



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention Foresterie et Environnement

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade de Master en Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement, Territoire et Développement

Promotion « ANDRISA »

(2012 – 2017)

**Modélisation de l'aire de distribution du *Piper sp.*
(*Tsiperifery*) à Madagascar en vue d'une gestion
durable de cette ressource**

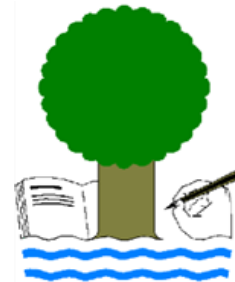
Présenté par :

RAHERINJATOVOARISON Dimby

Soutenu le 28 mars 2017

Devant le jury composé de :

- Président : RABEMANANJARA Zo Hasina, Docteur-HDR
- Rapporteur : RAKOTO RATSIMBA Harifidy, Docteur-Ingénieur
- Examineurs : RAZANAKA Samuel, Professeur
QUESTE Jérôme, Docteur



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES


Mention Foresterie et Environnement

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade de Master en Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement, Territoire et Développement

Promotion « ANDRISA »

(2012 – 2017)



**Modélisation de l'aire de distribution du *Piper sp.*
(*Tsiperifery*) à Madagascar en vue d'une gestion
durable de cette ressource**

Présenté par :

RAHERINJATOVOARISON Dimby

Soutenu le 28 mars 2017

Devant le jury composé de :

- Président : RABEMANANJARA Zo Hasina, Docteur-HDR
- Rapporteur : RAKOTO RATSIMBA Harifidy, Docteur-Ingénieur
- Examineurs : RAZANAKA Samuel, Professeur
QUESTE Jérôme, Docteur

« Na inona na inona ataonareo, dia ataovy ho
voninahitr' Andriamanitra izany rehetra izany. »

(I Kor. 10 : 31b)

Remerciements

Le présent mémoire de Master n'aurait pu être achevé sans l'aide de Dieu Tout-Puissant qui m'a procuré force et courage tout au long des travaux de recherche. En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin au bon déroulement de mon stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail. Mes sincères gratitudees à :

- Monsieur RAMAMONJISOA Bruno Salomon, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il porte à tous les étudiants ;
- Monsieur RABEMANANJARA Zo Hasina, Docteur-HDR, Chef de la Mention Foresterie et Environnement au sein de l'ESSA qui, malgré ses innombrables fonctions, a bien voulu présider la soutenance de ce mémoire ;
- Monsieur RAKOTO RATSIMBA Harifidy, Docteur-Ingénieur, Coordinateur du Laboratoire des Recherches Appliquées qui, en dépit de ses nombreuses occupations, m'a octroyé un encadrement de qualité durant la recherche ;
- Madame RAZAFIMANDIMBY Harizoly, Chercheur et conservateur de l'Herbier TEF au DRFGRN, pour ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion ;
- Monsieur RAZANAKA Samuel, Professeur, et Monsieur QUESTE Jérôme, Docteur, pour m'avoir fait l'honneur d'apporter leurs remarques pour l'amélioration de ce document.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de FOFIFA DRFGRN Ambatobe, pour leur accueil chaleureux lors des rencontres à quelques reprises pendant la période de stage et tous les participants de la Table ronde sur le *Tsiperifery* 2016, pour leurs commentaires qui ont permis l'amélioration de ce travail.

J'étends également mes remerciements à tous les professeurs ainsi que le Personnel Administratif et Technique de l'ESSA qui ont contribué à ma formation.

Je n'oserais oublier de remercier l'équipe du Laboratoire des Recherches Appliquées ou du Labo-SIG dirigé par Monsieur RATOVOSON Aina Naval, pour les diverses instructions qui ont énormément participé à l'accomplissement de ce mémoire.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers la promotion ANDRISA, en particulier mes amis de la Mention Foresterie et Environnement et surtout mes « frères » forestiers qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel durant ma démarche.

Un grand merci à toute ma famille pour leur soutien et encouragement inestimable tout au long de mes études mais aussi pour leur compréhension lors de la réalisation de ce travail de mémoire.

Merci à vous.

Présentation des partenaires

Cette étude est appuyée par le FOFIFA ou Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural. Ce centre a été créé en 1974 et est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial, doté de la personnalité morale, de l'autonomie financière et administrative. En matière de recherche, ses principales missions sont de : contribuer à l'élaboration de la politique nationale de recherche ; mettre en œuvre la politique nationale de recherche en matière de développement rural et d'en assurer, la définition, la promotion, l'orientation, la coordination et la capitalisation de toutes les activités de recherche ; développer la recherche thématique de base, pour générer des connaissances et techniques pour pouvoir anticiper les problèmes. En matière de Développement Rural, il a pour but de mettre en œuvre les documents de cadrage de la politique générale et des stratégies du Ministère de l'Agriculture ; d'appuyer et accompagner les actions de diffusion des résultats de recherche auprès des bénéficiaires cibles. Le DRFGRN est un des départements du FOFIFA et il s'occupe surtout de la valorisation des produits forestiers et piscicoles donc le *Tsiperifery* fait partie des ressources qui suscitent l'intérêt de ce département.

Le DP ou Dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariats Forêts et Biodiversité est une convention de partenariat entre le FOFIFA, CIRAD et l'Université d'Antananarivo créé il y a une quinzaine d'année. Il a pour objectif général de proposer à travers une recherche impliquée, des approches innovantes et adaptées combinant conservation de la biodiversité forestière malgache et valorisation des ressources naturelles afin de réduire la vulnérabilité des socio-écosystèmes face aux changements globaux. Et pour ce faire, il se doit de produire des connaissances, élaborer des outils et proposer des modalités d'actions afin d'assurer (1) la gestion et la conservation de la biodiversité forestière au service des populations locales, (2) la gestion durable des ressources naturelles renouvelables pour le développement rural, et (3) l'intégration multi scalaire de la politique forestière dans les dispositifs de gouvernance. Le programme *Tsiperifery* du DP se trouve dans l'axe (1) dont l'objectif est de développer les bases scientifiques sur l'espèce pour sa gestion et sa valorisation durable.



Résumé

La diversité végétale est vitale pour la survie et le bien-être de l'humanité. Diverses plantes sauvages jouent un rôle important dans la satisfaction des besoins actuels et futurs en nourriture, médicaments et matériaux de construction. Entre autres, le *Tsiperifery* ou poivre sauvage de Madagascar est une ressource très convoitée au niveau de la gastronomie mondiale pour son goût particulier. Cela occasionne l'émergence d'une filière de l'espèce au niveau national et international. Néanmoins, la collecte de l'espèce est destructive et ne permet pas sa régénération en milieu naturel. La connaissance de l'aire de distribution potentielle de la ressource à Madagascar s'avère alors être un outil indispensable afin de faciliter les prises de décisions des acteurs et des chercheurs dans la filière pour promouvoir son exploitation durable. L'étude s'est basée sur le système d'information géographique (SIG).

Des modèles de distribution de l'espèce ont été alors produits avec le logiciel de modélisation MaxEnt. Le modèle de la distribution actuelle a une Surface Incluse sous la Courbe excellente de 0,94 et celui de la distribution potentielle en 2100 possède une Surface Incluse sous la Courbe de 0,939 ; ce qui montre un pouvoir prédictif élevé. Ces deux modèles ont permis d'estimer les surfaces de présence du *Tsiperifery* par district. L'analyse des données obtenues a confirmé que 31% de la surface totale de présence actuelle de l'espèce est exploitable et une diminution globale de 70% de cette surface est estimée en 2100. Selon les modèles d'accessibilité aux bassins d'approvisionnement produits dans ArcGIS, les districts de Moramanga, Befotaka, Midongy Atsimo et Andapa sont qualifiés d'intéressants en termes d'exploitation en raison de leur proximité aux marchés et de leur superficie exploitable assez importante par rapport à celle des autres districts. Ces résultats permettent alors de dire que l'exploitation de manière durable de ce poivre sauvage est plus bénéfique pour la survie de l'espèce.

Cependant, les résultats obtenus manquent de précision et méritent des validations sur terrain, notamment ceux sur l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement. Des recommandations sont orientées vers les recherches aux niveaux plus locaux afin d'avoir des résultats plus fiables et sur la valorisation durable du poivre sauvage de Madagascar.

Mots clés : *Tsiperifery*, modèles, distribution, bassins d'approvisionnement, Madagascar.

Abstract

Plant diversity is vital for survival and well-being of humankind. Various wild plants play an important role in meeting current and future needs for food, medicines and building materials. Among others, *Tsiperifery* or wild pepper from Madagascar is one of the most wanted spices in gastronomy for its special taste. This leads to the advent of its sector at national and international level. Nevertheless, the species collection does not allow its regeneration. Knowledge of the potential range of *Tsiperifery* in Madagascar is imperative in order to facilitate decision-making in this sector so as to promote its sustainable exploitation. The study was based on the Geographic Information System (GIS).

Models of distribution were then produced with the MaxEnt modeling software. The current distribution model has an excellent Area under Curve the Curve of 0.94 and the Potential Distribution in 2100 has an AUC of 0.939; it shows that the models have a great predictive power. These two models are used to estimate the potential range's areas of *Tsiperifery* in Madagascar. The data analysis confirmed that 31% of the total area of this potential range is available for consumption and an overall decrease of 70% of this area is estimated in 2100. According to the accessibility models produced with ArcGIS, districts of Moramanga Befotaka, Midongy Atsimo and Andapa are the most interesting supply areas because of their proximity to markets and their large usable area compared to other districts. These results suggest that the exploitation of this wild pepper in a sustainable way is advantageous for the species survival.

However, the results are not yet precise and deserve validation, in particular those on accessibility to supply basins. Consequently, some recommendations are proposed on doing research in more local places to have reliable results and also on the sustainable valuation of the wild pepper of Madagascar.

Key words: *Tsiperifery*, models, distribution, supply areas, Madagascar.

Famintinana

Ny fisian'ny karazan-javamaniry samihafa dia ilain'ny olombelona amin'ny fivelomany sy ny fahasalamany. Maro ireo zavamaniry-dia izay mamaly ny filàn'ny olombelona ara-tsakafo, manome azy fanafody sy ireo fitaovam-panorenana isan-karazany ampiasainy ankehitriny sy ny amin'ny ho avy. Anisan'izany ny *Tsiperifery*, io no fiantsoana ny dipoavatra-dia avy eto Madagasikara ; maro ireo mitady azy atao amin'ny sakafo, indrindra fa ny vahiny noho ny tsirony tena miavaka. Izany no mahatonga ny tsenan'izy io sy ny fitrandrahana azy miroborobo ankehitriny eto anivon'ny firenena ary indrindra moa fa amin'ny sehatra iraisam-pirenena. Manimba ary tsy mamela ny fitomboan'ity zavamaniry ity anefa ny fomba fitrandrahana azy ankehitriny. Noho izany dia ilaina ny mahafantatra ireo toerana mety mampaniry ny *Tsiperifery* eto Madagasikara mba hanamoràna ny fanapahan-kevitra ho an'ny mpandraharaha isa-tsokajiny sy ireo mpikaroka miasa ao anatin'io sehatra io ary koa mba ahafahana mitrandraka azy amin'ny fomba maharitra. Ka ny taosarintany no fitaovana nampiasaina anaovana izany.

Ny modely miendrika sarin-tany mampiseho ny fizarazaran'ny toerana mety ahitana io dipoavatra io dia azo avy amin'ny MaxEnt. Ny modely maneho ny fizarazarana amin'izao fotoana izao dia manana "AUC" lehibe : 0,94 ary ilay maneho ny fizarazarana amin'ny taona 2100 kosa dia manana "AUC" : 0,939; izany dia manoporofa fa afaka maminavina tsara ny trangan-javatra mety hiseho ny MaxEnt raha ny momba ny fizarazaran'ny toerana ahitana ny *Tsiperifery*. Ireo modely roa nivoaka ireo no nampiasaina mba anombanana ny sarin-tany maneho ny voho mety ahitana ny *Tsiperifery* isaky ny distrika. Araka ireo tarehin-kevitra azo dia fantatra fa 31% ny fitambaran'ny faritra mety ahitana io dipoavatra io amin'izao fotoana izao dia afaka trandrahina ary ahitana fihenana ankapobeny 70% izany faritra izany raha ny tombana amin'ny 2100. Araka ny sarin-tany maneho ireo toeram-pamatsiana avy tamin'ny ArcGIS kosa dia ny distrikan'i Moramanga sy Befotaka sy Midongy Atsimo ary Andapa no nahafeno fepetra fa afaka trandrahina mandritra ny fotoana maharitra noho ny fahakekezan'ny tsena sy ny faritra azo trandrahina midadasika raha oharina amin'ny distrika hafa. Ireo voka-pikarohana azo ireo dia ahazoana milaza fa ny fitrandrahana ny *Tsiperifery* amin'ny fomba maharitra no nisafidy tsara mba tsy ahalany tamingana io zavamaniry io.

Na izany aza anefa dia dia mila hamarinina tsara ny voka-pikarohana azo, indrindra fa ireo mikasika ny toeram-pamatsiana. Noho izany dia manolotra soso-kevitra ity asa ity ny amin'ny fitarihana ny fikarohana any amin'ny faritra kelikely kokoa mba ho azo antoka ny voka-pikarohana ary koa ny amin'ny fitrandrahana ny *Tsiperifery* mba ho tena maharitra.

Teny fototra: *Tsiperifery*, modely (sarin-tany), fizarazarana, toeram-pamatsiana, Madagasikara.

Table des matières

Remerciements.....	i
Présentation des partenaires	ii
Résumé.....	iii
Abstract	iv
Famintinana.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des cartes	viii
Liste des figures	viii
Liste des équations	viii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations.....	x
Glossaire.....	xii
Introduction.....	1
Partie 1 : Matériels et Méthodes.....	3
1.1. Problématique	3
1.2. Hypothèses	4
1.3. Etat des connaissances	5
1.3.1. Systématique du <i>Tsiperifery</i>	5
1.3.2. Description botanique et phénologie.....	6
1.3.3. Niche écologique.....	8
1.4. Matériels.....	8
1.5. Méthodes.....	9
1.5.1. Détermination de l'aire potentielle de répartition du <i>Tsiperifery</i>	9
1.5.1.1. Notion d'entropie maximale.....	9
1.5.1.2. Choix de la méthode.....	10
1.5.1.3. Modélisation de la distribution du <i>Tsiperifery</i>	10
1.5.1.4. Prédiction de la couverture forestière en 2100.....	12
1.5.2. Calcul des surfaces exploitables.....	14
1.5.3. Accessibilité aux bassins d'approvisionnement	15

1.6.	Limites méthodologiques	17
1.7.	Résumé Méthodologique.....	18
1.8.	Cadre opératoire	19
Partie 2 : Résultats.....		22
2.1.	Distribution du <i>Tsiperifery</i>	22
2.1.1.	Prédiction de la couverture forestière en 2100.....	22
2.1.2.	Modèles de distribution proprement-dit du <i>Tsiperifery</i>	23
2.2.	Détermination des surfaces exploitables	30
2.3.	Identification des bassins d’approvisionnement.....	34
Partie 3 : Discussions et Recommandations.....		37
3.1.	Discussions méthodologiques	37
3.2.	Discussions sur les résultats	38
3.2.1.	Distribution potentielle du <i>Tsiperifery</i>	38
3.2.2.	Surfaces de présence de l’espèce.....	41
3.2.3.	Bassins d’approvisionnement.....	42
3.3.	Vérification des hypothèses	42
3.4.	Recommandations	44
Conclusion.....		50
Références Bibliographiques.....		52
Annexe 1 : Description des quatre morphotypes de <i>Tsiperifery</i> (RAFITOHARSON, 2016).....		I
Annexe 2 : Illustration de la courbe ROC sur MaxEnt pour le modèle de distribution actuelle.....		II
Annexe 3 : Illustration du seuil de 10 percentile training presence donné par MaxEnt.....		III
Annexe 4 : Cartes des couvertures forestières prédites en 2047, 2075 et 2100		IV
Annexe 5 : Plages de valeurs des variables influençant la distribution du <i>Tsiperifery</i>		VII
Annexe 6 : Surfaces de présence du <i>Tsiperifery</i> par district pour selon le modèle de distribution actuelle		IX
Annexe 7 : Surfaces de présence du <i>Tsiperifery</i> par district pour selon le modèle de distribution potentielle en 2100		XI
Annexe 8 : Niche écologique du <i>Tsiperifery</i> issue de l’étude en 2011 (par RAZAFIMANDIMBY)		XIII

Liste des cartes

Carte 1 : Aire de distribution actuelle (à gauche) et aire de distribution potentielle en 2100 du Tsiperifery (à droite).....	25
Carte 2 : Carte de présence/absence actuelle (à gauche) et carte de présence/absence en 2100 du Tsiperifery (à droite)	26
Carte 3 : Carte de présence/absence actuelle du Tsiperifery avec SAPM et TGRNR	27
Carte 4 : Surfaces de présence du Tsiperifery selon le modèle de distribution actuelle	32
Carte 5 : Pourcentage des pertes en surface de présence du Tsiperifery par district en 2100.....	33
Carte 6 : Carte des bassins d'approvisionnement en Tsiperifery actuels (à gauche) et en 2100 (à droite)	36

Liste des figures

Figure 1 : Racine crampon de Tsiperifery (RAKOTONASOLO, 2009)	6
Figure 2 : Liane présentant un dimorphisme foliaire (RATSARAEFATRARIVO, 2012).....	6
Figure 3 : Tsiperifery en fructification présentant une forte variabilité dans la maturité des grappes (RATSARAEFATRARIVO, 2012)	7
Figure 4 : Illustration du module Calculate areas.....	14
Figure 5 : Résumé Méthodologique	18

Liste des équations

Equation 1 : Formule de l'entropie (SHANNON, 1948).....	9
Equation 2 : Formule de l'indice Kappa (CONGALTON, 1991).....	14
Equation 3 : Formule simplifiée de l'indice Kappa (COHEN, 1960)	14
Equation 4 : Impédance de la zone d'étude (ANDY, 2000)	16
Equation 5 : Valeur de friction pour une cellule (traversé horizontal ou vertical) (ANDY, 2000).....	17
Equation 6 : Valeur de friction pour un pixel (traversé diagonal) (ANDY, 2000).....	17

Liste des tableaux

Tableau 1 : Matrice de confusion.....	13
Tableau 2 : Friction des facteurs	16
Tableau 3 : Matrice de confusion pour la prédiction de la couverture forestière en 1993	22
Tableau 4 : Matrice de confusion pour la prédiction de la couverture forestière en 2010	22
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des prédictions pour aboutir à la couverture forestière de 2100.....	23
Tableau 6 : Contribution des variables sur la répartition actuelle du Tsiperifery	28
Tableau 7 : Contribution des variables sur la répartition du Tsiperifery en 2100.....	29
Tableau 8 : Bassins d'approvisionnement les plus accessibles selon le modèle de distribution actuelle	34

Tableau 9 : Bassins d'approvisionnement situés entre 5 à 15 heures des marchés.....	34
Tableau 10 : Bassins d'approvisionnement les plus accessibles selon le modèle de distribution en 2100	35
Tableau 11 : Tableau comparatif de l'étude en 2011 et celle actuelle sur la distribution du Tsiperifery	38
Tableau 12 : Tableau comparatif de la contribution des paramètres environnementaux sur la distribution du Tsiperifery pour le modèle en 2011 et celui actuel	40
Tableau 13 : Cadre logique d'intervention.....	47

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

ANN : Artificial Neural Network

AP : Aires Protégées

AUC : Area Under Curve

BD : Base de Données

BioSceneMada : Biodiversity Scenarios for Madagascar

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CLB : Communauté Locale de Base

DP Forêts et Biodiversité : Dispositif de recherche et d'enseignement en Partenariats Forêts et Biodiversité

DRFGRN : Département de Recherches Forestières et Gestion des Ressources Naturelles

DVRF : Direction de la Valorisation des Ressources Forestières

FOFIFA : FOibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny FAmpandrosoana eny Ambanivohitra ou Centre national de recherche appliquée au développement rural

FTM : Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (Institut Géographique de Madagascar)

GPS : Global Positioning System

km/h : kilomètre par heure

ha : hectare

IPCC : Inter-gouvernemental Panel on Climate Change

MaxEnt : Maximum Entropy

MBG : Missouri Botanical Garden

mm : millimètre

MOLUSCE : MOdules for Land USE Change Evaluation

NAP : Nouvelles Aires Protégées

PERR-FH : Projet Eco-Regional REDD+ - Forêts Humides de Madagascar

PFNL : Produit Forestier Non Ligneux

RBG Kew : Royal Botanic Garden Kew

REBIOMA : Réseau de la Biodiversité de Madagascar

ROC : Receiver Operating Characteristic

SAPM : Système des Aires Protégées de Madagascar

SIG : Système d'Information Géographique

SRTM : Shuttle Radar Topographic Mission

TGRNR : Transfert de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables

WCS : Wildlife Conservation Society

Glossaire

Aire de distribution d'une espèce : zone géographique où cette espèce est présente.

Bassin d'approvisionnement : espace contenant un ensemble des fournitures, des produits destinés à approvisionner un marché.

Espace : étendue, surface ou région.

Feuille cordiforme : feuille en forme de cœur.

Infrutescences : fruits groupés issus d'une inflorescence.

Modélisation : La modélisation, en géographie, produit de modèles spatiaux. Les modèles, basés majoritairement sur des méthodes de statistiques spatiales, sont des représentations schématiques de réalités matérielles ou immatérielles. Les modèles des géographes sont largement utilisés pour faire ressortir les schémas généraux d'organisation de phénomènes divers dans l'espace et ainsi mieux les percevoir (VOIRON, 2005).

Niche écologique : ensemble des paramètres environnementaux (climatiques, édaphiques, biotiques) dont dépend une espèce donnée et qui la différencient des autres espèces occupant le même habitat.

Niche effective : définie par la combinaison des interactions négatives (comme la compétition et la prédation) qui restreignent la présence d'une espèce et des interactions positives (comme la facilitation) qui peuvent étendre la plage environnementale dans laquelle une espèce est capable de se développer.

Oblongue : plus long que large et arrondie aux deux extrémités.

Plantes sauvages apparentées à des plantes cultivées : plantes possédant une multitude de gènes d'une grande valeur potentielle pour l'amélioration génétique des plantes appartenant au même genre. Beaucoup de ces caractéristiques sont liées à l'adaptation aux changements climatiques.

Plante sciaphile : plante qui ne peut croître que sous ombrage.

Rameau plagiotrope (tige horizontale) : tige qui pousse et émise horizontalement.

Rameau orthotrope (tige droite) : tige qui pousse et émise verticalement vers le haut.

Ressource naturelle : substance, organisme ou objet présent dans la nature et qui fait, dans la plupart des cas, l'objet d'une utilisation pour satisfaire les besoins (énergies, alimentation, agrément) des humains, animaux ou végétaux.

SIG : ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées.

Introduction

La diversité végétale est vitale pour la survie et le bien-être de l'humanité. Nombre d'espèces végétales domestiquées sont cruciales pour la sécurité alimentaire mondiale, tandis que d'autres sont d'une grande importance dans des domaines tels que la production de bois ou de biocarburant. Outre les espèces cultivées, de nombreuses plantes sauvages jouent encore un rôle important dans la satisfaction des besoins locaux en nourriture, médicaments et matériaux de construction ; les espèces sauvages apparentées aux plantes cultivées ont aussi une grande importance pour les programmes d'amélioration des plantes. Il existe des centaines d'espèces et de variétés, aujourd'hui sous-utilisées, qui présentent des caractères intéressants pour satisfaire les besoins actuels et futurs de l'Homme. La valeur de nombreuses autres espèces végétales reste toujours à découvrir. Parmi ces espèces végétales, le poivre sauvage de Madagascar tient une place assez importante actuellement vu l'intérêt porté à son égard au niveau de la gastronomie internationale.

Ce dernier, plus connu sous le nom « *Tsiperifery* » ou « *Voatsiperifery* » n'a suscité l'intérêt scientifique que depuis peu. Il appartient au genre *Piper*, de la famille des PIPERACEAE. L'arrivée du projet Crop Wild Relatives (Plantes Sauvages Apparentées) en 2004 a incité les chercheurs à s'intéresser à cette famille (TOUATI, 2012). Ce qui fait que les données scientifiques concernant ce poivre sont peu nombreuses et même insuffisantes. Il s'agit d'un produit forestier non ligneux (PFNL), rencontré en majorité dans les forêts de l'Est malgache. Ses autres noms vernaculaires sont : « *Dipoavatra*, *Tsimahalatsaka*, *Sakarivovahy*, *Sakaiala*, *sakarivonala* ». Il est surtout utilisé par la population locale comme épice et pour la médecine traditionnelle, c'est un remède contre les blessures, la toux, les maux d'estomac (MANJATO et al., 2010 ; RAZAFIMANDIMBY, 2011). Présentant des caractéristiques organoleptiques uniques selon les gastronomes occidentaux, celui-ci est classé comme produit de haut de gamme de poivre à haute valeur ajoutée (TOUATI, 2012).

De ce fait, le poivre sauvage a une grande importance économique et sociale, mais, malheureusement, son exploitation est destructive. Le mode de collecte consiste surtout à l'arrachage de lianes et à l'abattage des arbres tuteurs car les grains sont positionnés entre 8 à 20 m sur les lianes (LEVESQUE, 2012). En outre, une étude sur le *Tsiperifery* de Tsiazompaniry affirme que son habitat est victime de différents types de perturbation. A part la déforestation qui favorise les trouées dans la forêt (RAZAFIMANDIMBY, 2011), les changements climatiques peuvent également influencer sur la distribution de l'espèce par la perturbation de l'équilibre écologique au sein de cet habitat. Le *Tsiperifery* se rencontre surtout dans la forêt dense humide orientale et sa probabilité de présence est élevée dans la forêt humide d'altitude. Il se rencontre dans les bas-fonds et est absent sur les crêtes (RAZAFIMANDIMBY, 2011 ; ANDRIANOELISOA, 2013).

INTRODUCTION

Il est donc important de connaître l'aire potentielle de répartition de cette espèce et les perturbations qui peuvent troubler son habitat afin de proposer des actions effectives pour une meilleure gestion de la ressource. Par ailleurs, l'analyse spatiale peut améliorer considérablement la compréhension et le suivi de la biodiversité étant donné que les résultats de l'analyse spatiale permettent de formuler et mettre en œuvre des stratégies de conservation mieux ciblées et donc plus efficaces (GUARINO et al., 2002). Les résultats des études spatiales peuvent fournir une information cruciale sur la biodiversité présente dans des zones géographiques données et peuvent être utilisés à des fins diverses. En effet, cette étude propose de donner un outil de prise de décision pour la gestion durable du *Tsiprifery* par le biais des cartes de probabilité de présence de l'espèce et celle de ses bassins d'approvisionnement potentiels. Les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) y sont adoptés, ils permettent de conduire des analyses complexes combinant différentes sources de données (spatiales) et de générer des cartes lisibles, facilitant ainsi l'assimilation des résultats par les autorités concernées et encourageant le développement et la mise en œuvre des politiques de conservation et/ou de valorisation (GUARINO et al., 2002). Une question est alors soulevée : « Comment l'aire de distribution de *Tsiprifery* à Madagascar évolue-t-elle dans le temps pour permettre une gestion durable de l'espèce? ». Trois hypothèses sont alors suggérées pour répondre à cette question : la première dit que *la répartition du Tsiprifery est fortement tributaire des précipitations*, la seconde énonce que *les surfaces potentiellement exploitables de l'espèce sont sujettes à des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales* et la troisième stipule que *la proximité de la ressource par rapport aux marchés permet de déterminer les bassins d'approvisionnement les plus prometteurs*.

Afin d'aboutir à l'objectif de cette étude, ce document se divise en trois (3) parties, la première consacrée aux matériels et méthodes avec le rappel de la problématique et des hypothèses, les états de connaissances sur le *Tsiprifery* et l'entropie maximale et enfin les phases de conception des modèles basés essentiellement sur MaxEnt et ArcGIS ; la seconde partie concerne la présentation et l'interprétation des résultats et la troisième aborde les discussions sur la méthodologie, sur les résultats et les recommandations à l'issue des analyses des résultats.

Partie 1 : Matériels et Méthodes

1.1. Problématique

Madagascar reste un pays majoritairement agricole, parmi les plus pauvres du monde. Cette pauvreté rurale conduit souvent à de fortes pressions des activités agricoles sur les ressources naturelles, notamment forestières (PHILIPPE et al., 2006). Cela se traduit par la pratique de la culture sur brûlis, « tavy ». Ce phénomène de déforestation combiné avec la collecte destructive du *Tsiperifery* constitue une grande menace pour cette ressource. En effet, la méthode de cueillette la plus répandue consiste à abattre le tuteur car la liane peut grimper jusqu'à plus de 15 mètres, hauteur où se situe la couronne fructifère (RAZAFIMANDIMBY, 2011). Aussi, compte tenu des revenus engendrés par l'exploitation et l'augmentation de la demande de la part des agents commerciaux, de plus en plus de paysans tendent à s'investir dans l'exploitation du poivre (BERNARD et al., 2014). Outre les pressions anthropiques qui pèsent sur ce poivre sauvage, d'autres facteurs naturels tels que les changements climatiques peuvent également avoir des répercussions néfastes sur la phénologie de l'espèce et notamment sur sa distribution (LEVESQUE, 2012).

Par conséquent, les cartes des aires de distribution potentielle de l'espèce, s'avèrent très utiles. Ces cartes peuvent, au vu des données d'observation, orienter des recherches et stimuler des investigations dans la niche écologique de l'espèce qui ne semble pas occupée. Elles sont utiles non seulement en tant que base de données mais aussi dans une optique de gestion des espèces menacées. En effet, à partir d'une carte de domaine potentiel et d'une carte relevant les sites où l'espèce est présente, il est possible de repérer quelles sont les zones favorables à l'espèce qui ne sont pas exploitées et également de proposer un plan de gestion (enrichissement) permettant à l'espèce de coloniser de tels endroits. La détermination des zones moins favorables et la proposition de divers aménagements susceptibles de les améliorer peuvent également être faites. Une étude sur la distribution de l'espèce a déjà été initiée en 2011 (RAZAFIMANDIMBY) mais la présente étude veut utiliser d'autres données que celles employées auparavant afin d'actualiser les résultats et de faire des analyses différentes. La question principale qui se pose est alors : *Comment l'aire de distribution de Tsiperifery à Madagascar évolue-t-elle dans le temps afin de faciliter les prises de décision pour une gestion durable de l'espèce?*

De cette problématique découlent les questions de recherche suivantes :

- Quels paramètres influencent le plus la distribution du *Tsiperifery*?
- Comment évolue la répartition de l'espèce en 2100?
- Dans quels districts se trouvent les superficies exploitables les plus importantes?
- Où se trouvent les bassins d'approvisionnement en *Tsiperifery* les plus intéressants au niveau national?

1.2. Hypothèses

Afin de répondre à la problématique, trois (3) hypothèses sont émises :

Hypothèse 1 : La répartition du Tsiperifery est fortement dépendante des précipitations

Selon une précédente étude, la présence de couverture forestière est le paramètre qui influe le plus sur la distribution de l'espèce (RAZAFIMANDIMBY, 2011). En effet, le *Tsiperifery* est une essence à tempérament sciaphile et a donc besoin de l'ombrage des autres arbres pour se développer. Il se rencontre surtout dans les zones où la canopée est fermée. Ce poivre se développe dans des endroits humides, bas fond à bioclimat humide et sub-humide dans le centre, dans le Nord et surtout à l'Est, rarement dans le bioclimat sec de l'Ouest (MANJATO et al., 2010). Pour son développement, le poivre sauvage de Madagascar a donc besoin d'une certaine quantité d'eau issue notamment des précipitations.

D'après cette hypothèse, le pourcentage de contribution des précipitations sur la répartition de l'espèce doit être d'autant important que celui de la couverture forestière.

Hypothèse 2 : Les surfaces potentiellement exploitables de l'espèce sont sujettes à des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales

La loi N° 2001/05 portant code de gestion des aires protégées stipule que les droits d'usage sont des prélèvements à but non commercial pour les besoins domestiques, vitaux et/ou coutumiers, réservés à la population riveraine (Article 41). De plus, les activités liées aux droits d'usage sont réglementées dans les nouvelles aires protégées, notamment la récolte des fruits et des plantes comestibles respectant les principes d'utilisation durable (Article 8, Arrêté interministériel n°52005/2010¹). Ce qui signifie que la collecte de *Tsiperifery* à but lucratif à l'intérieur des AP et des NAP est interdite. Concernant les transferts de gestion des ressources naturelles renouvelables, les communautés de base peuvent procéder à la collecte de la ressource si celle-ci est contractualisée avec l'Etat lors de la demande de gestion. De ce fait, l'exploitation dans ces zones est restreinte. Certaines contraintes environnementales telles que les changements climatiques, causant le manque de pluie qui retarderait la fructification (LEVESQUE, 2012), et la déforestation peuvent entre autres réduire les surfaces potentiellement exploitables de l'espèce dans le futur.

Cette seconde hypothèse se veut d'estimer et de comparer les surfaces de présence de l'espèce en dehors des AP, NAP et TGRN et celles qui y sont comprises. Il sera alors possible d'en déduire si les aires de *Tsiperifery* pouvant être exploitées sont importantes par rapport à celles qui en sont défendues. Elle veut également comparer les superficies exploitables actuelles et pour 2100 à l'issue des modèles de prédiction pour connaître la variation.

¹ Arrêté interministériel n°52005/2010 modifiant l'arrêté interministériel Mine-Forêts n°18633 du 17 octobre 2008 portant mise en protection temporaire globale des sites visés par l'arrêté n°17914 du 18 octobre 2006 et levant la suspension de l'octroi des permis miniers et forestiers pour certains sites.

Hypothèse 3 : La proximité de la ressource par rapport aux marchés permet de déterminer les bassins d'approvisionnement

D'après des études faites auparavant, trois (3) bassins de collecte de poivre sauvage ont été identifiés : les corridors de l'Angavo (avec Anjozorobe comme centre névralgique), de l'Ankaï (polarisé autour de Moramanga) et de Fianarantsoa (LEVESQUE, 2012 ; TOUATI, 2012). Toutefois, la notion d'accessibilité physique qui est la liberté de déplacement dans l'espace peut aider à identifier d'autres bassins d'approvisionnement. Il s'agit là de mesurer les facteurs qui peuvent rendre difficile l'accès à la ressource, puis de distinguer les différents marchés potentiels comme débouchés. Cela suppose qu'une offre éventuelle peut être déduite vu que les surfaces exploitables sont connues par le biais de la deuxième hypothèse.

En se référant à cette troisième hypothèse, les bassins d'approvisionnement qui sont proches des marchés sont les plus intéressants et méritent une plus grande considération par rapport à ceux qui sont éloignés.

1.3. Etat des connaissances

1.3.1. Systématique du *Tsiperifery*

La classification systématique proposée par MBG pour l'espèce est la suivante :

Règne : VEGETAL

Embranchement : SPERMATOPHYTES

Sous-embranchement : ANGIOSPERMES

Classe : DICOTYLEDONES

Sous-classe : MAGNOLIDES

Ordre : PIPERALES

Famille : PIPERACEAE

Genre : *Piper*

Nom vernaculaire : *Tsiperifery, Voatsiperifery, Dipoavatra, Tsimahalatsaka, Sakarivovahy, Sakaiala, sakarivonala.*

Nom commun : Poivre sauvage de Madagascar

1.3.2. Description botanique et phénologie

Le *Tsiperifery* est une liane dioïque à tige devenant ligneuse, grimpant à 5-20 m sur les arbres. Ses rameaux sont stériles et rampent ou grimpent en adhérant au support par des racines crampons naissant au niveau des nœuds. Il présente des feuilles simples, entières, alternes, uniquement cordiformes chez les plantules et les jeunes plantes. Le *Tsiperifery* présente une inflorescence en grappe solitaire, opposée aux feuilles. Les fruits sont pédonculés globuleux de couleur rouge ou rouge orangé à maturité (RAZAFIMANDIMBY, 2011).



Figure 1 : Racine crampon de *Tsiperifery* (RAKOTONASOLO, 2009)

Les lianes adultes présentent deux types de rameaux manifestant un dimorphisme foliaire (RAZAFIMANDIMBY, 2011) :

- rameaux plagiotropes reproductifs à feuilles oblongues qui se ramifient et forment un feuillage dense autour du tronc du tuteur et produisent des inflorescences donc des infrutescences (grappes) ;
- rameaux orthotropes végétatifs à feuilles cordiformes qui développent des racines-crampons adhésives au niveau des nœuds et s'accrochent sur les écorces des arbres tuteurs.



Figure 2 : Liane présentant un dimorphisme foliaire (RATSARAEFATRARIVO, 2012)

La fructification des pieds de poivre sauvage s'avère très irrégulière. Les populations de *Tsiperifery* connaissent deux pics de fructification, l'un en juin-juillet et l'autre, en septembre-novembre. Un pied ne fructifie qu'une fois dans l'année. Cependant, il est possible de trouver des grappes à maturité de début mars à fin janvier, en très petites quantités en dehors de ces pics de fructification. D'autre part, la maturation des grappes nécessite 2 à 4 mois. Ainsi, sur le même plant, les lianes sont à maturité différente. De même, sur la même grappe, les grains ne sont pas mûres simultanément (TOUATI, 2012).



Figure 3 : *Tsiperifery* en fructification présentant une forte variabilité dans la maturité des grappes (RATSARAEFATRARIVO, 2012)

La fructification connaît également de fortes variations interannuelles, avec généralement une année de production très abondante suivie d'une année de très faible production. Cette alternance de la productivité n'a pas lieu en même temps pour chacune des lianes. Ainsi une liane peu connaît une fructification abondante alors qu'une autre à proximité peut ne pas fructifier du tout.

La reproduction du *Tsiperifery* est surtout végétative par les tiges, les racines ou stolons. Des essais de bouturage ont été également effectués pour la multiplication de l'espèce en vue de sa domestication. Il faut préciser que quatre (4) morphotypes de *Tsiperifery* ont été décrits jusqu'à présent (cf. annexe 1)

1.3.3. Niche écologique

Le *Tsiperifery* se rencontre surtout dans la partie orientale de Madagascar, particulièrement dans la forêt dense humide sempervirente orientale. Selon RAZAFIMANDIMBY (2011), la répartition de ces lianes est dépendante de la couverture forestière du fait que c'est une espèce à tempérament sciaphile et les bas-fonds sont principalement leur habitat privilégié. Les plantules sont effectivement et extrêmement abondantes, par îlots ; dans des zones très ombragées et sur les substrats forestiers humides (RATSARAEFATRARIVO, 2012). Néanmoins, le *Tsiperifery* a une mauvaise tolérance à la perturbation de son habitat et supporte mal les trouées et les ouvertures de la canopée (RAZAFIMANDIMBY, 2011).

1.4. Matériels

Afin de déterminer la distribution potentielle du poivre sauvage de Madagascar, il a fallu des données d'observation de l'espèce et des variables environnementales. Concernant les bassins d'approvisionnement, différents jeux de données ont également été indispensables. Les données utilisables pour la réalisation de cette étude sont :

- des points d'occurrence géoréférencés de l'espèce qui ont été collectés au niveau de l'Herbarium de Tsimbazaza, du DRFGRN de FOFIFA et sur le site web Tropicos (www.tropicos.org) afin de constituer les données d'observation. Au total, 193 points d'occurrence du *Tsiperifery* à Madagascar ont été recensés. Ce nombre de points est largement suffisant pour le lancement de la modélisation sur MaxEnt ;
- 19 variables bioclimatiques de l'IPCC (http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3_download.html) en guise de contraintes pour la modélisation ; s'ajoutent à cela les couches raster sur l'altitude SRTM (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) et la couverture forestière en 2013 (issue du PERR-FH) puis celle en 2100 (issue d'une prédiction avec les données concernant les forêts à Madagascar sur <http://bioscenemada.cirad.fr/maps/>) ;
- celles sur le réseau routier, sur les limites et les chefs-lieux de districts à Madagascar qui sont géoréférencées et issues de BD500² (1998) et BD_commune (2008), essentielles pour l'identification des bassins d'approvisionnement potentiels.

Différents logiciels ont été mobilisés dans le cadre de ce travail afin d'atteindre les objectifs, dont : Excel 2103 pour l'enregistrement des données GPS, ArcGIS 10.3 pour les prétraitements (uniformisation) et traitements des données sur l'aire de distribution, les surfaces exploitables et les bassins de collecte, MaxEnt 3.3.3.k pour la production des cartes de répartition potentielle du *Tsiperifery* et QGIS 2.12.2 pour la prédiction de la couverture forestière en 2100.

² BD500 : base de données géographiques mise en place par l'Institut géographique et hydrographique national (FTM), contenant les données sur le réseau routier, à partir des cartes de base de Madagascar en 1998, à l'échelle 1/500 000

1.5. Méthodes

1.5.1. Détermination de l'aire potentielle de répartition du *Tsiperifery*

1.5.1.1. *Notion d'entropie maximale*

L'entropie est une fonction, fondamentale en théorie de l'information, qui retourne à la quantité d'information délivrée/contenue par une source S (SHANNON, 1948). Pour une source S comportant n symboles, un symbole i a une probabilité p_i d'apparaître. Alors l'entropie de la source S est définie comme suit :

Equation 1 : Formule de l'entropie (SHANNON, 1948)

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

Avec : $H(S)$ étant l'indice de SHANNON.

L'entropie est une mesure d'« incertitude ». Plus la source émet des informations différentes, plus l'entropie (incertitude) est grande et inversement. Si la source émet des valeurs avec le même signal, alors l'entropie est nulle ; par contre, elle est maximale quand les valeurs prennent chacune un signal différent car dans ce cas la distribution est uniforme et la source S est maximale informative. En d'autres termes, l'entropie correspond à la caractérisation statistique de l'information manquante (VENDITTI, 1998).

La maximisation de l'entropie se base sur deux (2) principes :

- le principe du rasoir d'Occam « *L'hypothèse la plus simple est souvent la bonne* », c'est-à-dire qui ne présume pas au-delà de ce qui est connu ;
- le principe d'indifférence (LAPLACE) : en cas d'information manquante, le mieux à faire est de considérer les événements comme équiprobables (distribution uniforme).

Le maximum d'entropie (MaxEnt) consiste à choisir, pour un phénomène donné, une distribution qui maximise l'entropie (SHANNON), c'est-à-dire « l'incertitude ». Il correspond à la loi de probabilité permettant de prendre en compte un maximum d'incertitude dans le processus de modélisation. Cette modélisation est réalisée à partir de données observées et en fonction de contraintes connues (ELITH et al., 2011 ; S. J. PHILLIPS et al., 2006 ; S. J. PHILLIPS et al., 2004). Le modèle statistique MaxEnt est principalement utilisé en écologie des populations, il permet d'évaluer la distribution spatiale potentielle de taxa grâce à des données d'observation accompagnées de variables environnementales.

1.5.1.2. *Choix de la méthode*

Il arrive souvent que les données de présence disponibles ne couvrent pas la totalité de l'aire de distribution naturelle d'une espèce. Les programmes de modélisation de la distribution d'espèces comme MaxEnt (PHILIPS et al., 2006) permettent d'approcher la distribution dans sa globalité et sont des outils pratiques pour identifier les zones où il y a des chances de trouver une espèce. Les résultats de l'analyse de modélisation de la distribution d'espèces peuvent être utilisés dans différentes analyses spatiales combinées, par exemple pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la distribution d'espèces, identifier les zones de collecte ou les zones appropriées et la production forestière.

Le programme MaxEnt identifie, comme zones d'occurrence possible d'une espèce, les sites où les conditions environnementales sont comparables à celles où l'espèce a déjà été observée. Pour identifier ces zones de distribution potentielle, les données requises comprennent les points de présence de l'espèce et les rasters des variables environnementales qui couvrent la zone étudiée. Le modèle calcule alors la probabilité de la présence de l'espèce dans chaque cellule des rasters utilisés.

La distribution avec l'entropie maximale est celle qui est la plus uniforme et, donc, celle qu'il serait le moins arbitraire d'utiliser pour représenter une connaissance imparfaite. En pratique, c'est la distribution qui contient le moins de cas particuliers qui divergent de ce qui est le plus probable. Elle ne présume pas au-delà des données.

MaxEnt comporte un certain nombre de points forts :

- Il ne nécessite en entrée que des données de présence, en complément des variables environnementales sur toute la zone d'étude (LAHOZ-MONFORT et al., 2010 ; PEARSON et al., 2006 ; PECK et al., 2010 ; S. J. PHILLIPS et al., 2004 ; THORN et al., 2009). Il peut donc se passer de données d'absence pour fonctionner.
- Il permet aussi bien l'utilisation de variables quantitatives que qualitatives (ELITH et al., 2011 ; FRIEDLAENDER et al., 2011 ; THULLER et MÜNKEMÜLLER, 2005).
- Des algorithmes déterministes efficaces ont été développés, et garantissent une convergence vers la distribution optimale (ELITH et al., 2011).

1.5.1.3. *Modélisation de la distribution du Tsiperifery*

Pour que MaxEnt puisse traiter les rasters environnementaux, ces derniers doivent avoir les mêmes propriétés, résolution et coordonnées des coins ou sommets (vertices). D'où, avant d'entrer les données dans le programme, certains prétraitements se sont imposés que ce soit pour la distribution actuelle ou pour la prédiction en 2100.

Tout d'abord, les points GPS recensés ont dû être convertis en degré décimal et le fichier Excel a été enregistré au format « .csv ». Ensuite pour les variables d'environnement, quelques règles ont été respectées :

- la conversion des rasters en « .asc » s'est effectuée dans ArcGIS par la fonction : *conversion tools, from raster to ascii* ;
- les différents fichiers ont tous dû se trouver dans le même répertoire ;
- pour obtenir la même emprise sur l'ensemble de la zone d'étude il a fallu procéder à une extraction par masque avec le polygone cote500³ (*Extract by mask* dans *Spatial Analysis Tools*) ;
- et les différentes couches d'environnement doivent impérativement être à la même résolution. Le module *Resample* dans ArcGIS est employé à cet effet et la résolution choisie pour cette étude à été de 1 km².

Une fois ces quelques prétraitements terminés, il a suffi d'introduire les données dans MaxEnt pour qu'il puisse déterminer les zones de probabilité de présence du *Tsiperyfy*. L'un des paramètres utilisés pour évaluer la capacité prédictive d'un modèle généré par MaxEnt est la Surface Incluse sous la Courbe (en anglais : AUC) de la courbe *Receiver Operating Characteristic* (ROC) (annexe 2).

Le sous-ensemble de la zone prédite (*Fractional predicted area*) sur l'axe X fait référence au sous-ensemble de l'aire totale de l'étude où l'espèce est modélisée, alors que la sensibilité (*Sensitivity*) sur l'axe Y fait référence à la proportion de points de présence dans l'aire d'occurrence prédite par rapport au nombre total de points de présence (PHILIPPS, 2009). L'AUC est égal à la vraisemblance qu'un point de présence choisi au hasard soit situé dans une cellule du raster avec une plus grande probabilité d'occurrence de l'espèce qu'un point d'absence choisi au hasard. Pourtant, la modélisation de la distribution d'espèce dans le programme ne prend en compte que les points de présence. Afin de pouvoir quand même calculer l'AUC, MaxEnt remplace les points d'absence par des points de la zone d'étude générés de manière aléatoire. L'AUC peut alors être interprété comme la vraisemblance qu'un point de présence choisi au hasard soit situé dans une cellule du raster avec une plus grande probabilité d'occurrence de l'espèce qu'un point généré aléatoirement (PHILIPS et al., 2006).

Un modèle généré par MaxEnt atteint le plus haut pouvoir prédictif lorsque l'AUC a une valeur de 1. Ce serait le cas si tous les points de présence avaient une plus haute probabilité que les points générés aléatoirement. En pratique, aucun AUC ne sera inférieur à 0,5. Dans ce cas, les cellules du raster où il y a des points de présence n'ont pas une probabilité supérieure à celle des cellules du raster où il y a des points générés aléatoirement, et le modèle généré par MaxEnt n'a aucun pouvoir prédictif. Cette situation est reflétée dans le graphique par la courbe de référence *Random Prediction*. ARAÛJO et al. (2005) recommandent l'interprétation suivante de l'AUC pour les modèles générés : Excellente si $AUC > 0,90$; Bonne si $0,80 < AUC < 0,90$; Acceptable si $0,70 < AUC < 0,80$; Mauvaise si $0,60 < AUC < 0,70$; Invalide si $0,50 < AUC < 0,60$. Une autre fonctionnalité permettant d'évaluer la viabilité du modèle consiste à réserver une partie des données d'observation (*Test data*) pour éprouver la qualité de la distribution probable. 30% des données d'observation ont donc été affectées à cette vérification de la viabilité des modèles par le biais des valeurs de l'AUC.

³ Cote500 : Contour de Madagascar dans BD500

Pour la suite de l'étude, un seuil donné par MaxEnt a été considéré ; il représente la probabilité minimale qu'une espèce soit présente dans l'environnement d'une cellule spécifique. Ce concept suppose que les sites qui ont une probabilité supérieure au seuil ont des conditions climatiques et géophysiques appropriées pour l'espèce, tandis que cette dernière ne se trouverait pas dans les sites en dessous du seuil. Plus le seuil est élevé, plus les aires de distribution potentielle sont réduites. Il n'y a pas de valeur de seuil normalisée mais dans cette analyse, le seuil de *10 percentile training presence* (annexe 3) est utilisé : c'est la probabilité que 90% des points de présence tombent dans cette aire potentielle. Les 10% restant, qui tombent en dehors de l'aire potentielle, sont ceux qui ont un environnement atypique, qui n'entrent pas dans les limites de la niche effective. Ce choix a pour but de faciliter les analyses des données mais il faut aussi noter que les modèles sans filtrage spatiale avec un seuil de 10% de l'aire de répartition ont une sensibilité significative (DARREN, 2014).

Néanmoins, sachant que le *Tsiperifery* nécessite la présence de couverture forestière pour se développer, seules les surfaces comprises dans les forêts ayant une probabilité supérieure au seuil de *10 percentile training presence* sont considérées comme des aires de présence potentielle de l'espèce.

1.5.1.4. Prédiction de la couverture forestière en 2100

Le choix de cette date réside dans le fait que les effets des changements climatiques et de la déforestation se ressentent mieux entre des dates assez éloignées ; mais il est aussi dû à la disponibilité des données. Afin de pouvoir sortir le modèle de distribution du *Tsiperifery* en 2100, il a fallu prédire l'évolution de la couverture forestière pour cette année. Pour cela, le module MOLUSCE de QGIS a été utilisé ; il permet d'analyser, modéliser et simuler les changements d'utilisation des terres et de couverture. En guise de jeu de données, les cartes de couverture forestière à différentes périodes (1953, 1973, 1990, 2000, 2010, 2014)⁴ ont été entrées avec comme facteur de déforestation le réseau routier. Le module calcule les variations de la couverture entre deux périodes (T1 et T2). Des matrices et des cartes de transition pour le changement de couverture ont été alors produites.

MOLUSCE utilise Artificial Neural Network (ANN) ou réseau neuronal artificiel qui est un ensemble d'algorithmes optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste permettant de créer des classifications rapides.

Il simule également des automates cellulaires, qui consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps (la présence ou non de couverture forestière dans ce cas). L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état t d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ». Ce qui lui permet de modéliser le changement potentiel de la couverture forestière entre deux périodes et de simuler une carte de couverture future.

⁴ Cartes de couverture forestière issues de <http://bioscenemada.cirad.fr/maps/>

Cependant, afin d'évaluer le pouvoir prédictif de cet outil, la matrice de confusion et l'indice Kappa ont été employés. Il s'agit de s'assurer de la précision de la classification de la couverture forestière en 1990 en utilisant comme base de données les cartes de 1953 et 1973 mais aussi celle en 2010 par le biais des cartes de 1990 et 2000. Pour ce faire, il a été question de comparer les cartes de couverture forestière en 1990 et en 2010 par rapport à celles prédites par MOLUSCE à la même date et d'en déduire la précision de prédiction de ce dernier. La méthode s'est appuyée sur un échantillonnage aléatoire, c'est-à-dire que 3000 points ont été générés de manière aléatoire sur les cartes de couverture forestière puis les valeurs des pixels correspondant à ces points ont été extraites. La matrice de confusion permet ainsi de grouper les différences entre les cartes prédites par MOLUSCE et les cartes de référence⁴. La somme des éléments de la diagonale représente le nombre total de pixels correctement classés. Le rapport de ce nombre et du nombre total de pixels de la matrice donne la « précision globale » de la classification (Benhadj, 2008). Les erreurs de classification sont de deux types : omission et commission. Les erreurs d'omission surviennent chaque fois qu'un pixel qui aurait dû être affecté à une classe n'a pas été reconnu. Les erreurs de commission apparaissent quand les pixels associés à une classe sont incorrectement identifiés.

Tableau 1 : Matrice de confusion

		Points de contrôle		Total	Précision	Erreur de commission
		Forêts	Non forêts			
Carte de référence	Forêts	x_{11}	x_{12}	$\sum x_{1+}$	$\frac{x_{11}}{\sum x_{1+}}$	$1 - \frac{x_{11}}{\sum x_{1+}}$
	Non forêts	x_{21}	x_{22}	$\sum x_{2+}$	$\frac{x_{22}}{\sum x_{2+}}$	$1 - \frac{x_{22}}{\sum x_{2+}}$
Total		$\sum x_{+1}$	$\sum x_{+2}$	$\sum x_{ii}$		
Erreur d'omission		$1 - \frac{x_{11}}{\sum x_{+1}}$	$1 - \frac{x_{22}}{\sum x_{+2}}$			

L'indice Kappa évalue à partir de la matrice de confusion l'accord entre les prédictions et la référence. Il varie de 0 à 1 et s'interprète comme suit : accord très faible de 0 à 0,20 ; accord faible de 0,21 à 0,40 ; accord modéré de 0,41 à 0,60 ; accord important de 0,61 à 0,80 et accord presque parfait de 0,81 à 1 (BLUM et al., 1995).

Equation 2 : Formule de l'indice Kappa (CONGALTON, 1991)

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{+i} * x_{i+}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{+i} * x_{i+}}$$

Avec r : Nombre de lignes dans la matrice de confusion

x_{ii} : Nombre d'observations sur la ligne i et la colonne i

x_{i+} et x_{+i} : Totaux marginaux de la ligne i et de la colonne i respectivement

N : Nombre d'observations total

Cette équation peut s'écrire de la manière simplifiée suivante :

Equation 3 : Formule simplifiée de l'indice Kappa (COHEN, 1960)

$$\hat{K} = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

Avec P_o : Pourcentage réel obtenu de la classification de la couverture forestière

P_c : Probabilité pour obtenir une classification correcte

1.5.2. Calcul des surfaces exploitables

Le but étant de faire sortir pour chaque district la superficie propice au développement du *Tsiprifery*. Le module *Calculate Areas* dans ArcGIS a été employé à cet effet, il calcule les valeurs de surface de chaque entité appartenant à une classe d'entités surfaciques.

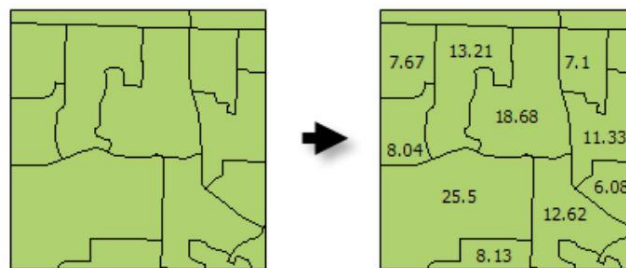


Figure 4 : Illustration du module *Calculate areas*

Puis l'analyse des données issues de ce module s'est effectuée sur Excel ; permettant ainsi de séparer les superficies comprises dans les AP, les NAP et les transferts de gestion de celles qui sont en dehors pour la période actuelle. Néanmoins, pour la prédiction de distribution de l'espèce en 2100, le calcul de ces surfaces a également été fait par district afin de voir et de comparer l'évolution de la répartition future par rapport à la distribution actuelle mais sans tenir compte des AP, NAP et transferts de gestion car ces paramètres peuvent changer au cours du temps. Il s'agit seulement d'avoir un ordre d'idée des effets des changements climatiques et de la déforestation sur l'aire potentielle de répartition du *Tsiprifery*.

1.5.3. Accessibilité aux bassins d'approvisionnement

L'accessibilité peut être définie comme la capacité d'interaction ou de contact avec des sites d'intérêt économique ou social (DEICHMANN, 1998), mais il existe une multitude de façons de définir ce concept intuitif dans la littérature. L'accessibilité est définie comme la facilité avec laquelle un emplacement peut être atteint à partir d'autres endroits. En Géographie, l'accessibilité d'un lieu est généralement définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, par un ou plusieurs individus susceptibles de se déplacer à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants (COQUIO, 2008).

Ainsi, l'accessibilité ne renvoie pas uniquement à la seule possibilité d'atteindre ou non un lieu donné, mais elle traduit également la pénibilité du déplacement, la difficulté de la mise en relation appréhendée le plus souvent par la mesure des contraintes spatio-temporelles. De ce fait, elle va dépendre non seulement de la position géographique respective des lieux d'origine et de destination, mais également du niveau de service offert par le ou les systèmes de transport utilisés pour accomplir le déplacement. Les bassins d'approvisionnement de *Tsiprifery* ont été estimés à partir des conditions d'accessibilité déterminées par le réseau routier (routes, pistes et chemins), les pentes et la distance aux marchés (Chefs-lieux de districts). Ces bassins d'approvisionnement ont été conçus comme la portion du territoire immédiatement accessible aux marchés dans lesquels le bilan de l'offre potentielle et de la consommation du poivre sauvage est positif.

Pour mettre en évidence l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement de *Tsiprifery*, la méthode par isochrones a été utilisée. Un isochrone est une ligne sur une carte qui joint des points d'égal temps de trajet à partir d'un point de référence donné. Plusieurs facteurs influent sur la forme des isochrones, tels que :

- la structure du réseau routier, qui peut faire qu'il sera possible de se déplacer plus rapidement dans certaines directions que d'autres ;
- le mode de déplacement utilisé ; ainsi une isochrone à 10 minutes (donc tous les lieux qui peuvent être atteints en moins de 10 minutes) aura une surface plus importante si le déplacement se fait en voiture que si celui-ci est la marche à pied.

Dans le cas de cette étude, la marche a été privilégiée car l'approvisionnement en *Tsiprifery* se fait surtout en forêts et les déplacements se font généralement à pied. L'outil *Cost distance* dans ArcGIS a été employé pour le calcul de cette accessibilité par rapport aux bassins d'approvisionnement. Il faut préciser que tous les outils de distance de coût nécessitent à la fois un jeu de données source (marchés) et un raster de coût en entrée (surface de friction). La surface de friction ou *friction surface* se définit comme l'effort à mobiliser pour parcourir l'espace. Elle se compose d'une grille ou image bidimensionnelle où chaque pixel de l'image représente soit le fond du territoire (pentes pour cette étude) soit les couches de voie de transport telles que les routes, les fleuves ainsi que les rivières (CONESA, 2010).

Chaque surface possède ses propres caractéristiques. Une route goudronnée, par exemple, permet un temps de parcours plus rapide qu'un chemin de terre accidenté. Pour calculer le temps "contrainte" pour parcourir un pixel, une *matrice de friction* a été élaborée pour tenter d'intégrer les facteurs les plus influents sur les conditions d'accès à la ressource qui est le *Tsiperifery*. La vitesse de marche couramment admise est de 4 km/h donc le temps mis pour traverser un pixel (100 m) est d'environ 2 minutes ce qui est admissible sur les routes, pistes et chemins. Mais selon la pente, ce temps de parcours est variable. Afin de lancer le module, les jeux de données en entrée doivent être convertis en format *raster* avec une zone tampon de 45 m de part et d'autre pour le réseau routier (*buffer*). Il est important de noter que les coûts attribués aux facteurs agissent sur l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement de la ressource.

Tableau 2 : Friction des facteurs

Description	Valeur de multiplication
<i>Routes, pistes et chemins</i>	2
$0^\circ < \text{Pente} < 10^\circ$	7
$10^\circ < \text{Pente} < 35^\circ$	15
$\text{Pente} > 35^\circ$	30

Les valeurs de multiplication des pentes ont été prises de manière générale vu que le calcul de l'accessibilité dans la présente étude est à défaut de l'occupation du sol. Or le temps de déplacement sur différents types d'occupation n'est pas le même ; par exemple le temps mis pour parcourir une forêt dense sur une pente comprise entre 0° et 10° ne sera pas pareil à celui pour parcourir une savane herbeuse sur une même pente. Donc, cette généralisation des valeurs de multiplication permet quand même de prendre en compte la difficulté de déplacement à travers toute la zone d'étude.

La *matrice de friction* finale est obtenue par la multiplication des deux couches d'information dans *raster calculator*. Cette étape combine les éléments de friction des pentes et des réseaux routiers dans un même *raster*, avec la logique suivante :

Equation 4 : Impédance de la zone d'étude (ANDY, 2000)

Friction = Pente x Précédence (Routes, zones urbaines, occupation du sol, ...)

Du point de vue de la cellule, l'objectif de l'outil *cost distance* est de déterminer le chemin de moindre coût pour atteindre une source (marchés dans ce cas) pour chaque emplacement de cellule dans la fenêtre d'analyse. Autrement-dit, il permet de créer un raster en sortie dans lequel chacune des cellules se voit attribuer le coût cumulé du déplacement jusqu'à la cellule source la plus proche. Les valeurs de coût attribuées à chacune des cellules représentent le coût par unité de distance pour le déplacement à travers chaque cellule, c'est-à-dire, si la taille de cellule est exprimée en mètres, le coût affecté à la cellule est le temps nécessaire pour parcourir un mètre dans la cellule.

La résolution est de 100 mètres pour la carte d'accessibilité, donc le coût total de déplacement horizontal ou vertical à travers la cellule (ou pixel) serait le coût affecté multiplié par la longueur verticale ou horizontale du pixel.

Equation 5 : Valeur de friction pour une cellule (traversé horizontal ou vertical) (ANDY, 2000)

$$\text{Coût total} = \text{Coût} \times 100$$

Pour voyager en diagonale à travers la cellule, le coût total serait 1,414 fois le coût de déplacement dans la cellule multiplié par la résolution de cette dernière.

Equation 6 : Valeur de friction pour un pixel (traversé diagonal) (ANDY, 2000)

$$\text{Coût diagonal total} = 1.414 \times \text{Coût} \times 100$$

1.6. Limites méthodologiques

Les données utilisées constituent une limite méthodologique lors de l'exécution des démarches mentionnées. En effet, les données bioclimatiques entrées dans MaxEnt pour la détermination de la distribution actuelle du *Tsiperifery* sont datées de 2000 ; or des changements se sont produits entre temps. Les données plus récentes ont une résolution très faible et ne permettent pas de mieux distinguer la distribution de l'espèce au niveau national.

Les données concernant la production par pieds et la densité de *Tsiperifery* ne sont pas fiables car les chiffres donnés par différents auteurs sont très variés. Ce qui fait que l'étude s'est limitée à fournir des superficies au lieu du stock disponible de la ressource. Enfin, le calcul de l'accessibilité n'a pas pris en compte l'occupation du sol car les données y afférentes au niveau national ne sont pas sûres et manquent de précision donc seuls les facteurs pentes et réseaux routiers ont été retenus. Une des limites de cette étude est aussi l'absence de travaux de terrain pour la validation des points de présence de l'espèce. Cette validation s'est alors basée sur une partie des points géoréférencés à disposition.

1.7. Résumé Méthodologique

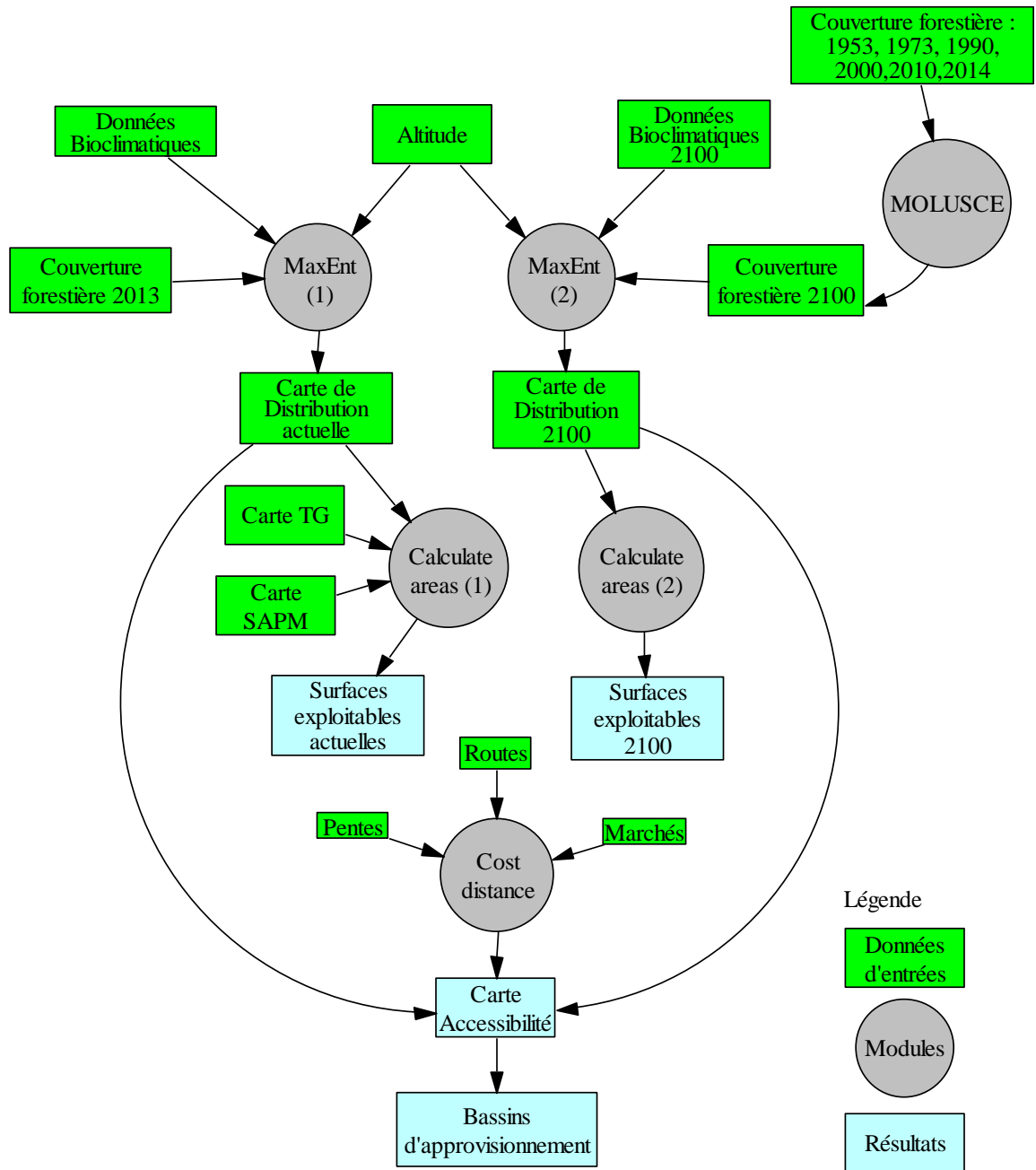


Figure 5 : Résumé Méthodologique

1.8. Cadre opératoire

Problématique	Hypothèses	Indicateurs	Méthode	Activités
Comment l'aire de distribution de <i>Tsiperifery</i> à Madagascar évolue-t-elle dans le temps afin de faciliter les prises de décision pour une gestion durable de l'espèce?	H1 : La répartition du <i>Tsiperifery</i> est fortement dépendante des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> - Pourcentage de contribution des précipitations sur la distribution de l'espèce - Evolution de la répartition de l'espèce en 2100 	- Détermination de l'aire de répartition potentielle de l'espèce actuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Exécuter les prétraitements des données sur ArcGIS - Opérer au traitement sur MaxEnt - Effectuer les traitements de l'image issue de MaxEnt - Identifier les zones les plus adéquates à la croissance de l'espèce
			<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction de la couverture forestière nationale en 2100 - Prédiction de l'évolution de l'habitat potentiel en 2100 	<ul style="list-style-type: none"> - Procéder aux prétraitements des données sur la couverture forestière - Lancer le module MOLUSCE de QGIS - Exécuter le traitement des données ainsi obtenues sur MaxEnt

				- Identifier les zones les plus propices à la croissance de l'espèce pour la période de 2100
	H2 : Les surfaces potentiellement exploitables de l'espèce sont sujettes à des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales	<ul style="list-style-type: none"> - Proportion de surfaces propices au développement de l'espèce en dehors des aires protégées, des nouvelles aires protégées et des transferts de gestion des ressources naturelles renouvelables - Modification des surfaces de présence du poivre sauvage de Madagascar en 2100 	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul des surfaces convenables au développement du <i>Tsiperifery</i> à travers l'île pour la période actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Lancer le module <i>calculate areas</i> dans ArcGIS - Comparer les surfaces favorables dans et en dehors des aires protégées et des TGRNR
			<ul style="list-style-type: none"> - Calcul des surfaces appropriées au développement du <i>Tsiperifery</i> en 2100 	<ul style="list-style-type: none"> - Lancer le module <i>calculate areas</i> dans ArcGIS - Déterminer les surfaces de présence éventuelles pour cette période
	H3 : La proximité de la ressource par rapport aux marchés permet de déterminer les bassins d'approvisionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de bassins d'approvisionnement recensés 	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul de l'accessibilité à la ressource par rapport aux marchés 	<ul style="list-style-type: none"> - Procéder aux traitements des facteurs influençant l'accessibilité - Utiliser le module <i>cost distance</i> dans ArcGIS

MATERIELS ET METHODES

		<ul style="list-style-type: none"> - Ordre d'importance de ces bassins en termes de surface par rapport aux autres 	<ul style="list-style-type: none"> - Classement des bassins d'approvisionnement les plus importants suivant leur emplacement vis-à-vis des marchés les plus proches 	<ul style="list-style-type: none"> - Recenser les marchés (chefs-lieux de District) à proximité des bassins d'approvisionnement - Ordonner les bassins les plus intéressants pour l'exploitation selon l'importance de leur surface
--	--	---	--	---

Partie 2 : Résultats

2.1. Distribution du *Tsiperifery*

2.1.1. Prédiction de la couverture forestière en 2100

Avant de procéder à l'estimation de la couverture forestière pour cette période, il a fallu évaluer le pouvoir prédictif du module MOLUSCE de QGIS. De ce fait, la détermination de la couverture forestière en 1993 par l'intermédiaire de cet outil a été effectuée.

Tableau 3 : Matrice de confusion pour la prédiction de la couverture forestière en 1993

		Points de contrôle			Erreur de commission (%)	Précision (%)
		Forêts	Non forêts	Total		
Carte de référence	Forêts	444	128	572	22,38	77,62
	Non forêts	190	2238	2428	7,83	92,17
Total		634	2366	3000	0	100
Erreur d'omission (%)		29,97	5,41	2682	3000	
Précision globale de la prédiction (%)						89,40

Selon cette matrice de confusion, 2682 points sur les 3000 points aléatoires générés correspondent à une bonne classification faite par MOLUSCE. Ce qui donne une précision globale de 89,4% ; l'indice kappa est calculé selon l'équation 2 et il est de 0,67. L'accord entre la carte prédite et celle de référence est donc important. Cette prédiction est sortie des données de couverture forestière entre 1953 et 1973, validée par celle en 1990.

Une deuxième validation a été réalisée avec l'estimation de la couverture forestière en 2010 par le biais de ce même outil.

Tableau 4 : Matrice de confusion pour la prédiction de la couverture forestière en 2010

		Points de contrôle			Erreur de commission (%)	Précision (%)
		Forêts	Non forêts	Total		
Carte de référence	Forêts	376	76	452	16,81	83,19
	Non forêts	99	2449	2548	3,89	96,11
Total		475	2525	3000	0	100
Erreur d'omission (%)		20,84	3,01	2825	3000	
Précision globale de la prédiction (%)						94,17

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Procédant de la même manière que pour la première prédiction, une précision globale de 94,2% est enregistrée avec un indice kappa de 0,78. L'accord entre la classification et la carte de référence est alors important. Cette prédiction est sortie des données de couverture entre 1990 et 2000, validée par celle en 2010. D'après ces tests, il peut être conclu que le pouvoir prédictif du module est important (kappa entre 0,61 à 0,80) d'où la prédiction de la couverture forestière en 2100 peut se faire. Elle est issue de 3 niveaux de prédiction sur MOLUSCE.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des prédictions pour aboutir à la couverture forestière de 2100

Données utilisées	Prédictions (annexe 4)
<i>Couverture forestière entre 1953 et 2000</i>	Couverture forestière en 2047
<i>Couverture forestière entre 1953 et 2014</i>	Couverture forestière en 2075
<i>Couverture forestière entre 2047 et 2075</i>	Couverture forestière en 2100 (en 2103 plus précisément)

Il a fallu prédire une carte avec un intervalle de temps de 25 ans par rapport à 2075 car le module calcule les changements des classes de l'image selon la durée entre l'image initiale et celle finale. Pourtant, faute des données disponibles, la carte de la couverture forestière en 2047 a pu être prédite avec celle en 2075 et ces deux cartes ont servi à produire la carte de couverture forestière en 2103 supposée comme étant plus ou moins similaire à celle de 2100.

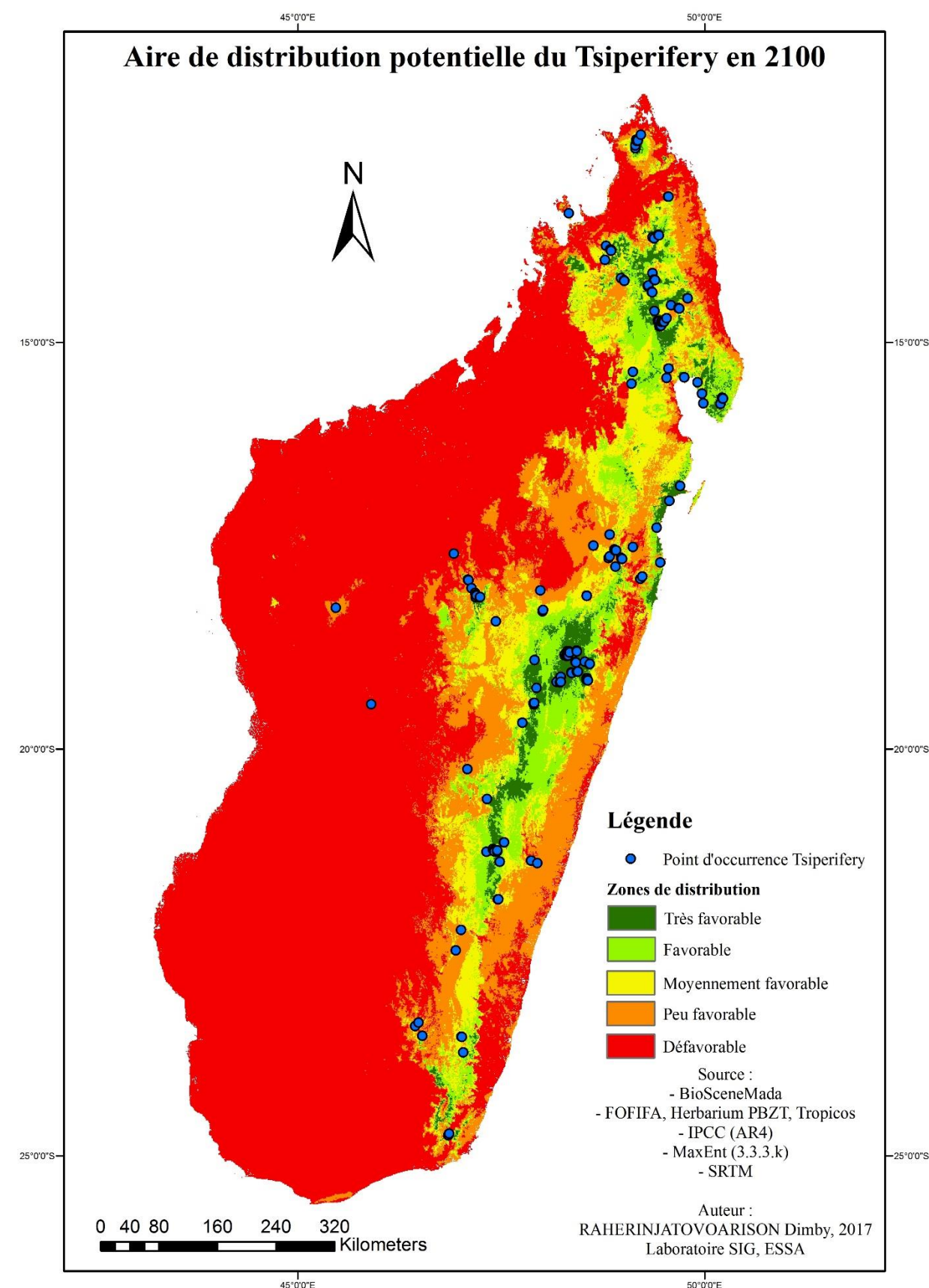
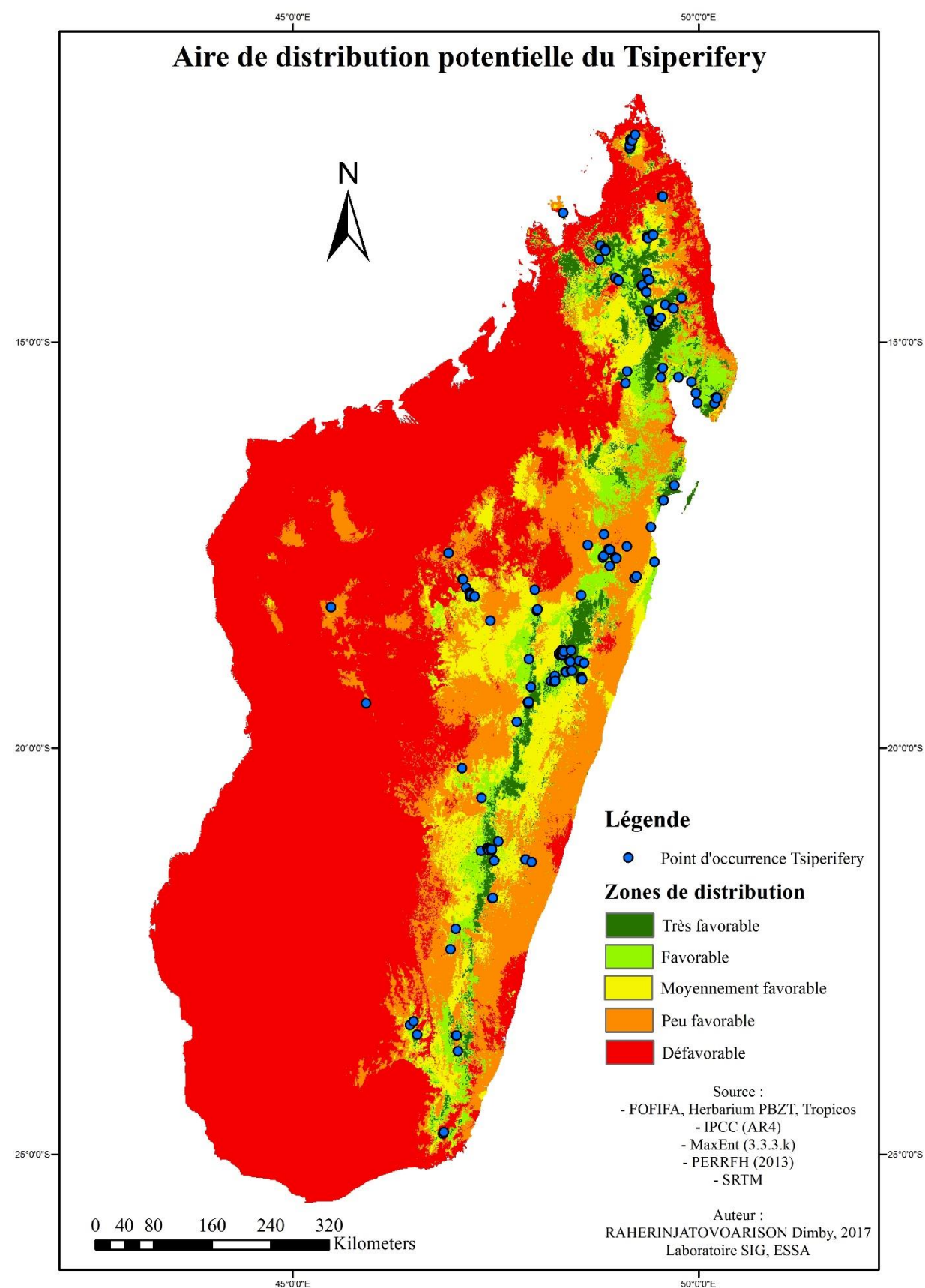
2.1.2. Modèles de distribution proprement-dit du *Tsiprifery*

La modélisation de l'aire de distribution potentielle de l'espèce est obtenue avec MaxEnt par l'utilisation des données Bioclimatiques, celles sur la couverture forestière et sur l'Altitude. Des modèles distinguant les milieux les moins propices aux plus propices au développement de l'espèce en sont sortis (carte 1). Ces cartes donnent un aperçu des zones les plus favorables à la croissance de cette ressource, elles sont surtout situées dans la partie orientale de l'île allant du Nord (Antsiranana) au Sud (Taolanaro). La partie Ouest de Madagascar est plutôt défavorable au développement de cette espèce selon les modèles. Cela peut être dû au fait que les conditions climatiques n'y permettent pas son épanouissement. Mais une autre explication réside aussi sur le fait que les points d'observations recensées se trouvent en majorité dans la partie Est du pays et donc MaxEnt suggère que l'espèce ne peut pas se développer dans la partie occidentale.

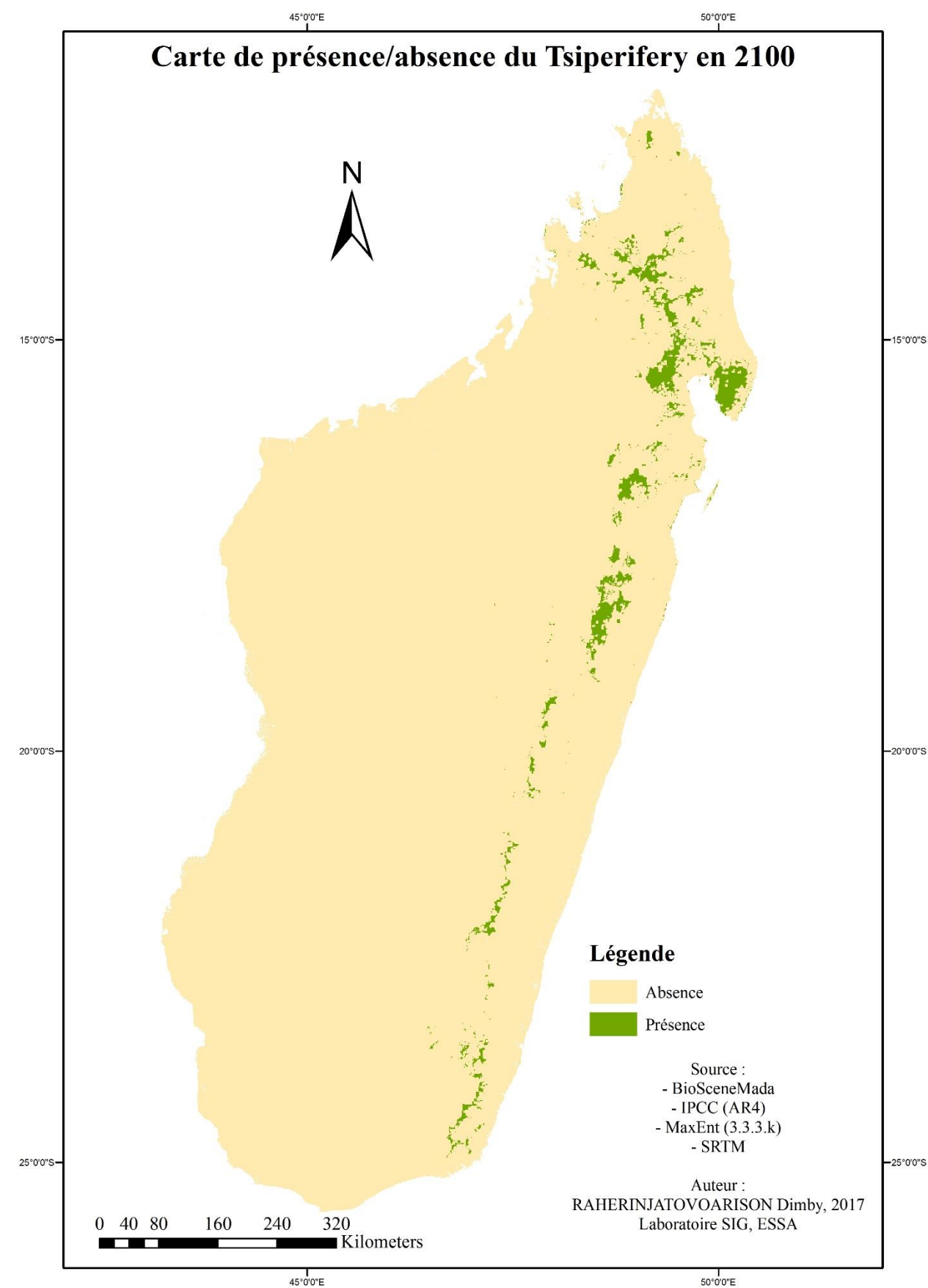
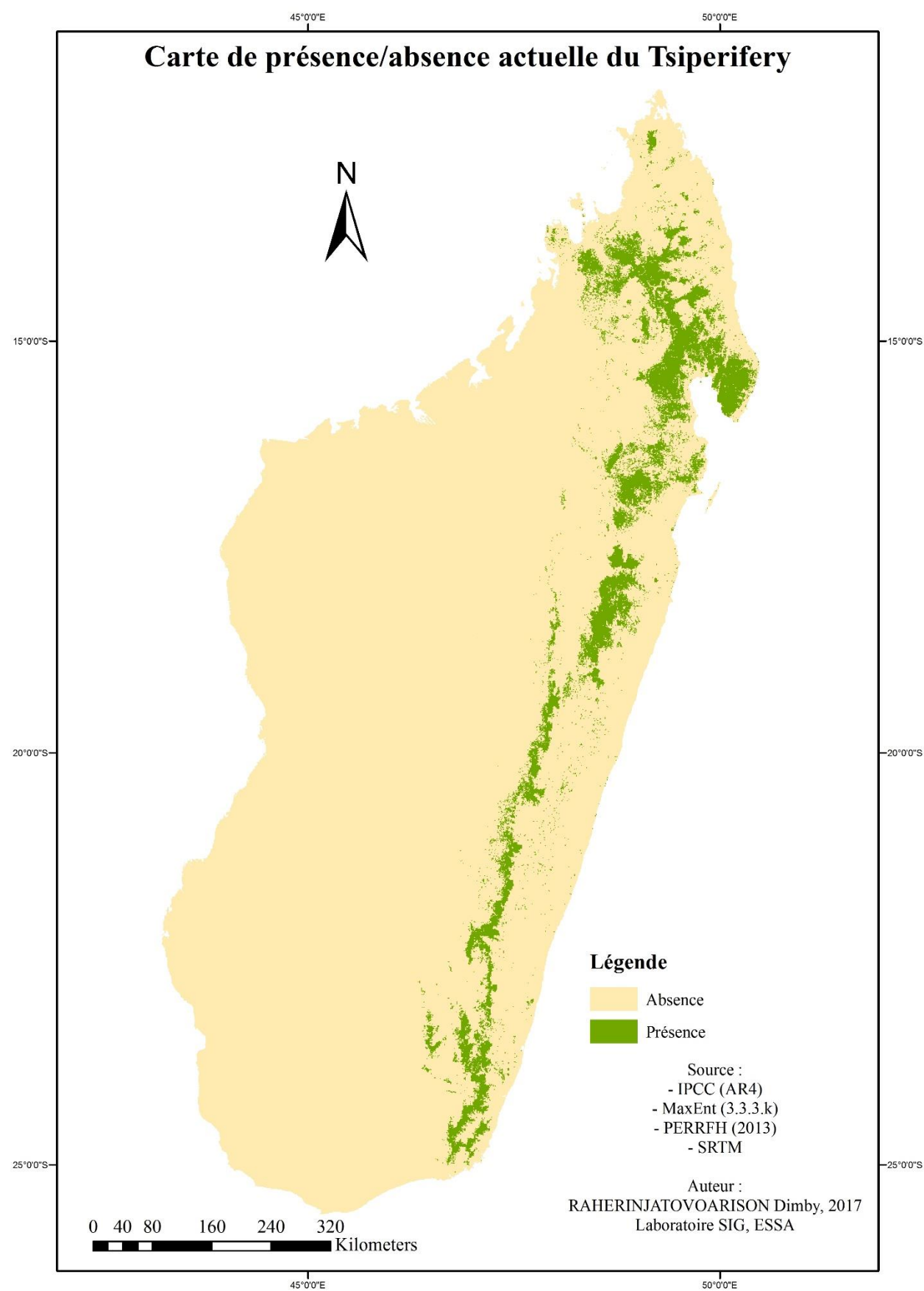
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Selon ces deux modèles (carte 1), les zones défavorables et favorables au développement du *Tsiperifery* augmentent d'une surface respective de 1 630 700 ha et 715 400 ha entre sa distribution actuelle et celle en 2100. Les zones peu favorables, moyennement favorables et très favorables à son développement présentent par contre une diminution de surfaces respectivement : 1 830 400 ha, 187 600 ha et 328 100 ha. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conditions défavorables (climatiques et déforestation) à la croissance de l'espèce s'accroissent avec le temps. Les milieux peu favorables et moyennement favorables diminuent donc au profit de ceux défavorables au développement de la ressource. Ceux qui sont très favorables se transforment par contre en favorables car la couverture forestière ne cesse de se réduire d'où certaines zones considérées comme très favorables deviennent moins favorables.

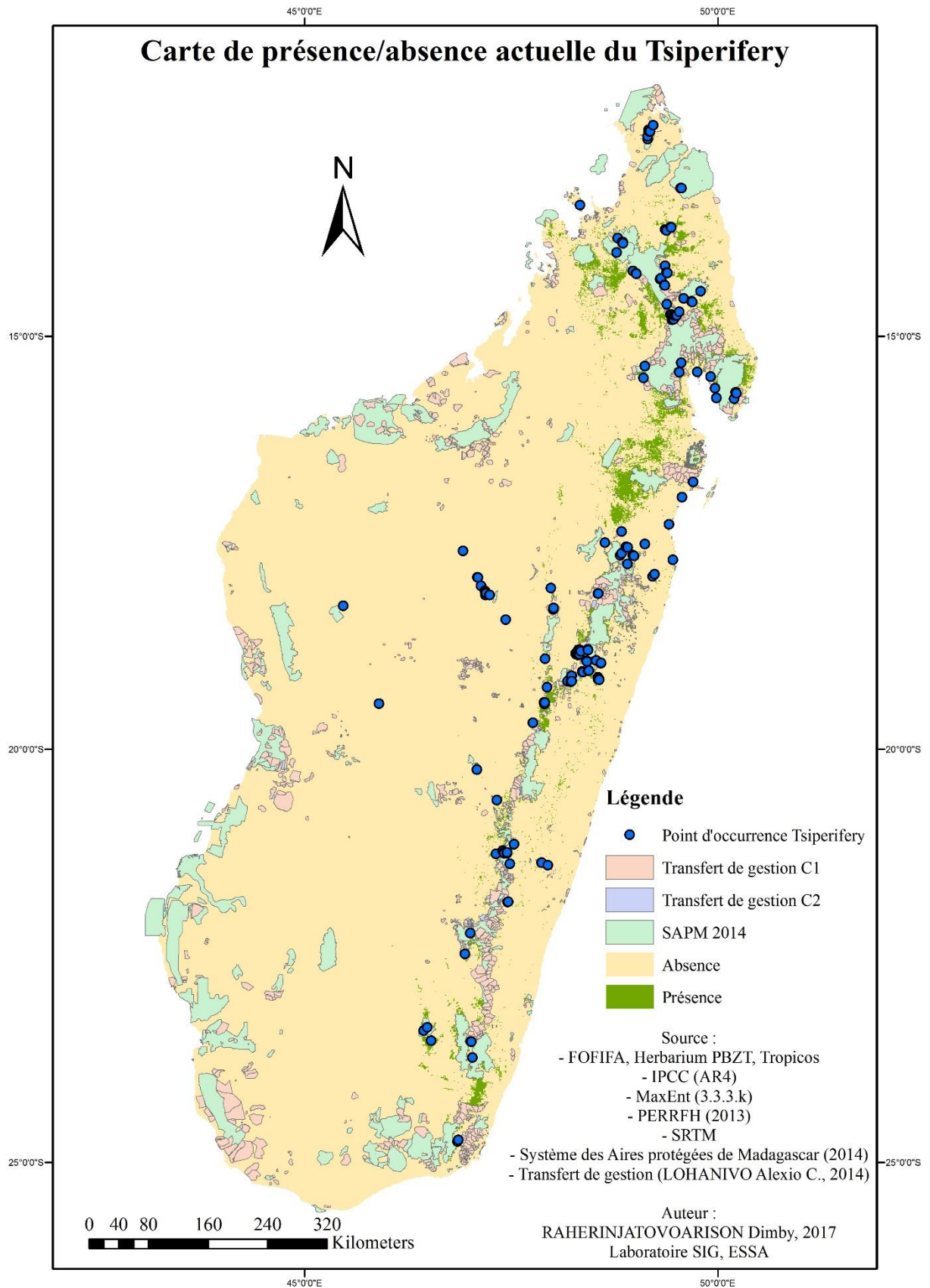
Mais à l'issue de la méthodologie utilisée, les résultats montrent des cartes du modèle de présence/absence de la distribution du poivre sauvage de Madagascar (carte 2). Il est important de signaler que les SAPM et TGRNR ne sont pas considérés dans la carte de l'aire de distribution potentielle en 2100 car ils sont susceptibles de changement durant cette période assez longue.



Carte 1 : Aire de distribution actuelle (à gauche) et aire de distribution potentielle en 2100 du *Tsiperifery* (à droite)



Carte 2 : Carte de présence/absence actuelle (à gauche) et carte de présence/absence en 2100 du *Tsiperifery* (à droite)



Carte 3 : Carte de présence/absence actuelle du *Tsiperifery* avec SAPM et TGRNR

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les contributions de chaque variable sur les distributions (actuelle et en 2100) du poivre sauvage de Madagascar sont différentes pour les deux modèles.

Tableau 6 : Contribution des variables sur la répartition actuelle du *Tsiperifery*

Variabes	Contribution (%)
<i>Couverture forestière</i>	34
<i>Température maximale de la période la plus chaude</i>	30,3
<i>Ecart annuel de température</i>	7,6
<i>Précipitations du trimestre le plus humide</i>	3,7
<i>Isothermalité</i>	3,5
<i>Précipitations du trimestre le plus chaud</i>	3,2
<i>Saisonnalité des précipitations</i>	2,8
<i>Température moyenne du trimestre le plus chaud</i>	2,3
<i>Précipitations annuelles</i>	2,1
<i>Température minimale de la période la plus froide</i>	2
<i>Altitude</i>	1,7
<i>Ecart diurne moyen</i>	1,3
<i>Température moyenne du trimestre le plus sec</i>	1,3
<i>Saisonnalité de la température</i>	1,1
<i>Précipitations de la période la plus sèche</i>	1,1
<i>Précipitations du trimestre le plus froid</i>	1,1
<i>Température moyenne du trimestre le plus froid</i>	0,3
<i>Précipitations de la période la plus humide</i>	0,3
<i>Température moyenne annuelle</i>	0,2
<i>Température moyenne du trimestre le plus humide</i>	0,1
<i>Précipitations du trimestre le plus sec</i>	0

Les trois (3) variables qui conditionnent le plus la distribution de l'espèce sont : la présence de couverture forestière (à hauteur de 34%), la température maximale de la période la plus chaude (30,3%) et l'écart annuel de température (7,6%). Ceci peut s'expliquer par le fait que c'est une espèce sciaphile et elle a besoin de l'ombrage des autres arbres pour se développer. De plus, elle nécessite une température maximale assez faible (entre 24,2 et 34,3°C) par rapport à celle des autres régions et une amplitude de variation de température moyenne mais pas trop élevée (entre 11,6 et 21,8°C) pour favoriser sa croissance. Cela peut s'expliquer par le fait que le *Tsiperifery* ne tolère pas une température trop élevée et une grande variation de température pour son développement. Les précipitations du trimestre le plus humide ne contribuent qu'à 3,7% sur la répartition de ce poivre sauvage, mais la valeur de ces précipitations est assez élevée (entre 543 et 1277 mm) dans les zones de présence de ce dernier. Ce qui veut dire que la ressource nécessite quand même un certain seuil d'humidité pour sa croissance.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les intervalles de valeurs pour chaque variable sont présentés en annexe (annexe 5). Ces intervalles montrent la valeur minimale et celle maximale pour chacun des variables dans les endroits où l'espèce est rencontrée, c'est-à-dire à partir des points géoréférencés à disposition.

L'AUC donné par MaxEnt pour ce modèle est égale à 0,94 ; ce qui est excellent, c'est-à-dire qu'il a un haut pouvoir prédictif. L'AUC issue des *test data* (30% des points d'observation) est de 0,878 (bonne) ce qui confirme cette affirmation.

Tableau 7 : Contribution des variables sur la répartition du *Tsiperifery* en 2100

Variables	Contribution (%)
<i>Température maximale de la période la plus chaude</i>	51,2
<i>Ecart annuel de température</i>	9,7
<i>Précipitations de la période la plus sèche</i>	8,3
<i>Précipitations du trimestre le plus chaud</i>	7,3
<i>Saisonnalité de la température</i>	4,1
<i>Altitude</i>	3,5
<i>Couverture forestière</i>	3,3
<i>Température moyenne du trimestre le plus humide</i>	1,9
<i>Température minimale de la période la plus froide</i>	1,8
<i>Isothermalité</i>	1,6
<i>Précipitations du trimestre le plus humide</i>	1,5
<i>Ecart diurne moyen</i>	1,2
<i>Précipitations annuelles</i>	1,1
<i>Saisonnalité des précipitations</i>	1,1
<i>Précipitations du trimestre le plus sec</i>	0,7
<i>Précipitations du trimestre le plus froid</i>	0,6
<i>Température moyenne du trimestre le plus chaud</i>	0,5
<i>Précipitations de la période la plus humide</i>	0,2
<i>Température moyenne annuelle</i>	0,1
<i>Température moyenne du trimestre le plus froid</i>	0,1
<i>Température moyenne du trimestre le plus sec</i>	0

Les trois (3) variables qui conditionnent davantage la répartition du *Tsiperifery* en 2100 sont par contre : la température maximale de la période la plus chaude (51,2%), l'écart annuel de température (9,7%) et les précipitations de la période la plus sèche (8,3%). La contribution de la température maximale est très importante car l'augmentation de celle-ci, due aux changements climatiques, fait que l'espèce cherche les milieux où la température maximale est la plus faible (entre 27,6 et 37,7°C) pour se développer vu qu'elle ne supporte pas une température trop élevée. Il y a quand même une augmentation d'environ 3°C par rapport à la température maximale selon le modèle actuel de répartition.

L'amplitude de variation moyenne mais pas trop élevée de température (entre 12,1 et 22°C) pour favoriser sa croissance est toujours valable et elle a également besoin de précipitations assez importantes par rapport à celles des autres zones où elle est absente même en période sèche.

Il est remarquable que la couverture forestière ne contribue qu'à 3,3% sur la distribution de l'espèce en 2100, cela peut être dû au fait que cette couverture est très faible et MaxEnt considère que ce paramètre n'est plus très important. Cependant, l'espèce nécessite toujours un ombrage pour son développement mais elle s'adapte aux conditions climatiques qui peuvent être défavorables à ce développement.

Ce deuxième modèle a une Surface Incluse sous la Courbe (AUC) de 0,939 qui est excellente donc son pouvoir prédictif est élevé. L'AUC des *test data* est égale à 0,887 ce qui confirme que le modèle prédit se rapproche de la réalité si le scénario proposé par les données s'avère juste.

Il est remarqué que la surface de présence du *Tsiperifery* diminue considérablement entre le modèle de répartition actuelle et celui en 2100 (cf. carte 2).

2.2. Détermination des surfaces exploitables

Il faut préciser que « *surface exploitable* » signifie ici, la superficie des lieux de présence de l'espèce (en vert sur la carte 2) donnés par les modèles. Les surfaces exploitables pour le modèle de distribution actuelle sont toutes les aires de présence du *Tsiperifery* qui sont en dehors des AP, NAP et TGRNR (carte 3). Celles pour le modèle de distribution potentielle en 2100 ne tiennent pas compte de ce paramètre.

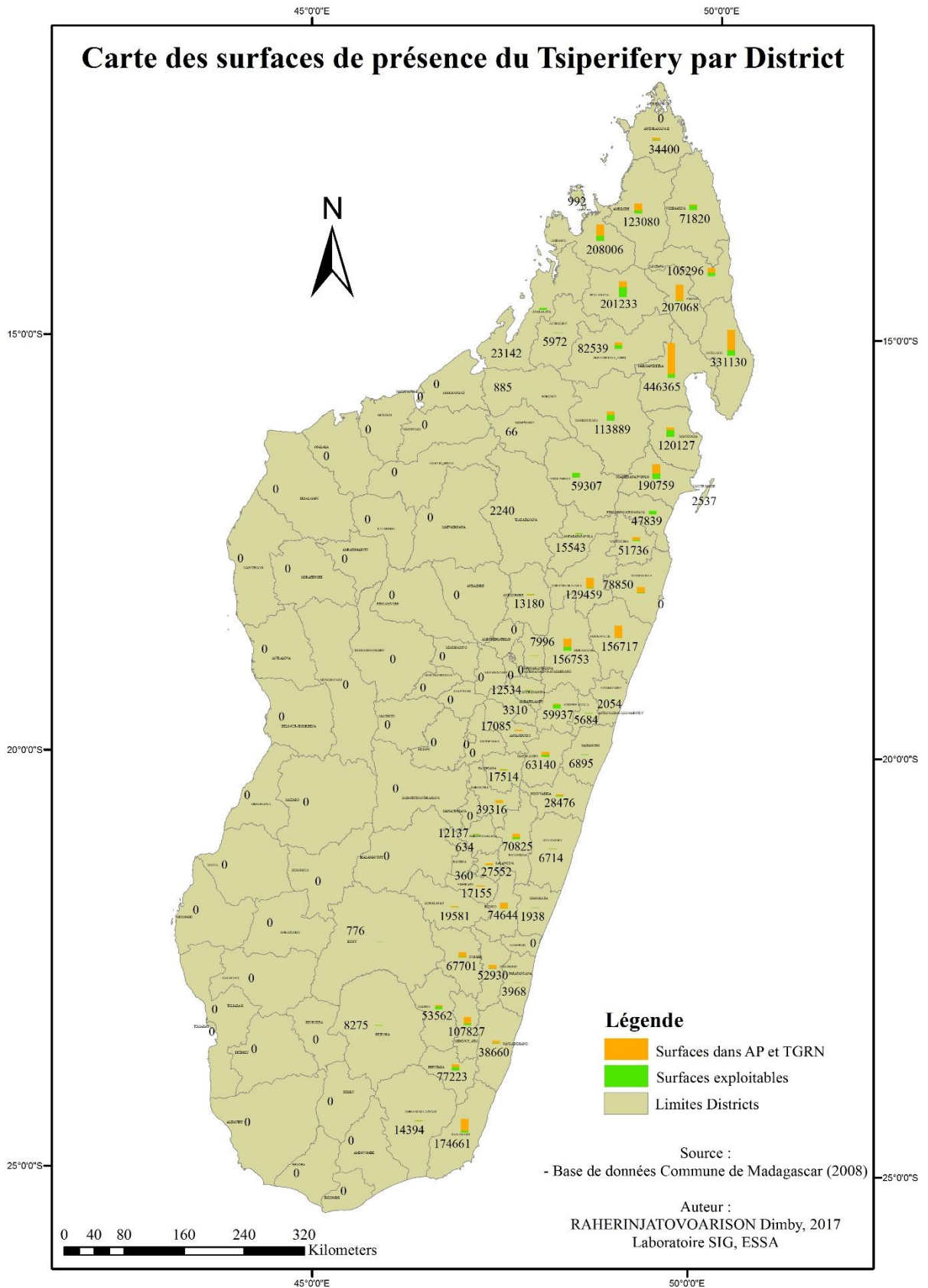
Les résultats en termes de surfaces exploitables sont donnés par district pour le modèle de distribution actuelle dans le tableau de données présenté en annexe (annexe 6). Après analyse de ces données, les aires de présence comprises dans les SAPM et les TGRNR (2 794 297 ha) représentent 69% de la surface totale de distribution du *Tsiperifery* (4 076 388 ha) à Madagascar. Les surfaces pouvant être exploitées (1 282 091 ha) sont alors plus petites que celles règlementées pour l'exploitation. Les districts de : Maroantsetra, Antalaha, Ambanja, Andapa, Bealanana, Soanierana Ivongo, Taolanaro, Moramanga et Brickaville possèdent les plus grandes surfaces de présence de l'espèce, elles représentent 50,8% de l'aire totale de présence. Pourtant, c'est dans ces zones que les restrictions d'exploitation sont les plus présentes. Pour la majorité de ces districts, les surfaces de présence sont en grande partie comprises dans les Aires protégées et les transferts de gestion.

Les districts de : Bealanana, Mananara, Mandritsara, Soanierana Ivongo, Antalaha, Ambanja, Andilamena, Vohimarina et Moramanga détiennent par contre les plus importantes surfaces exploitables avec une totale de 655 521 ha soit 51,1% de la superficie totale exploitable ou 16,1% de l'aire totale de présence. Cela constitue quand même un énorme potentiel surtout pour le district de Bealanana avec 128 762 ha exploitables. Il est alors préférable de mener des investigations dans ces zones afin de savoir si les projets d'exploitation y seront viables.

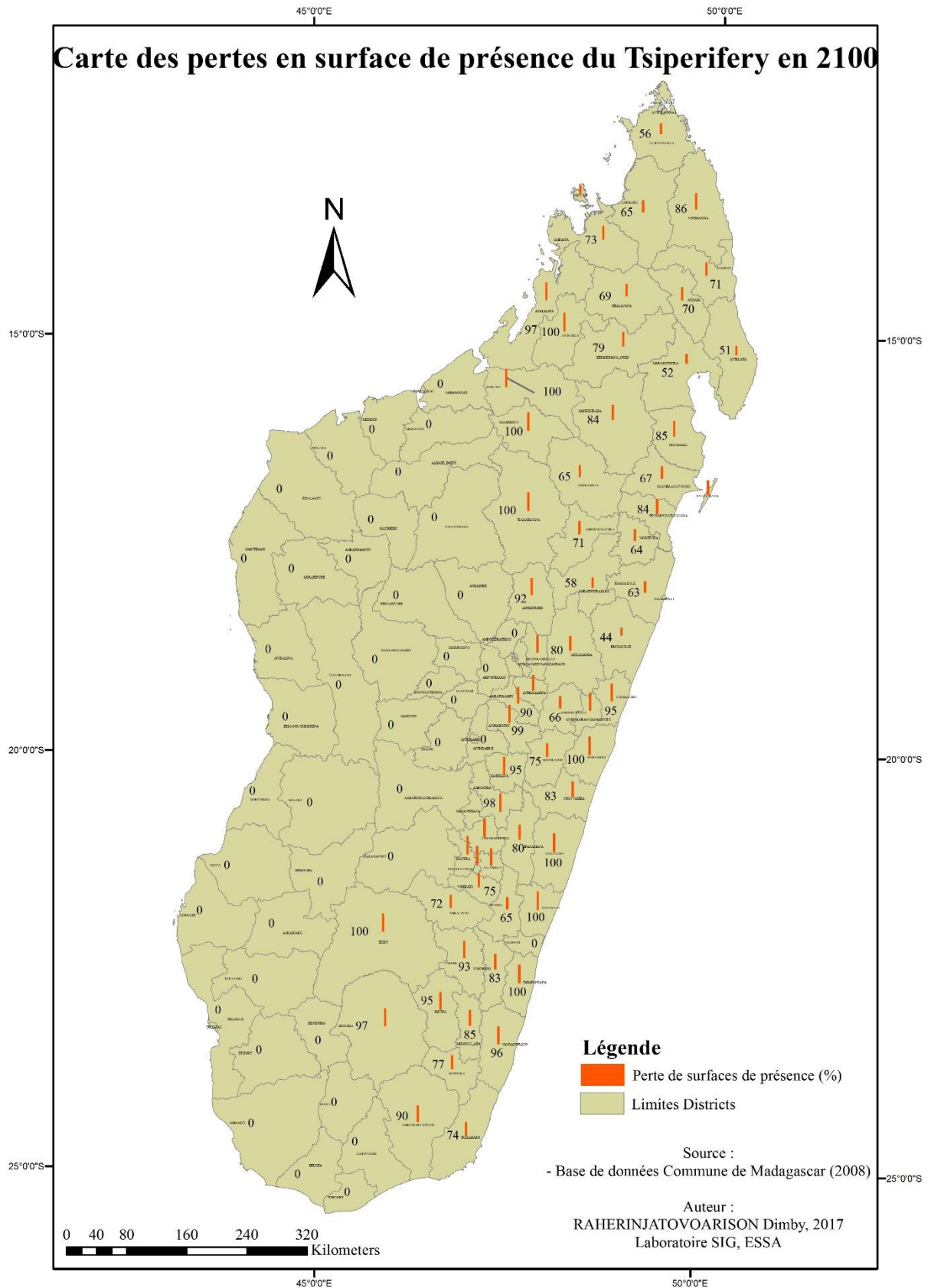
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

D'après le tableau de données (annexe 7) à l'origine de la carte 4, une perte globale de 70% de la surface totale de présence actuelle du *Tsiprifery*, soit 2 850 817 ha, est enregistrée pour la période de 2100. Ce phénomène est dû à la déforestation et à l'effet des changements climatiques selon le modèle issu de MaxEnt. Il s'agit d'une énorme perte, même en l'espace de 83 ans. En moyenne, la surface de présence de l'espèce diminue de 0,84% chaque année soit 34 347 ha par an si la déforestation continue de ravager son habitat. Il est donc primordial de ne pas accentuer ce fait par la collecte destructive de la ressource qui freine sa régénération mais accélère son extinction.

Toutefois, la diminution de l'aire de présence se présente différemment selon les régions. Les districts de : Maroantsetra, Antalaha et Brickaville vont subir moins de perte par rapport aux autres. Ils auront les plus importantes superficies de présence en 2100 avec respectivement : 213 552 ha, 162 292 ha et 87 685 ha. En conséquence, l'évolution des surfaces de présence de l'espèce se ressentent mieux à un niveau plus local que national.



Carte 4 : Surfaces de présence du *Tsiperifery* selon le modèle de distribution actuelle



Carte 5 : Pourcentage des pertes en surface de présence du *Tsiperifery* par district en 2100

2.3. Identification des bassins d’approvisionnement

Les bassins d’approvisionnement en *Tsiperifery* les plus intéressants sont ceux qui sont les plus proches des marchés et qui ont une surface importante par rapport aux autres. Dans cette étude, « proche des marchés » signifie situé à moins de 2 heures de marche en partant des marchés (chefs-lieux de District) et les bassins ont une accessibilité moyenne s’ils se trouvent entre 2 à 5 heures de marche en partant des marchés, ils sont encore considérés comme accessible dans ce cas.

Tableau 8 : Bassins d'approvisionnement les plus accessibles selon le modèle de distribution actuelle

Bassins d'approvisionnement (Districts)	Surfaces exploitables (ha)	Surfaces de présence (ha)
<i>Bealanana</i>	128 762	201 233
<i>Antalaha</i>	67 858	331 130
<i>Moramanga</i>	50 999	156 753
<i>Befotaka</i>	39 258	77 223
<i>Midongy Atsimo</i>	22 858	107 827
<i>Ambohimahaso</i>	8 969	12 137
<i>Andapa</i>	6 246	207 068
<i>Manjakandriana</i>	2 027	7 996

Ces huit (8) bassins d’approvisionnement sont les plus proches des marchés. Ils ont une surface totale de 326 976 ha pouvant être exploitée soit 26% de la surface totale exploitable. Ce qui constitue un grand potentiel pour l’exploitation. Les bassins les plus intéressants, selon le modèle de répartition actuelle du *Tsiperifery*, sont surtout : Bealanana, Antalaha, Moramanga, Befotaka et Midongy Atsimo car ils ont chacun une surface exploitable assez élevée comparée à celle des autres.

Tableau 9 : Bassins d'approvisionnement situés entre 5 à 15 heures des marchés

Bassins d'approvisionnement (Districts)	Surfaces exploitables (ha)	Surfaces de présence (ha)
<i>Soanierana Ivongo</i>	70 743	190 759
<i>Ambanja</i>	62 285	208 006
<i>Anosibe An'ala</i>	49 047	59 937
<i>Maroantsetra</i>	47 941	446 365
<i>Ifanadiana</i>	24 551	70 825
<i>Marolambo</i>	24 114	63 140
<i>Taolanaro</i>	19 625	174 661
<i>Ivohibe</i>	7 896	67 701
<i>Ambositra</i>	5 468	39 316
<i>Ikongo</i>	3 772	74 644
<i>Vondrozo</i>	3 451	52 930
<i>Anjozorobe</i>	2 829	13 180

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

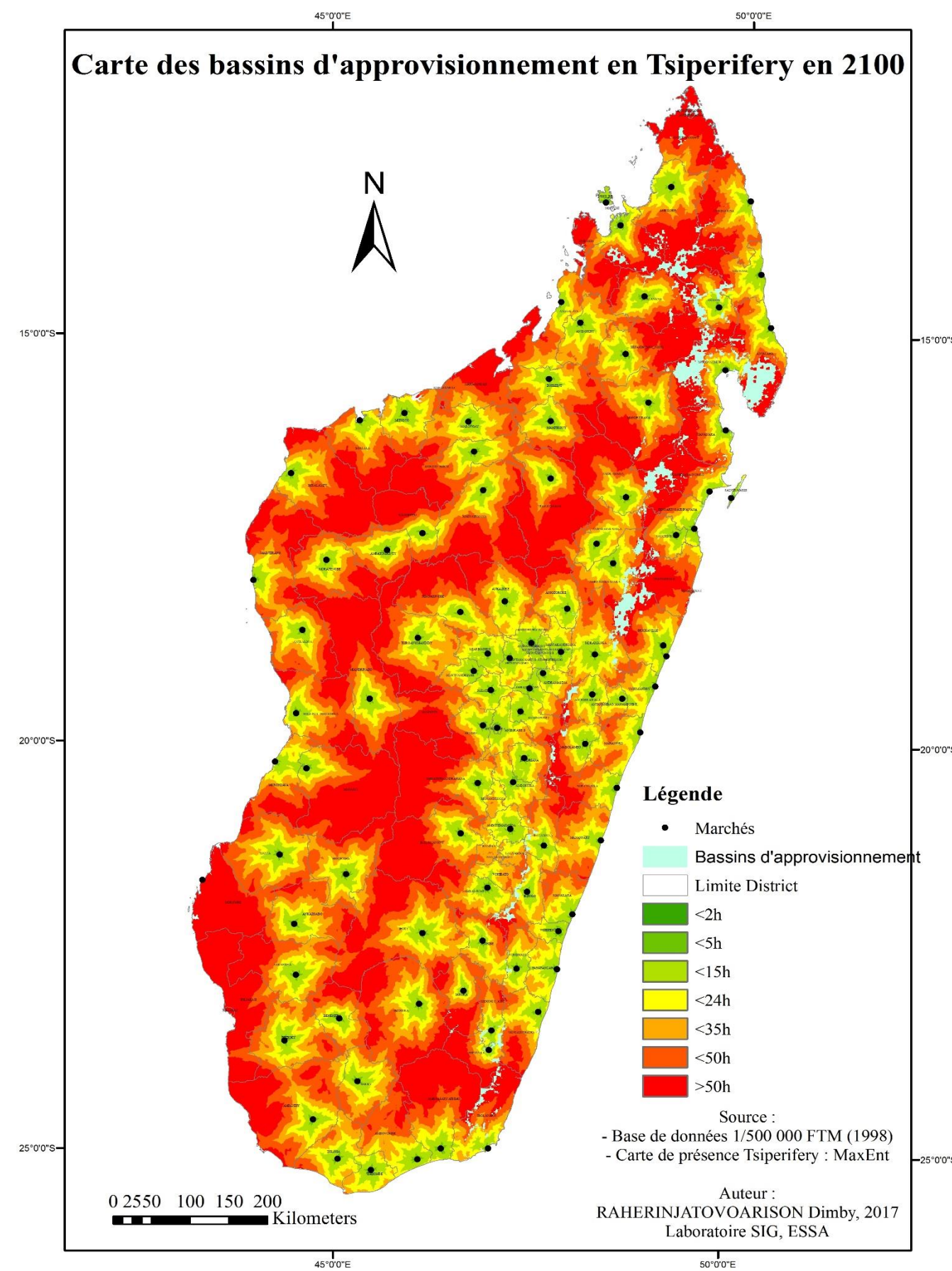
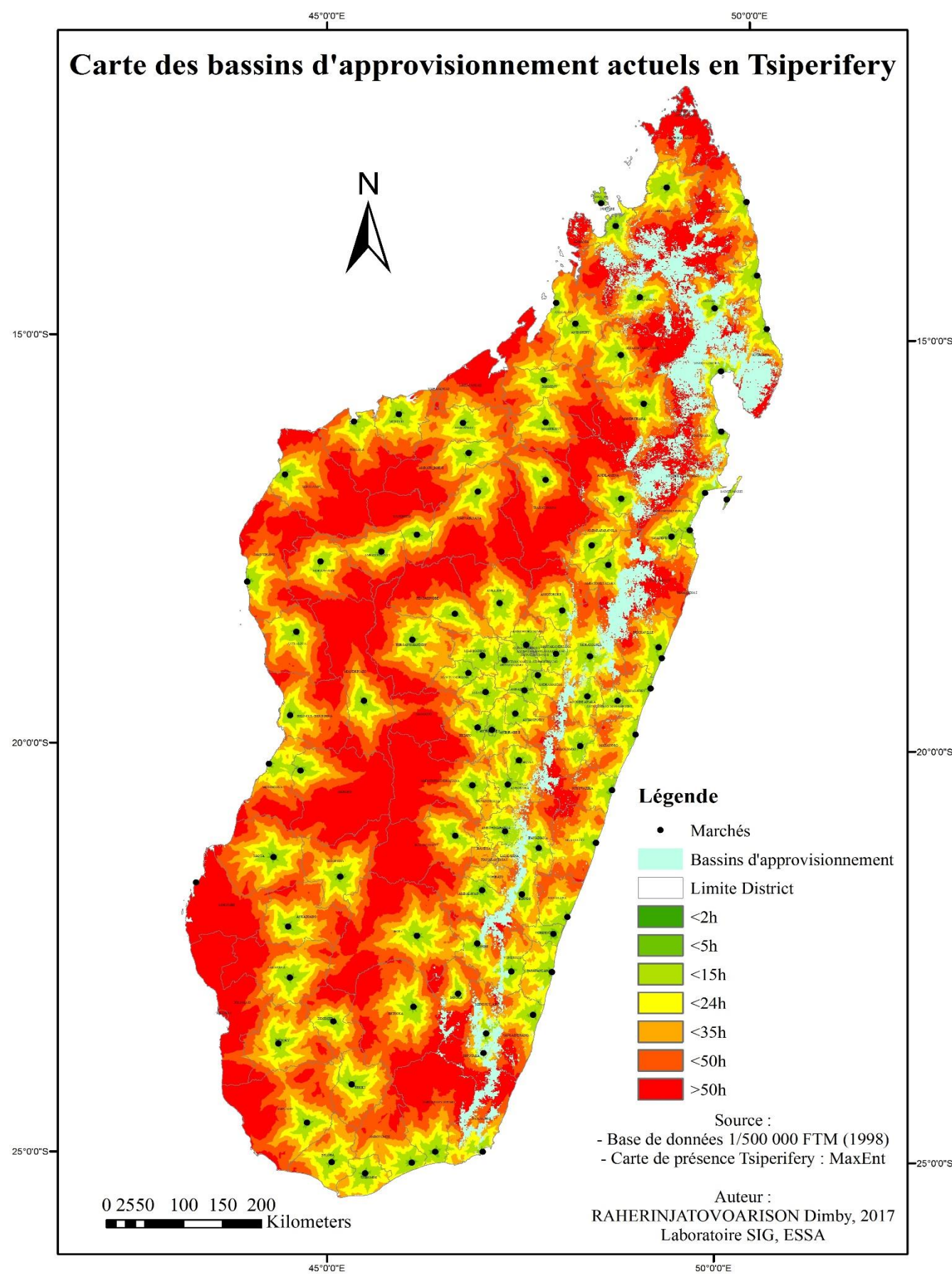
Les bassins d’approvisionnement dans le tableau 10 ont une grande superficie totale exploitable de 321 722 ha, ce qui représente 25% de l’aire totale exploitable (hors des SAPM et TGRNR). Cependant, ils sont situés loin des marchés (entre 5 à 15 heures de marche par rapport aux marchés). Ces derniers sont donc intéressants en termes de superficie mais l’accessibilité peut poser problème pour leur exploitation.

Selon le modèle de répartition de l’espèce en 2100, les bassins d’approvisionnement vont diminuer en termes de surfaces. De ce fait, ceux qui sont les plus proches des marchés vont se situer entre 5 à 15 heures de marche.

Tableau 10 : Bassins d'approvisionnement les plus accessibles selon le modèle de distribution en 2100

Bassins d'approvisionnement (Districts)	Surfaces de présence (ha)
<i>Maroantsetra</i>	213 552
<i>Soanierana Ivongo</i>	63 511
<i>Andapa</i>	61 108
<i>Ambanja</i>	56 385
<i>Ambatondrazaka</i>	54 348
<i>Moramanga</i>	31 859
<i>Befotaka</i>	17 906
<i>Midongy Atsimo</i>	15 846
<i>Vondrozo</i>	9 188
<i>Anjozorobe</i>	1 053

Ces dix (10) bassins d’approvisionnement sont les plus accessibles par rapport aux marchés pour la période de 2100. Ils possèdent une surface de 524 756 ha correspondant à 43% de la surface totale de présence du poivre sauvage de Madagascar. D’après ces analyses, les bassins d’approvisionnement en *Tsipery* les plus intéressants sont donc : Moramanga, Befotaka, Midongy Atsimo et Adapa car ils sont toujours classés parmi les plus attrayants en termes de surfaces et de proximité des marchés.



Carte 6 : Carte des bassins d'approvisionnement en *Tsiperifery* actuels (à gauche) et en 2100 (à droite)

Partie 3 : Discussions et Recommandations

3.1. Discussions méthodologiques

Les cartes de distribution des espèces sont utiles pour voir l'évolution de leur répartition. Des cartes de répartition vraiment objectives, suffisamment précises et complètes, sont particulièrement difficiles à obtenir pour les espèces difficiles à observer. C'est pourquoi les cartes de domaine potentiel, représentant l'aire sur laquelle la présence de l'espèce est théoriquement possible, sont souvent utilisées. Les cartes de domaine potentiel sont utiles non seulement en tant que base de données mais aussi dans une optique de gestion des espèces. Pour la réalisation de tel modèle, il est important de définir deux (2) concepts : le postulat d'équilibre et le concept de niche. Le postulat d'équilibre est défini comme suit : *« puisque les données environnementales et d'abondance d'espèces sont normalement échantillonnées sur une période de temps limitée ou sur des sites d'étude limités, les modèles ne reflètent qu'un cliché temporel de la relation attendue entre les conditions environnementales et la répartition des espèces. Ainsi, pour plus de commodité, on assume que les espèces modélisées se trouvent en pseudo-équilibre avec leur environnement »* (GUISAN et al., 2005). Le second concept à définir est celui de niche. Les modèles de distribution d'espèce, plus particulièrement les cartes résultantes, reposent sur une combinaison entre la *niche écologique* de GRINNELL, où une espèce se trouve partout où les conditions environnementales sont favorables à sa reproduction et la *niche réalisée* de HUTCHINSON, où une espèce est exclue de sa niche fondamentale par prédation ou compétition (GUISAN et al., 2005). Cette combinaison est due au fait que les modèles de distribution d'espèce, ou modèles de niche, utilisent des observations réelles pour identifier la niche écologique d'une espèce. Or, les observations réelles sont le fruit de la compétition et de la prédation des espèces; la *niche réalisée* sert donc indirectement à la conception des modèles.

Dans le souci de respecter ces postulats et afin de créer ces types de carte, cette étude s'est basée sur l'utilisation du logiciel MaxEnt de Stephen PHILLIPS (2006). Cet outil de modélisation peut fonctionner avec des données de présence de l'espèce, qui sont disponibles, contrairement à d'autres qui exigent des données de présence/absence. Mais il présente certaines limites, notamment une trop forte autocorrélation spatiale dans les données d'observation peut fausser le modèle, et introduire un certain biais dans les prédictions (FRIEDLAENDER et al., 2011 ; LAHOZ-MONFORT et al., 2010 ; PEARSON et al., 2006 ; PECK et al., 2010 ; THORN et al., 2009). De ce fait, il est important de vérifier que les données d'observation ne soient pas redondantes pour éviter ce problème. Comme mentionner précédemment, l'approche adoptée dans la présente étude est l'utilisation de MaxEnt pour la production des cartes de probabilité de présence de l'espèce. Le même logiciel a été utilisé en 2011 (RAZAFIMANDIMBY) afin d'obtenir la carte de la niche écologique du *Tsiperifery* (annexe 8). Cette approche a été employée à maintes reprises dans différentes recherches concernant d'autres espèces ; entre autres en 2008 en vue de l'élaboration d'un plan de conservation de trois espèces de palmiers endémiques (RAJAONARIVOTANTELY) et en 2015 pour l'analyse spatiale sur la répartition des zones adaptées pour la survie du *Raphia* face au changement climatique (RAJAONSON, REBIOMA).

Cependant, la carte de la niche écologique du poivre sauvage de Madagascar faite en 2011 s'est basée sur des données environnementales différentes de celles utilisées dans la présente étude (tableau 11).

Tableau 11 : Tableau comparatif de l'étude en 2011 et celle actuelle sur la distribution du *Tsiperifery*

	Carte de répartition du <i>Tsiperifery</i> en 2011	Carte de répartition du <i>Tsiperifery</i> en 2017
<i>Nombre de paramètres environnementaux</i>	10	21
<i>Système des aires protégées</i>	2010	2014
<i>Carte de couverture forestière</i>	- Classification de la végétation RBG Kew (2007)	- Carte des forêts par PERR-FH en 2013 - Cartes de BioSceneMada pour 2100
<i>Surplus</i>		- Nombre de points GPS actualisés - Calcul des superficies exploitables - Prédiction de l'aire potentielle de distribution en 2100 - Détermination des bassins d'approvisionnement en <i>Tsiperifery</i>

Concernant les cartes d'accessibilité aux bassins d'approvisionnement, l'utilisation des cartes d'occupation du sol en guise de friction pour plus de précision serait préférable. Pourtant, c'est difficile d'avoir ces genres de cartes au niveau national et leur production nécessite des heures de traitement. C'est pour cela que le présent travail s'est limité aux conditions d'accessibilité déterminées par le réseau routier, les pentes et la distance des marchés.

Afin d'avoir des cartes d'accessibilité plus précises, il est donc nécessaire de faire des études au niveau plus local (commune par exemple) si besoin selon les zones d'intérêts.

3.2. Discussions sur les résultats

3.2.1. Distribution potentielle du *Tsiperifery*

Comme mentionner précédemment, une étude sur la modélisation de la niche écologique de l'espèce a déjà été entreprise en 2011 (RAZAFIMANDIMBY) utilisant 9 variables climatiques issues de worldclim (www.worldclim.org) avec le pourcentage de la couverture forestière. La présente étude par contre utilise 19 variables bioclimatiques de l'IPCC avec les couches de données sur la couverture forestière et l'altitude.

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Certaines différences existent alors par rapport à la contribution de chaque facteur sur la répartition actuelle de l'espèce en question. Les pourcentages de contribution des facteurs climatiques pour la production des modèles de distribution du poivre sauvage de Madagascar pour ces deux études sont tout à fait différents.

Pour les deux modèles, la couverture forestière contribue le plus à la distribution de l'espèce. Cela s'explique par le fait que le *Tsiprifery* a besoin de l'ombrage d'autres arbres (tuteurs et autres) pour se développer (RAZFIMANDIMBY, 2011). Pourtant, le deuxième facteur le plus important pour le modèle en 2011 est la température moyenne annuelle (22,3%) alors que celui-ci ne contribue qu'à hauteur de 0,2% pour le modèle actuel de répartition. La température maximale de la période la plus chaude est la deuxième variable qui contribue le plus à la répartition de l'espèce selon le modèle actuel de distribution (30,3%) tandis que la température maximale du mois le plus chaud ne contribue qu'à 0,1% selon celui en 2011. Cela peut alors être dû aux données trimestrielles pour les variables bioclimatiques de l'IPCC. Elles permettent plus les prédictions à long terme d'où les mêmes variables sont disponibles pour la période de 2100. L'estimation sur une période de 3 mois vise à trouver le scénario le plus probable de se produire dans le futur, c'est pour cela qu'elle est privilégiée pour l'étude sur les changements climatiques. Les données mensuelles des variables climatiques de worldclim servent plutôt à définir les conditions favorables pour le développement d'une espèce pour une période donnée (niche écologique).

Ainsi, l'utilisation des variables bioclimatiques de l'IPCC a été favorisée dans cette étude car elle se veut de constater les impacts des changements climatiques et de la déforestation sur l'aire de distribution potentielle du *Tsiprifery*. De plus, les changements climatiques prennent une importance grandissante dans la recherche en environnement et pourraient être un des moteurs principaux de changement écologique dans les prochaines décennies (PARMESAN 2006; LAWLER et al. 2009; VIRKKALA et al. 2008).

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Tableau 12 : Tableau comparatif de la contribution des paramètres environnementaux sur la distribution du *Tsiperifery* pour le modèle en 2011 et celui actuel

Variables	Contribution (%) : Carte de distribution 2011	Contribution (%) : Carte de distribution 2017
<i>Altitude</i>	-	1,7
<i>Bilan hydrique de l'année</i>	6,6	-
<i>Couverture forestière</i>	41,9	34
<i>Ecart annuel de température</i>	-	7,6
<i>Ecart diurne moyen</i>	-	1,3
<i>Isothermalité</i>	-	3,5
<i>Nombre de mois ayant un bilan hydrique positif</i>	0,3	-
<i>Précipitations annuelles</i>	0,7	2,1
<i>Précipitations de la période la plus humide</i>	-	0,3
<i>Précipitations de la période la plus sèche</i>	-	1,1
<i>Précipitations du trimestre le plus chaud</i>	-	3,2
<i>Précipitations du trimestre le plus froid</i>	-	1,1
<i>Précipitations du trimestre le plus humide</i>	-	3,7
<i>Précipitations du trimestre le plus sec</i>	-	0
<i>Précipitation maximale du mois le plus humide</i>	0	-
<i>Précipitation minimale du mois le plus sec</i>	19,3	-
<i>Saisonnalité de la température</i>	-	1,1
<i>Saisonnalité des précipitations</i>	-	2,8
<i>Somme de l'évapotranspiration des 12 mois</i>	7,4	-
<i>Température maximale de la période la plus chaude</i>	-	30,3
<i>Température minimale de la période la plus froide</i>	-	2
<i>Température maximale du mois le plus chaud</i>	0,1	-
<i>Température minimale du mois le plus froid</i>	1,3	-
<i>Température moyenne annuelle</i>	22,3	0,2
<i>Température moyenne du trimestre le plus chaud</i>	-	2,3
<i>Température moyenne du trimestre le plus froid</i>	-	0,3
<i>Température moyenne du trimestre le plus humide</i>	-	0,1
<i>Température moyenne du trimestre le plus sec</i>	-	1,3

Il y a quand même lieu de dire qu'un nombre limité de facteurs permet de mieux interpréter les résultats. D'autant plus que la contribution de certaines variables est très légère par rapport à celle des autres. Cela peut être dû à une forte colinéarité des variables et il est donc préférable d'en éliminer quelques-unes pour obtenir la vraie contribution des variables les plus importantes.

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

La différence entre les deux modèles aussi réside dans les données d'observation du *Tsiperifery* utilisées. Le site web Tropicos a été actualisé entre temps et donne beaucoup plus de points d'observation de l'espèce ce qui est primordial pour le modèle produit. Les cartes de distribution potentielle de l'espèce issues de ces modèles ne se ressemblent pas (cf. carte 1 et annexe 8).

3.2.2. Surfaces de présence de l'espèce

Comme mentionné dans les limites méthodologiques, cette étude n'a pas pu sortir le stock disponible de *Tsiperifery* au niveau national à cause des données non fiables sur la densité de la population de l'espèce et de sa production par pieds. En effet, en termes de fructification, il a été observé selon les auteurs, 1 à 25 kilogrammes de grappes fructifères par liane adulte (RAZAFIMANDIMBY, 2011 ; TOUATI, 2012 ; LEVESQUE, 2012). Il y a un écart énorme entre ces chiffres évoqués par différents auteurs, c'est pour cette raison que la présente étude se focalise surtout sur les surfaces de présence de l'espèce en vue de distinguer les zones les plus propices au développement et à l'exploitation du poivre sauvage de Madagascar.

D'autre part, la décentralisation de la gestion forestière prévue par la loi GELOSE⁵ constitue une opportunité pour les populations locales, organisées en communauté locale de base (CLB), pour reprendre le contrôle de leur terroir et de ses ressources forestières. Ce transfert représente une occasion de valorisation de la filière pour une production durable. La gestion de proximité permise par le contrat vise l'exploitation raisonnée des ressources dans la mesure où elle limite l'accès à la ressource aux membres de la CLB et impose des règles de conservation et d'exploitation durable. Selon l'article 43 de la loi GELOSE : « *Dès sa notification, l'agrément confère à la communauté de base bénéficiaire pendant la période indiquée dans l'acte, la gestion de l'accès, de la conservation, de l'exploitation et de la valorisation des ressources objets de transfert de gestion sous réserve du respect des prescriptions et des règles d'exploitation définies dans le contrat de gestion* ».

Cependant, dans les bassins de collecte du *Tsiperifery*, la dynamique des contrats de transfert de gestion en est encore à un stade embryonnaire. En 2013, 13 contrats de transfert de gestion ont été recensés dans le district d'Anjozorobe ; 33 contrats initiaux répartis dans les districts d'Anjozorobe, de Manjakandriana et d'Andramasina. De plus, une étude réalisée en 2014 déplore les dysfonctionnements de ces VOI, notamment dans le district de Manjakandriana.

En tout état de causes, les TGRNR ne concernent à ce jour pas le poivre sauvage de Madagascar. De ce fait, ils ont été considérés comme étant des contraintes à l'exploitation dans cette étude car le *Tsiperifery* ne figure pas dans les contrats de gestion, donc ne peuvent pas normalement être collectés dans les zones dont la gestion est transférée à la communauté locale.

⁵ Loi 96-025 du 30 septembre 1996, dite loi GELOSE, relative au transfert de gestion des ressources naturelles aux communautés locales de base.

3.2.3. Bassins d’approvisionnement

La méthode utilisée pour déterminer l’accessibilité aux bassins d’approvisionnement du *Tsiperifery* s’est focalisée sur la marche à pied car sa collecte s’effectue en forêts. Vu qu’il s’agit d’une étude au niveau national et que les facteurs utilisés (pentes et routes) ne permettent pas une précision élevée des cartes pour un niveau plus local, certaines zones qui peuvent être accessibles sont considérées par le modèle comme inaccessibles. Ceci s’explique par le fait que les moyens de transport n’ont pas pu être pris en compte car il s’agit de distinguer les bassins d’approvisionnement les plus accessibles par rapport aux marchés les plus proches. Les cueilleurs du poivre circulent souvent à pied pour la récolte en forêt et la vente aux marchés locaux ou surtout auprès des collecteurs. Mais une fois arrivé au marché, des moyens de transport acheminent le produit vers d’autres marchés plus importants et le *Tsiperifery* peut circuler vers les zones desservies par le réseau routier ou même être exporté à ce moment. Pour pouvoir intégrer des variables (telles que l’occupation du sol, les moyens de transport disponibles) qui permettent de produire une carte d’accessibilité plus précise, des études sur les zones (plus restreintes) les plus intéressantes doivent être effectuées.

Dans les études déjà réalisées, les cueilleurs signalent des déplacements de plus en plus longs en forêt (passage de 1 à 6 heures de marche dans certaines zones) afin de trouver des lianes fructifères (TOUATI, 2012). Il s’agit là des effets de la collecte destructive du *Tsiperifery* sur sa production et son milieu de développement. Néanmoins, le modèle de distribution de l’espèce en 2100 a permis de constater que le retrait de la couverture forestière provoque la diminution de ses surfaces de présence. Ce qui engendre une réduction importante des bassins d’approvisionnement en poivre sauvage de Madagascar, causée cette fois-ci par la déforestation. Les modèles qui sont produits dans la présente étude sont toutefois assez généraux, ils donnent une idée des zones d’intérêt qui méritent plus d’investigations et de recherches dans cette voie selon les besoins.

3.3. Vérification des hypothèses

Les trois (3) hypothèses émises au tout début de cette présente étude sont :

- Hypothèse 1 : La répartition du *Tsiperifery* est fortement dépendante des précipitations
- Hypothèse 2 : Les surfaces potentiellement exploitables de l’espèce sont sujettes à des restrictions d’exploitation et des contraintes environnementales
- Hypothèse 3 : La proximité de la ressource par rapport aux marchés permet de déterminer les bassins d’approvisionnement

A l’issue des analyses et interprétations des résultats, la vérification de ces hypothèses peut s’effectuer.

Hypothèse 1 : La répartition du *Tsiperifery* est fortement dépendante des précipitations

La contribution du facteur précipitations sur la distribution de l'espèce, d'après les modèles obtenus, permet de vérifier cette première hypothèse. Il s'agit de comparer la contribution de cette variable par rapport à celle des autres facteurs. Il est aussi question de voir l'évolution de cette contribution entre le modèle actuel et celui en 2100.

Les précipitations du trimestre le plus humide, les précipitations du trimestre le plus chaud et les précipitations annuelles contribuent respectivement à 3,7%, 3,2% et 2,1% sur la distribution du poivre sauvage de Madagascar selon le modèle actuel de répartition. Elles ont une contribution très faible par rapport à celle de la couverture forestière (34%) et celle de la température maximale de la période la plus chaude (30,3%). D'après ce modèle, la température est alors un facteur plus important que les précipitations pour favoriser le développement de l'espèce. Selon le modèle de distribution en 2100, la température maximale de la période la plus chaude est le facteur qui contribue le plus au développement du *Tsiperifery* avec un pourcentage de 51,2%. Les précipitations de la période la plus sèche (8,3%), les précipitations du trimestre le plus chaud (7,3%) et la couverture forestière (3,3%) ont un taux de contribution minimale par rapport à celui de la température. Il a été mentionné que le faible taux de contribution de la couverture forestière sur la distribution de l'espèce pour le modèle de 2100 peut être dû au logiciel mais en pratique son développement nécessite cette couverture car il s'agit d'une espèce à tempérament sciaphile. Il peut donc être conclu que les précipitations jouent toujours un rôle minimal mais non négligeable sur la répartition de cette ressource. La première hypothèse est alors réfutée.

Hypothèse 2 : Les surfaces potentiellement exploitables de l'espèce sont sujettes à des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales

Les restrictions d'exploitation dont il est question ici sont les AP, NAP et TGNR où les prélèvements de produits forestiers (fruits pour le poivre sauvage de Madagascar) sont réglementés et même interdits. Il s'agit donc de comparer la surface de présence de l'espèce dans ces zones de restriction et celle en dehors. D'après les résultats y afférents, seulement 31% de la surface totale d'occurrence du *Tsiperifery* selon le modèle de répartition actuelle se trouve hors des SAPM et TGRNR soit 1 282 091 ha exploitables. Ce qui signifie que la majorité de son aire de présence (69%) est soumise à des restrictions d'exploitation sauf en présence de permis ou d'autres formes d'autorisation à l'exploitation.

Pour ce qui est des contraintes environnementales, il s'agit des effets des changements climatiques et de la déforestation sur la répartition de l'espèce. Le modèle de prédiction en 2100 est employé pour la vérification de l'hypothèse. Les résultats ont montré une diminution de 2 850 817 ha de la surface totale de distribution potentielle de l'espèce pour cette période. Soit une réduction globale de 70% de cette surface d'occurrence par rapport à celle du modèle de distribution actuelle. Il est constaté que la déforestation est la principale cause de ce retrait des surfaces de présence de l'espèce.

Il peut être conclu que les surfaces potentiellement exploitables du poivre sauvage de Madagascar sont majoritairement sujettes à des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales. La seconde hypothèse est donc confirmée.

Hypothèse 3 : La proximité de la ressource par rapport aux marchés permet de déterminer les bassins d'approvisionnement

L'accessibilité aux bassins d'approvisionnement par les cueilleurs est nécessaire pour vérifier cette hypothèse. Si la ressource se trouve à moins de 2 heures et entre 2 à 5 heures de marche en partant des marchés, elle est qualifiée respectivement comme accessible et moyennement accessible donc relativement proche des marchés. Au-delà de 5 heures de marche, elle est considérée comme éloignée et difficilement accessible. Or, si la ressource est accessible, elle peut être vendue sur le marché et le lieu de collecte est considéré comme bassin d'approvisionnement.

Pourtant, il n'est pas évident qu'un bassin d'approvisionnement se trouvant à proximité des marchés soit exploitable de manière durable, car le potentiel de production est aussi un critère primordial. Il est possible que la ressource s'épuise rapidement après quelques exploitations si la surface exploitable ne permet pas de satisfaire la demande. Tel est le cas par exemple du bassin d'approvisionnement de Manjakandriana avec 2 027 ha exploitables comparé à celui de Moramanga avec 50 999 ha exploitables selon le modèle de répartition actuelle du *Tsiperifery*. Le bassin d'approvisionnement de Moramanga est alors considéré comme plus intéressant que celui de Manjakandriana. De même pour le modèle de distribution de l'espèce en 2100, le bassin d'approvisionnement de Befotaka (17 906 ha exploitables) est considéré comme plus intéressant que celui d'Anjozorobe (1 053 ha exploitables). Cependant, il faut remarquer que 1 000 et 2 000 ha représentent d'énormes superficies mais elles sont tout simplement minimales comparées à celles des autres bassins recensés.

Néanmoins, la proximité de la ressource par rapport aux marchés est un critère essentiel à considérer pour déterminer un bassin d'approvisionnement. La troisième hypothèse est alors vérifiée.

3.4. Recommandations

Les recommandations proposées pour cette étude sont à la fois d'ordre technique et opérationnel. Comme il a été mentionné dans les limites méthodologiques, l'absence de travaux de terrains n'a pas permis la validation des cartes et de connaître la réalité sur terrain concernant les bassins d'approvisionnement et leur accessibilité. Il est donc nécessaire pour les recherches futures en rapport avec ce travail de valider les résultats, notamment les points de présence si d'éventuels changements se sont produits mais aussi les surfaces de présence dans les modèles si elles sont conformes à la réalité. Cette étude se veut également de favoriser les actions dans le but d'atteindre les deux (2) principaux objectifs suivants : orienter les recherches vers des niveaux plus locaux et valoriser les ressources en *Tsiperifery* de manière durable.

Objectif 1 : Orienter les recherches vers des niveaux plus locaux

Le présent travail s'est focalisé sur la distribution nationale du *Tsiperifery* et ses bassins d'approvisionnement. Il s'inscrit dans un contexte plus global mais a permis de ressortir les zones qui méritent des études plus poussées en termes de filière de cette espèce.

Différents projets sont également en cours sur l'exploitation de cette ressource et il serait avantageux d'effectuer des recherches en parallèle avec ces projets afin de faciliter les prises de décision future et d'avoir des bases de données pertinentes à cet effet.

Les activités à entreprendre sont :

- réaliser une cartographie plus précise des bassins d'approvisionnement déjà identifiés

Divers projets sont menés concernant le poivre sauvage de Madagascar en ce moment tels qu'à Mandraka, Vohemar, Anjozorobe, Ranomafana et dans d'autres localités. La production de carte d'accessibilité à la ressource dans ces différentes zones peut déjà constituer des données importantes et plus fiables permettant d'envisager les actions à réaliser. Il sera alors plus facile de délimiter la zone de collecte du *Tsiperifery*.

- effectuer des études et des analyses sur l'offre et la demande en *Tsiperifery*

Il s'agit des enquêtes au niveau des marchés, des cueilleurs, des collecteurs, des exportateurs et même des consommateurs (la filière *Tsiperifery*) afin d'avoir des données sur ces paramètres. Des inventaires de l'espèce à l'intérieur des forêts peuvent également fournir des données fiables sur sa production. Il faut tout de même remarquer que des travaux sont en cours, en relation avec cette activité, sur l'étude de la filière *Tsiperifery*.

Objectif 2 : valoriser les ressources en *Tsiperifery* de manière durable

La méthode de cueillette du poivre sauvage de Madagascar est destructive et représente un danger pour la régénération de cette ressource. L'abattage des tuteurs avec les lianes est la méthode de collecte la plus utilisée, ensuite l'arrachage des lianes mais une petite partie des cueilleurs seulement grimpent pour extraire les fruits. Les lianes fructifères les plus productives sont souvent récoltées donc leur chance de régénérer est minime. Seules les lianes moins productives ont une forte chance de se régénérer et cela diminue le potentiel de production de l'espèce.

Les activités à entreprendre pour l'atteinte de ce deuxième objectif sont :

- trouver des méthodes de collecte moins destructives

Il est primordial de mener des recherches sur les méthodes de collecte occasionnant les moins de dégâts possible sur la ressource. Tout en assurant que ces méthodes soient connues et appliquées par les cueilleurs lors de la récolte. Il faut également encourager la régénération des lianes en forêt. Des études sont également en cours pour cette activité au sein du DP Forêts et Biodiversité.

- exiger et appliquer les conventions de collecte avant l'exploitation

Chaque maillon de la filière *Tsiperifery* doit être soumis à des obligations concernant la collecte et la vente de la ressource. Des redevances doivent être payées en contrepartie des collectes en forêt auprès des autorités compétentes par tous les acteurs : cueilleurs, collecteurs et autres opérateurs économiques.

- développer les recherches sur la domestication du *Tsiperifery*

Dans le but de protéger la ressource contre l'extinction, les études sur sa domestication doivent être privilégiées. De plus, la méthode de collecte destructive peut accélérer ce phénomène d'extinction si les résultats tardent à être opérationnels. Les activités de multiplication végétative (bouturage) qui ont des résultats positifs doivent être poussées et reproduites dans d'autres sites. Selon RAFITOHARSON (2016), la réussite du bouturage du *Tsiperifery* est influencée par le morphotype et par la provenance. De même, la reprise et l'enracinement des boutures sont meilleurs sur les stolons que sur les rameaux mais ils ne sont pas influencés par le substrat utilisé.

Tableau 13 : Cadre logique d'intervention

Objectif 1 : Orienter les recherches vers des niveaux plus locaux					
Activités	Sous activités	Echéance	Responsables/Acteurs	IOV	Moyens de vérification
Réaliser une cartographie plus précise des bassins d'approvisionnement déjà identifiés	Collecter les données dans les zones d'études choisies	Moyen terme	Chercheurs, organismes de recherche	- Nombre de cartes de bassins d'approvisionnement utilisables et fiables	- Bases de données informatisées - Rapport d'activités
	Définir les facteurs pouvant influencer l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement				
	Produire des cartes avec des données à résolution spatiale élevée				
Effectuer des études et des analyses sur l'offre et la demande en <i>Tsiperifery</i>	Effectuer des enquêtes auprès des acteurs de la filière sur la consommation du produit	Moyen à long terme	Chercheurs, opérateurs économiques	- Production annuelle de l'espèce (taux d'exportation) - Calcul du stock de <i>Tsiperifery</i>	- Rapport d'enquêtes - Rapport d'activités
	Inventorier l'espèce dans différentes zones				
	Identifier la production par pieds et la densité de la population du <i>Tsiperifery</i>				

Objectif 2 : valoriser les ressources en <i>Tsiprifery</i> de manière durable					
Activités	Sous activités	Echéance	Responsables/Acteurs	IOV	Moyens de vérification
Trouver des méthodes de collecte moins destructives	Confectionner des outils simples mais moins destructifs pour la cueillette	Court à moyen terme	Chercheurs, techniciens, cueilleurs, ONG	- Nombre d'outils de collecte produits	- Rapport de formation - Rapport d'activités
	Vulgariser l'utilisation des matériels non destructifs par les cueilleurs			- Nombre de cueilleurs utilisant des méthodes de collecte moins destructives	
	Sensibiliser des cueilleurs à collecter uniquement les fruits matures, afin d'encourager la régénération des lianes			- Nombre de zones de cueillette recensées	
	Délimiter les zones de cueillette			- Surface de zones enrichies	
	Enrichir les zones surexploitées				
Exiger et appliquer les conventions de collecte avant l'exploitation	Inciter les acteurs de la filière à signer des conventions de collecte pour les prélèvements effectués	Court, moyen à long terme	DVRF, Ministère de l'Agriculture, cueilleurs, collecteurs, opérateurs économiques	- Nombre de conventions de collecte signées - Superficies reboisées - Redevances perçues	- Rapport d'activités - Rapport de suivi annuel

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

	Solliciter le paiement des redevances en nature (reboisement)				- Rapport d'évaluation
	Réclamer le paiement des redevances en espèce et celles à l'exportation				
Développer les recherches sur la domestication du <i>Tsipery</i>	Chercher les techniques de reproduction permettant la domestication de l'espèce	Moyen à long terme	Chercheurs, techniciens	- Nombre de techniques de reproduction opérationnelles - Nombre de boutures effectuées	- Rapport d'activités
	Amplifier les multiplications végétatives qui ont réussi				

Conclusion

A la lumière de cette analyse, la mise à jour sur la connaissance de l'aire de distribution potentielle du *Tsiprifery* à Madagascar a permis de proposer des stratégies pour sa gestion durable. Ce qui est l'objectif principal de cette présente étude. Les modèles de distribution de l'espèce sont issus du logiciel de modélisation MaxEnt qui utilise les données d'observation et des variables explicatives pour prédire sa répartition potentielle. Deux modèles en sont sortis, celui de la distribution actuelle avec un AUC excellent de 0,94 et celui de la distribution potentielle en 2100 avec un AUC de 0,939. Ce qui montre un pouvoir prédictif élevé des modèles. Ces derniers sont à la base de toutes les analyses qui ont suivi car une fois obtenue, ils ont permis d'estimer les surfaces de présence du *Tsiprifery* par district.

Selon le modèle de distribution actuelle, il a été remarqué que la majorité des surfaces de présence de l'espèce est sujette à des restrictions d'exploitation. Une partie importante de la ressource est contenue dans les aires protégées et les transferts de gestion. Concernant le modèle de répartition potentielle de l'espèce en 2100, il a permis de constater qu'une grande partie de la surface totale de présence du *Tsiprifery* est devenue défavorable à son développement. Ce qui laisse à croire que la déforestation et les changements climatiques provoquent la régression des surfaces d'occurrence de l'espèce. Selon l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement, quatre (4) districts ont été qualifiés d'intéressants en termes d'exploitation en raison de leur proximité aux marchés et de leur superficie assez importante par rapport à celle des autres.

Trois hypothèses ont été émises pour répondre à la problématique de cette étude. La première concerne la contribution du facteur précipitations sur la répartition du *Tsiprifery*. Elle a été réfutée vue que la couverture forestière est la variable la plus importante pour le développement de l'espèce suivie de la température tandis que la précipitation a une faible contribution selon les deux modèles obtenus dans cette étude. La deuxième hypothèse examine les effets des restrictions d'exploitation et des contraintes environnementales sur les surfaces potentiellement exploitables du poivre sauvage de Madagascar. Elle a été vérifiée car les effets de ces facteurs sont énormes, ils affectent considérablement les surfaces de présence de l'espèce pouvant être exploitées. La troisième hypothèse parle de la proximité de la ressource aux marchés comme étant le facteur déterminant pour l'identification des bassins d'approvisionnement en *Tsiprifery*. Cette dernière hypothèse a également été confirmée car cette proximité est un critère indispensable pour permettre l'identification en question.

Cependant, les résultats obtenus manquent de précision et méritent des validations sur terrain, notamment ceux sur l'accessibilité aux bassins d'approvisionnement. Les recommandations suggèrent donc une orientation des recherches vers des niveaux plus locaux pour avoir plus de fiabilité dans les résultats et une valorisation durable du poivre sauvage de Madagascar.

CONCLUSION

En conclusion, les menaces qui pèsent sur la ressource et qui peuvent compromettre sa survie sont surtout les collectes destructives et la destruction de son habitat (déforestation). Or, la demande en *Tsiperifery* est de plus en plus importante actuellement ce qui intensifie encore plus les récoltes. Dans la mesure où l'espèce s'éteint avant que la recherche n'offre des solutions efficaces pour sa conservation (domestication et méthodes de collecte moins destructives), il n'y a plus lieu de s'interroger sur sa gestion durable. Néanmoins, les travaux dans ce domaine ne font que commencer ou plutôt à mi-chemin et les résultats obtenus ne sont pas encore complets. Le plus important est donc maintenant de multiplier les études sur la domestication et les méthodes de collecte du *Tsiperifery* car elles constituent un des critères fondamentaux qui peut assurer l'exploitation durable de la ressource.

Références Bibliographiques

1. ANDRIANOELISOA H. (2013), *Développement des Bases Scientifiques pour une Gestion et Valorisation durable du Poivre Sauvage ou Tsiperifery à Madagascar*, AGRO FERT'ILES.
2. ANDY N. (2000), *Accessibility, transport and travel time information*, Modelling across geographic scales – Activity 2.5, 4-5.
3. ARAÙJO M. B., PEARSON R. G., THUILLER W., ERHARD M. (2005), “Validation of species–climate impact models under climate change”, *Global Change Biology*, **11**: 1504-1513.
4. BENHADJ I. (2008), *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystème semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech*, Université de Toulouse III – Paul Sabatier.
5. BERNARD A-G., ANDRIANOELISOA H., RAZAFIMANDIMBY H., AUBERT S., DANFLOUS J-P. (2014), *Synthèse bibliographique sur la filière poivre sauvage à Madagascar*, CIRAD, DP, FOFIFA, France volontaires, Région Réunion.
6. BLUM A., FELDMAN L., BRESLER F., JOUANNY P., BRIANÇON S., & RÉGENT D. (1995), “Intérêt du calcul du coefficient Kappa dans l'évaluation d'une méthode d'imagerie”, *J. Radiol.*, **76**: 441-443.
7. COHEN J. (1960), “A coefficient of agreement for nominal scales”, *Educational and Psychological*, **20**: 37-46.
8. CONESA A. (2010), *Modélisation des réseaux de transports collectifs métropolitains pour une structuration des territoires*, Thèse de doctorat en Aménagement de l'Espace-Urbanisme, INRETS Université de Lille 1.
9. CONGALTON R. (1991). “A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data”, *Remote Sens. Environ.*, **37**: 35-46.
10. COQUIO J. (2008), *La performance adaptative des réseaux de transports collectifs. Modélisation, mesure de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées*, Thèse de doctorat en Aménagement du territoire, EPU-Tours (Ex-CESA).
11. DARREN N. (2014), “Model thresholds are more important than presence location type”, *Tropical Conservation Science*, **7**: 529-547.
12. DEICHMANN U. (1998), *Accessibility indicators in GIS*, Department for Economic and Social Information and Policy Analysis, United Nations Statistics Division.
13. ELITH J., GRAHAM C. H., ANDERSON R. P., DUDÍK M., FERRIER S., GUISAN A., HIJMANS R. J., HUETTMANN F., LEATHWICK J. R., LEHMANN A., LI J., LOHMANN L. G., LOISELLE B. A., MANION G., MORITZ C., NAKAMURA M., NAKAZAWA Y., OVERTON J. M. C., TOWNSEND C., PETERSON A., PHILLIPS S. J., RICHARDSON K., SCACHETTI-PEREIRA R., SCHAPIRE R. E., SOBERÓN J., WILLIAMS S., WISZ M. S., ZIMMERMANN N. E. (2011), “Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data”, *Ecography*, **29**: 129-151.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

14. ELITH J., PHILLIPS S. J., HASTIE T., DUDÍK M., CHEE Y. E., & YATES C. J. (2011), “A statistical explanation of MaxEnt for ecologists”, *Diversity and Distributions*, **17**: 43-57.
15. FRIEDLAENDER A. S., JOHNSTON D. W., FRASER W. R., BURNS J., PATRICK N. H., & COSTA D. P. (2011), “Ecological niche modeling of sympatric krill predators around Marguerite Bay, Western Antarctic Peninsula”, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **58**: 1729-1740.
16. GUARINO L., JARVIS A., HIJMANS R. J., MAXTED N. (2002), “Geographic Information Systems (GIS) and the Conservation and Use of Plant Genetic Resources”, *Managing plant genetic diversity, International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI) Rome, Italie* **1**: 387-404.
17. GUISAN A., THUILLER W. (2005), “Predicting species distribution: offering more than simple habitat models”, *Ecology letters*, **8**: 993-1009.
18. HUTCHINSON G. E. (1957), “Concluding remarks”, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, **22**: 415-427.
19. IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Cambridge University Press, New York, USA.
20. LOHANIVO A. C. (2017), *Enjeux et perspectives de la gestion communautaire des ressources naturelles renouvelables après 20 ans d'existence à Madagascar*, Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques et Environnementales, ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.
21. LAHOZ-MONFORT J. J., GUILLERA-ARROITA G., MILNER-GULLAND E. J., YOUNG R. P., & NICHOLSON E. (2010), “Satellite imagery as a single source of predictor variables for habitat suitability modelling: how Landsat can inform the conservation of a critically endangered lemur”, *Journal of Applied Ecology*, **47**: 1094-1102.
22. LAWLER J. J., SARAH L. S. (2009), “Projected Climate-Induced Faunal Change in the Western Hemisphere”, *Ecology* **90**: 588-97.
23. LEVESQUE A. (2012), *Etude de différents schémas de vie mis en œuvre sur Tsiperifery, poivre sauvage malgache*. Stage de formation d'ingénieur (2^e année) Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud (SAADS), Institut des régions chaudes, Sup Agro Montpellier.
24. MANJATO N., RAMAHEFAHARIVELO A., DAVIDSON C., PHILLIPSON P. (2010), “The Malagasy species of Piper (PIPERACEAE)”, Poster, Missouri Botanical Garden Madagascar.
25. PARMESAN C., 2006, “Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change”, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **37**: 637-669.
26. PEARSON R. G., DAWSON T. P. (2006), “Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?”, *Global Ecology and Biogeography*, **12**: 361-371.
27. PEARSON R. G., & THUILLER W. (2006), “Model-based Uncertainty in Species Range Prediction”, *Journal of biogeography*, **33**: 1704-1711.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

28. PEARSON R. G., RAXWORTHY C. J., NAKAMURA M., & TOWNSEND P. A. (2006), "Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar", *Journal of Biogeography*, **34**: 102-117.
29. PECK M., THORN J., MARISCAL A., BAIRD A., TIRIRA D., & KNIVETON D. (2010), "Focusing Conservation Efforts for the Critically Endangered Brown-headed Spider Monkey (*Ateles fusciceps*) Using Remote Sensing, Modeling, and Playback Survey Methods", *International Journal of Primatology*, **32**: 134-148.
30. PHILIPPE M. et DENIS R-D. (2006), *La gestion durable de l'environnement à Madagascar : enjeux, opportunités et contraintes*, économie rurale.
31. PHILIPPS J. (2009), *A Brief Tutorial on MaxEnt*.
32. PHILLIPS S. J., ANDERSON R. P., SCHAPIRE R. E. (2006), "Maximum entropy modeling of species geographic distributions", *Ecological Modeling*, **190**: 231-259.
33. PHILLIPS S. J., DUDIK M., SHAPIRE R. E. (2004), "A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling", *Proceeding of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 655-662.
34. RAFITOHARSON N. M. E. (2016), *Définition et mise en place d'un protocole de multiplication du Tsiperifery (Piper sp.) à Beforona en vue de sa domestication*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade de Master en Foresterie - Environnement, ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.
35. RAJAONARIVOTANTELY L. B. (2008), *Etude de trois espèces de palmiers endémiques et menacées de la forêt montagnarde de Marojejy en vue d'un plan de conservation : cas de *Dypsis lokohoensis* J. Dransf ; *Dypsis coursii* Beentje et *Dypsis pumila* Beentje*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales, ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.
36. RAJAONSON R. (2015), *Rapport d'activité sur la descente sur terrain à Bandabe et à Andranonkazo, commune rurale d'Ambilobe : collecte de données et informations sur la plantation et l'exploitation de l'espèce *Raffia farinifera* dans la zone d'Ambilombe, District de Mandritsara ; résultat de l'analyse spatiale sur la répartition des zones adaptées pour la survie du *Raphia* face au changement climatique*, Projet REBIOMA-WCS, Antananarivo.
37. RATSARAEFATRARIVO M. (2012), *Etude de variabilité spécifique de piper sp. (Tsiperifery) dans les versants ouest et est du corridor Anjozorobe Angavo et quelques paramètres caractéristiques de qualité des grains secs de cette espèce, dite : « poivre sauvage » ou « voatsiperifery »*, Mémoire en vue de l'obtention du Certificat d'Aptitude Pédagogique de l'Ecole Normale (CAPEN), Université d'Antananarivo.
38. RAZAFIMANDIMBY H. (2011), *Etudes écologique et ethnobotanique de Tsiperifery (Piper sp.) de la forêt de Tsiazompaniry pour une gestion durable*, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme d'études approfondies, ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

39. SHANNON C. E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, vol. 27.
40. THORN J. S., NIJMAN V., SMITH D., & NEKARIS K. A. I. (2009), “Ecological niche modelling as a technique for assessing threats and setting conservation priorities for Asian slow lorises (Primates: *Nycticebus*)”, *Diversity and Distributions*, **15**: 289-298.
41. THUILLER W., & MÜNKEMÜLLER T. (2005), *Habitat suitability modelling*, 77-85.
42. TOUATI G. (2012), *Etat des lieux de la gestion du poivre sauvage de Madagascar : Un produit forestier non ligneux exploité pour la commercialisation*, Mémoire de fin d'étude, ISTOM Ecole supérieure d'Agro Développement International.
43. VENDITTI V. (1998), *Aspects du principe de maximum d'entropie en modélisation statistique*, Université Joseph Fourier.
44. VIRKKALA R., HEIKKINEN R. K., LEIKOLA N., & LUOTO M. (2008), “Projected Large-Scale Range Reductions of Northern-Boreal Land Bird Species Due to Climate Change”, *Biological Conservation*, **141**: 1343-1353.
45. VOIRON C., CHERY J-P. (2005), “Espace géographique, spatialisations et modélisation en dynamique des systèmes”, *Res-Systemica*, **5**: 10-20.

Lois

- Loi n° 96-025 du 30 septembre 1996 relative à la gestion locale des ressources naturelles renouvelables.
- Loi n° 2001-05 portant code de gestion des aires protégées.

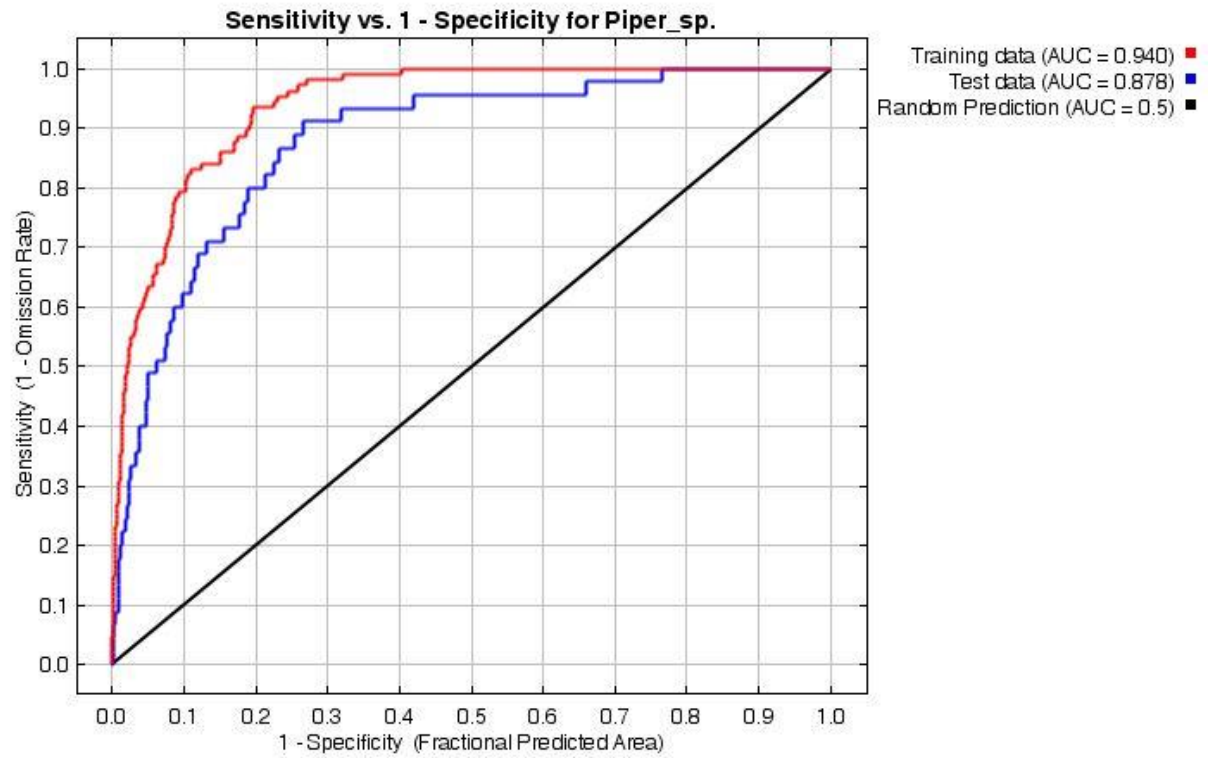
Arrêté

- Arrêté interministériel n° 52005/2010 modifiant l'arrêté interministériel Mine-Forêts n°18633 du 17 octobre 2008 portant mise en protection temporaire globale des sites visés par l'arrêté n°17914 du 18 octobre 2006 et levant la suspension de l'octroi des permis miniers et forestiers pour certains sites.

Annexe 1 : Description des quatre morphotypes de *Tsiperifery*
(*RAFITOHARSON, 2016*)

Morphotype	M1	M2	M3	M4
Feuille	Oblongue et crassulescente	Obovale à acumen obtus	Cordiforme effilée sur la tige orthotrope Lancéolée sur la tige plagiotope	Plus ou moins coriace, cordiforme
Inflorescence	Blanche verdâtre devenant jaune brunâtre à maturité Pédoncule vert violacée	Blanche Pédoncule vert glabre	Jaune	Blanche verdâtre Pédoncule pubescent
Fleur	Eparses insérées systématiquement suivant une direction diagonale sur le diamètre du rachis Bractée de forme triangulaire Filet de couleur blanche surmonté de 2 sacs polliniques jaunes à ouverture apicale	Eparses insérées aléatoirement sur rachis Etamines à filet blanc surmonté de 2 sacs polliniques jaunes blanchâtres à ouverture apicale	Densément serrées réparties aléatoirement sur le rachis Etamines à filet blanc surmonté de 2 sacs polliniques à déhiscence latitudinale	Eparses insérées systématiquement suivant une direction diagonale sur le diamètre du rachis Bractée de forme triangulaire Filet de couleur blanche surmonté de 2 sacs polliniques blancs à ouverture apicale
Fruits	Ovoïde de 0,5-0,6 cm x 0,4 cm de diamètre Pédicelle courte 0,2-0,3 cm avec une protubérance à la base Rouge orangé à maturité	Globuleux de 0,3-0,4 cm de diamètre Pédicelle de 0,8-1,2 cm	Ovoïde de 0,3-0,4 cm x 0,4-0,6 cm de diamètre Pédicelle pubescent de 0,4-0,8 cm Rouge à maturité	

Annexe 2 : Illustration de la courbe ROC sur MaxEnt pour le modèle de distribution actuelle



Annexe 3 : Illustration du seuil de 10 percentile training presence donné par MaxEnt

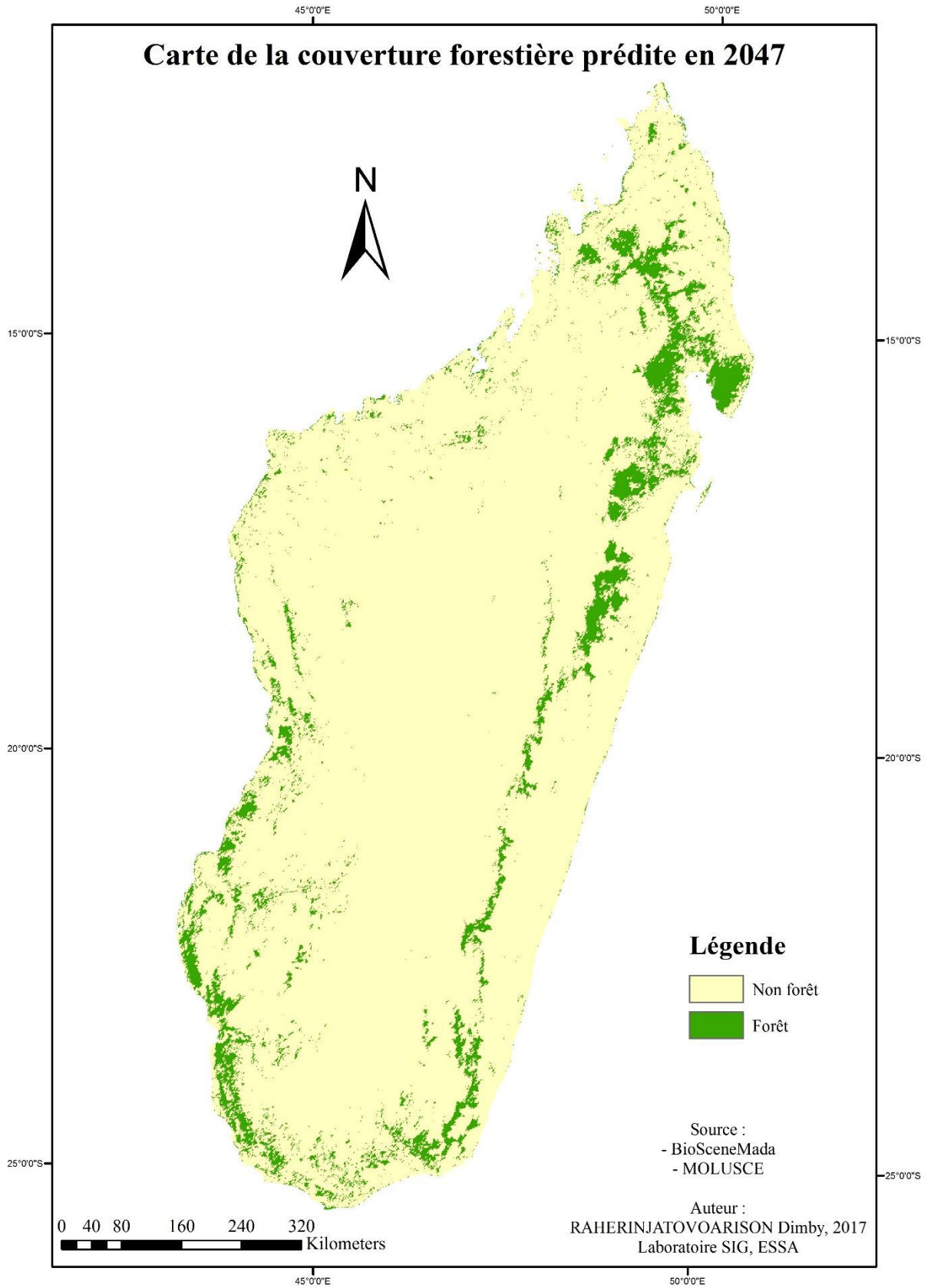
Cumulative threshold	Logistic threshold	Description	Fractional predicted area
1.000	0.015	Fixed cumulative value 1	0.537
5.000	0.080	Fixed cumulative value 5	0.327
10.000	0.138	Fixed cumulative value 10	0.238
2.725	0.043	Minimum training presence	0.402
14.163	0.183	10 percentile training presence	0.191
19.240	0.233	Equal training sensitivity and specificity	0.150
13.521	0.178	Maximum training sensitivity plus specificity	0.197
13.253	0.175	Equal test sensitivity and specificity	0.200
8.149	0.117	Maximum test sensitivity plus specificity	0.265
2.725	0.043	Balance training omission, predicted area and threshold value	0.402
11.934	0.160	Equate entropy of thresholded and original distributions	0.214

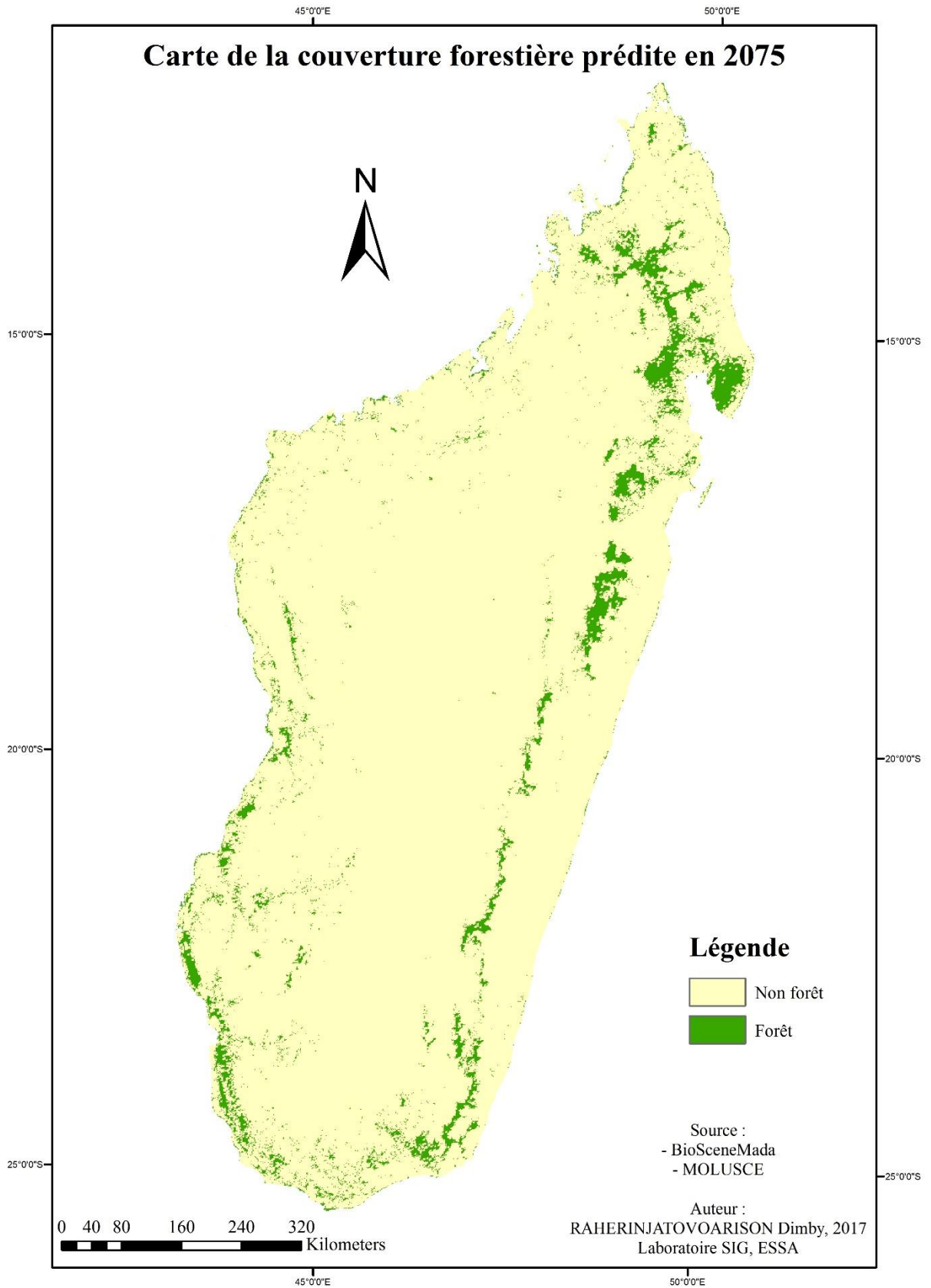
Pour le modèle de distribution actuelle, une probabilité inférieure ou égale à 0,183 correspond à une zone d'absence du *Tsiperifery* et une probabilité supérieure à 0,183 correspond à une zone de présence de l'espèce.

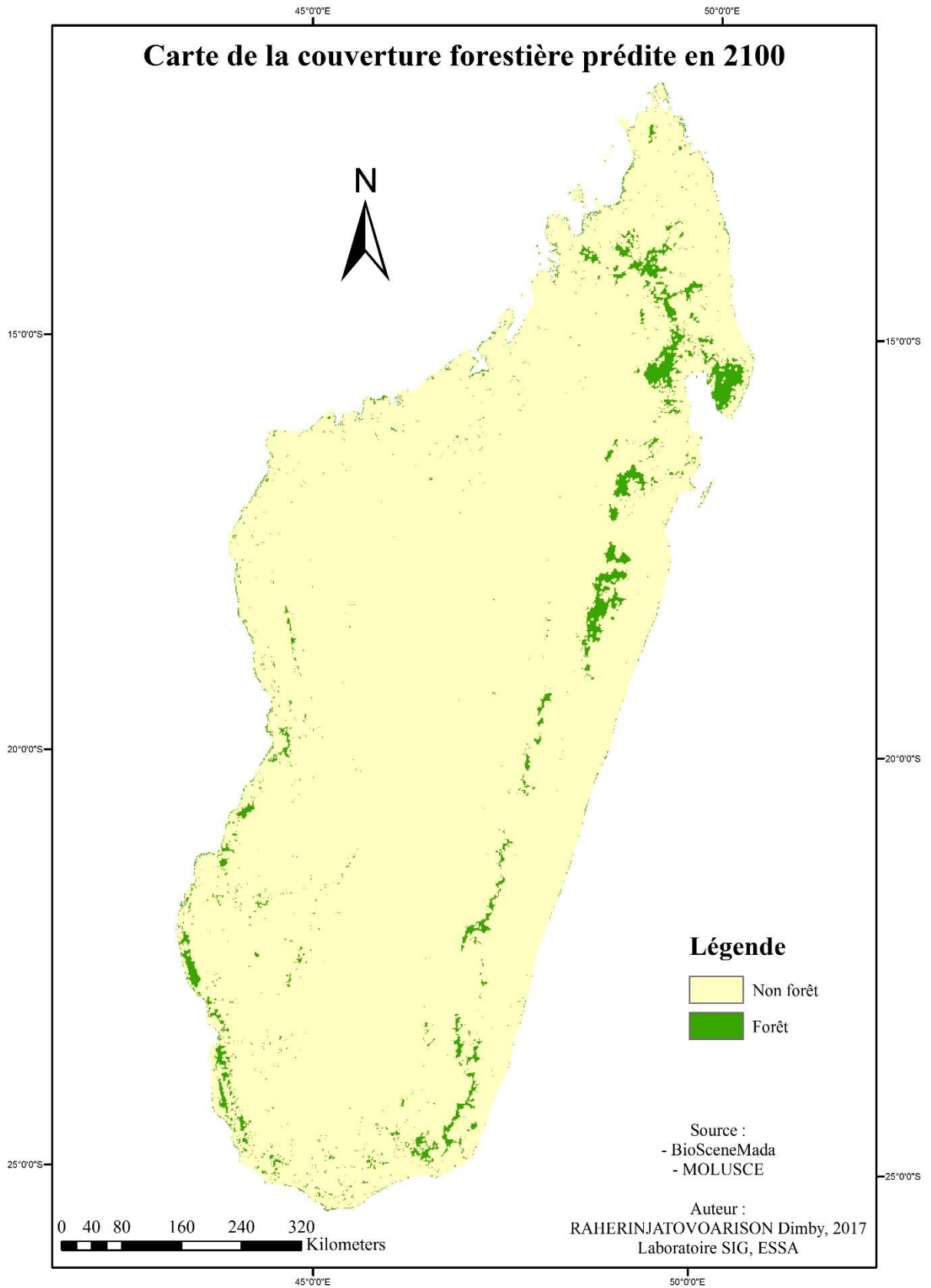
Cumulative threshold	Logistic threshold	Description	Fractional predicted area
1.000	0.014	Fixed cumulative value 1	0.565
5.000	0.096	Fixed cumulative value 5	0.325
10.000	0.179	Fixed cumulative value 10	0.252
1.583	0.021	Minimum training presence	0.485
17.113	0.247	10 percentile training presence	0.190
24.881	0.315	Equal training sensitivity and specificity	0.144
21.645	0.290	Maximum training sensitivity plus specificity	0.161
17.419	0.250	Equal test sensitivity and specificity	0.188
8.467	0.158	Maximum test sensitivity plus specificity	0.270
4.522	0.086	Balance training omission, predicted area and threshold value	0.336
11.704	0.196	Equate entropy of thresholded and original distributions	0.235

Pour le modèle de distribution potentielle en 2100, une probabilité inférieure ou égale à 0,247 correspond à une zone d'absence de l'espèce et une probabilité supérieure à 0,247 correspond à une zone de présence.

Annexe 4 : Cartes des couvertures forestières prédites en 2047, 2075 et 2100







Annexe 5 : Plages de valeurs des variables influençant la distribution du *Tsiperifery*

Intervalles de valeurs pour le modèle de distribution actuelle

Variables	Plages de valeurs
Altitude (m)	[8 - 2011]
Ecart annuel de température (°C)	[11,6 - 21,8]
Ecart diurne moyen (°C)	[6,8 - 14,5]
Isothermalité	[58 - 74]
Précipitations annuelles (mm)	[1081 - 3301]
Précipitations de la période la plus humide (mm)	[198 - 500]
Précipitations de la période la plus sèche (mm)	[2 - 96]
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	[522 - 1275]
Précipitations du trimestre le plus froid (mm)	[10 - 590]
Précipitations du trimestre le plus humide (mm)	[543 - 1277]
Précipitations du trimestre le plus sec (mm)	[10 - 360]
Saisonnalité de la température	[1282 - 2672]
Saisonnalité des précipitations	[39 - 114]
Température maximale de la période la plus chaude (°C)	[24,2 - 34,3]
Température minimale de la période la plus froide (°C)	[5,9 - 18,8]
Température moyenne annuelle (°C)	[15,9 - 25,6]
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	[18,3 - 26,7]
Température moyenne du trimestre le plus froid (°C)	[12,2 - 23,6]
Température moyenne du trimestre le plus humide (°C)	[18,3 - 26,7]
Température moyenne du trimestre le plus sec (°C)	[18,6 - 23,6]

Intervalles de valeurs pour le modèle de distribution en 2100

Variabes	Plages de valeurs
Ecart annuel de température (°C)	[12,1 - 22]
Ecart diurne moyen (°C)	[6,8 - 14,6]
Isothermalité	[56 - 74]
Précipitations annuelles (mm)	[1029 - 3094]
Précipitations de la période la plus humide (mm)	[211 - 531]
Précipitations de la période la plus sèche (mm)	[2 - 77]
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	[533 - 1226]
Précipitations du trimestre le plus froid (mm)	[7 - 540]
Précipitations du trimestre le plus humide (mm)	[542 - 1288]
Précipitations du trimestre le plus sec (mm)	[7 - 304]
Saisonnalité de la température	[1297 - 2784]
Saisonnalité des précipitations	[47 - 118]
Température maximale de la période la plus chaude (°C)	[27,6 - 37,7]
Température minimale de la période la plus froide (°C)	[9,2 - 21,7]
Température moyenne annuelle (°C)	[19 - 28,4]
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	[21,4 - 29,9]
Température moyenne du trimestre le plus froid (°C)	[15,6 - 26,5]
Température moyenne du trimestre le plus humide (°C)	[21,4 - 29,7]
Température moyenne du trimestre le plus sec (°C)	[15,8 - 26,6]

Il y a une certaine augmentation de la température (valeurs) entre le modèle de distribution actuelle et celle en 2100. Par contre, les précipitations diminuent notamment pour les précipitations annuelles et celles en période sèche. Cela peut s'expliquer par l'accentuation de la sécheresse dans certaines zones mais les précipitations tombent dans d'autres régions. Elles peuvent être irrégulières, c'est-à-dire qu'elles sont parfois rares et parfois abondantes selon les régions et les saisons.

**Annexe 6 : Surfaces de présence du *Tsiperifery* par district pour selon
le modèle de distribution actuelle**

Nom Districts	Surfaces exploitables (ha)	Surfaces dans les SAPM et les TG (ha)	Surfaces de présence (ha)
Ambalavao	4 234	15 348	19 581
Ambanja	62 285	145 721	208 006
Ambatolampy	2 244	1 066	3 310
Ambatondrazaka	4 937	124 522	129 459
Ambilobe	35 568	87 512	123 080
Amboasary Atsimo	4 592	9 802	14 394
Ambohimahasoa	8 969	3 168	12 137
Ambositra	5 468	33 848	39 316
Amparafaravola	11 892	3 651	15 543
Analalava	23 142	0	23 142
Andapa	6 246	200 823	207 068
Andilamena	56 991	2 317	59 307
Andramasina	8 919	3 615	12 534
Anjozorobe	2 829	10 351	13 180
Anosibe An'ala	49 047	10 890	59 937
Antalaha	67 858	263 271	331 130
Antanambao Manampotsy	5 625	59	5 684
Antanifotsy	0	17 085	17 085
Antsiranana II	4 282	30 118	34 400
Antsohihy	5 972	0	5 972
Bealanana	128 762	72 471	201 233
Befandriana Nord	47 079	35 460	82 539
Befotaka	39 258	37 965	77 223
Betroka	4 032	4 243	8 275
Boriziny	885	0	885
Brickaville	1 789	154 928	156 717
Fandriana	4 442	13 072	17 514
Farafangana	1 411	2 557	3 968
Fenoarivo Atsinanana	46 756	1 084	47 839
Fianarantsoa I	360	0	360
Iakora	34 871	18 691	53 562
Ifanadiana	24 551	46 274	70 825

Ihosal	776	0	776
Ikongol	3 772	70 872	74 644
Isandra	634	0	634
Ivohibe	7 896	59 805	67 701
Lalangina	2 649	24 902	27 552
Mahanoro	6 484	411	6 895
Mampikony	66	0	66
Manakara	1 566	372	1 938
Mananara	86 483	33 643	120 127
Mananjary	5 521	1 193	6 714
Mandritsara	74 917	38 973	113 889
Manjakandriana	2 027	5 969	7 996
Maroantsetra	47 941	398 425	446 365
Marolambo	24 114	39 025	63 140
Midongy Atsimo	22 858	84 970	107 827
Moramanga	50 999	105 754	156 753
Nosy Varika	12 085	16 391	28 476
Nosy Be	637	355	992
Sainte Marie	2 253	284	2 537
Sambava	44 914	60 382	105 296
Soanierana ivongol	70 743	120 016	190 759
Taolanaro	19 625	155 036	174 661
Toamasina II	4 454	74 395	78 850
Tsaratanana	2 240	0	2 240
Vangaindrano	4 579	34 081	38 660
Vatomandry	1 895	159	2 054
Vavatenina	13 186	38 550	51 736
Vohibato	1 548	15 607	17 155
Vohimarina	56 483	15 337	71 820
Vondrozo	3 451	49 478	52 930
Total	1 282 091	2 794 297	4 076 388

**Annexe 7 : Surfaces de présence du *Tsiperifery* par district pour selon
le modèle de distribution potentielle en 2100**

Nom Districts	Surfaces de présence actuelle (ha)	Surfaces de présence en 2100 (ha)	Pertes de surface (%)
Ambalavao	19 581	5 563	72
Ambanja	208 006	56 385	73
Ambatolampy	3 310	332	90
Ambatondrazaka	129 459	54 348	58
Ambilobe	123 080	43 483	65
Amboasary Atsimo	14 394	1 432	90
Ambohimahasoa	12 137	0	100
Ambositra	39 316	601	98
Amparafaravola	15 543	4 543	71
Analalava	23 142	737	97
Andapa	207 068	61 108	70
Andilamena	59 307	20 923	65
Andramasina	12 534	1 779	86
Anjozorobe	13 180	1 053	92
Anosibe An'ala	59 937	20 285	66
Antalaha	331 130	162 292	51
Antanambao Manampotsy	5 684	0	100
Antanifotsy	17 085	212	99
Antsiranana II	34 400	15 000	56
Antsohihy	5 972	0	100
Bealanana	201 233	61 606	69
Befandriana Nord	82 539	17 591	79
Befotaka	77 223	17 906	77
Betroka	8 275	235	97
Boriziny	885	0	100
Brickaville	156 717	87 685	44
Fandriana	17 514	873	95
Farafangana	3 968	0	100
Fenoarivo Atsinanana	47 839	7 559	84
Fianarantsoa I	360	0	100
Iakora	53 562	2 728	95
Ifanadiana	70 825	14 302	80

Ihosy	776	0	100
Ikongo	74 644	25 951	65
Isandra	634	0	100
Ivohibe	67 701	4 756	93
Lalangina	27 552	1 970	93
Mahanoro	6 895	0	100
Mampikony	66	0	100
Manakara	1 938	0	100
Mananara	120 127	18 093	85
Mananjary	6 714	0	100
Mandritsara	113 889	18 341	84
Manjakandriana	7 996	500	94
Maroantsetra	446 365	213 552	52
Marolambo	63 140	15 498	75
Midongy Atsimo	107 827	15 846	85
Moramanga	156 753	31 859	80
Nosy Varika	28 476	4 722	83
Nosy Be	992	550	45
Sainte Marie	2 537	558	78
Sambava	105 296	30 386	71
Soanierana Ivongo	190 759	63 511	67
Taolanaro	174 661	46 138	74
Toamasina II	78 850	28 808	63
Tsaratanana	2 240	0	100
Vangaindrano	38 660	1 616	96
Vatomandry	2 054	100	95
Vavatenina	51 736	18 618	64
Vohibato	17 155	4 347	75
Vohimarina	71 820	10 103	86
Vondrozo	52 930	9 188	83
Total	4 076 388	1 225 571	70

Annexe 8 : Niche écologique du *Tsiperifery* issue de l'étude en 2011
(par RAZAFIMANDIMBY)

