de Mimosa pigra en Amérique centrale et du Sud

Les résultats obtenus sur la délimitation de l'aire de répartition de *Mimosa pigra* en Amérique centrale et du Sud ont montré que cette espèce occupe d'une part toute la bande allant du Mexique au Paraguay en passant par la Costa Rica, la Colombie et d'autre part par Cuba, le Venezuela, la Guyane française, le Suriname et le Nord du Brésil (Figure 9). La distribution de *Mimosa pigra* est confinée pour la plupart, d'après la classification climatique de Köppen, dans les domaines climatiques Aw, Af et Am. Ces zones sont caractérisées par un climat tropical avec une température moyenne de chaque mois de l'année supérieure à 18°C, une saison sèche peu importante et de fortes précipitations annuelles (supérieures l'évaporation annuelle). Une petite incursion est notée dans le domaine climatique Cfa de Köppen et marquée par un climat de type tempéré chaud avec les températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3°C et 18°C; la température moyenne du mois le plus chaud supérieure à 10°C, les saisons été et hiver sont bien définies.

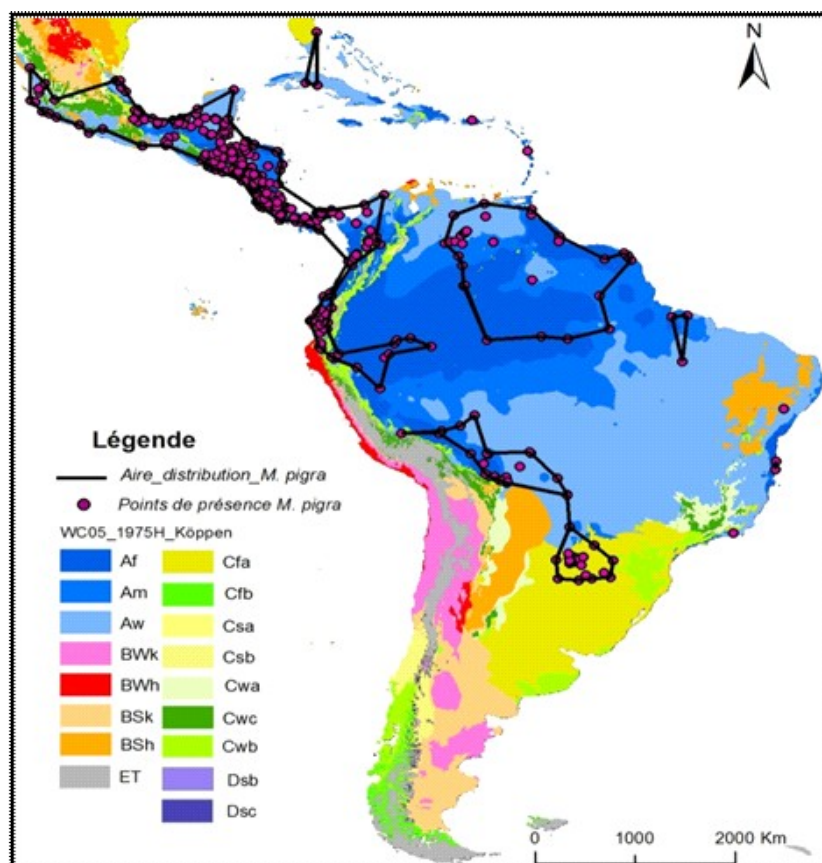


Figure 9: Aire de distribution (alpha-hull) de *Mimosa pigra* en Amérique centrale et du Sud

Aire de distribution de Mimosa pigra en Afrique

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que l'aire de distribution de *Mimosa pigra* en Afrique s'étend d'une part du Sénégal au Tchad en passant par la République de Congo et d'autre part du Soudan au Botswana avec des microsattellites au Swaziland, en Egypte et à la frontière entre l'Angola et la Namibie (Figure 10). La quasi-totalité de cette aire de distribution correspond aux centres régionaux d'endémisme soudanien (BSh), guinéo-congolais (Af et Am), zambézien (Cwa et Cwb) et la zone de transition régionale guinéo-congolaise/soudanienne (Aw) comme décrit par White (1986) et marqué par un climat tropical avec une température moyenne de chaque mois de l'année supérieure à 18°C, une saison sèche peu importante et de fortes précipitations annuelles (supérieures l'évaporation annuelle). Les résultats révèlent également la présence de *Mimosa pigra* dans la zone de transition régionale du Sahara (présence au Tchad et en Egypte) caractérisée par BWb de Köppen, climat sec avec évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles, cours d'eau permanents rares.

Au Sénégal, les résultats sur la distribution de *Mimosa pigra* montrent qu'elle est retrouvée au Nord (Richard-Toll et Mbolo birane), au centre (Dongorong), au Sud (Kolda, Kounkané) et au Sud-est notamment au Parc National du Niokolo Koba. Au niveau de ce dernier site, elle occupe les mares et les rebords du fleuve Gambie et correspond au centre régional d'endémisme soudanien d'après la classification de White et au climat tropical Aw selon Köppen.

En conclusion, *Mimosa pigra* est retrouvée, de part et d'autre de l'océan atlantique, globalement sous le même de climat tropical (Af, Am et Aw). Toutefois, quelques populations sont notées en Amérique du Sud sous le climat tempéré chaud, caractérisé par des précipitations tous les mois de l'année, ou presque et par une température moyenne du mois le plus chaud qui est supérieure à 22°C (Cfa). En outre, en Afrique *M. pigra* est présente sous les climats BWh et BSh correspondant au climat sec avec une température moyenne annuelle supérieure à 18°C et à précipitations annuelles, d'une part, inférieures à 250 mm et d'autre part comprises entre 250-350 et 760 mm. Cette présence en Afrique sous ces climats secs (BSh et BWh) se justifie par la présence de cours d'eau comme le Nil aux bords duquel l'espèce a été collectée.

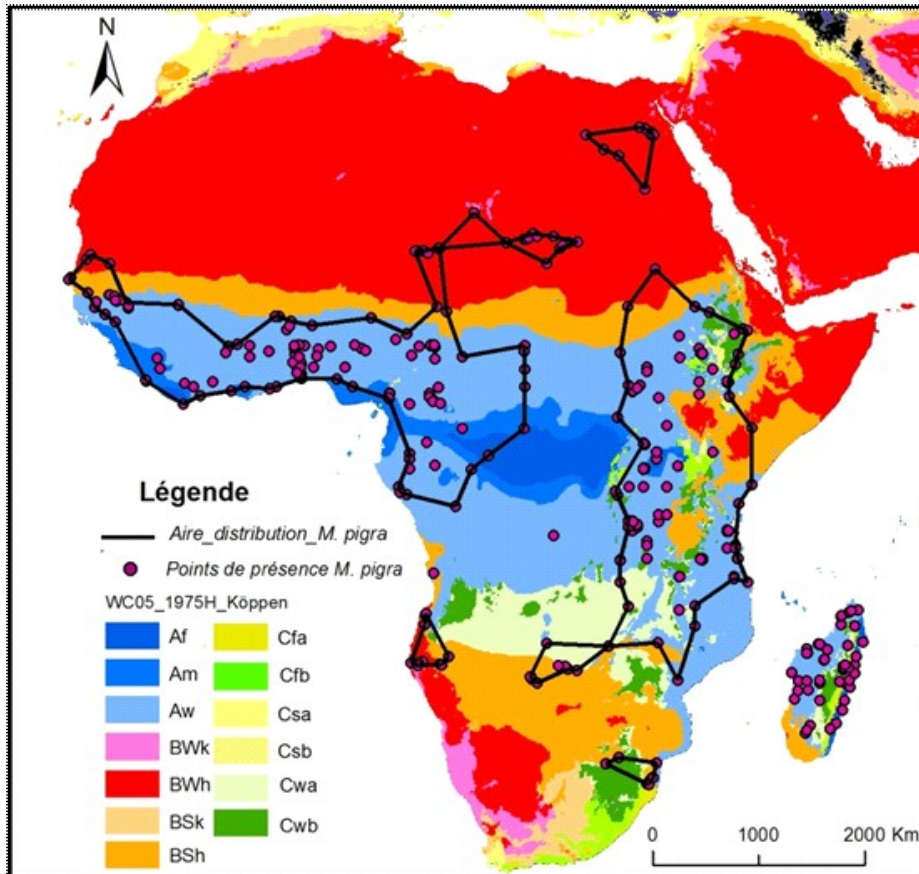


Figure 10: Aire de distribution (alpha-hull) de *Mimosa pigra* en Afrique

1.2. Modèles construits avec les données de l'aire d'origine

Modèle I sur le continent américain

La construction de ce modèle I avec les données sur le continent américain a été faite sur la base des variables climatiques exclusivement. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 5. La procédure de sélection retient l'effet de la température et de l'amplitude thermique diurne, les effets quadratiques de l'évapotranspiration potentielle, de l'amplitude thermique et des précipitations et les interactions température*précipitations, précipitation*évapotranspiration potentielle et évapotranspiration potentielle*amplitude thermique diurne ont été également retenues par le modèle.

Tableau 5: Résultats du modèle logistique sur les variables climatiques sur l'aire d'origine

Variables	Estimation	Standard type	Wald stat	p
Ordonnée origine	-1,847	2,278712	0,65697	0,41763
temp	-0,2093	0,035216	6,87180	0,000000
det	0,9928	0,378722	35,32706	0,008756
etp ²	-0,0003054	0,012039	18,54504	0,000287
det ²	-0,05184	0,000084	13,15069	0,000017
prc ²	-0,00002089	0,000006	10,72410	0,001057
tempprc	0,001151	0,000289	15,89249	0,000067
prcetp	-0,0001613	0,000058	7,64403	0,005696
etpdet	0,004649	0,001443	10,38618	0,001270

Les résultats du test de vraisemblance de type I sont repris dans le tableau 6, le test de Hosmer et Lemeshow donne une valeur égale à 3,4755 associée à une probabilité $p = 0,9010$, alors que l'analyse de la matrice de confusion révèle un taux de 77,67% de prédictions correctes.

Tableau 6: Résultats du Test de vraisemblance de type I sur les variables climatiques sur l'aire d'origine

Variables	Degré de liberté	Log vraisemblance	Chi ²	p
Ordonnée Origine	1	-724,758		
temp	1	-634,32	180,8764	0
det	1	-588,67	91,299	0
etp ²	1	-532,59	112,161	0
det ²	1	-515,617	33,9445	0
prc ²	1	-515,508	0,2182	0,640384
tempprc	1	-509,464	12,0879	0,000507
prcetp	1	-501,958	15,0117	0,000107
etpdet	1	-496,976	9,9655	0,001595

Enfin, l'AUC est égal à 0,853. Ces différents tests démontrent que l'on a obtenu un modèle parfaitement acceptable et correctement spécifié. La projection réalisée (Figure 11) couvre assez bien l'aire délimitée mais des zones supplémentaires semblent susceptibles d'accueillir *M. pigra*.

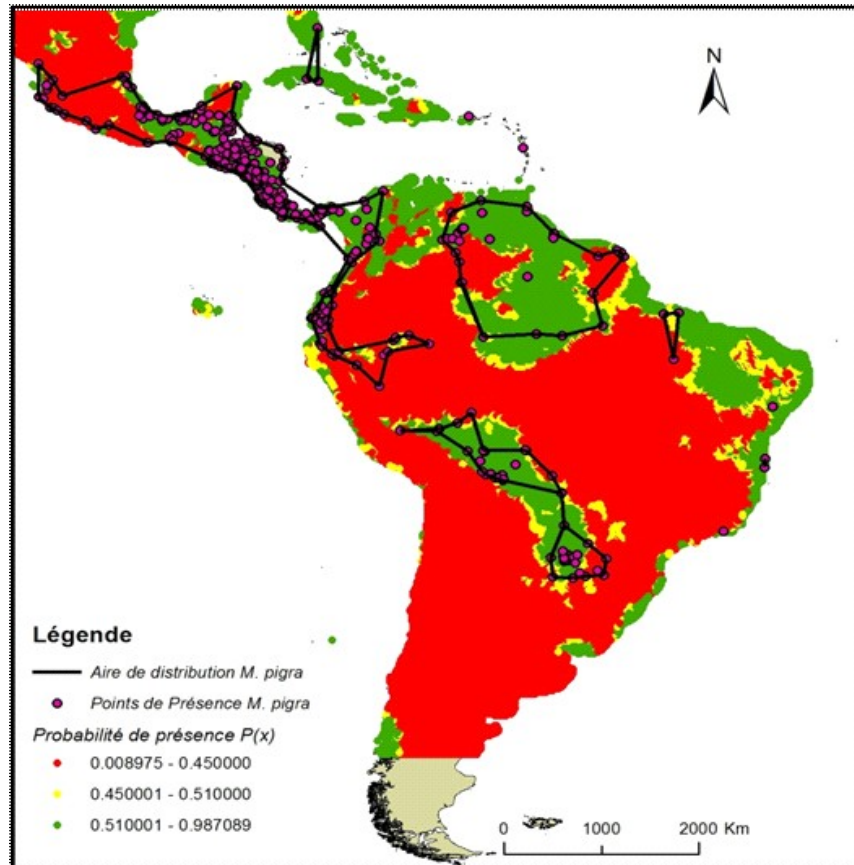


Figure 11: Distribution actuelle de *Mimosa pigra* dans son aire d'origine en fonction des variables climatiques

Modèle II sur le continent américain

Ce modèle a été construit avec des données climatiques et pédologiques. Les résultats obtenus révèlent que les mêmes effets des variables climatiques que dans le modèle I sont retenus. De plus, le modèle II a retenu significativement l'effet quadratique du pH et l'effet du CaCO_3 (Tableau 7).

Tableau 7: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques et pédologiques sur l'aire d'origine

Variables	Estimation	Standard type	Wald stat	p
Ordonnée origine	-0,47636	2,348181	0,04115	0,839242
temp	-0,211637	0,035911	34,73141	0
det	0,952141	0,382204	6,20602	0,012732
etp ²	-0,000294	0,000085	11,97092	0,000540
prc ²	-0,000023	0,000007	11,02347	0,000900
det ²	-0,050541	0,012154	17,29179	0,000032
tempprc	0,001216	0,000294	17,07814	0,000036
prcetp	-0,000173	0,000059	8,60753	0,003348
etpdet	0,004612	0,00146	9,97704	0,001585
pH ²	-0,038047	0,007846	23,51734	0,000001
CaCO ₃	0,216063	0,045887	22,17063	0,000002

Les résultats du test de vraisemblance de type I sont repris dans le tableau 8, le test de Hosmer et Lemeshow donne une valeur égale à 2,8339 associée à une probabilité $p = 0,9443$ alors que l'analyse de la matrice de confusion révèle un taux de 78% de prédictions correctes.

Tableau 8: Résultats du Test de vraisemblance de type I sur les variables climatiques et pédologiques sur l'aire d'origine

Variables	Degré de liberté	Log vraisemblance	Chi ²	p
Ordonnée origine	1	-724,758		
temp	1	-634,32	180,8764	0
det	1	-588,67	91,299	0
etp ²	1	-532,59	112,161	0
prc ²	1	-532,393	0,3933	0,530567
det ²	1	-515,508	33,7694	0
tempprc	1	-509,464	12,0879	0,000507
prcetp	1	-501,958	15,0117	0,000107
etpdet	1	-496,976	9,9655	0,001595
pH ²	1	-495,557	2,8373	0,092100
CaCO ₃	1	-472,569	45,9751	0

Ces résultats démontrent un tout petit gain obtenu sur le modèle II par rapport au modèle I constitué de variables climatiques uniquement. Enfin, les résultats de l'analyse ont montré que l'AUC est égale à 0,867. Le modèle est donc correctement spécifié, les variables climatiques comme pédologiques expliquent bien la présence ou l'absence de *Mimosa pigra* en Amérique centrale et du Sud. Le gain du aux variables pédologique est faible en terme d'AUC et pourrait s'expliquer simplement statistiquement (il y a perte de 2 degrés de liberté).

Cependant, un examen attentif de la projection montre que des points de présences relativement isolées sont à présent prédits correctement. Les variables pédologiques amènent donc une petite amélioration de la performance du modèle (Figure 12).

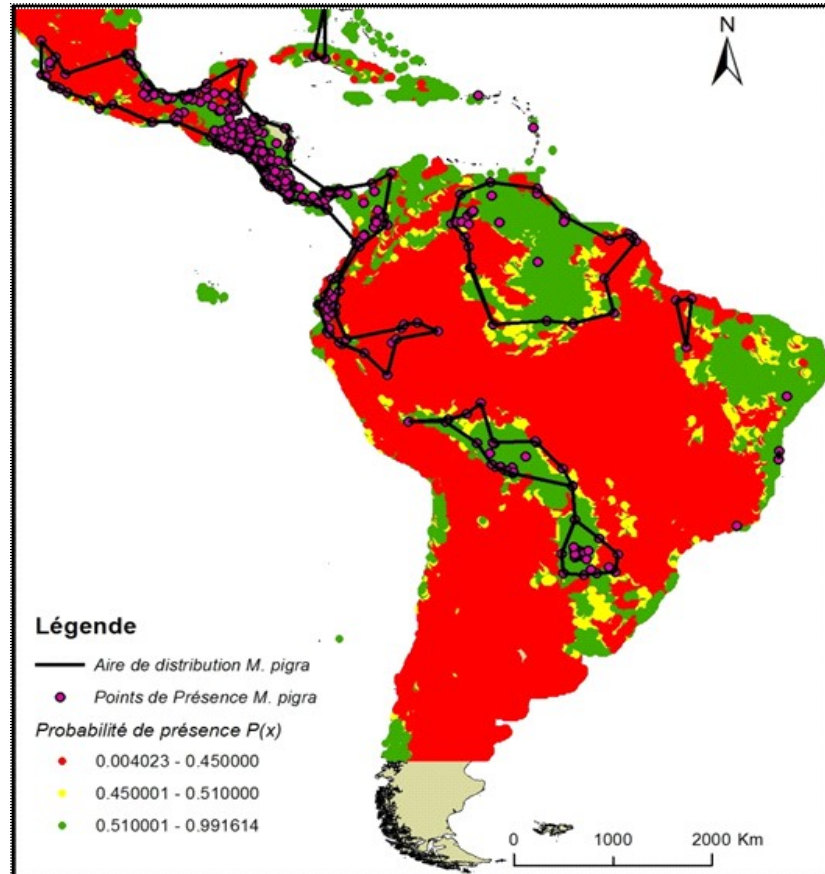


Figure 12: Carte de distribution actuelle de *Mimosa pigra* en fonction des variables climatiques et pédologiques

Projection des modèles I et II de l'aire d'origine sur l'Afrique

Il s'est agi de projeter les deux modèles construits avec les données africaines, puis de les projeter sur l'Afrique afin de voir si *Mimosa pigra* atteindra d'autres zones que celle occupées actuellement sur ce continent. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de carte de distribution (Figures 13 et 14). La figure 13 montre que *Mimosa pigra* a atteint quasiment toutes les régions phytogéographiques de l'Afrique allant du centre régional d'endémisme soudanien jusqu'à celui du Cap à l'exception de la mosaïque régionale de Zanzibar-Inharnbane et d'une partie du centre régional d'endémisme de la Somalie et du pays Masai

(voir Figure 4). En outre, Au nord du continent, les résultats montrent également que cette espèce occupe le centre régional d'endémisme méditerranéen, le centre morcelé d'endémisme afro-montagnard et la région morcelée afroalpine d'appauvrissement floristique extrême. Cependant, le modèle révèle que de vastes zones resteraient à atteindre.

La projection du modèle I révèle que *Mimosa pigra* atteint la partie est du Sénégal et tout le sud en particulier le PNNK.

Ces régions phytogéographiques occupées par *Mimosa pigra* (en Afrique) correspondent exactement aux domaines climatiques Aw, Am, Af, BSh, BSk, BWk, Cwa, Cwb, Cfa, Cfb, (avec petites incursion sur BWh) définis par Köppen (voir Figure 5).

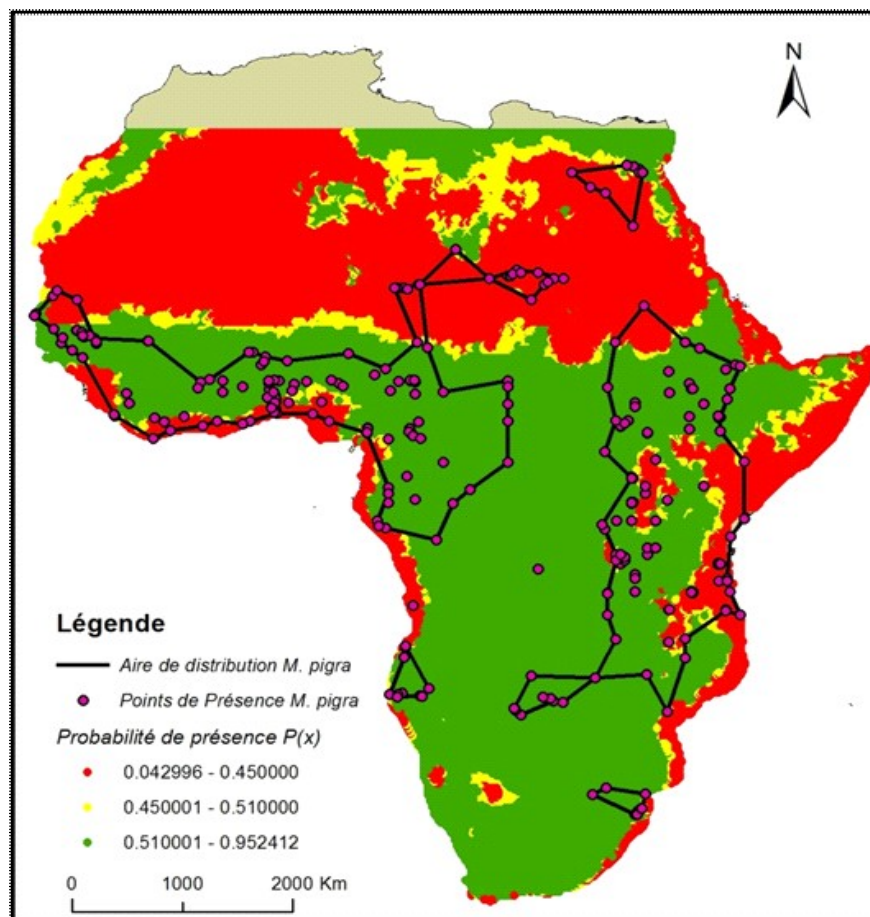


Figure 13: Carte de distribution actuelle de *Mimosa pigra* en Afrique suite à la projection du modèle I

En ce qui concerne la figure 14 (variables climatiques et pédologiques), la colonisation de *Mimosa pigra* atteint les mêmes zones que sur la carte précédente (Figure 13) mais avec plus de superficie occupée sur le centre régional d'endémisme de la Somalie et du pays Masai, et

sur les zones de transition régionale méditerranéo-saharienne et du Sahara. Ces subdivisions chorologiques où la présence de *Mimosa pigra* est notée avec le modèle II projetée en Afrique correspondent quasiment aux domaines climatiques définis par Köppen et occupés par cette invasive avec le modèle I. Cependant, il y a plus de présence sur BWh et une occupation totale de Csa dans la partie septentrionale de l'Afrique.

Au Sénégal, l'occupation de *Mimosa pigra* obtenue avec la projection du modèle II est identique à celle obtenue avec le modèle I sur le PNNK.

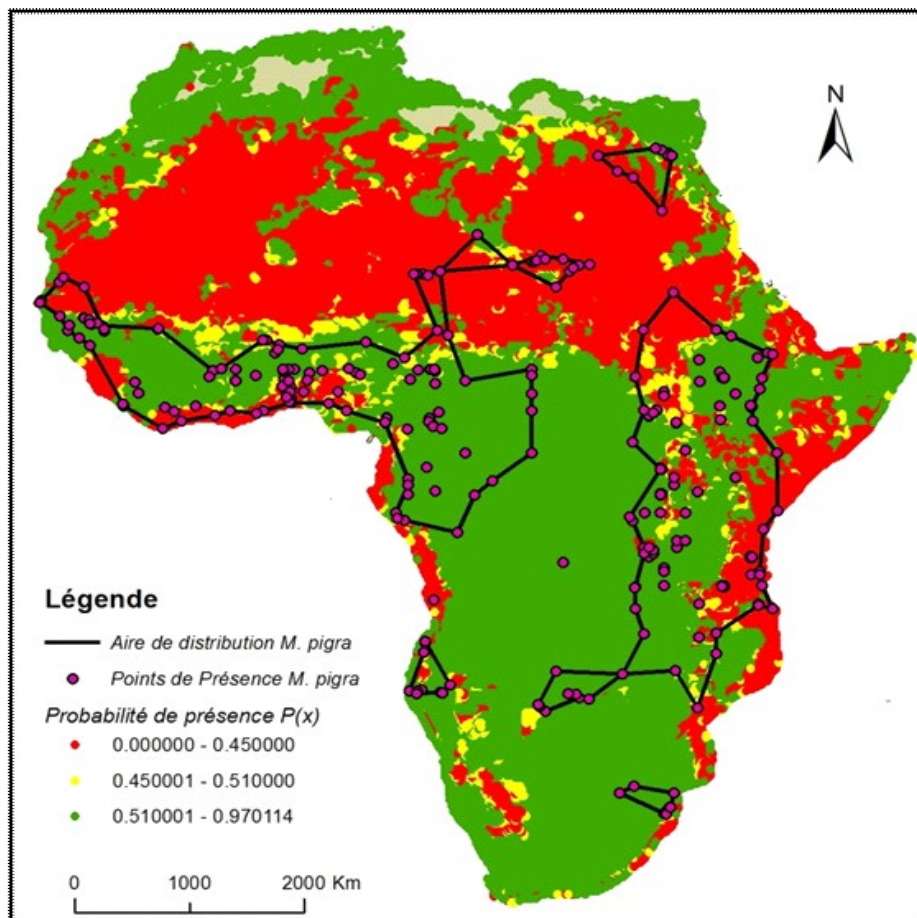


Figure 14: Carte de distribution actuelle de *Mimosa pigra* en Afrique suite à la projection du modèle II

1.3. Modèles construits avec les données africaines

Modèle I sur le continent africain

Les résultats de l'analyse sur les données de présence/absence associées aux variables climatiques pour la construction du modèle I sur l'Afrique sont consignés dans le tableau ci-dessous. L'analyse statistique révèle au seuil de 5%, que de l'amplitude thermique diurne ainsi que ses effets quadratiques et ceux des précipitations moyennes sont très hautement significatifs. Elle révèle un niveau de significativité hautement élevé pour l'interaction précipitations* évapotranspiration potentielle (Tableau 9).

Tableau 9: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques sur l'aire envahie

Variables	Estimation	Standard type	Wald stat	p
Ordonnée Origine	6,96237	2,991421	5,41701	0,019941
temp	0,06298	0,035958	3,06731	0,079882
det	-1,77430	0,493446	12,92929	0,000323
etp ²	-0,00005	0,000139	0,14226	0,706048
det ²	0,07131	0,016968	17,66355	0,000026
prc ²	-0,00018	0,000037	23,02179	0,000002
tempprc	0,00039	0,000362	1,15544	0,282414
prcetp	0,00038	0,000129	8,58797	0,003384
etpdet	0,00050	0,001674	0,08807	0,766649

Le test de vraisemblance de type 1 appliquée sur les données révèle les résultats consignés dans le tableau suivant :

Tableau 10: Résultats du test de vraisemblance de type I des variables climatiques sur l'aire envahie

Variabiles	Degré de liberté	Log vraisemblance	Chi ²	p
Ordonnée Origine	1	-467,868		
temp	1	-463,776	8,18239	0,004230
det	1	-433,666	60,22054	0,000000
etp ²	1	-393,112	81,10751	0,000000
det ²	1	-387,125	11,97527	0,000539
prc ²	1	-385,070	4,11060	0,042615
tempprc	1	-371,466	27,20702	0,000000
prcetp	1	-366,614	9,70374	0,001839
etpdet	1	-366,570	0,08790	0,766860

La construction de la courbe ROC a permis d'avoir une valeur de l'AUC égale à 0,792 alors que la matrice de confusion indique un taux de 69,31% de prédictions correctes. Parallèlement, le test d'Hosmer Lemeshow donne une valeur équivalente à 24,978 et une p-valeur = 0,0015. Ce modèle est donc probablement sur-paramétré, c'est-à-dire mais qu'il contiendrait des effets non-significatifs (comme *etpdet* qui a une p-valeur du test de Wald > 0,05).

Modèle II sur le continent africain

Les résultats de l'analyse montrent que le modèle logistique retient pour *Mimosa pigra* que non seulement les effets quadratiques de l'amplitude thermique diurne et les précipitations sont très hautement significatifs mais également les variables amplitude thermique diurne et CaCO₃ ont été révélées hautement significatives. De plus, l'analyse montre un effet significatif pour l'interaction précipitations*évapotranspiration potentielle (Tableau 11).

Tableau 11: Résultats de l'analyse statistique sur l'estimation des coefficients des variables climatiques et pédologique sur l'aire envahie

Variables	Estimation	Standard type	Wald stat	p
Ordonnée origine	4,40184	3,137583	1,96824	0,160635
temp	0,04758	0,036230	1,72452	0,189112
det	-1,33282	0,517104	6,64338	0,009952
etp ²	0,00004	0,000147	0,07412	0,785436
det ²	0,05784	0,017621	10,77470	0,001029
prc ²	-0,00014	0,000039	13,55554	0,000232
tempprc	0,00043	0,000372	1,31660	0,251203
prcetp	0,00030	0,000133	4,96109	0,025924
etpdet	-0,00063	0,001745	0,13084	0,717568
CaCO ₃	-0,11468	0,041442	7,65753	0,005654
pH ²	0,01218	0,007660	2,52730	0,111892

Le test de vraisemblance de type 1 appliquée sur les données révèle les résultats consignés dans le tableau suivant :

Tableau 12: Résultats du test de vraisemblance de type I des variables climatiques et pédologiques sur l'aire envahie

Variables	Degré de liberté	Log vraisemblance	Chi ²	p
Ordonnée origine	1	-457,477		
temp	1	-453,373	8,20803	0,004171
det	1	-426,292	54,16317	0,000000
etp ²	1	-386,245	80,09211	0,000000
det ²	1	-381,148	10,19574	0,001408
prc ²	1	-377,890	6,51559	0,010693
tempprc	1	-365,563	24,65411	0,000001
prcetp	1	-361,443	8,24033	0,004097
etpdet	1	-361,442	0,00093	0,975618
CaCO ₃	1	-357,728	7,42877	0,006419
pH ²	1	-356,457	2,54083	0,110937

La capacité de prédiction du modèle a été évaluée à 69,7% suite à l'analyse de la matrice de confusion alors que l'AUC est estimée à 0,794. Le test d'Hosmer Lemeshow associé à cette analyse indique une valeur égale à 18,097 pour une p-valeur égale à 0,0205. Ce modèle est donc probablement aussi sur-paramétré (*etpdet* et *CaCO₃* ont des p-valeur du test de Wald > 0,05).

1.4.Comparaison des modèles construits (Amérique et Afrique)

Les résultats de cette analyse statistique sont consignés dans le tableau 13 :

Tableau 13: Résultats du test de comparaison de variance entre les modèles I Amérique et Afrique

Variables	Modèle Amérique		Modèle Afrique		F (1046,674)	
	Ecart-type	V1	Ecart-type	V2	V2/V1	p-valeur
temp	0,03522	0,00124045	0,035958	0,001293	1,0423624	0,27832011
det	0,3787	0,14341369	0,493446	0,24348892	1,69780807	7,333E-14
etp ²	0,00008421	7,0913E-09	0,000139	1,9453E-08	2,74316831	6,0201E-43
det ²	0,01204	0,00014496	0,016968	0,00028792	1,98615911	1,081E-21
prc ²	0,000006378	4,0679E-11	0,000037	1,358E-09	33,3838832	0
tempprc	0,0002886	8,329E-08	0,000362	1,3119E-07	1,57511414	9,6019E-11
prcetp	0,00005835	3,4047E-09	0,000129	1,6599E-08	4,87525501	8,3213E-95
etpdet	0,001443	2,0822E-06	0,001674	2,8029E-06	1,34609735	1,3566E-05

V1 : variance des coefficients des variables du modèle sur l'Amérique; V2 : variance des coefficients des variables du modèle sur l'Afrique

L'analyse des résultats révèle que toutes les probabilités de $F(1046,674)$ sont inférieures au seuil de significativité de 5% fixé à l'exception de la variable température. Ce qui veut dire qu'à l'exception de cette variable il y a une différence significative entre les coefficients du modèle I construits pour l'Afrique et l'Amérique en ce qui concerne les variables climatiques. Pour variable température le F -test n'est pas significatif ce qui impose l'application du t-test dont les résultats sont les suivants : $t_{obs} = 0,42$ pour une p-valeur égale à 0,34. Nous en déduisons que les coefficients de la variable température pour les modèle africain et américain sont non-significativement différents. Donc, *Mimosa pigra* pousse manifestement dans des zones de même gamme de températures entre son aire d'origine et l'Afrique.

Ce même F -test a été également appliqué sur les données des deux modèles II (climat + sol pour Amérique et Afrique) afin de comparer les variances des deux échantillons et de voir si les coefficients de variables climatiques et pédologiques sont statistiquement égaux. Les résultats de cette analyse statistique sont consignés dans le tableau 14.

Tableau 14: Résultats du test de comparaison de variance entre les modèles II Amérique et Afrique

Variables	Modèle Amérique		Modèle Afrique		F(1046,659)	
	Ecart-type	V1	Ecart-type	V2	V2/V1	p-valeur
temp	0,035911	0,0012896	0,036230	0,00131259	1,01782849	0,4029646
det	0,382204	0,1460799	0,517104	0,2673963	1,83047978	3,7189E-17
etp ²	0,000085	7,225E-09	0,000147	2,1689E-08	3,00190857	3,5403E-49
det ²	0,012154	0,00014772	0,017621	0,00031051	2,10205203	1,4249E-24
prc ²	0,000007	4,9E-11	0,000039	1,5044E-09	30,701891	0
tempprc	0,000294	8,6436E-08	0,000372	1,3812E-07	1,59799419	3,6482E-11
prcetp	0,000059	3,481E-09	0,000133	1,7764E-08	5,10315512	8,7594E-98
etpdet	0,00146	2,1316E-06	0,001745	3,0463E-06	1,42913446	3,0162E-07
pH ²	0,007846	6,156E-05	0,007660	5,8681E-05	0,95323718	0,754032
CaCO ₃	0,045887	0,00210562	0,041442	0,00171747	0,81566282	0,99825789

V1 : variance des coefficients des variables du modèle sur l'Amérique; V2 : variance des coefficients des variables du modèle sur l'Afrique

Ces résultats permettent d'aboutir aux mêmes conclusions qu'avec le modèle I, c'est-à-dire que les coefficients sont significativement différents. Mais, pour la température, pH² et CaCO₃, la p-valeur du test F est supérieure au seuil de significativité de 5%. Ce qui révèle que le test n'est pas significatif pour ces variables pédologiques et climatique. Un t-test a, donc, été effectué pour la température, pH² et CaCO₃. Les résultats sont repris dans le tableau 15 :

Tableau 15: Résultat t-test effectué sur la variable CaCO3 des deux modèles

	Température	pH ²	CaCO ₃
t_{obs}	0,1780	0,4804	2,0223
p-valeur	0,4294	0,3155	0,0217

L'analyse statistique révèle que les coefficients de la variable CaCO₃ sont significativement différents alors que ceux de la température et du pH² sont non-significatifs.

1.5. Réponses écologiques des facteurs selon les modèles

Réponses écologiques pour Mimosa pigra selon le modèle I sur l'aire d'origine

Les résultats des réponses écologiques obtenus à partir du modèle climatique sur l'aire d'origine révèlent que *M. pigra* est présente dans les régions caractérisées par une température moyenne mensuelle comprise entre 3 et 29°C avec un optimum de 26°C alors que l'amplitude thermique diurne moyenne comprise entre 6 et 19°C affiche un optimum de 11,3°C (Figure 15). Ces résultats révèlent également que ces régions sont caractérisées par une évapotranspiration potentielle annuelle variant de 380 à 1790 mm pour un optimum de 1130 mm ; les précipitations annuelles quant à elles oscillent entre 0 et 3610 mm avec un optimum de 820 mm.

Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle II sur l'aire d'origine

Les résultats des réponses écologiques obtenus à partir du modèle pédoclimatique sur l'aire d'origine sont repris dans la figure 16 et sont très semblables à celles du modèle climatique. Les régions de présence de *Mimosa pigra* sont caractérisées par des teneurs du sol en CaCO₃ comprises entre 0 et 10% pour un optimum de 1% et par un pH compris entre 2,3 et 8,5 et un optimum de 5,3. L'espèce semble être calciphile quoiqu'elle aussi apprécie les sols plus acides.

Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle I sur l'aire envahie

Les résultats du modèle révèlent que *Mimosa pigra* est susceptible de supporter la gamme de température allant de 12 à 31°C avec un optimum de 27,4°C, une amplitude thermique journalière de 6-18°C et 10,5°C d'optimum; par la même occasion, le modèle montre une évapotranspiration potentielle (500-1670 mm) optimale à 1050 mm et des précipitations (0-2750 mm) optimales également à 900 mm (Figure 17).

Réponses écologiques de Mimosa pigra selon le modèle II sur l'aire envahie

Les résultats des réponses écologiques obtenus à partir du modèle pédoclimatique sur l'aire envahie sont repris dans la figure 18 et sont très semblables à celles du modèle climatique de la même aire. Les régions de présence de *Mimosa pigra* sont caractérisées par des teneurs du

sol en CaCO_3 comprises entre 0 et 10% pour un optimum de 1% et par un pH allant de 2,5 à 9 et un optimum de 6,5).

Nous pouvons conclure que les réponses écologiques des modèles construits avec les données africaines ne sont pas très fortes. On pouvait s'y attendre puisque le test de Hosmer et Lemeshow conduit à rejeter ces modèles. Elles sont aussi très différentes de celles obtenues avec les modèles américains. On pouvait aussi s'y attendre sur base de la comparaison des coefficients obtenus avec les modèles américains.

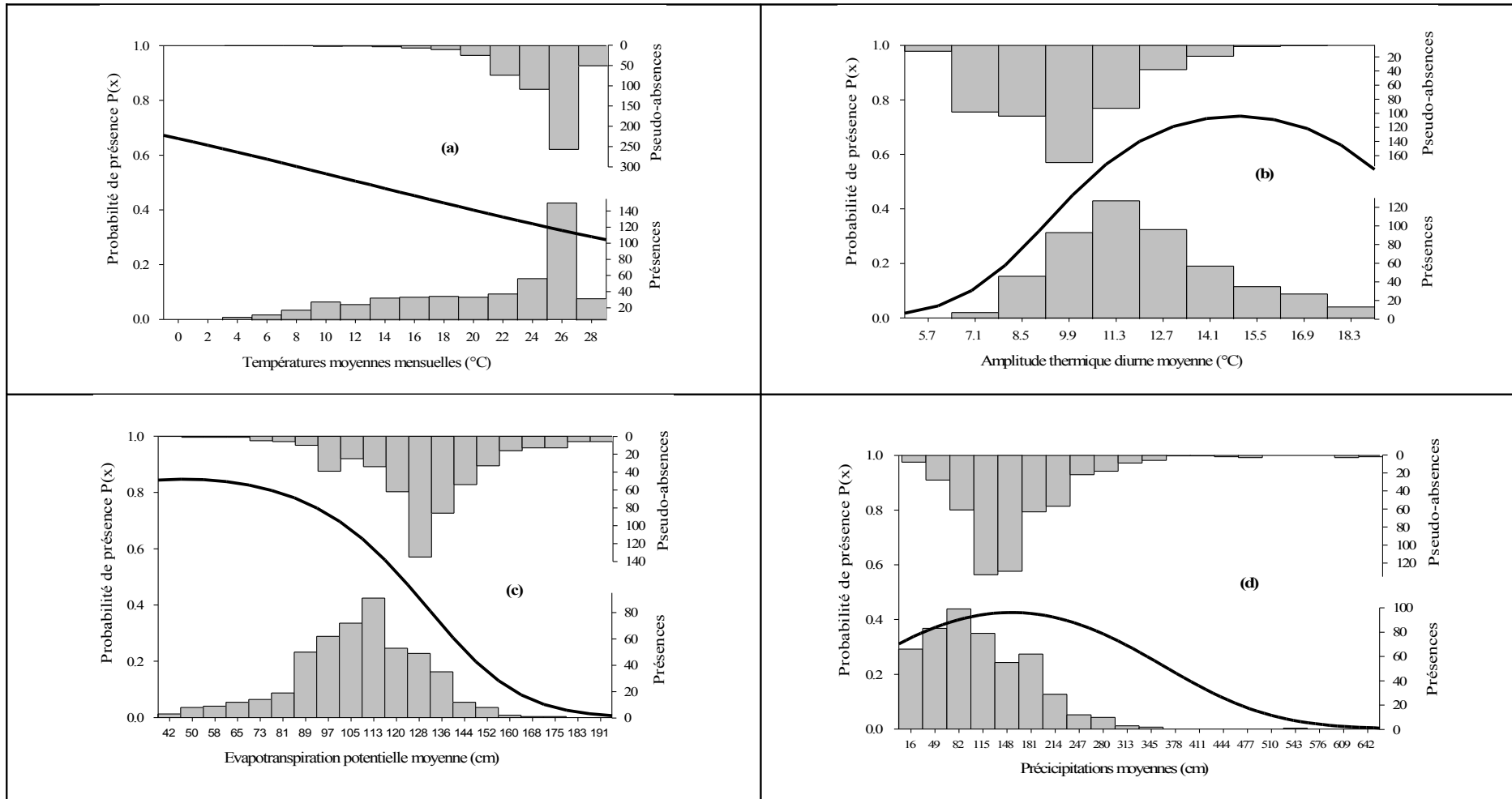


Figure 15: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle I sur l'aire d'origine pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c) et précipitations (d)

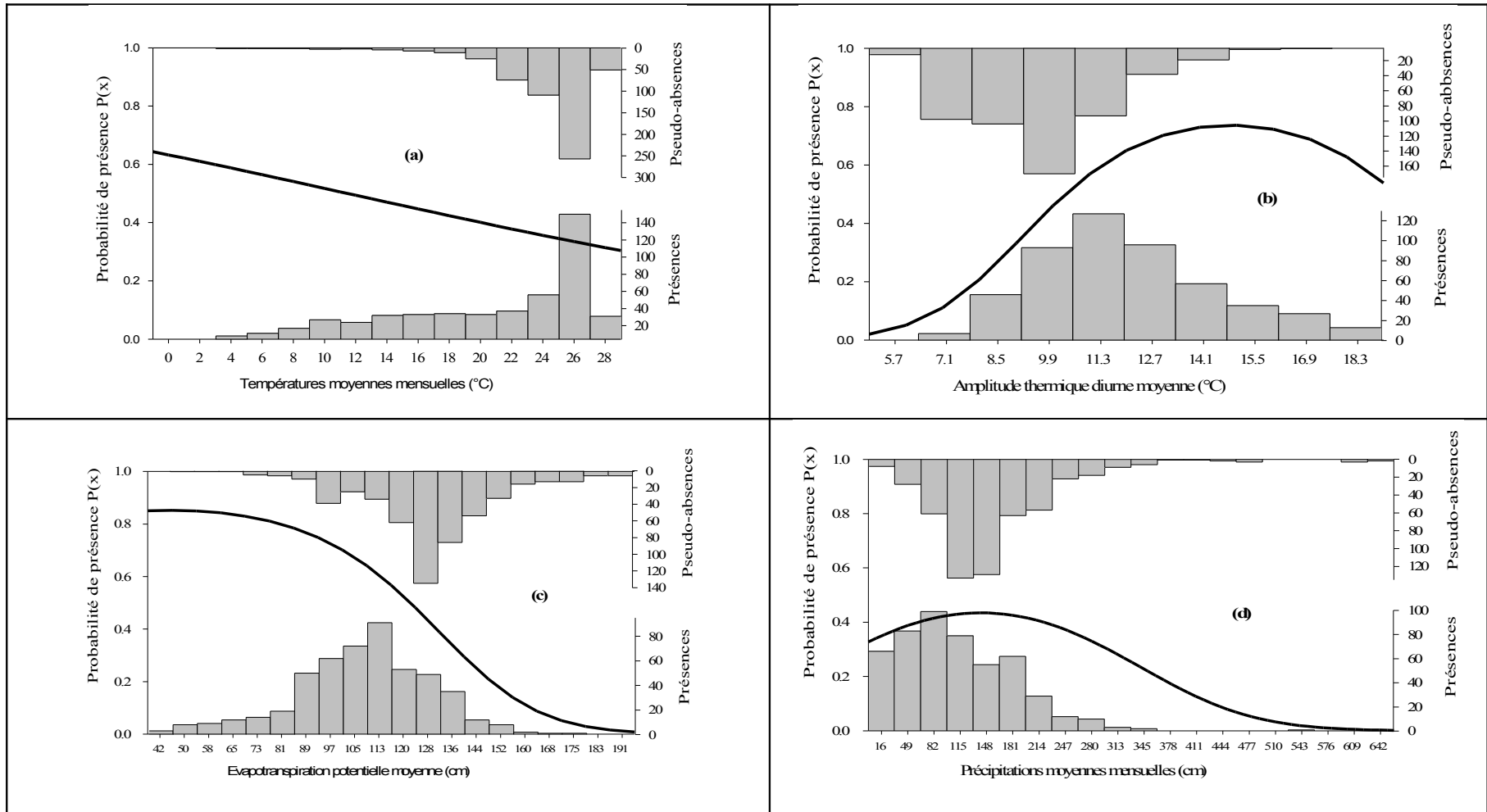


Figure 16: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle II sur l'aire d'origine pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c), précipitations (d), CaCO_3 (e) et pH (f)

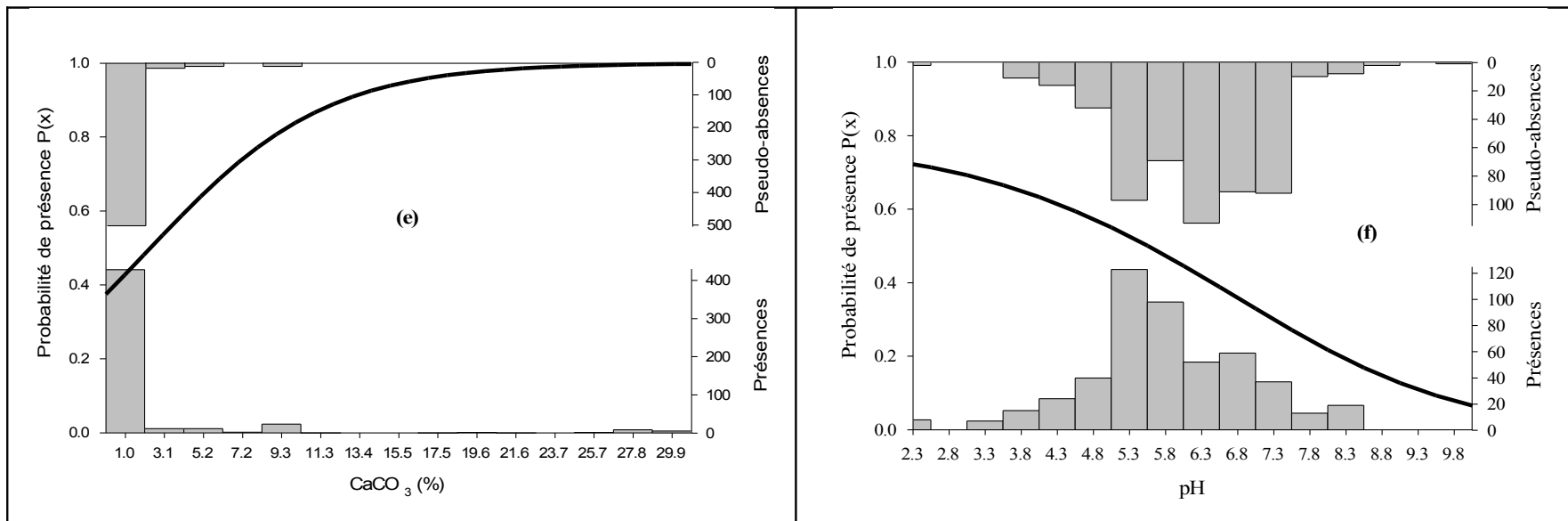


Figure 16 (suite) : Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle II sur l'aire d'origine pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c), précipitations (d), CaCO_3 (e) et pH (f)

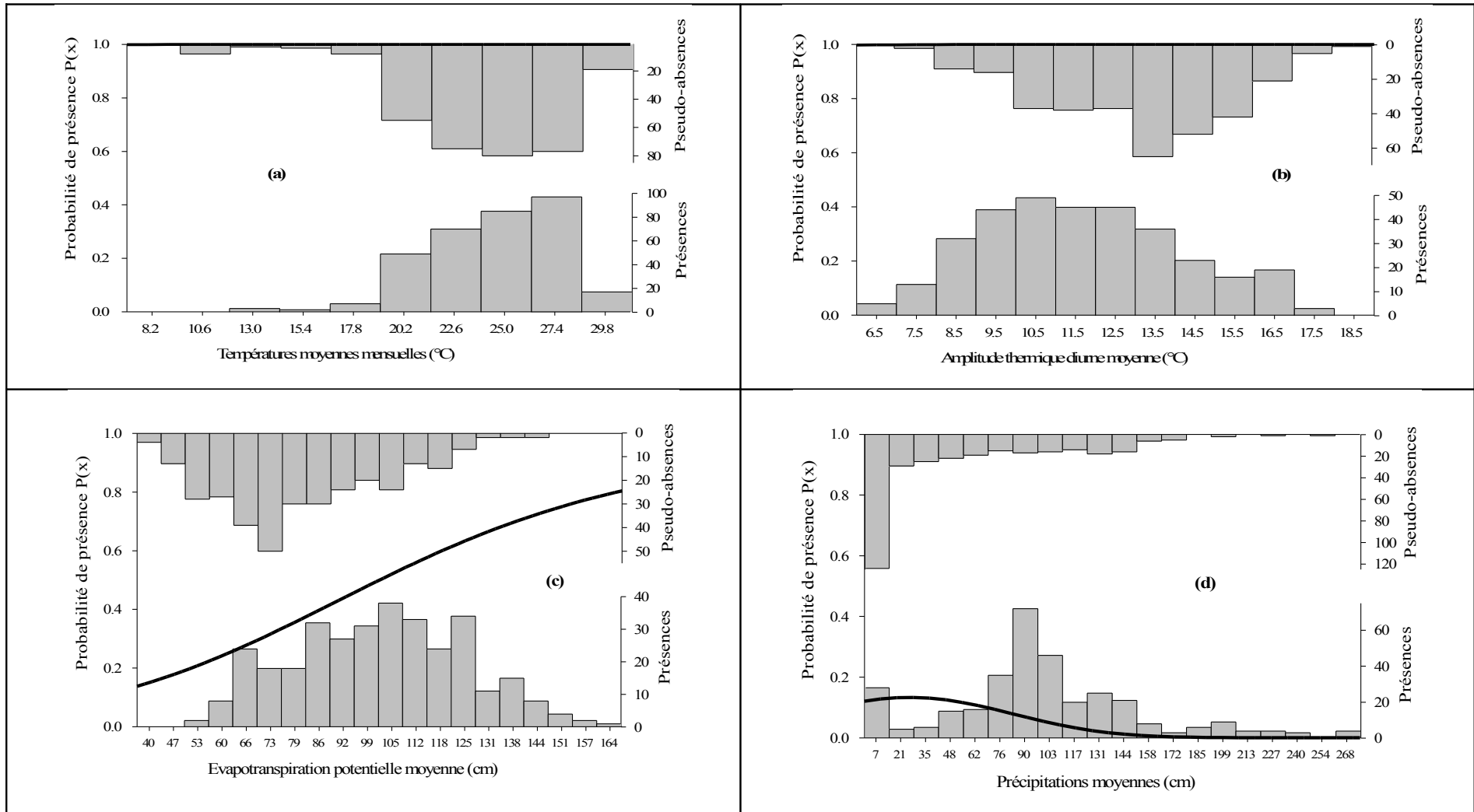
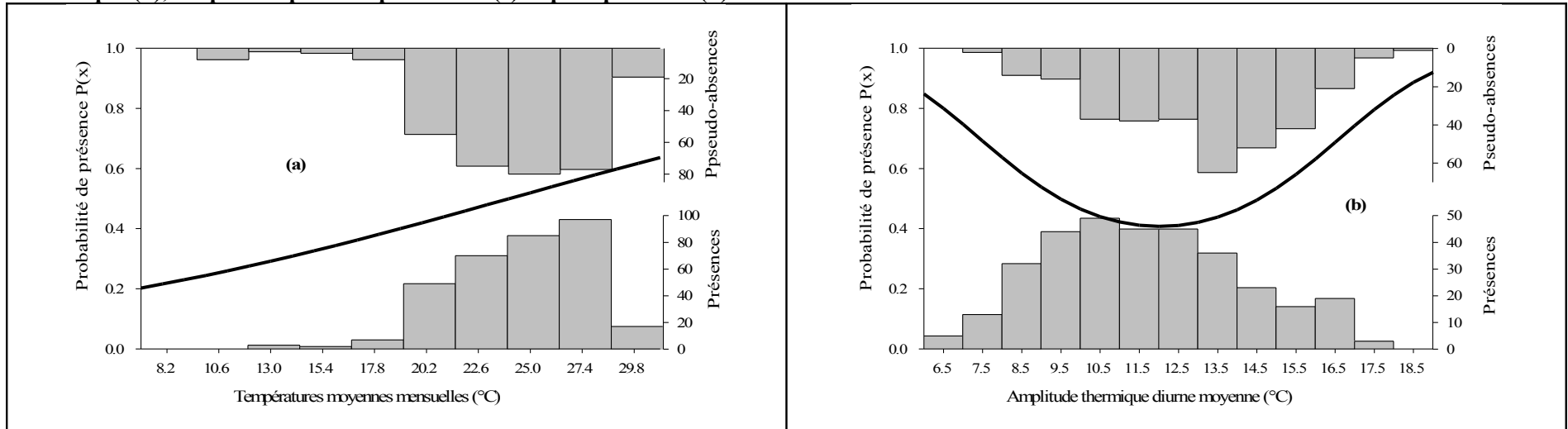


Figure 17: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle I sur l'aire envahie pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c) et précipitations (d)



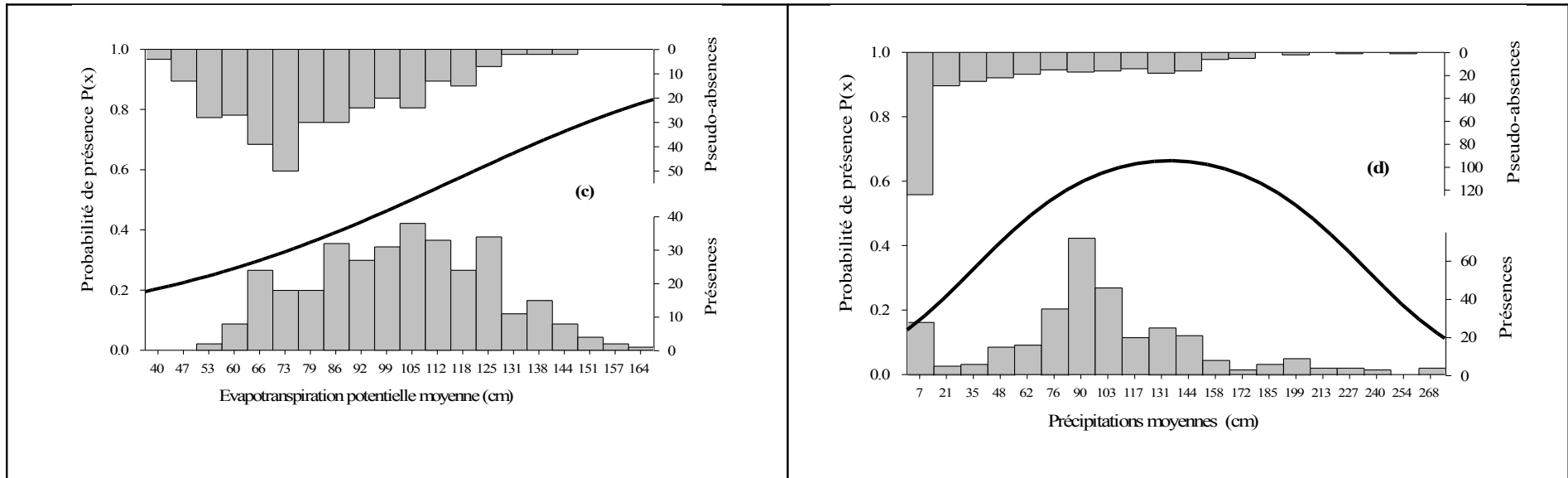
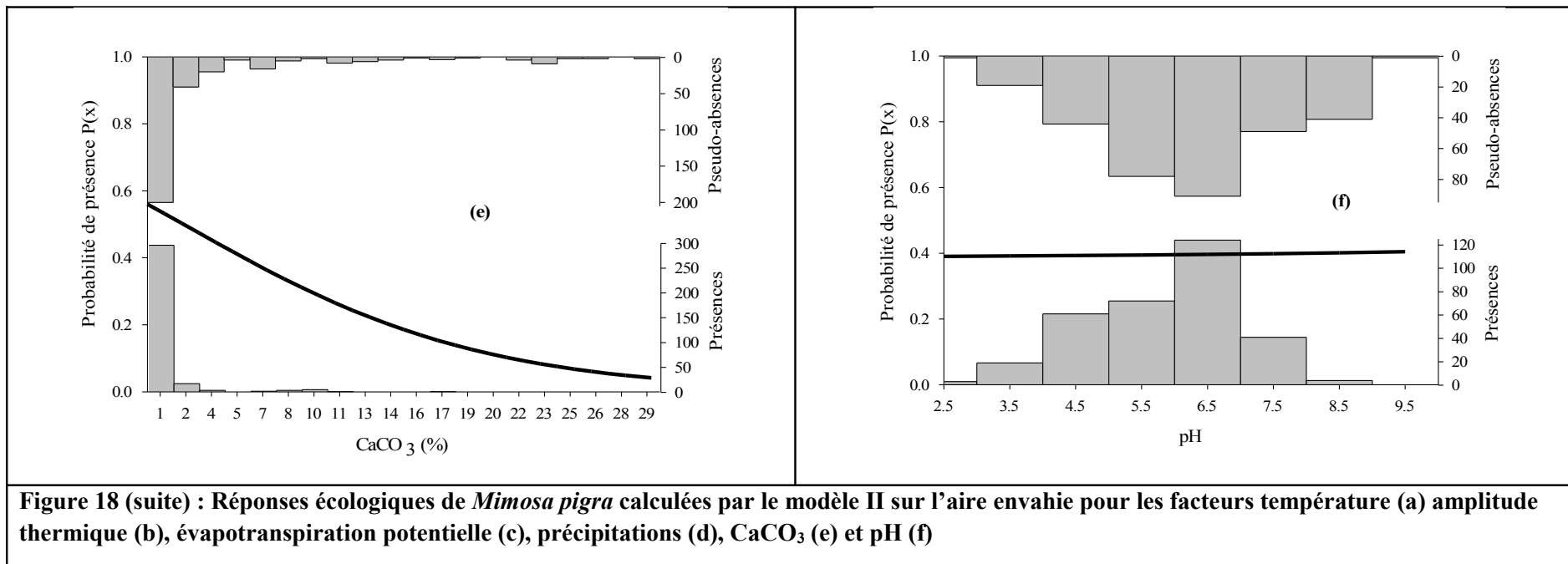


Figure 18: Réponses écologiques de *Mimosa pigra* calculées par le modèle II sur l'aire envahie pour les facteurs température (a) amplitude thermique (b), évapotranspiration potentielle (c), précipitations (d), CaCO3 (e) et pH (f)



1.6. Distribution future de *Mimosa pigra* en Afrique

Les résultats du modèle I (variables climatiques) prédisent, pour le futur (2041 – 2060), que *Mimosa pigra* est susceptible d'occuper, sous l'effet des changements climatiques, les régions phytogéographiques allant du centre régional d'endémisme soudanien jusqu'à la limite entre les centres régionaux d'endémisme de Karoo-Namib et du Cap. Des pertes d'habitats par rapport à l'aire de répartition connue sont également prédites sur une partie du centre régional d'endémisme guinéo-congolais et sur la zone de transition régionale guinéocongolaise/soudanienne; une absence quasiment totale de *Mimosa pigra* est prévue sur le centre régional d'endémisme de la Somalie et du pays Masai et la mosaïque régionale de Zanzibar-Inharnbane (Figure 19). Le PNNK, par ailleurs, ne connaîtra pas une réduction des habitats de *Mimosa pigra* pour l'horizon (2041 – 2060) d'après les résultats du modèle I.

Selon la classification climatique de Köppen, toutes ces zones phytogéographiques occupées par *Mimosa pigra* à l'échelle du continent pour le futur correspondent aux climats de type tropical (Af, Am et Aw), sec (BSh, BSk et BWk) et tempéré chaud (Cwa, Cwb, Csa et Csb).

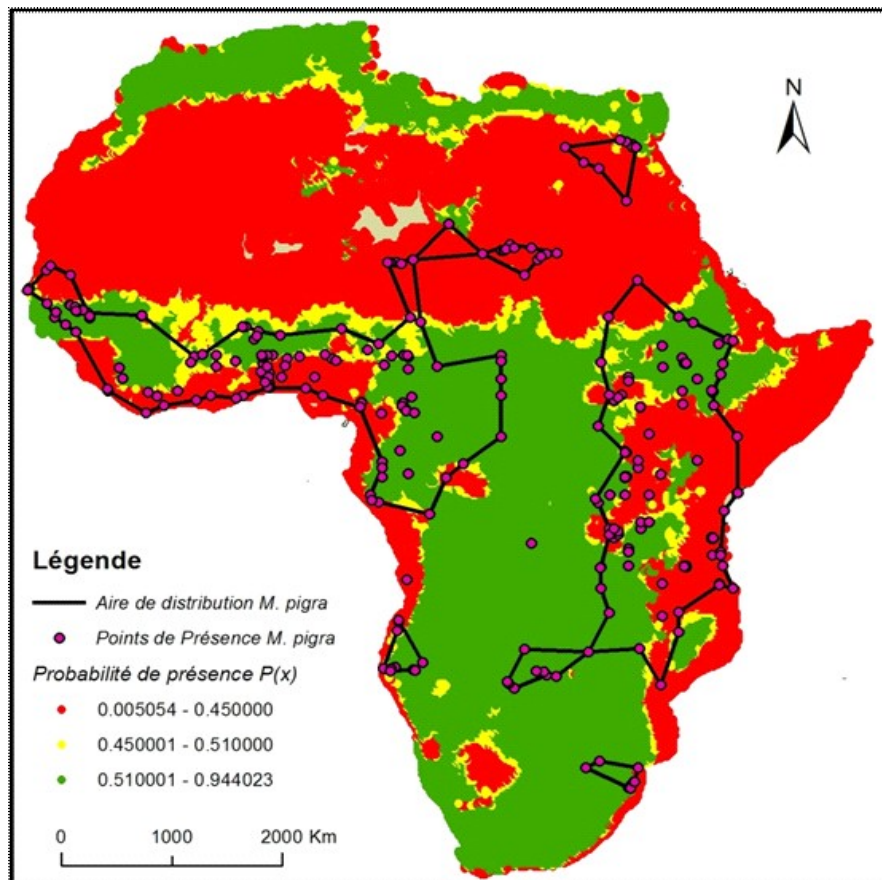


Figure 19: Carte de distribution future de *Mimosa pigra* selon le modèle I

Les prédictions du modèle II (variables climatiques et pédologiques), sous l'effet des changements climatiques à l'horizon (2041 – 2060), montrent la présence de *Mimosa pigra* dans les régions phytogéographiques allant de la partie sud du centre régional d'endémisme soudanien (correspondant à la République de Centrafrique) jusqu'aux limites entre les centres régionaux d'endémisme de Karoo-Namib et du Cap (Figure 20). Cette aire de distribution future s'étend aussi sur les centres régionaux d'endémisme méditerranéen et de la Somalie et du pays Masai, sur le centre morcelé d'endémisme afromontagnard, sur la zone de transition régionale méditerranéo-saharienne. Par ailleurs, quelques points de présence sur les zones de transition régionale du Sahel et du Sahara sont notés. Par contre, une importante réduction d'habitats de *Mimosa pigra* est prédite sur l'aire de distribution connue. Cette perte d'habitats concerne aussi le PNNK dont sa situation d'aire protégée envahie par cette espèce s'améliorerait légèrement dans le futur d'après les résultats de prédiction du modèle II.

D'après la classification de Köppen Le modèle II prédit que *Mimosa pigra* sera retrouvée sous les climats de type tropical (Af, Am et Aw), sec (BSh, BSk et BWk) et tempéré chaud (Cwa, Cwb, Csa, Csb).

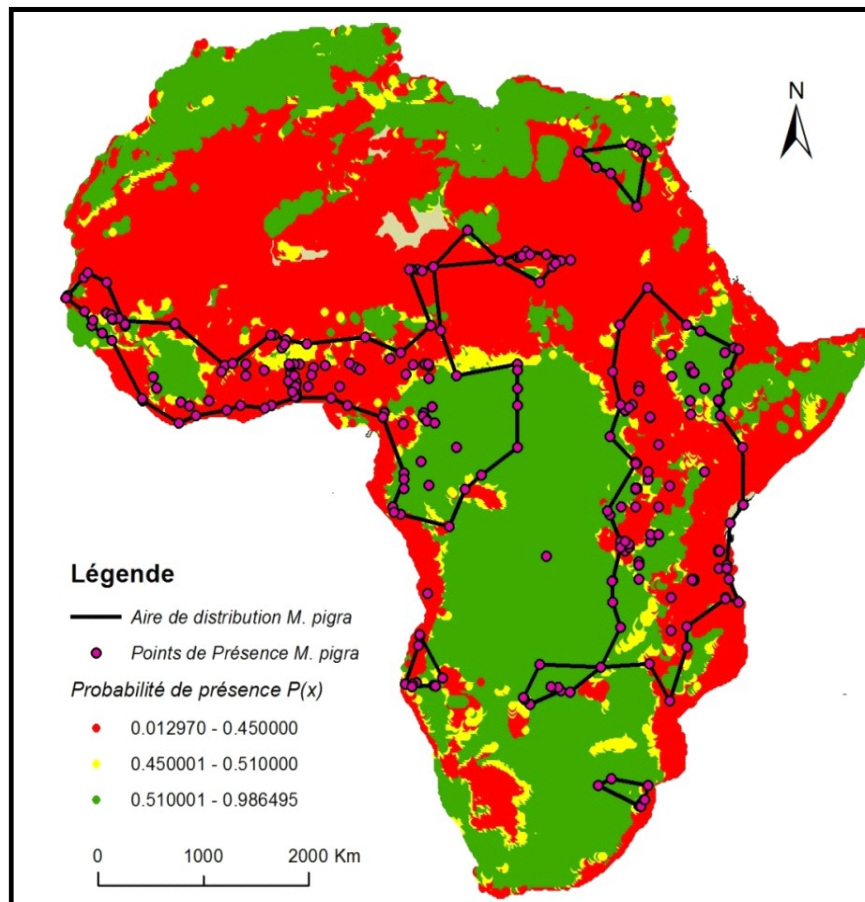


Figure 20: Carte de distribution future de *Mimosa pigra* selon le modèle II

2. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Dans son aire d'origine, *Mimosa pigra* a une distribution confinée pour la plupart, dans les domaines climatiques Aw, Af et Am définis par Köppen. Ces domaines sont caractérisés par un climat tropical avec une température moyenne de chaque mois de l'année supérieure à 18°C, une saison sèche peu importante et de fortes précipitations annuelles qui sont supérieures à l'évaporation annuelle. Parallèlement, en Afrique, les résultats ont montré que la quasi-totalité de l'aire de distribution de cette espèce correspond aux mêmes types de climats (Aw, Af et Am) occupés par *Mimosa pigra* en Amérique. Cependant, des points de présence de cette espèce sur les deux aires ont été observés sous les climats Cwa et Cwb de Köppen, caractérisés par un climat tempéré chaud avec des températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3 et 18°C. La température moyenne du mois le plus chaud est supérieure à 10°C. Les saisons été et hiver sont bien définies. Donc, *Mimosa pigra* est globalement retrouvée sous les mêmes climats de part et d'autre de l'océan atlantique mais elle est largement présente en climat tropical aussi bien dans son aire d'origine que dans l'aire envahie étudié. Ce qui nous permet de dire que ces résultats sont en concordance avec les données de Cronk et Fuller (1995) qui rapportent qu'au niveau de l'aire d'origine, le climat est de type tropical sec caractérisé par une période sèche de quatre mois et une humidité très élevée pour le reste de l'année alors qu'en zone envahie le climat est de type tropical humide/sec avec une pluviométrie estivale élevée et une sécheresse relativement prononcée au cours des mois d'hiver.

Il est important de relever que la présence de *M. pigra* en Afrique n'est peut être pas le résultat d'une introduction anthropique. En effet, l'espèce était largement présente en Afrique et aux Mascareignes ([La Réunion](#), [l'île Maurice](#) et [Rodrigues](#)) déjà au 19^{ème} siècle mais dans une forme identique à la forme américaine. Pour notre part, nous avons trouvé dans l'herbier en ligne du Royal Botanic Gardens⁴ des spécimens collectés en Sierra Leone, au Madagascar et en Egypte datant (du début du 19^{ème} siècle) respectivement de 1823, 1826 et 1829. De toute manière, il s'agirait d'une colonisation récente, puisqu'il n'y aurait pas encore eu d'apparition de variétés africaines (Cronk et Fuller 1995). Cependant, à notre connaissance, personne n'a suggéré de date d'apparition de *M. pigra* en Afrique. On doit donc considérer que l'espèce est présente en Afrique depuis plus de 190 ans. Un groupe de 117 espèces, parmi lesquelles la seule Cactaceae présente naturellement hors des néotropiques, *Rhipsalis baccifera*, possèdent une telle distribution disjointe Amérique du Sud – Afrique, quoique dans ce dernier cas

⁴ <http://www.kew.org/>

l'hypothèse d'une introduction anthropique est aussi évoquée. Les diaspores de ces espèces auraient été transportées par des oiseaux (Thorne 1973 ; Cotta-Sánchez et Bomfim-Patricio 2010).

Nos projections avec les différents modèles cernent correctement les zones de présences en Amérique mais y font aussi apparaître de vastes zones supplémentaires. On peut supposer soit un manque de données de présences pour ces zones, soit la présence d'une espèce qui occupe la même niche (compétiteur) soit encore la présence d'un prédateur ou d'un parasite. Ce résultat mériterait d'être approfondi, en particulier il serait nécessaire de connaître avec plus de précision la distribution de l'espèce dans son aire d'origine. Le même type de résultat a été obtenu sur l'Afrique. Ceci laissent supposer que dans la situation climatique actuelle, *M. pigra* est encore largement susceptible d'étendre son aire en Afrique, au-delà des zones colonisées actuellement, à moins qu'il ait manque d'observations de terrain et que ces zones seraient déjà envahies. Une recherche plus approfondie dans les herbaria devrait absolument être entreprise.

La comparaison des modèles africains et américains met en évidence des différences significatives dans leurs coefficients et dans leurs réponses écologiques. Les différences pourraient provenir d'une dérive génétique provoquée par la taille réduite de la population initiale de l'Afrique. La dérive génétique est rarement démontrable pour les invasions biologiques par les méthodes de biologie moléculaire car, selon Fitzpatrick *et al.*, 2012 ce phénomène s'étale généralement sur des millénaires. Par exemple, on a pu mettre en évidence l'existence de 10 haplotypes différents de *Cistus monspeliensis* aux Iles Canaries alors qu'il n'en existe qu'un seul dans le bassin d'origine (Fernández-Mazuecos & Vargas 2011), mais il s'agit ici d'une colonisation remontant à près d'un million d'années. Les processus adaptatifs jouent certainement un rôle mais les espèces invasives conserveraient une diversité génétique suffisante leur permettant de faire face à leur nouvel environnement (Erfmeier et Bruelheide, 2011). Néanmoins, il est possible que les populations africaines de *M. pigra* soient moins variables physiologiquement que les populations américaines parce qu'elles proviendraient d'une petite population initiale n'ayant pas encore eu le temps de se re-diversifier.

Cependant, il faut prendre en compte deux éléments supplémentaires. Premièrement, le fait que nos modèles ne révèlent que la niche réalisée (dans l'environnement biotique et abiotique) et non la niche fondamentale (dans l'environnement abiotique uniquement) (Bouzellé, 2007), or les environnements biotiques sont différents en Amérique et en Afrique. Par exemple,

l'espèce est attaquée par plus de 400 espèces d'insectes herbivores et champignons parasites en Amérique (Lonsdale *et al.*, 1989 ; Heard et Pettit 2005) alors qu'il y en a 10 fois moins dans les régions envahies d'Australie (Flanagan *et al.*, 1990). Donc, on doit s'attendre à des modèles différents. Deuxièmement, en Afrique, la présence de l'espèce est de toute façon récente. De grandes zones resteraient à coloniser, donc, qu'il n'y aurait pas encore d'équilibre avec les conditions abiotiques que mettent en évidence les modèles. Nous avançons donc l'hypothèse que *M. pigra* n'a pas encore envahi toute les zones qu'elle pourrait occuper en Afrique (les gammes des valeurs des facteurs étudiés où l'espèce est rencontrée en Afrique sont plus étroites pour tous les facteurs sauf le pH), soit parce que il n'y a pas encore eu suffisamment de temps ou d'opportunités pour que toutes ces zones soient atteintes par les diaspores, soit parce que dans ces zones, *M. pigra* est moins compétitif et ne peut prendre le dessus sur des espèces indigène qui occupent la niche.

Les prédictions sur la distribution future de *Mimosa pigra* sur le continent africain montrent une perte d'habitats, par rapport à l'aire de distribution connue pour les deux types modèles à l'horizon (2041 – 2060). Cette réduction varie en fonction des modèles construits. Elle est davantage plus importante avec le modèle II qu'avec le modèle I. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la composition du sol est élément important de la distribution de cette espèce. Pinto et Gegout (2005), Bragazza et Gerdol, (1996), Coudun et Gegout (2007) concluent que les facteurs édaphiques sont importants pour la modélisation de la distribution des espèces végétales. Par exemple, Coudun *et al.* (2006) et Coudun et Gégout (2007) et démontrent que la modélisation de la distribution de l'érable champêtre et de la myrtille est nettement affinée avec l'utilisation de variables pédologiques en plus des variables climatiques.

Par ailleurs, comparativement à sa distribution actuelle sur le continent africain, *Mimosa pigra* pourrait régresser spontanément sous le climat futur. Selon le modèle II, le PNNK pourrait en particulier connaître une perte complète d'habitats de *Mimosa pigra*. Ce qui nous permet de dire que la situation actuelle d'invasion biologique de cette aire protégée pourrait se régler d'elle-même dans le futur.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, nous avons voulu étudier la niche écologique de *Mimosa pigra* L. en Afrique en vue de définir une stratégie de contrôle de ces populations invasives au Parc National du Niokolo Koba. Pour cela, deux modèles ont été construits avec des données de l'aire de distribution initiale et de l'Afrique sur la base de la régression logistique. L'un des modèles a été construit avec des variables climatiques exclusivement et l'autre avec des variables pédoclimatiques.

Les résultats ont montré que *Mimosa pigra* est globalement retrouvée sous les mêmes climats de part et d'autre de l'océan atlantique et est largement présente en climat tropical aussi bien dans son aire d'origine que dans l'aire envahie étudiée bien que des points de présence aient été observés en climat tempéré chaud sur ces deux aires.

En Afrique, *M. pigra* a une amplitude écologique globale inférieure à ce qui est observé en Amérique qui pourrait s'expliquer par la colonisation de l'Afrique à partir d'une petite population initiale et/ou par le fait que cette colonisation est récente (200 ans ou plus).

Les résultats des prédictions à l'horizon (2041 – 2060), sous l'effet des changements climatiques prévoient une dynamique de régression spontanée des populations de *Mimosa pigra* par rapport à leur répartition actuelle en Afrique. Par ailleurs, de manière spécifique, la situation actuelle d'invasion biologique du PNNK pourrait se régler d'elle-même dans le futur. Ce qui constitue une lueur d'espoir pour les autorités en charge de la gestion de ce site du patrimoine mondial de l'Unesco en particulier et pour le monde de la conservation de la biodiversité en général.

Nous pouvons suggérer de préférer des méthodes de contrôle basées sur des aménagements ou des interventions intégrées plutôt que d'envisager l'utilisation de la lutte biologique qui s'est souvent révélée désastreuse et qui de toute façon est incompatible avec le statut de l'aire protégée.

Pour que le Parc National du Niokolo Koba puisse retrouver ses fonctions écologiques d'antan, qui lui ont valu le titre de site du patrimoine mondial, les méthodes intégrées de contrôle qui doivent être mises en place devraient consister en :

- la collecte de toutes les gousses et graines de *Mimosa pigra* observées sur les plantes sur pied et celles ramassées sur le sol et les mettre dans des sacs;

- l'incinération du produit collecté afin d'éviter la dissémination ;
- dessouchage sur une profondeur de 20 cm ;
- le curage et le reprofilage des chenaux d'alimentation des mares pour assurer un remplissage correcte du site à partir du fleuve et la présence de l'eau pour une longue période ;
- la mise en place d'un système de veille écologique pour dessoucher les rejets et déraciner les plantules observées, éventuellement, après chaque retrait des eaux de pluie.

Les résultats de ce travail pourraient être améliorés en recherchant avec plus de précision la distribution de l'espèce dans son aire d'origine et dans son aire envahie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Adam, J.G. (1971).** Le milieu biologique, flore et végétation. In le Niokolo Koba, premier grand Parc National de la République du Sénégal. Dakar, G.I.A, pp. 43-62.
2. **Agnote. 466. No. F2. (August 2001).** Agdex No: 643. ISSN No: 0157-8243. *Mimosa* or Giant Sensitive Plant (*Mimosa pigra*). I. L. Miller and S. E. Pickering, updated by C. S. Smith and I.L. Miller Weeds Branch
3. **Albert, A. (2005).** Biostatistique. Céfal, EULg (ed.) Liège. Université de Liège – Faculté de Médecine
4. **Austin, M.P. (2002).** Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecol. Model.* 157, 101–118.
5. **Austin Mike, 2007.** Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *ecological modelling* 200 (2007) 1–19.
6. **Bâ, A.T., Sambou, B., Erviik, F., Goudiaby, A., Camara, C., Diallo, D. (1997).** Végétation et Flore. Parc transfrontalier du Niokolo Badiar. Niokolo Badiar, UE, 157p.
7. **Bâ A.T., Noba K. Sambou B., Goudiaby A. Mbaye M.S.. (2008).** Etude botanique et écophysiological de *Mimosa pigra* et *Mitragyna inermis* pour une stratégie de contrôle de ces plantes envahissantes dans les mares de Simenti et de Kountadala du Parc National du Niokolo Koba (Sénégal). 49p+ annexes.
8. **Bedia J., Busque´ J. & Gutiérrez J.M. (2011).** Predicting plant species distribution across an alpine rangeland in northern Spain. A comparison of probabilistic methods. *Applied Vegetation Science* 14 (2011) 415–432.
9. **Bellard, C., Thuiller, W., Leroy, B., Genovesi, P., Bakkenes, M., Courchamp, F. (2013).** Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology* 19, 3740-3748.8.

10. **Berhaut, J. (1967).** – Flore du Sénégal, deuxième édition, Clairafrique, Dakar, 485p.
11. **Bertelsmeier, C., Luque, G.M., Courchamp, F. (2013).** The impact of climate change changes over time. *Biological Conservation* 167, 107-115
12. **Bonn, A. & Schröder, B. (2011).** Habitat models and their transfer for single- and multi-species groups: a case study of carabids in an alluvial forest. *Ecography* 24: 483-496.
13. **Bordin Patricia (2002).** SIG: concepts, outils et données. Ed. Lavoisier, Paris, 26
14. **Bouzillé, J.-B. (2007).** *Gestion des habitats naturels et biodiversité. Concepts, méthodes et démarches.* Paris: Editions TEC & DOC.
15. **Bragazza, L. & Gerdol, R. (1996).** Response surfaces of plant species along water-table depth and pH gradients in a poor mire on the southern Alps (Italy). *Annales Botanici Fennici*, 33, 11-20.
16. **Braithwaite, R.W., W.M. Lonsdale, et J.A. Estbergs (1989).** Alien vegetation and native biota in tropical Australia : the spread and impact of *Mimosa pigra*. *Biological Conservation*, 48: 189 – 210.
17. **Brotons, L., Thuiller, W., Araujo, M.B., Hirzel, A.H. (2004).** Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography* 27, 437-448.
18. **Burgmann, M. A. & Forx, J. C. (2003).** Bias in species range estimates from minimum convex polygons: implications for conservation and options for improved. *Animal Conservation* 6: 19-28
19. **Burns & Burns (2008).** Logistic regression.
20. **Calcagno, V. & de Mazancour, C. (2010).** glmulti: An R package for pasy automated model selection with (Generalized) Linear Models. *Journal of Statistical Software* 34: 1-29.

21. **Chin Duong Van (2009).** *Mimosa pigra* L.: A dangerous invasive weed in Vietnamese agro-ecosystems.
22. **Cortes, C. & Vapnik, V. (1995).** Support-vector networks. *Machine Learning* 20: 273–297.
23. **Cota-Sánchez, J. H. & Bomfim-Patricio, M. C. (2010).** Seed morphology, polyploidy and the evolutionary history of the epiphytic cactus *Rhipsalis baccifera* (Cactaceae). *Polibotanica* 29: 107-129.
24. **Coudun, C., Gegout, J. C., Piedallu, C. & Rameau, J. C. (2006).** Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography*, 33, 1750-1763.
25. **Coudun, C. & Gegout, J. C. (2007).** Quantitative prediction of the distribution and abundance of *Vaccinium myrtillus* with climatic and edaphic factors. *Journal of Vegetation Science*, 18, 517- 524.
26. **Cronk, Q.B., Fuller, J.L., (1995).** – *Plant invaders: The threat to natural Ecosystems*. Chapman & Hall, London, UK.
27. **Denis Antoine (2013).** Initiation à ArcGIS. Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique. Arlon Campus Environnement. 90 pages.
28. **Dillon S.P. et Forcella F. (1985).** Fluctuating temperatures break seed dormancy of catclaw mimosa (*Mimosa pigra*). *Weed Science* 33, 196-8.
29. **DPN (2000).** Plan de gestion du Parc National du Niokolo Koba et de sa périphérie. Direction des Parcs Nationaux. Ministère de l'Environnement. 131p.
30. **Drake, J.M., Randin, C., Guisan, A. (2006).** Modelling ecological niches with support vector machines. *J. Appl. Ecol.* 43, 424–432.
31. **Drake, J.M. & Bossenbroek, J.M. (2009).** Profiling ecosystem vulnerability to invasion by zebra mussels with support vector machines. *Theoretical Ecology* 2: 189–198.

- 32. Dury, M., Hambuckers, A., Warnant, P., Henrot, A., Favre, E., Ouberdous, M. & Francois, L. (2011).** Responses of European forest ecosystems to 21st century climate: assessing changes in interannual variability and fire intensity. *Iforest-Biogeosciences and Forestry* 4: 82-99.
- 33. Elias T.S. (1981).** Mimosoideae. In ‘Advances in legume science’, eds. R.J. Summerfield and A.H. Bunting, pp. 143-52. (Royal Botanic Gardens, Kew).
- 34. Elith, J., et al. (2006).** Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29, 129–151.
- 35. Elith, J. & Leathwick, J.R. (2009).** Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40, 677–697.
- 36. Elith J., Phillips S. J., Hastie T., Dudi´k M. , Chee Y. E. and Yates C. J. (2011).** A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57.
- 37. Engler et Guisan (1999).** *Diversity and Distribution* 15 :590-601
- 38. Erfmeier, A. & Bruelheide, H. (2011).** Maintenance of high genetic diversity during invasion of *Rhododendron ponticum*. *International Journal of Plant Sciences* 172(6): 795-806.
- 39. Ferna´ndez-Mazuecos M, Vargas P. (2011).** Genetically Depauperate in the Continent but Rich in Oceanic Islands: *Cistus monspeliensis* (Cistaceae) in the Canary Islands. *PLoS ONE* 6(2): e17172. doi:10.1371/journal.pone.0017172
- 40. Fielding, A.H. & Bell, J.F. (1997).** A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24: 38–49.
- 41. Fitzpatrick, B. M., Fordyce, J. A., Niemiller, M. L. & Reynolds, R. G. (2012).** What can DNA tell us about biological invasions? *Biological Invasions* 14(2): 245-253.

- 42. Flanagan, G. J., Wilson, C. G. & Gillett, J. D. (1990).** The abundance of native insects on the introduced weed *Mimosa pigra* in northern Australia. *Journal of Tropical Ecology* 6(2): 219-230.
- 43. François, L., Utescher, T., Favre, E., Henrot, A. J., Warnant, P., Micheels, A., Erdei, B., Suc, J. P., Cheddadi, R. & Mosbrugger, V. (2011).** Modelling Late Miocene vegetation in Europe: Results of the CARAIB model and comparison with palaeovegetation data. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 304, 359-378.
- 44. Germplasm Resources Information Network, USDA-ARS.**
- 45. Global Invasive Species Database**
- 46. Graham, C.H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C., Peterson, A.T. (2004a).** New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends Ecol. Evol.* 19, 497–503.
- 47. Graham CH, Ron SR, Santos JC, Schneider CJ, Moritz C. (2004b).** Integrating phylogenetics and environmental niche models to explore speciation mechanisms in dendrobatid frogs. *Evolution* 58:1781–93
- 48. [Grosvenor PW](#), [Gothard PK](#), [McWilliam NC](#), [Supriono A](#), [Gray DO](#) (1995).** [Medicinal-plants from Riau Province, Sumatra, Indonesia .1. Uses.](#) *Journal Of Ethnopharmacology* Volume: 45 Issue: 2 Pages: 75-95.
- 49. Guisan, A., Weiss, S. B. & Weiss, A. D. (1999).** GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143, 107-122.
- 50. Guisan, A., Zimmermann, N.E. (2000).** Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135, 147–186.
- 51. Guisan, A., Edwards, T.C., Hastie, T. (2002).** Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecol. Model.* 157, 89–100.
- 52. Guisan, A., Thuiller, W. (2005).** Predicting species distribution: offering more than simple habitat models? *Ecol. Lett.* 8, 993–1009.

- 53. Harper J.L. (1977).** ‘Population biology of Plant’, p.77.(Academic Press, London).
- 54. Hastie, T.J., Tibshirani, R.J. (1986).** Generalized additive models. *Stat. Sci.* 1, 297_ /318.
- 55. Hastie, T., Tibshirani, R. (1990).** Generalised Additive Models. Chapman and Hall, London.
- 56. Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J. (2009).** The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. 2nd ed. Springer Series in Statistics, Springer, New York, NY,US. Available at: <http://www-stat.stanford.edu/~tibs/ElemStatLearn/main.html>.
- 57. Heard TA, Paynter Q, Chan R, et al. (2005).** Source: Biological Control Volume: 32 Issue: 2 Pages: 252-262.
- 58. Heard, T. A. & Pettit, W. (2005).** Review and analysis of the surveys for natural enemies of *Mimosa pigra*: What does it tell us about surveys for broadly distributed hosts? *Biological Control* 34(3 SPEC. ISS.): 247-254.
- 59. Hosmer, D. W. & Lemeshow, S. (2000).** Applied logistic regression. New York: John Wiley and Sons.
- 60. Hutchinson, G.E. (1957).** Population studies – animal ecology and demography – concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22: 415–427.
- 61. Hutchinson, J., Dalziel, J.M. (1958).** *The flora of west tropical Africa, 2nd eden* (revised by Keay R.W.J). Crown agents, London.
- 62. Indira Thomas J., (2007).** Mapping and modeling of *mimosa pigra* expansion in Lochinvar National Park, Zambia, 118p.
- 63. Janzen D.H., (1983).** *Mimosa pigra*. In ‘Costa Rican natural history’, ed.D.H. Janzen, pp. 277-8. (University of Chicago Press, Chicago).
- 64. Kearney, M. (2006).** Habitat, environment and niche: what are we modelling? *Oikos*, 115, 186-191.

- 65. Kearney, M. & Porter, W. (2009).** Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters*, 12, 334-350.
- 66. Kleinbaum D.G. et Klein M. (2010).** Logistic regression: a self-learning text (third edition). Department of epidemiology, Emory University. 706p.
- 67. Lancia, R.A., Adams, D.A. & Anderson, W.B. (1986).** "Temporal and spatial aspects of species-habitat models". In *Wildlife 2000 : Modelling habitat relationships of terrestrial vertebrates*. Verner, J., et al Eds, University of Wisconsin Press, Madison. PP 65-69.
- 68. [Lane AM](#), [Williams RJ](#), [Muller WJ](#), [Lonsdale WM](#) (1997).** [The effects of the herbicide tebuthiuron on seedlings of Mimosa pigra and native floodplain vegetation in northern Australia](#). *Australian Journal of Ecology* Volume: 22 Issue: 4 Pages: 439-447
- 69. Laurent, J. M., Bar-hen, A., Francois, L., Ghislain, M. & Cheddadi, R. (2004).** Refining vegetation simulation models: From plant functional types to bioclimatic affinity groups of plants. *Journal of Vegetation Science*, 15, 739-746.
- 70. Leathwick, J.R., Austin, M.P. (2001).** Competitive interactions between tree species in New Zealand's old-growth indigenous forests. *Ecology* 82, 2560–2573.
- 71. Leathwick, J.R., Whitehead, D. (2001).** Soil and atmospheric water deficits and the distributions of New Zealand's indigenous tree species. *Funct. Ecol.* 15, 233–242.
- 72. Leathwick, J.R., Elith, J. & Hastie, T. (2006).** Comparative performance of generalized additive models and multivariate adaptive regression splines for statistical modelling of species distributions. *Ecological Modelling* 199: 188–196.
- 73. Lechmere-Oertel, R.G. & Cowling, R.M. (1999).** Predicting the distribution of fynbos and succulent karoo biome boundaries and plant communities using

generalised linear models and geographic information systems. *South African Journal of Botany*, 65, 89-96.

- 74. Lonsdale W.M. and Segura R. (1987).** A demographic comparison of native and introduced populations of *Mimosa pigra*. Proceedings of the Eighth Australian Weeds Conference, Sydney, pp. 163-6.
- 75. Lonsdale, W.M. (1988).** "Litterfall in an Australian population of 'Mimosa pigra', an invasive tropical shrub". *Journal of Tropical Ecology* 4: 381–392.
Lonsdale W.M., Miller I.L., Forno I.W. (1995). 'Mimosa pigra L'. In: Groves R.H., Sheppard R.C.H., Richardson R.G. (eds) 'The biology of Australian weeds'. R.G. and F.J. Richardson Publishers, Melbourne, Australia, pp 169–188
- 76. Lonsdale, W. M. & Abrecht, D. G. (1989).** Seedling mortality in *Mimosa pigra*, an invasive tropical shrub. *Journal of Ecology* 77(2): 371-385.
- 77. Lonsdale W.M, Miller, I.L, Forno, I.W. (1989) –** The Biology of Australian Weeds 20. *Mimosa pigra* L.. *Plant Protection Quarterly* 4(3), 119 – 130.
- 78. Lonsdale, W.M. (1992).** The biology of *Mimosa pigra* L. In A guide to the management of *Mimosa pigra*, ed. K.L.S. Harley, CSIRO. Canberra. 8-32.
- 79. Lonsdale W.M., Miller I.L., Forno I.W. (1995).** *Mimosa pigra*. pp. 169–188. In In Groves R.H., Sheppard R.C.H., Richardson R.G. The biology of Australian weeds R.G. and F.J. Richardson Publishers, Melbourne, Australia.
- 80. Manel S., Williams H. C. & Ormerod, S.J. (2001).** Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38, 921-931.
- 81. McNeely A.J., Mooney H. A., Neville L. E., Schei P.J. et Waage J. K. (2001).** *Global Invasive Species Programme*
- 82. Melki A. (2007).** Espèces envahissantes (*Mimosa pigra* et *Mitragyna inermis*) fermeture des mares du Parc National du Niokolo Koba : cas des mares de

Simenti, Kountadala et Nianaka. Mémoire de BTS en gestion et protection des espaces Naturels.45p.

- 83. Miller I.L. (1983).** The distribution and threat of *Mimosa pigra* in Australia. Proceedings of in International symposium *Mimosa pira* Management, Chiangmai, Thailand, pp. 38-50. (International Plant Protection Center, Corvalis).
- 84. Miller I.L. (1988).** ‘Aspects of the biology and control of *Mimosa pigra* L.’ M.Sc. Agr. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Sidney.
- 85. Miller I.L. (1992).** "Competition between *Brachiaria humidicola* and *Mimosa pigra*". *Tropical Grasslands* 26: 111–114. Lonsdale W.M., Miller I.L., Forno I.W. (1995). ‘*Mimosa pigra* L’. In: Groves R.H., Sheppard R.C.H., Richardson R.G. (eds) ‘The biology of Australian weeds’. R.G. and F.J. Richardson Publishers, Melbourne, Australia, pp 169–188.
- 86. Miller, I.L., and W.M. Lonsdale (1992).** Ecological management of *Mimosa pigra*: use of fire and competitive pasture. In *A guide to the management of Mimosa pigra*. K.L.SL Harley [ed.], pp 104 – 106, CSIRO, Canberra.
- 87. Miller,I.L., and M. Siriworakul (1992).** Herbicide research and recommendations for control of *Mimosa pigra*. In *A guide to the management of Mimosa pigra*. K.L.SL Harley [ed.], pp 86 – 89, CSIRO, Canberra.
- 88. Miller, I.L. (2002).** "Uses for *Mimosa pigra*". 3rd International Symposium on the Management of *Mimosa pigra*. Darwin, Australia: Research and management of *Mimosa pigra*.
- 89. Munoz, J., Felicisimo, A.M. (2004).** Comparison of statistical methods commonly used in predictive modelling. *J. Veg. Sci.* 15, 285–292.
- 90. Nakkitsset S, Mikled C, Ledin I. (2008).** [Effect of feeding head lettuce, water spinach, Ruzi grass or *Mimosa pigra* on feed intake, digestibility and growth in rabbits.](#) *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* Volume: 21 Issue: 8 Pages: 1171-1177

- 91. Nicholls, A.O. (1989).** How to make biological surveys go further with generalized linear models. *Biol. Conserv.* 50, 51–76.
- 92. Nicholls, A.O. (1991).** Examples of the use of generalized linear models in analysis of survey data for conservation evaluation. In: Margules, C.R., Austin, M.P. (Eds.), *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, Melbourne, pp. 191–201.
- 93. Ndiaye Mandiaye (2012).** Evaluation de l'efficacité de la gestion du Parc National de Niokolo Koba. Travail de Fin d'Etudes. Université de Liège.66p.
- 94. NWSEC (2000).** Weed of National Significance *Mimosa (Mimosa pigra)* Strategic Plan. National Weeds Strategy Executive Committee (NWSEC), Launceston, 118p.
- 95. Pateiro-Lopez, B. & Rodriguez-Casal, A. (2010).** Generalizing the Convex Hull of a Sample: The R Package alphahull. *Journal of Statistical Software* 5: 1-28.
- 96. Paynter Q, Flanagan G.J. (2004).** [Integrating herbicide and mechanical control treatments with fire and biological control to manage an invasive wetland shrub, Mimosa pigra](#). *Journal of Applied Ecology*. Volume: 41 Issue: 4 Pages: 615-629
- 97. Pearce, J., Ferrier, S. (2000).** Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecol. Modell.* 133, 225–245.
- 98. Piedallu, C., Gégout, J. C., Perez, V. & Lebourgeois, F. (2013).** Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* 22(4): 470-482.
- 99. Peng, C. H. (2000).** From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 135, 33-54.

- 100. Phillips, S.J., Dudík, M. & Schapire, R.E. (2004).** A maximum entropy approach to species distribution modeling. Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning 655–662. ACM Press, New York, NY, US.
- 101. Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006).** Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190, 231–259.
- 102. Pimentel D., McNair S., Janecka J., Wightman J., Simmonds C., O'Connell C., Wong E., Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190, 231-259
- 103. Pinto, P. E. & Gegout, J. C. (2005).** Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. *Annals of Forest Science*, 62, 761-770.
- 104. Praneetvatakul S. (2001).** An Impact Assessment of ACIAR Research Projects on Biological Control in Thailand. In Impact Assessment of forty-nine Thailand/Australia Collaborative Projects Funded by ACIAR during 1983 – 1995 (Working Paper Series No.38), S. Isvilanonda, S. Praneetvatakul, C. Sangkapituk, A. Sattarasart, C. Singhaprecha and P. Sirisupluxana.
- 105. Preux P.M., Odermatt P., Perna A., Marin B., Vergnenègre A. (2005).** Qu'est-ce qu'une régression logistique ? Mémento biostatistique. *Rev Mal Respir*, 22 : 159-62.
- 106. Rushton, S.P., Ormerod, S.J. & Kerby, G. (2004).** "New paradigms for modelling species distributions?" *Journal of Animal Ecology* 41: 193-200.
- 107. Russel L., Zern J., Aquino T., Tsomondo T. (2001).** Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84 (2001) 1–20
- 108. Santika, T. & Hutchinson, M.F. (2009).** The effect of species response form on species distribution model prediction and inference. *Ecological Modelling* 220: 2365–2379.

- 109.Schatz T.J. (2001).** The effect of cutting on the survival *Mimosa pigra* and its application to the use of blade ploughing as a control method, *Plant Protection Quarterly* 16(2).
- 110.Schwartz G. (1978).** Estimating the dimension of the model, *Ann. Statist.* 6 461 - 464.
- 111.Smart, J., Sutherland, W. J., Watkinson, R. & Gill, J. A. (2004).** A new means of presenting the results of logistic regression. *Bulletin of the Ecological Society of America* 85: 100-102.
- 112.Sheded M.G. and Hassan L. (2008).** Reproductive ecology of *Mimosa pigra* L. in Egypt. *Feddes Repertorium*. Volume 110 Issue 3-4, pages 219-224.
- 113.Smolik M. G., Dullinger, S., Essl, F., Kleinbauer, I., Leitner, M., Peterseil, J., Stadler, L. M. et Vogl, G. (2010).** Integrating species distribution models and interacting particle systems to predict the spread of an invasive alien plant. *Journal of Biogeography*, 37, 411-422.
- 114.Schneider, A. & Sambou, K. (1982).** Prospection botanique dans les Parc nationaux du Niokolo Koba et de Basse Casamance : Recherche scientifique dans les parcs nationaux du Sénégal, Mémoire de l'IFAN, n°92, pp.101-102.
- 115.Steven J. Phillips, Robert P. Anderson, Robert E. Schapire (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259.
- 116.Stockwell, D. R. B. (1999).** Genetic algorithms II. Pages 123-144 in A. H. Fielding, editor. *Machine learning methods for ecological applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- 117.Taylor, J.A. and Tulloch, D. (1985).** Rainfall in the wet-drytropics: extreme events at Darwin and similarities between years during the period1870-1983. *Australian Journal of Ecology* 10,281-95.
- 118.Thorne, R. F. (1973).** Floristic relationships between tropical Africa and tropical America. In *Tropical forests ecosystems in Africa and South America:*

a comparative review., 27-47 (Eds B. J. Meggers and W. D. Duckworth).
Washington, DC.: Smithsonian Institute.

- 119.Thuiller, W. (2003).** BIOMOD-optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biol.* 9, 1353–1362.
- 120.Thuiller, W., Araujo, M. B. & Lavorel, S. (2003).** Generalized models vs. classification tree analysis: Predicting spatial distributions of plant species at different scales. *Journal of Vegetation Science*, 14, 669-680.
- 121.Tosso Félicien Dji-ndé (2013).** Modélisation de la distribution de six espèces d'arbres multi-usages en Afrique et évaluation de l'effet des changements climatiques. Travail de Fin d'Etudes, Master complémentaire en Science et Gestion de l'Environnement dans les pays en voie de développement. 78p.
- 122.Triet, T. and N.V. Dung. (2001).** Finding the best solution for management of giant sensitive plant *Mimosa pigra* in Tram Chim National Park. pp 21-28.
- 123.Van der Wal, J., Shoo, L. P., Graham, C. & Williams, S. E. (2009).** Selecting pseudo-absence data for presence-only distribution modeling: How far should you stray from what you know? *Ecol.Model.* 220: 589-594.
- 124.Vayssieres, M.P., Plant, R.E. & Allen-Diaz, B.H. (2000).** Classification trees: an alternative non-parametric approach for predicting species distributions. *Journal of Vegetation Science* 11: 679–694.
- 125.Walden, D., Finlayson, C. M., van Dam, R., Storrs, M. (1999).** Information for a risk assessment and management of *Mimosa pigra* in Tram Chim National Park, Viet Nam. Processing of the EnviroTox'99 International Conference, 160 – 170.
- 126.Walden D., Finlayson C.M., Van Dam R., Storrs M. (1999).**- Information for a risk assessment and management of *Mimosa pigra* in Tram Chim National Park, Viet Nam. *Proceeding of the EnviroTox'99 International Conference*, 160 – 170.

- 127. Walden D., VanDam R., Finlayson M., Stors M., Lowry J., Kriticos D. (2004).** - A risk Assessment of the tropical wetlands, weed *Mimosa pigra* in northern Australia, supervising Scientist, report 177.
- 128. Wanichanantakul, P. and Chinawong, S. (1979).** Some aspects of the biology of *Mimosa pigra* in northern Thailand. Proceedings of the seventh Asian-Pacific Weed Science Society Conference, Sydney, pp.381-3.
- 129. Ward, D. F. 2007.** Modelling the potential geographic distribution of invasive species in New Zealand. *Biological Invasions*, 9, 723-735.
- 130. Warnant, P., François, L., Strivay, D. & Gerard, J. C. (1994).** CARAIB - a global-model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 255-270.
- 131. Weed Management Guide (2008).** *Mimosa (Mimosa pigra)*". Australian Government Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts. <http://www.weeds.gov.au/publications/guidelines/wons/m-pigra.html>.
- 132. White F. (1986).** La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique UNESCO/AETFAT/UNSO. 391p.
- 133. Willems Jean-Léon (2011).** Modélisation de la distribution des plantes : exploitation de bases de données à l'échelle européenne pour la prise en compte des facteurs pédologiques. Travail de Fin d'Etudes, Master en Biologie des Organismes et Ecologie. 66p.
- 134. Yee, T.W., Mitchell, N.D. (1991).** Generalized additive models in plant ecology. *J. Veg. Sci.* 2, 587-602.
- 135. Zaneiwski, A.E., Lehmann, A., Overton, J. (2002).** Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns. *Ecol. Model.* 157, 261-280.