





#### Mémoire de stage présenté par :

MANEAU Solène

#### Année 2018-2019

Rapport de stage Master Environnement Ecotoxicologie Ecosystèmes Spécialité GEMAREC – parcours GEMAREC- 2ème année

#### Sujet:

# Analyse des dynamiques et des facteurs liés à la régénération forestière du Miombo autour de la Réserve Nationale de Gilé au Mozambique

Réalisé du 04/04/19 au 04/09/19

#### A Nitidae

(500 Rue Jean-François Breton, 34090 Montpellier)

#### Sous la direction de :

- a) MONTFORT Frédérique
- b) GUEROLD François

## Mémoire soutenu publiquement le 06/09/19 devant le jury composé de :

MONTFORT Frédérique tutrice de stage

GUEROLD François tuteur universitaire

DEVIN Simon responsable de parcours

#### REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le CIRAD et l'association Nitidae pour m'avoir offert l'opportunité de vivre une expérience professionnelle et personnelle exceptionnelle dans ce pays magnifique qu'est le Mozambique.

Ensuite je tiens à remercier l'équipe de Nitidae, plus particulièrement Frédérique MONTFORT, ma maître de stage. Je la remercie pour m'avoir fait confiance, pour avoir fait preuve d'une extrême patience et de pédagogie tout au long de mon stage. Je la remercie également de m'avoir accompagné à mes débuts au Mozambique et d'avoir partagé son expérience aussi bien sur le plan professionnel que sur le plan humain, mais également de m'avoir inculqué les rudiments de portugais nécessaires... Je remercie Charline DE ROUVROY et Jean-Baptiste ROELENS qui ont toujours trouvé du temps à m'accorder durant mon temps au Mozambique et qui ont su m'accompagner et me conseiller dans les moments compliqués.

Je remercie bien évidemment François GUEROLD, tuteur universitaire et Simon DEVIN, responsable de parcours qui m'ont accompagné tout au long de mon stage.

Merci à tous les techniciens et partenaires de Nitidae au Mozambique pour leur gentillesse, leur bienveillance et le partage de leur culture.

Merci à José Mohamede Dias, administrateur de la Réserve Nationale de Gilé, Sansao, responsable des fiscais de la Réserve et Alessandro Fusari, coordinateur de projet à la fondation IGF, de m'avoir permis de réaliser mon travail autour et dans la Réserve.

Un grand merci à Pedro, Francisco et Tobias qui m'ont accompagné sur le terrain et qui ont partagé leurs connaissances historiques, floristiques et pédologiques qui ont rendu ce travail possible.

Un merci particulier à Laura qui a veillé sur moi dans des moments délicats au Mozambique.

Merci à toutes les personnes bienveillantes que j'ai rencontré au Mozambique qui ont eu la patience de m'enseigner le portugais et de me faire découvrir ce pays surprenant.

Merci à mes collègues de bureau et amis, Catalina, Corentin et Aramata pour leur présence et soutien sans qui ce travail n'aurait jamais abouti. Merci à leur bonne humeur et gentillesse qui a instauré une ambiance de travail très agréable.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont été là durant ce travail, que ce soit au Mozambique ou à Montpellier pour ces beaux moments et c'est belles découvertes.

# Sommaire

		3
REMERCIEM	MENTS	5
Liste des tab	oleaux	8
Liste des fig	ures	9
Liste des an	nexes	10
Liste des ab	réviations et sigles	11
INTRODUCT	TION	15
1. Synthès	se bibliographique	18
1.1. La	régénération forestière	18
1.2. Le:	s dynamiques de régénération forestière	18
1.3. Le:	s facteurs de régénération	19
1.4. Le:	s forêts de Miombo	21
2. Matérie	el et méthode	23
2.1. Zo:	ne d'étude	23
2.2. Ac	quisition des données	25
2.2.1.	Sélection des sites d'inventaire	26
2.2.2.	Plan d'échantillonnage	26
2.2.3.	Méthodologie d'inventaire	27
2.2.4.	Facteurs étudiés	29
2.3. An	alyse des données	30
2.3.1.	Indicateurs de biodiversité	30
2.3.2.	Tests de comparaison	31
2.3.3.	Composition spécifique	31
2.3.4.	Influence des facteurs	32
3. Résulta	its	33
3.1. Ca	ractéristiques générales des inventaires	33
	pact du degré de perturbation anthropique et influence des facteurs (	
	tion)	
3.2.1.	Caractéristiques des sites d'études	
3.2.2.	Richesse spécifique et diversité	
3.2.3.	Composition spécifique et espèces dominantes	
3.2.4.	Influence des différents facteurs	
	s dynamiques de régénération naturelle	
3.3.1.	Richesse spécifique et diversité	
3.3.2.	Composition spécifique et structure	
4. Discuss	sion	44

4.1. Impact du degré de perturbation anthropique et influence des facteurs s	-
de régénération	44
4.2. Les dynamiques de régénération naturelle	46
4.3. Perspectives de l'étude	47
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES	55
Annexe A: Fiche terrain utilisée lors des prospections	55
Annexe B: Fiche terrain pour la réalisation des inventaires des ligneux	57
Annexe C: Fiche terrain pour l'analyse physique du sol	58
RESUME	61
ABSTRACT	61
SUMARIO	62

# Liste des tableaux

Tableau I: Nombre de placettes par âge et type d'échantillonnage2	7
Tableau II: Liste des variables spatiales utilisées dans l'analyse et de leurs sources	30
Tableau III: Récapitulatif des caractéristiques des villes de Gilé et Naburi et villages de Malema et Musseia	
Comparaisons réalisées avec le test de Kruskal-Wallis	34
Tableau IV: Richesse spécifique, diversité et abondance des jeunes jachères par sites d'études et par âge.	
Comparaison réalisée à l'aide l'ANOVA pour la richesse spécifique et la diversité, suivi du test HSD de Tuke	эy
oour les comparaisons par paire. Pour l'abondance, le test de Kruskal-Wallis	35
Tableau V: Richesse spécifique, diversité et abondance des jeunes jachères par villes et villages.	
Comparaison réalisée à l'aide l'ANOVA, suivie du test HSD de Tukey pour les comparaisons par paire 3	35
Tableau VI: Les 5 espèces dominantes pour chaque lieu calculé avec l'IVI transformé	37
Tableau VII: Tableau résumant les résultats significatifs des facteurs testés sur la richesse spécifique du	
modèle linéaire généralisé avec une loi de Poisson	37
Tableau VIII: Tableau résumant les résultats significatifs des facteurs testés sur l'abondance du modèle	
inéaire généralisé avec une loi de Poisson	38
Tableau IX: Caractéristiques des deux types de sol de la zone d'étude	39
Tableau X: Richesse spécifique, diversité et abondance des jachères de 5 ans en fonction de leur type de	
sol. Comparaison des moyennes réalisée avec l'ANOVA suivie du test HSD de Tukey	39
Tableau XI: Les 10 espèces dominantes pour les deux types de sols calculé avec l'IVI transformé ع	40
Гableau XII: Richesse spécifique cumulée, estimateur Bootstrap et indice de Shannon estimé et	
abondance/ha des jeunes, anciennes jachères et de la forêt mature. Comparaisons réalisées avec le test d	e
Kruskal-Wallis	42
Tableau XIII: Résultats d'IVI pour les 10 premières espèces dominantes des jeunes, anciennes jachères et	
de la forêt mature	42

# Liste des figures

igure 1: Cartographie de la zone d'étude et des placettes échantillonnées	23
igure 2: (a) photo d'un champ de maïs et manioc sur et autour d'une termitière (Gilé), (b) photo d'une	:
izière (Naburi), (c) photo d'un champ de cacahuètes pendant la récolte	24
igure 3: (a) : Jachère 3 ans, (b) : Jachère 5 ans, (c) : Jachère 10ans, (d) : Jachère 20ans, (e) : Jachère de 3	30
ns, (f) : Forêt mature	25
igure 4: Schéma d'un inventaire de placette	28
igure 5: (a) Sondage à la tarière, (b) Analyse physique du sol à l'aide du code Munsell	29
igure 6: Représentation graphique des placettes de jeunes jachères par (a) villes (en rouge) et village (	en
vert) et (b) par lieu avec GI (Gilé) en vert, NB (Naburi) en bleu, MUS (Musseia) en noir et ML (Malema)	en
ouge sur les deux premiers axes de l'ACoP	36
igure 7: Richesse spécifique, diversité et abondance en fonction de la période de déforestation des jeu	ınes
achères. Comparaison des moyennes réalisée avec l'ANOVA suivie du test HSD de Tukey	39
igure 8: Représentation graphique des 15 placettes de jeunes jachères de 5 ans par type de sol Otaco	(en
ouge) et Ecotxocua (en vert) sur les deux premiers axes de l'ACoP basés sur la matrice de distance de E	3ray-
Curtis calculée sur les données d'abondance en espèces	40
igure 9: Boxplot de la hauteur moyenne (à gauche) et du DBH moyen (à droite) en fonction de l'âge de	3S
achères. La comparaison des moyennes a été réalisée avec le test de Kruskal-Wallis	43

# Liste des annexes

Annexe A: Fiche terrain utilisée lors des prospections	55
Annexe B: Fiche terrain pour la réalisation des inventaires des ligneux	57
Annexe C: Fiche terrain pour l'analyse physique du sol	58

# Liste des abréviations et sigles

**ACOP** : Analyse en Coordonnées Principales

**ANAC**: Administration Nationale des Aires de Conservation

ANOVA: Analysis of Variance (Analyse de la Variance)

**DBH**: Diamètre à hauteur de poitrine

GLM: Modèles Linéaires Généralisés

**HSD**: Honest Significant Difference (Réelle différence significative)

IGF: Fondation Internationale pour la Gestion de la Faune

IVI : Indice de Valeur d'Importance

**KW**: Kruskal-Wallis

**ONG**: Organisation Non Gouvernementale

**PFNL**: Produits Forestiers Non Ligneux

REDD+: Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts et rôle de la

conservation, de la gestion durable des forêts et du renforcement des stocks de carbone forestier

RNA: Régénération Naturelle Assistée

RNG: Réserve Nationale de Gilé

RS: Richesse Spécifique

# Présentation des établissements d'accueil

#### L'association Nitidae:

Nitidae est une organisation non gouvernementale née en 2017 de la fusion de deux associations : ETC Terra et Rongead. L'objectif de cette ONG est de développer des projets parvenant à associer préservation de l'environnement en renforcement des économies locales.

Rongead avait été créée en 1983 en menant des actions pour l'amélioration des fonctionnements des filières agroalimentaires et à l'augmentation des revenus des producteurs et de la valeur ajoutée sur les territoires d'interventions. ETC Terra avait été créée plus tard en 2012 et intervenait sur des projets de terrain visant à concilier préservation des ressources naturelles, dynamisme économique dans les territoires ruraux.

Les deux associations partageant des valeurs semblables, la fusion a permis de conjuguer différentes expertises et connaissances afin de proposer des solutions intégrées aux territoires ruraux africains.

L'équipe compte 90 collaborateurs provenant de nombreux domaines (économistes, ingénieurs, agronomes, forestiers, géographes, spécialistes du carbone du sol, experts en SIG et télédétection).

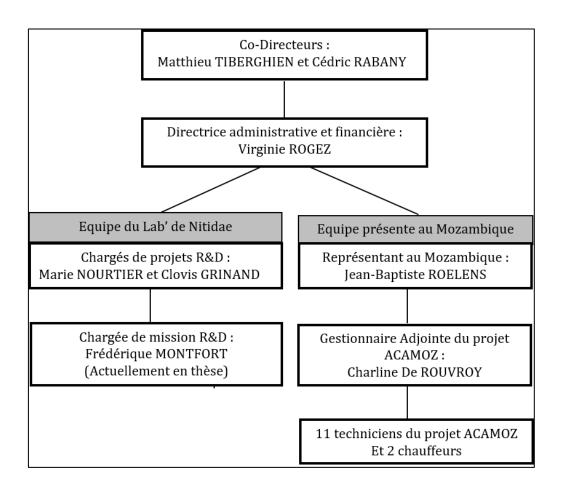
Une trentaine de projets sont actuellement conduits par l'association, principalement au Burkina Faso, à Madagascar, au Mozambique et en Côte d'Ivoire. Une expertise technique peut également être donnée par Nitidae au entreprises agroalimentaires et cosmétique qui souhaitent améliorer la performance des chaînes de valeurs naturelle, atténuer leur impact environnemental, améliorer leur efficacité énergétique et stimuler le développement économique local.

Parmi ses compétences, Nitidae travaille sur la préservation des écosystèmes, notamment des écosystèmes forestiers. Pour se faire, l'association s'inscrit dans le cadre du mécanisme REDD+ (Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts et rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et du renforcement des stocks de carbone forestier). Cela passe par un accompagnement vers l'exploitation durable des forêts en autorisant la valorisation du bois au service des forêts et des populations, ou encore un accompagnement des paysans pour mettre en places des modes de productions écologiquement intensifs et économiquement rentables.

L'association travaille également sur un volet « Agriculture et marché » à deux échelles. A l'échelle des exploitations familiales, elle accompagne à l'adoption de pratiques agricoles durables basées sur des principes d'agro-écologie ou d'agro-foresterie. A l'échelle des organisations de producteurs, Nitidae facilite l'accès aux marchés locaux et internationaux. Enfin, à l'échelle des territoires, l'association forme des alliances entre opérateurs du secteur privé, producteurs et collectivités territoriales pour une meilleure

gestion des ressources naturelles. Enfin, le volet « Bio-énergie et Déchets » passe par la valorisation énergétique des déchets en les réutilisant pour permettre aux agro-industriels de les transformer en énergie nécessaire à leurs activités de transformation. Nitidae travaille également sur le développement du biogaz et de la carbonisation améliorée.

Au sein de Nitidae, le pôle Recherche & Développement de l'association (Nitidae lab') a pour but de suivre, analyser et modéliser les dynamiques des paysages et territoires afin d'améliorer le pilotage de projets de développement et d'évaluer les impacts socio-environnementaux. Il participe à la conception des projets de l'association afin de prendre en compte les derniers résultats de la recherche pour l'orientation des activités et de prévoir le suivi des impacts dès le démarrage des projets. Ce laboratoire regroupe l'expertise technique et scientifique de Nitidæ (télédétection, modélisation spatiale, système d'information géographique, science des sols, écologie forestière, biodiversité, hydrologie, etc.) et travaille en étroite collaboration avec la recherche scientifique (instituts de recherche internationaux et universités).



Organigramme de l'équipe du Lab' Nitidae et de l'équipe du Mozambique (l'association comptant 90 collaborateurs, de nombreux services et projets, seuls les services avec lesquels j'ai travaillé sont présents dans l'organigramme).

#### Le CIRAD:

Le Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) est un organisme français de recherche en agronomie axé sur le développement international durable. Le Cirad est un Epic (Etablissement public à caractère industriel et commercial) placé sous la double tutelle du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère des Affaires étrangères et du Développement international.

La plupart des recherches du Cirad sont conduites en partenariat avec des pays en développement, en tenant compte des conséquences écologiques, économiques et sociales à long terme. Les travaux du Cirad portent sur la recherche, la formation, la diffusion de l'information, l'innovation et l'évaluation, et ses domaines de compétences comprennent les sciences de la vie, les sciences de l'homme et le génie, ainsi que leurs applications dans l'agriculture et l'alimentation, la gestion des ressources naturelles et la société.

Ce stage est connecté aux travaux menés par l'unité de recherche *Forêts et Sociétés*, affiliée au département scientifique *Environnement et Sociétés*, via les travaux de thèse de F. Montfort. L'objectif principal de l'unité est de conserver les forêts tropicales par la mise au point de pratiques de gestion durable assurant d'une part le maintien des services environnementaux clés (biodiversité, stockage de carbone), la production de biens et contribuant d'autre part à l'amélioration des conditions de vie des populations locales et de la société en général.

#### **INTRODUCTION**

Le Miombo est le mot vernaculaire utilisé pour faire référence aux forêts claires d'Afrique Australe (Malaisse, 1979). Cette formation végétale est caractérisée par la prédominance des espèces appartenant aux genres *Brachystegia*, *Julbernardia* et *Isoberlinia* (Campbell, 1996). Ses propriétés physionomiques et fonctionnelles sont tellement variées que le Miombo est caractérisé par de nombreux écosystèmes allant de la forêt à feuilles caduques aux savanes ouvertes (Malmer, 2007). Sa superficie d'environ 3,6 millions de km² (couvrant 10% du territoire africain) en fait la plus grande formation de forêt tropicale sèche en Afrique (Malaisse, 1979; White, 1983; Campbell, 1996). Bien que considérées comme des écosystèmes menacés, les forêts sèches ont reçu moins d'attention de la part de la communauté scientifique que les forêts humides et les dynamiques forestières de ces écosystèmes sont souvent moins connues (Blackie *et al.*, 2014).

Le Mozambique, situé au Sud-Est du continent africain, compte encore une large proportion de forêts naturelles, principalement des forêts de Miombo, couvrant plus de 40% du pays (GoM, 2018). Il s'agit d'un des pays les plus pauvres au monde avec une population de 28 millions d'habitants en 2015 dont 54,7% vivent sous le seuil de pauvreté (UNDP, 2016). Près de 70% de la population dépend des ressources naturelles, telles que les forêts, pour assurer leur subsistance (produits forestiers non-ligneux, matériaux de construction, source d'énergie...) (Rodrigues de Aquino *et al.* 2017). Cependant, les forêts de Miombo font face à de multiples menaces (déforestation, dégradation...). La déforestation y est rapide à cause de la croissance démographique qui donne lieu à une production accrue de charbon de bois, à une expansion de l'agriculture familiale et commerciale et à l'expansion urbaine. Entre 2003 et 2013, 267 000 ha de forêt par an ont été deforestés (GoM, 2018).

L'agriculture sur brûlis (abattis-brûlis) est la principale cause de la déforestation au Mozambique, représentant 65% de la déforestation entre 2000 et 2012 (GoM, 2018). La pratique de l'agriculture sur brûlis consiste à couper une portion de forêt, brûler les débris végétaux sur la parcelle pour enrichir le sol puis cultiver. La parcelle va ensuite être cultivée pendant quelques années jusqu'à une baisse des rendements puis être mise en jachère pendant une durée variable pour permettre à la terre de retrouver sa fertilité (Floret et al. 1993). La mise en jachère n'est pas un abandon total mais reste un lieu de production puisque le paysan ou l'éleveur peut continuer à en tirer des ressources en récoltant du bois de chauffe ou des produits forestiers non ligneux (PFNL), comme des champignons. Seulement, la croissance démographique ne laisse plus suffisamment de temps de jachère pour permettre au sol de retrouver toutes ses capacités agronomiques (Floret et al. 1993). Après plusieurs années de cultures, le sol voit sa fertilité diminuer, les paysans renouvellent alors la pratique d'abattis-brûlis sur une autre zone et recommencent

leurs cycles de culture (Peltier, 2015). Ainsi, les cycles de jachère devenus trop courts et le sol appauvri, la biodiversité et la biomasse sur ces terres se voient diminuées. Les plantes invasives qui s'installent après abandon de la jachère empêchent la forêt de se régénérer (Peltier, 2015).

La problématique de déforestation due à la pratique de l'agriculture sur brûlis est très présente atour de la Réserve Nationale de Gilé (RNG) créée en 1932 (Mercier *et al.*, 2016). La Réserve est située dans la partie Est de la province de Zambézie et occupe une grande partie des districts de Gilé et Pebane (Agrisud, 2017). Elle est cogérée par l'Administration Nationale des Aires de Conservation (ANAC) et la fondation Internationale pour la Gestion de la Faune (IGF). La RNG représente le plus grand morceau d'un seul tenant de Miombo dans la province de Zambézia au Mozambique. Les années de guerre civile qui ont suivi l'indépendance du Mozambique en 1975, ont fortement impacté la faune et la flore abritée par la Réserve (Delbergue, 2015). Actuellement, sa périphérie est sujette à des pressions anthropiques grandissantes, dues à une croissance démographique importante, à l'utilisation de techniques d'agriculture sur brûlis consommatrices d'espace, à la production de charbon et à l'exploitation de bois (Berton, 2013; Mercier *et al.*, 2016).

Pour diminuer ces pressions, plusieurs projets visant à lutter contre la déforestation et la dégradation de la forêt de Miombo (Projet REDD+, projet d'appui agricole...) ont été mis en œuvre en périphérie de la Réserve. C'est dans cette logique que s'inscrit le travail de l'ONG Nitidae qui coordonne différents projets autour de la RNG depuis 2014 à la demande d'IGF (Fondation Internationale pour la Gestion de la Faune), initialement pour développer la stratégie REDD+ de la zone (stratégie de développement agricole – en partenariat avec Agrisud International - et comptabilité et valorisation carbone du projet).

En continuité de ces activités, Nitidae réfléchit à la mise en place de projets de restauration des paysages forestiers adaptés aux forêts de Miombo. Certaines études ont mis en évidence une remarquable capacité de régénération des forêts de Miombo après une perturbation (Williams *et al.*, 2008; Chinuwo *et al.*, 2010; Kalaba *et al.*, 2013), ce qui représente une opportunité pour la restauration écologique de certaines zones. Les méthodes de restauration passive sont en effet, peu coûteuses et souvent recommandées pour réaliser une restauration à large échelle (Chazdon, 2017). Cependant, elles nécessitent une compréhension en amont de la résilience de la forêt aux perturbations et une évaluation de la capacité de régénération dans la zone d'étude.

C'est dans cette perspective que s'inscrit cette étude, qui a pour objectif d'analyser les dynamiques de régénération naturelle du Miombo après agriculture sur brûlis en périphérie de la Réserve Nationale de Gilé pour différents degrés de perturbation anthropique (villes et villages). Dans notre étude, les degrés de perturbation sont caractérisés par l'ancienneté de l'occupation du sol et la densité de population alentour.

#### Les questions de recherche sous-jacentes sont les suivantes :

- Comment le degré de pression anthropique influence les premiers stades de régénération forestière ?
- Quels facteurs environnementaux et anthropiques impactent la régénération naturelle forestière du Miombo ?
- Comment évolue la richesse spécifique, la composition floristique et la structure de la végétation au cours des différents stage de la succession ?

#### Quatre hypothèses sont testées :

- La richesse spécifique et la diversité sont plus élevées dans les jachères de village que dans les jachères de ville
- Plus les jachères sont proches de la ville et éloignées de la forêt mature, plus la richesse spécifique et la diversité sont importantes
- Les conditions pédologiques influencent la richesse spécifique, la diversité et la composition floristique des jachères
- Les jachères les plus anciennes présentent des caractéristiques plus proches de la forêt mature que les jeunes jachères

# 1. Synthèse bibliographique

# 1.1. La régénération forestière

Alors que la forêt est une ressource vitale pour plus d'un milliard de personnes et qu'elle fournit un grand nombre de services écosystémiques (protection des terres contre l'érosion, régulation de l'eau, stock de carbone, biodiversité...), les pressions exercées sur elle ne cessent de s'accroître. La surface forestière mondiale représentait 4 128 millions d'hectares en 1990 (soit 31,6% de la surface totale des terres émergées) contre 3 999 millions d'ha en 2015 (soit 30,6% de la surface totale émergée des terres), (FAO, 2015). Bien que la déforestation mondiale semble ralentir dû à une meilleure gestion (FAO, 2015), le sujet reste sensible dans de nombreuses zones du monde.

Dans ce contexte, les forêts tropicales semblent avoir un rôle prépondérant puisqu'elles recèlent la majorité de la diversité d'espèces ligneuses (53 000 espèces d'arbres) (Rozendaal *et al.* 2019). Seulement, beaucoup d'entre elles se sont vu disparaître au profit de nouvelles terres agricoles. En ce sens, l'étude et la compréhension de la régénération forestière s'impose comme un outil nécessaire pour une gestion raisonnée de cette ressource. Dans des conditions appropriées, la régénération naturelle (succession secondaire) des forêts tropicales se produit d'elle-même, en suivant des processus écologiques de colonisation d'espèces et d'assemblage de communautés (Chazdon et Guariguata, 2016).

## 1.2. Les dynamiques de régénération forestière

D'après l'étude menée par Rozendaal et al. (2019), les forêts tropicales se régénèrent rapidement en termes de richesse spécifique mais très lentement en ce qui concerne la composition spécifique. Pendant cette succession, l'établissement des arbres dépend de la disponibilité en eau, de la qualité et du taux de recouvrement de la forêt mature aux alentours mais aussi le type et l'intensité de l'usage des sols. Ces résultats ont pu mettre en évidence le fait que l'âge de la jachère est la variable qui détermine le plus les dynamiques de régénération. Ces auteurs montrent qu'il faudrait en moyenne 54 ans à une parcelle abandonnée pour retrouver une richesse spécifique semblable à celle de la forêt mature et en moyenne 780 ans pour rétablir une composition spécifique semblable à celle de la forêt mature.

Bien que les forêts humides aient plus de diversité et un sol plus fertile, le rétablissement de la composition spécifique peut y être plus long que dans les forêts tropicales sèches (Rozendaal *et al.*, 2019). En effet, le nombre d'espèces y est tellement important qu'il sera d'autant plus compliqué pour les espèces plus rares de se rétablir.

# 1.3. Les facteurs de régénération

Facteurs climatiques et édaphiques: Bien qu'une corrélation positive ait été établie entre les précipitations et la biomasse des plantes, (Bell, 1982, Coe et al. 1976) il faut toutefois préciser que cette relation est modifiée par d'autres facteurs comme la texture du sol et sa disponibilité en eau, la disponibilité des nutriments du sol, le degré d'herbivorie, lui-même corrélé positivement avec la disponibilité des nutriments du sol ou encore le feu (Bell, 1982). Ayala-Orozco et al. (2018) ont établi une corrélation entre les propriétés du sol et la raréfaction de la richesse des espèces ligneuses. Toutefois, cette étude précise que les résultats peuvent être contradictoires dans la littérature. En effet, de grandes variations sont observées car elles dépendent du site étudié, du type de sol ou encore de la gestion historique du sol. Il est donc compliqué de généraliser ces résultats.

La qualité des sols dans les forêts, et ici dans les forêts tropicales sèches, est également altérée par les changements d'utilisation des terres (Ayala-Orozco et al. 2018). Alors que beaucoup d'études ont été menées sur la résilience de la forêt, nous en savons peu sur la résilience du sol. L'étude de Ayala-Orozco et al. (2018) a testé l'hypothèse que la résilience végétale est témoin de la résilience du sol, puisque cela a été supposé pendant longtemps. Les propriétés résilientes du sol ont été évaluées au Mexique sur une zone d'étude de 800km² avant, pendant et après le pâturage. Ici, la résilience est définie comme la résistance à la pression et au recouvrement des propriétés après abandon du pâturage. Dans le cadre de cette étude, un tiers des propriétés du sol étudiées n'étaient pas résistantes. Après le départ du pâturage, les précipitations ont tendance à beaucoup éroder la zone et donc à entraîner une perte des nutriments importante du sol. Alors que le carbone et l'azote se résilient très rapidement grâce à la photosynthèse et à la fixation biologique, la quantité de phosphore disponible ne se résilie même pas après 30 ans de succession secondaire. Ce manque de phosphore pourrait avoir un effet cascade sur les propriétés de l'écosystème et retarder la résilience. Dans cette étude, alors que la végétation se résilie très vite, certaines propriétés du sol mettent beaucoup de temps à se résilier, voire ne se résilient pas du tout. On ne peut donc pas utiliser la résilience végétale comme témoin de la résilience du sol. Les mycorhizes pourraient être à l'origine de ce décalage, car elles permettent aux plantes de capter des nutriments dans le sol même s'il en est pauvre, notamment de l'azote et du phosphore (Mousain et al. 1997).

Les feux : Si les facteurs sont nombreux, ils n'ont pas tous le même rôle sur la régénération selon le type de forêt. Le feu, par exemple, occupe une place prépondérante dans les forêts sèches et les savanes alors qu'il n'est pas un acteur majeur dans les forêts tropicales (Hoffmann et al., 2009). Ces zones plus sèches victimes de feux risquent d'y être de plus en plus confrontées à cause du réchauffement climatique. Le climat tend à favoriser des feux plus réguliers et d'une plus forte intensité. Certaines de ces forêts sont parfois prises dans le « piège du feu » (Hoffmann et al. 2009), c'est-à-dire que les feux réguliers empêchent le recrutement de jeunes arbres en arbres matures. En effet, les individus qui font le plus preuve de

résistance face au feu sont ceux qui possèdent une importante épaisseur d'écorce, c'est-à-dire les individus au diamètre important. Le feu reste un sujet controversé puisque certains résultats d'expériences démontrent des effets positifs comme une meilleure activité microbienne du sol et un développement accru de champignons donc une meilleure décomposition des matières organiques dans des forêts de pins (Pinus radiata) et d'Eucalyptus (Eucalyptus) en Australie (Stirling et al. 2019). Si le feu modifie les écosystèmes en supprimant et en altérant les conditions physiques et biologiques (Buckingham et al. 2019), il modifie également les habitats de la faune de la litière du sol, les décomposeurs. Après un feu, on note donc une nette diminution et l'abondance et de la richesse taxonomique (Buckingham et al. 2019). Il y a une perte importante d'organismes responsables de la décomposition, et donc une remise à disposition des nutriments de la litière dans le sol plus lente (Buckingham et al. 2019). Ribeiro et al. (2013), dans son étude sur la Réserve Nationale de Niassa (Mozambique) souligne que des feux répétés peuvent transformer la forêt en broussailles ou prairie. Ils modifient également la composition spécifique puisque les espèces sensibles au feu déclinent en cas de feux répétés.

Facteurs biotiques: Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre des plantes et des champignons au niveau des racines. Elles sont alors un élément clef à évoquer dans le cadre de notre étude puisque les sols du Miombo sont connus pour être pauvres en azote et en phosphore (Munyanziza, 1994). Les associations symbiotiques mycorhiziennes concernent 90% des taxons végétaux, parmi elles, seulement 3% des taxa sont ectomycorhizés et les reste est endomycorhizé (Mousain, 1997). Certains auteurs évoquent la résilience des ectomycorhizes après des feux de forêt. Des études sur ce sujet ont été menées en Amérique de l'Ouest, où il a pu être démontré que la régénération des pins après un feu de forêt dépend directement de la présence et donc de la capacité de résilience des ectomycorhizes (Glassman et al. 2016). Après avoir réalisé des échantillons avant et après le passage d'un feu, cette étude a noté la grande capacité de régénération des ectomycorhizes : la banque de spores d'ectomycorhizes survit très bien au feu bien que la communauté soit plus réduite et différente de la banque de spores de la forêt mature. La capacité à fixer l'azote est un atout pour les plantes qui sont dans un milieu où l'azote est le facteur limitant (Högberg, 1986). Bien que la végétation ectomycorhizée soit minoritaire dans le monde, les espèces ectomycorhizées représentent 70% de l'aire basale de la forêt du Miombo (Högberg, 1986).

D'autres facteurs biotiques, comme les frugivores peuvent contribuer à la régénération forestière. Dans une étude publiée en 2018, Gonzalez-Castro *et al.* ont tenté de comprendre comment l'avifaune frugivore structurent les communautés végétales par le biais de la dispersion des graines dans les successions secondaires de forêts tropicales (Porto Rico). Ils ont pu comparer des sites où des graines ont été dispersées en prenant en compte la relative abondance des espèces dans l'environnement à l'échelle locale et à l'échelle du paysage et des sites où les dispersions ont été effectuées par les oiseaux en les attirants avec des perchoirs. A l'issu de cette expérience, ils ont pu conclure que le site où la dispersion dépendait uniquement de l'avifaune frugivore disposait d'une plus grande richesse spécifique et que la communauté

de plantes était bien différente des sites où les graines ont été dispersées à la main en ne prenant en compte que la relative abondance des espèces. Ils ont pu noter parfois une importante abondance d'espèces rares et une diminution de la dominance des espèces communes. Les frugivores contribuent donc à la régénération et au maintien d'espèces rares.

Si les pressions sur les forêts sont nombreuses, la majorité des impacts sur les forêts tropicales en Afrique centrale sont dû à l'agriculture itinérante et à l'extraction de bois utilisé pour le feu (Peltier et al. 2015).

#### 1.4. Les forêts de Miombo

En Afrique, la forêt de Miombo est le type de végétation le plus étendu (Giliba, 2011) puisqu'il couvre 10% du territoire (Malmer 2007). Il constitue les forêts principales de l'Angola, de la Zambie, de la Tanzanie, du Malawi, du Mozambique et du Zimbabwe (Malmer, 2007). Selon les définitions, cette forêt représente entre 2,5 à 4 millions de km² (Malmer, 2007).

Les précipitations annuelles sont comprises entre 55 et 1200mm et la température annuelle moyenne est comprise entre 15 et 25°C. La saison sèche peut durer entre 3 et 7 mois. Cette forêt est donc divisée en zones sèches et zones humides qui présentent des compositions floristiques et fonctions différentes, aussi bien des forêts à feuilles non persistantes que des savanes ouvertes (Malmer, 2007). Les forêts de miombo sont dominées par des espèces ligneuses du genre Brachystegia, Julbernardia et Isoberlina appartenant toutes à la famille des Fabacées (Caesalpinioideae). Les zones humides comptent une plus grande diversité floristique et des espèces ligneuses plus hautes que les zones sèches (Malmer, 2007).

Les sols du miombo sont caractérisés par des ferrasols, des acrisols, des luvisols et des nitisols. Leur capacité d'échange cationique est faible, ainsi que les bases échangeables (Malmer, 2007). En revanche, les propriétés minérales et le pH sont variables selon les zones. De manière générale, le sol est pauvre en matière organique et en azote disponible (Malmer, 2007). La matière organique déjà pauvre se voit réduite de 50% à cause des pratiques de l'agriculture et l'azote disponible est si faible à cause des feux fréquents et de la mauvaise décomposition due à une acidité globale des sols (Malmer, 2007). Les feux en fin de saison sèche sont un réel problème pour la qualité des sols et le développement des ligneux matures (Malmer, 2007).

Les forêts de Miombo présentent une richesse floristique et un fort endémisme (Campbell, 1996). Elles ont également une importance cruciale pour la fourniture de services écosystémiques (protection des terres contre l'érosion, régulation de l'eau, stock de carbone, biodiversité...) et représente une part importante des moyens de subsistance des populations locales (produits forestiers non-ligneux, matériaux de construction, source d'énergie...) (Chidumayo and Gumbo, 2010). Cependant, malgré leur importance écologique et socio-économique, les plusieurs scénarios prévoient une conversion importante de la forêt

de Miombo en terres agricoles au cours des quelques décennies à venir, ce qui en fera le biome le plus touché par les changements d'usages du sol selon les prédictions (Leadley et al. 2010).

Jew *et al.* (2016) soulève tout de même que le Miombo possède des capacités de régénération remarquables après les perturbations par le biais des racines et des souches, notamment après l'agriculture, la production de charbon et la coupe sélective. Seulement, peu d'études sur le Miombo sont réalisées hors des aires protégées, alors que la majeure partie de cet écosystème n'est pas situé dans ces aires. Encore moins d'études sont conduites dans les zones où l'agriculture a encore lieu (Jew *et al.*, 2016). De plus, peu d'études de végétation du Miombo sont menées au Mozambique. Celles qui existent concernent la Réserve Nationale de Niassa dans le nord de pays (Ryan et Williams 2010 et Ribeiro *et al.*, 2013).

#### 2. Matériel et méthode

#### 2.1. Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans le Nord-Est du Mozambique, dans la province de Zambézia, en périphérie de la Réserve Nationale de Gilé (RNG) (Figure 1). La RNG se situe sur les districts de Gilé, Pébane, entre 16°14'45" et 16°50'30" de latitude et entre 38°05'38" et 38°48'45" de longitude. Originellement créée en 1932 comme réserve de chasse partielle d'une étendue de 283 600 ha, la Réserve Nationale de Gilé, elle s'est vue agrandie par une zone tampon de 152 800 ha en 2011 (Mercier *et al.*, 2016). L'altitude est comprise entre 30 et 200 mètres au-dessus du niveau de la mer (Prin, 2008).

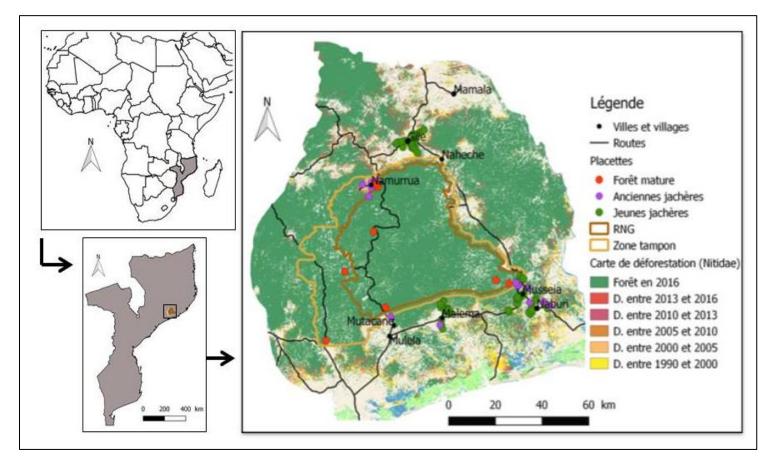


Figure 1: Cartographie de la zone d'étude et des placettes échantillonnées

La zone d'étude dispose d'un climat tropical humide à subtropical, avec pluviométrie annuelle moyenne de 1000-1200mm (Lamarre, 2017). Il y a une saison des pluies marquée entre le mois de novembre et avril puis une saison sèche entre mai et octobre. Les températures varient durant la saison sèche, de 13°C (moyenne minimum en juin) à 35,7°C (moyenne maximum en octobre). Les variations de températures pendant la saison des pluies sont moins marquées (Pascal, 2008).

La RNG est couverte majoritairement par de la forêt de Miombo. Sa zone tampon et sa périphérie sont caractérisées par une mosaïque hétérogène de paysages composés principalement de champ de cultures (manioc, maïs, haricots, cacahuètes...voire mêmes quelques rizières dans les zones le plus humides) (Figure 2) de jachères de différents âges (Figure 3 a-e) et de zones forestières (Figure 3 f).



Figure 2: (a) photo d'un champ de maïs et manioc sur et autour d'une termitière (Gilé), (b) photo d'une rizière (Naburi), (c) photo d'un champ de cacahuètes pendant la récolte.



Figure 3: (a): Jachère 3 ans, (b): Jachère 5 ans, (c): Jachère 10ans, (d): Jachère 20ans, (e): Jachère de 30 ans, (f): Forêt mature

D'après les travaux de Berton (2013), il existe trois principaux types de sol autour de la RNG : les sols foncés argilo-limoneux situés dans les bas-fonds et les interfluves, avec une bonne capacité de rétention en eau et d'échanges cationiques (nom local : Ntxipa ou Nipatxi) ; les sols rouge argilo-sableux de type ferralitique (Kotxocua ou Ecotxocua) et enfin les sols blancs sableux très érosifs et disposant d'une faible capacité d'échange cationique (Muthaka ou Otaco), (Lamarre 2017).

# 2.2. Acquisition des données

Le suivi a été réalisé en termes de biodiversité et de structure de la végétation ligneuse à l'aide d'inventaires floristiques et en termes de propriété physiques du sol sur des zones de jachères postagriculture sur brûlis de différents âges et des zones de forêt mature non perturbées.

#### 2.2.1. Sélection des sites d'inventaire

Pour les inventaires de jachère, quatre sites d'études ont été choisis : deux villes (Gilé et Naburi) et deux villages (Malema et Musseia) (Figure 1). Les sites d'inventaire ont été sélectionnés à l'aide d'entretiens informels réalisés avec les agriculteurs locaux pour identifier des sites ayant un âge et une histoire connus. Pour chaque nouveau site, une fiche avec les informations concernant les types de sol, les usages du sol de la placette, l'âge de la jachère, la fréquence des feux, et la récolte de bois et de produits non ligneux ont été relevées (ANNEXES

Annexe A). Les points GPS de chaque placette ont été relevés, ainsi que des photos. Après comparaison des fiches, les sites qui présentaient les informations les plus complètes ont été sélectionnés pour la réalisation des inventaires. Les jachères ont été classées en 5 classes en fonction de l'âge de la jachère : [0-3], [4-6], [8-12], [20-25] et [30-35] ans.

Les inventaires en forêt mature non perturbée ont été réalisés à l'intérieur de la zone cœur de la RNG et dans la zone tampon, sur des sites choisis de façon aléatoire.

## 2.2.2. Plan d'échantillonnage

Les inventaires sont issus de 3 campagnes d'inventaires : une campagne d'inventaires réalisée d'avril à juin 2019, une en 2016 (Montfort, 2016), et les inventaires en forêt ont été réalisés en 2015 par l'équipe de Nitidae. Ainsi, toutes les données ont pu être combinées et analysées. 92 placettes ont été échantillonnées et utilisées pour cette étude (Tableau I).

Impact du degré de perturbation anthropique et influence des facteurs sur les premiers stades de régénération: Pour analyser l'impact du degré de perturbation anthropique sur la régénération naturelle et les facteurs influençant la régénération, 2 villes (Gilé et Naburi) et 2 villages (Malema et Musseia) ont été sélectionnés autour de la RNG. Pour chaque ville et village, 5 placettes des trois premières classes d'âge, [0-3],[4-6] et [8-10] ans ont été échantillonnées et inventoriées à l'exception de la ville de Naburi où seulement 3 placettes de [0-3],[4-6] et [8-10] ont été effectuées. 54 placettes ont été utilisées au total.

Pour se concentrer sur l'influence du facteur pédologique, un inventaire sol a été réalisé sur **15 placettes** de 5 ans à Gilé.

**Dynamique de régénération naturelle**: Afin de mieux comprendre les dynamiques de régénération naturelle du Miombo, 8 placettes de jachère par classe d'âge ([4-6], [8-12], [20-25], [30-35]ans) et 8 placettes de forêt mature ont été utilisées dans l'analyse (Tableau I). Seuls les individus de plus de 5cm de DBH ont été pris en compte dans ces analyses. **40 placettes ont été utilisées**.

Tableau I: Nombre de placettes par âge et type d'échantillonnage.

	Âge					Nombre total de	
Type d'échantillonnage	[0-3]	[4-6]	[8-12]	[20-25]	[30-35]	Forêt mature	placettes
Ligneux	18	30	20	8	8	8	02
Sol	0	15	0	0	0	0	92

## 2.2.3. Méthodologie d'inventaire

Inventaire des ligneux: Les inventaires ont été réalisés sur des placettes circulaires d'un rayon de 10m pour les jachères de [0-3],[4-6] et [8-10] ans et d'un rayon de 16m pour les jachères de [20-25], [30-35] ans ainsi que les placettes de la forêt mature. Elles ont été placées aléatoirement sur la zone d'intérêt. Un rayon de 10m (soit 314m²) a ainsi été choisi en se basant sur la courbe d'accumulation des espèces réalisée durant de précédents travaux de Montfort (2016) pour les placettes de [0-3],[4-6] et [8-10] ans et un rayon de 16m (soit 804m²) pour les placettes de [20-25], [30-35] ans et celles de la forêt mature. La placette est ainsi séparée en 4 zones à l'aide de rubans de mesure (Figure 4). Sur chaque placette, l'inventaire floristique a été réalisé à l'aide d'un botaniste local pour l'identification des ligneux et des herbacées en langue Lomwé. Les correspondances aux noms latins ont été permises avec le document de correspondance réalisé par l'association Nitidae et la checklist des noms vernaculaires des plantes du Mozambique de de Koning (1993). Les sujets qui n'ont pas pu être identifiés sur le terrain ont été photographiés, récoltés et séchés dans un herbier pour permettre une identification par la suite à l'aide de guides (van Wyk et. Al, 2013) ainsi qu'avec un herbier photo réalisé par Montfort (2016).

Pour les espèces ligneuses, le suivi a été réalisé en termes de biodiversité végétale pour tous les individus et de biomasse aérienne (diamètre et hauteur) pour les individus de diamètre supérieur à 5cm. Le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) a été mesuré en utilisant un mètre ruban et la hauteur en utilisant un clinomètre. Toutes ces informations ont été relevées sur des fiches d'inventaires terrain préparées en amont ().

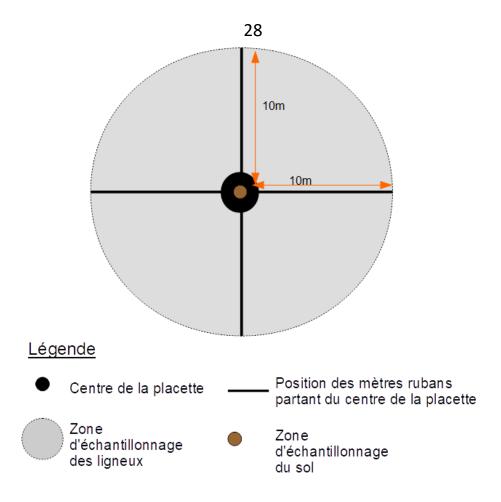
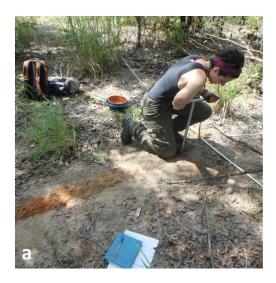


Figure 4: Schéma d'un inventaire de placette

Inventaire de sol : Un sondage à la tarière d'un mètre de profondeur a été réalisé au centre de la placette afin de décrire les propriétés physique du sol (texture, couleur, structure, racine, humidité, teneur en éléments grossiers...). Cette description a été réalisée tous les 10cm et les informations ont été relevées sur une fiche de terrain (Annexe C). L'appréciation de la texture du sol a été réalisée avec le test de boudin. L'analyse de la couleur a été possible grâce à l'utilisation du code Munsell (Figure 5) Le reste des informations ont été récoltées suite à une appréciation visuelle et tactile. Les analyses ont été croisées avec les noms de sols locaux (en Lomwé) et les descriptions faites par les agriculteurs. Deux noms principaux ont été cités : Otaco ou Muthaka (Lamarre, 2017) et Ecotxocua ou Kotxocua (Lamarre, 2017). Dans la suite de l'étude, les noms Otaco (sol banc sableux) et Ecotxocua (sol rouge argilo-sableux) seront utilisés.



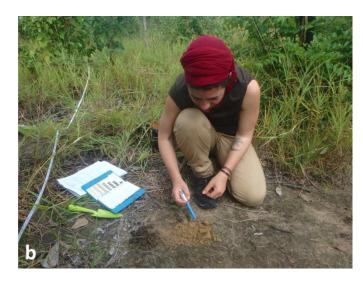


Figure 5: (a) Sondage à la tarière, (b) Analyse physique du sol à l'aide du code Munsell

#### 2.2.4. Facteurs étudiés

Pour analyser les différents facteurs pouvant influencer la régénération forestière, plusieurs informations ont été relevées sur le terrain : l'âge de la jachère, la période de première ouverture, quelques informations sur les pressions anthropiques et la pédologie (nom local du type de sol).

En se basant sur l'analyse bibliographique des facteurs de régénération forestière et la disponibilité des données, 12 variables issues de données spatiales de différentes sources ont été incluses dans l'analyse. Ces variables appartiennent à 4 catégories : climatiques (pluviométrie, température), contraintes naturelles (altitude, pente, type de sol), disponibilité du capital forestier (distance à la limite de la Réserve, distance à la végétation secondaire haute), pressions anthropiques (densité de population, fréquence des feux, première ouverture avant 1990 ou après 1990) et accessibilité (distance aux routes et ville). L'information sur la période de la première ouverture est issue de la carte de déforestation réalisée par Nitidae. Elle nous renseigne sur la durée d'exploitation de la zone depuis sa première ouverture (on suppose que les zones ouvertes avant 1990 ont subi de nombreux cycles de culture, elles présentent donc une plus forte intensité d'utilisation que les zones ouvertes plus récemment).

L'utilisation des données spatiales permet d'apporter des informations nouvelles à l'analyse qui ne sont pas toujours facilement mesurables sur le terrain. La source et la résolution spatiale de ces données sont détaillées dans le Tableau IIII.

Tableau II: Liste des variables spatiales utilisées dans l'analyse et de leurs sources

Type de facteur	Définition	Source des données	Résolution spatiale
Climatique	Moyenne annuelle des pluies (mm)	WorldClim <sup>1</sup>	1 km
	Moyenne annuelle des températures (°C)	WorldClim	1 km
Contraintes	Altitude (mètres)	SRTM <sup>2</sup>	30 m
naturelles	Pente (°)	SRTM	31 m
	Principale classe de texture (classification USDA)	Soil grid (% argile, limon, sable) <sup>3</sup>	vecteur
Capital forestier à	Distance euclidienne à la limite de la RNG (m)	OpenStreetMap <sup>4</sup>	vecteur
proximité	Distance euclidienne à la végétation secondaire (m)	Carte d'occupation du sol Nitidae	vecteur
Pressions	Densité de population en 2015 (hab/km²)	Worldpop - AfriPop <sup>5</sup>	100 m
anthropiques	Déforestation avant ou après 1990	Carte de deforestation Nitidae	30 m
	Fréquence des feux entre 2001 and 2016	MODIS burnt areas <sup>6</sup>	500 m
Accessibilité	Distance euclidienne à la route (m)	OpenStreetMap	vecteur
	Distance euclidienne à la ville (m)	Instituto Nacional de Estatistica <sup>7</sup>	vecteur

# 2.3. Analyse des données

#### 2.3.1. Indicateurs de biodiversité

**Richesse spécifique:** Elle a été évaluée avec les richesses spécifiques totales et moyennes. La richesse spécifique totale est le nombre total d'espèces trouvées dans le peuplement étudié. La richesse spécifique moyenne correspond au nombre moyen d'espèces dans les échantillons du peuplement étudié.

**Diversité spécifique :** Elle est évaluée à partir du nombre d'espèces d'un échantillon et l'abondance des individus au sein de ces espèces en utilisant l'indice de Shannon-Wiener (H):

$$H' = -\Sigma pi. Ln (pi)$$

où p<sub>i</sub> est la proportion de d'individus de l'espèce i par rapport au nombre total d'espèces dans le milieu d'étude. Il a été calculé à l'aide du logiciel R avec la fonction « biodiversité » du package Vegan (The R Core Team, 2016).

Dans certains cas, l'utilisation d'aires d'échantillonnage parfois différentes (314m² par placette pour et 804m² pour les anciennes jachères et la forêt mature) a mené à l'utilisation d'un estimateur de richesse spécifique et de diversité spécifique pour éviter les biais. Pour faciliter les comparaisons avec l'étude

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://www.worldclim.org/

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> https://soilgrids.org/#!/?layer=ORCDRC M sl2 250m&vector=1

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> https://www.openstreetmap.org

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> https://www.worldpop.org/

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod45.php

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> http://www.ine.gov.mz/

31

précédente de Montfort (2016) nous avons réutilisé l'estimateur **Bootstrap** avec lequel il y a moins de risque de surestimer la richesse spécifique en présence d'un nombre important d'espèces représentées par un individu (Poulin, 1998). Les richesses spécifiques estimées ont été calculées avec la fonction « specpool » du package « Vegan » du logiciel R (The R Core Team, 2016). L'indice de Shannon estimé a été calculé avec le package « simboot » du logiciel R.

**Abondance**: Nombre d'individus par placette.

# 2.3.2. Tests de comparaison

Tous les tests de comparaisons sur les indicateurs de biodiversité (richesse spécifique, diversité spécifique et abondance), de structure (hauteur moyenne et DBH moyen) et les caractéristiques des sites (Tableau III) ont été effectués avec une **analyse factorielle de variance** (ANOVA) dans le cas de respect des règles d'homoscédasticité et de normalité. Les ANOVA ont été suivies du test HSD de Tukey qui compare les groupes deux à deux afin de connaître les paires pour lesquelles le résultat est significatif. Dans le cas de non-respect des règles d'homoscédasticité et de normalité, le test non-paramétrique de **Kruskal-Wallis** (K-W) a été réalisé.

Les comparaisons ont parfois été représentées graphiquement à l'aide de boxplot réalisés avec le logiciel R. Les niveaux de probabilité statistique seront indiqués avec la convention de notation suivante : \*p(H0) < 0.05; \*\*p(H0) < 0.01; \*\*\*p(H0) < 0.001

#### 2.3.3. Composition spécifique

Représentations des similarités: Les représentations graphiques des ressemblances en espèces entre les échantillons ont été réalisées avec une analyse en coordonnées principales (ACoP). L'indice de similarité choisi a été celui de Bray-Curtis (Bray et Curtis, 1957), considéré comme le coefficient de dissemblance le plus approprié pour les études de communauté (Clarke et Warwick, 2001). Les ACoP ont été réalisées avec le package « Vegan » du logiciel R (The R Core Team, 2016).

**Espèces dominantes**: Pour déterminer les espèces dominantes, c'est l'**indice de valeur d'importance** (IVI) qui a été utilisé. Il a été calculé avec l'équation de Curtis et McIntosh (1951) :

IVI = (Fréquence relative + aire basale relative + densité relative) /3

Comme l'équation initiale nécessite de connaître les DBH de chaque individus, il a fallu utiliser un IVI transformé dans le cas des placettes où les individus de moins de 5cm de DBH (dont le DBH n'a pas été mesuré) ont été pris en compte dans les analyses. L'indice transformé a été utilisé en modifiant le calcul de Curtis et McIntosh (Williams-Linera et al., 2005) :

IVI= (Fréquence relative + densité relative) / 2

# 2.3.4. Influence des facteurs

Pour analyser l'influence des différents facteurs (Tableau I) sur la richesse spécifique, la diversité et l'abondance, nous avons eu recours à des **modèles linéaires généralisés** (GLM) en optant pour une loi de Poisson puisqu'elle est idéale pour les données de comptage. La fonction GLM du package « stats » de R a été utilisé pour les réaliser (The R Core Team, 2016).

Les niveaux de probabilité statistique seront indiqués avec la convention de notation suivante : \* p (H0) < 0.05; \*\* p (H0) < 0.01; \*\*\* p (H0) < 0.001

#### 3. Résultats

## 3.1. Caractéristiques générales des inventaires

Jeunes jachères ([0-3], [4-6] et [8-12] ans): Sur les 54 placettes échantillonnées, 7424 d'individus ligneux ont été inventoriés, appartenant à 113 espèces et 43 familles. C'est la famille des Fabaceae qui domine avec 25 espèces. Les 5 espèces les plus abondantes sont Julbernardia globiflora, Margaritaria discoidea var. triplosphaera, Byrsocarpus orientalis, Annona senegalensis et Millettia stuhlmannii.

Anciennes et jeunes jachères avec seulement les individus de plus de 5cm de DBH: Dans les placettes de [4-6], [8-12], [20-25] et [30-35] ans, 1425 individus de plus de 5cm de DBH ont été inventoriés. Parmi ces individus, nous comptons 94 espèces pour 36 familles. La famille des Fabaceae est également la famille dominante avec 22 espèces. Les 5 espèces les plus abondantes sont Julbernardia globiflora, Millettia stuhlmannii, Brachystegia spiciformis, Strychnos madagascariensis et Annona senegalensis.

Forêt mature: Dans les 8 placettes réalisées dans la forêt mature, 260 individus de DBH supérieur à 5cm ont été inventoriés, appartenant à 38 espèces et 18 familles. C'est encore une fois la famille des Fabaceae qui domine avec 15 espèces. Les 5 espèces les plus abondantes sont *Julbernardia globiflora, Brachystegia spiciformis, Dalbergia nitudila, Brachystegia boehmii* et *Diplorhynchus condylocarpon*.

# 3.2. Impact du degré de perturbation anthropique et influence des facteurs (premiers stades de régénération)

## 3.2.1. Caractéristiques des sites d'études

Les sites d'études ont été comparés selon différentes caractéristiques (climatiques, capital forestier à proximité, pressions anthropiques). Le tableau récapitulatif (Tableau III) montre de nombreuses différences significatives entre les différents sites d'études. Le village de Malema est le plus pluvieux (1256.3  $\pm$  7,3 mm/an) alors que le village de Musseia et la ville de Naburi sont les moins pluvieux. Bien que statistiquement différentes, les températures varient peu. Naburi est le site d'étude le plus éloigné de la limite de la RNG, Musseia le plus proche et Gilé est la zone la plus éloignée de la végétation secondaire. La densité de population est plus importante dans les villes de Gilé (14.7  $\pm$  0.01 hab/km²) et Naburi (13.3  $\pm$  0.01 hab/km²) que dans les villages de Musseia (11.2  $\pm$  0.01 hab/km²) et Malema (10.1  $\pm$  0.01 hab/km²). La proportion des placettes ouvertes avant 1990 est également bien plus importante dans les villes (plus de  $\frac{3}{4}$ 

des placettes) que dans les villages (40% et 27%). La fréquence des feux la plus importante se trouve à Musseia et la plus faible à Gilé.

➡ Il y a peu de variations climatiques (température et précipitation) entre les sites d'études. Il y a des différences en termes de perturbation anthropiques (densité de population, feux, temps d'exploitation) marquées : les perturbations sont plus fortes dans les villes de Gilé et Naburi que dans les villages de Musseia et Malema.

Tableau III: Récapitulatif des caractéristiques des villes de Gilé et Naburi et villages de Malema et Musseia. Comparaisons réalisées avec le test de Kruskal-Wallis.

		Ville (> 50 0	Ville (> 50 000 habitants)		Village (< 20 000 habitants)	
		Gile	Naburi	Malema	Musseia	
•	Moyenne annuelle des pluies (mm)	1220.3 (±7.2) b	1168.3 (±7.4) °	1256.3 (±7.3) a	1169.6 (±11.4) °	
Climat	Moyenne annuelle de la temperature (°C)	24.8 (±0.1) °	25.5 (±0.1) <sup>a</sup>	25.3 (±0.1) <sup>b</sup>	25.4 (±0.1) a	
	Sol (Principale classe de texture)	Sablo-limoneux	Sablo-limoneux	Sablo-limoneux	Argilo-sableux	
Capital	Distance RNG (km)	8.8 (±1.3) b	14.3 (±2.2) a	8.1 (±2.8) b	5.7 (±3.0) °	
forestier à proximité	Distance vegetation secondaire (km)	1.7 (±0.8) a	0.4 (±0.2)°	0.3 (±0.03) °	0.5 (±0.2)b	
-	Densité de population (hab/km²)	14.7 (±0.01) a	13.3 (±0.01) b	10.1 (±0.01) d	11.2 (±0.01) °	
Impact humain	Proportion des placettes ouvertes avant 1990	87%	78%	40%	27%	
	Fréquence des feux (2001-2016)	3.3 (±4.1) b	4.7 (±3.0) ab	3.9 (±3.8) <sup>b</sup>	7.7 (±2.9) <sup>a</sup>	

# 3.2.2. Richesse spécifique et diversité

#### Analyse par site d'étude :

Richesse spécifique: La richesse spécifique moyenne des jeunes jachères des villes et villages varie de 17,2 ± 4,3 pour les jachères de [8-12] ans de la ville de Gilé à 33,8 ± 2,1 pour les jachères de [4-6] ans du village de Musseia. L'ANOVA nous montre que les différences sont significatives entre les différentes catégories (ANOVA: df=11, F=8,107, p(HO)= 2.35e-07 \*\*\*). Le test HSD de Tukey nous montre que les différences observées sont majoritairement liées au lieu des jachères et non pas à leur âge (Tableau IV). C'est le village de Musseia qui montre les résultats de richesse spécifique les plus élevés alors que la ville de Gilé montre les plus faibles.

**Diversité**: La diversité a été mesurée à l'aide de l'indice de Shannon. Il varie de 2,3 ± 0,2 pour les jachères de [4-6] ans de la ville de Gilé à 3,1 ± 0,1 pour les jachères de [8-12] ans du village de Malema. Des différences ont été observées entre les catégories (ANOVA : df=11, F=6,237, p(HO)= 5.76e-06 \*\*\*). Le test HSD de Tukey nous montre que les différences sont encore une fois majoritairement liées au lieu des jachères (Tableau IV)

**Abondance**: L'abondance varie entre 181,8 ± 99,8 pour les jachères de [4-6] ans de la ville de Gilé à 97,8 ± 26,1 pour les jachères de [0-3] ans du village de Malema. Les différences entre catégories sont significatives

(K-W: R<sup>2</sup>=13,471, df=11, p(H0)= 0.2637). La comparaison par paires nous montre encore une fois que les différences sont liées au lieu et non pas à l'âge des jachères (Tableau IV).

Tableau IV: Richesse spécifique, diversité et abondance des jeunes jachères par sites d'études et par âge. Comparaison réalisée à l'aide l'ANOVA pour la richesse spécifique et la diversité, suivi du test HSD de Tukey pour les comparaisons par paire. Pour l'abondance, le test de Kruskal-Wallis

Туре	Lieu-âge	RS	Indice de Shannon	Abondance
	Gilé [0-3] ans	19,0 ( ± 8,7)cd	2,4 ( ± 0,4)cd	<b>124,4 ( ± 102,5)</b> abc
	Gilé [4-6] ans	21,6 ( ± 3,9)bcd	2,3 ( ± 0,2)d	181,8 ( ± 99,8)a
\ ett -	Gilé [8-12] ans	17,2 ( ± 4,3)d	$2,3 (\pm 0,1)$ cd	101,2 ( ± 49,8)bc
Ville	Naburi [0-3] ans	18,6 ( ± 3,2)cd	$2,4 (\pm 0,2)$ bcd	115,0 ( ± 24,5)abc
	Naburi [4-6] ans	$21,0 (\pm 3,0)$ bcd	$2,4 (\pm 0,1)$ cd	132,6 ( ± 48,0)abc
	Naburi [8-12] ans	26,6 ( ± 4,7) abcd	$2,7 (\pm 0,08)$ abcd	162,0 ( ± 58,8)abc
	Malema [0-3]ans	22,0 ( ± 2,5)bcd	2,6 ( ± 0,08)abcd	97,8 ( ± 26,1)c
	Malema [4-6] ans	$28,2 (\pm 6,8)$ abc	$2,7 (\pm 0,1)$ abcd	129,4 ( ± 41,5)abc
Village	Malema [8-12] ans	35,4 ( ± 4,5)a	$3,1 (\pm 0,1)a$	160,0 ( ± 32,5)ab
Village	Musseia [0-3] ans	28,8 ( ± 4,9)abc	$2,7 (\pm 0,2)$ abcd	147,2 ( ± 29,2)abc
	Musseia [4-6] ans	33,8 ( ± 2,1)a	$3,0 (\pm 0,1)$ ab	165,4 ( ± 42,7) ab
	Musseia [8-12] ans	32,0 ( ± 2,3)ab	$2,8 (\pm 0,1)$ abc	134,4 ( ± 14,5)abc

Nous constatons peu de différence statistique en termes de richesse et diversité liée à l'âge mais des différences davantage liées à la situation géographiques des placettes (différences locales) et liées au degré de perturbation (plus forte dans les villes que dans les villages).

#### **Comparaison ville/village:**

Les différences de richesse spécifique et diversité ne sont pas significativement différentes pour les villes de Gilé et Naburi (Tableau V) qui appartiennent au même groupe au test HSD de Tukey par paires. Les villages de Malema et Musseia ne montrent pas non plus de différences significatives en termes de richesse spécifique et diversité et appartiennent au même groupe au test HSD de Tukey. En revanche il y a une différence significative entre la richesse spécifique et la diversité des villes qui sont plus faibles que dans les villages. Il n'y a aucune différence significative en termes d'abondance entre les villes et les villages (Tableau V).

Tableau V: Richesse spécifique, diversité et abondance des jeunes jachères par villes et villages. Comparaison réalisée à l'aide l'ANOVA, suivie du test HSD de Tukey pour les comparaisons par paire.

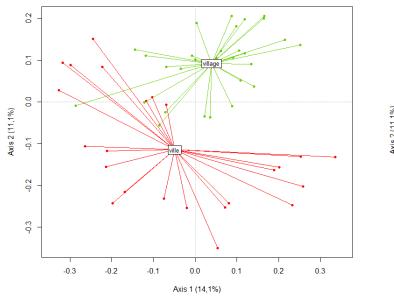
Туре	Lieu	RS	Indice de Shannon	Abondance
Villa	Gilé	19,2 ( ± 5,9)b	2,3 ( ± 0,3)b	135,8 ( ± 88,2)a
Ville	Naburi	22,1 ( ± 4,8)b	2,5 ( ± 0,2)b	136,5 ( ± 44,9)a
Village	Malema		2,8 ( ± 0,2)a	129,0 ( ± 41,0)a
Village	Musseia	_ 31,5 ( ± 3,7)a	2,8 ( ± 0,2)a	149,0 ( ± 31,6)a

 Nous constatons donc que plus les perturbations anthropiques sont intenses (nombre de cycles de culture et temps d'exploitation), plus la richesse spécifique et la diversité sont faibles.

# 3.2.3. Composition spécifique et espèces dominantes

#### Composition spécifique :

L'analyse des similarités de composition spécifique entre les villes et les villages (Figure 6(a)), illustrée par l'ACOP, montre une différence de composition spécifique entre les deux catégories. Les villes semblent avoir une composition plus hétérogène que les villages (Figure 6 (a)). Alors que les deux villages, Musseia (MUS) et Malema (ML) montrent une composition spécifique homogène, les villes de Gilé (GI) et Naburi (NB) montrent une composition spécifique hétérogène (Figure 6 (b)). La plupart des placettes de Naburi (NB) forment un groupe bien détaché du reste des placettes.



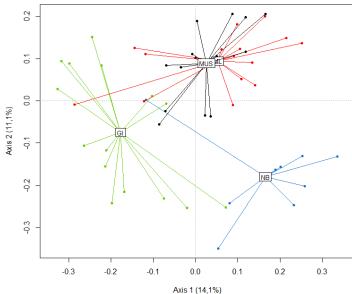


Figure 6: Représentation graphique des placettes de jeunes jachères par (a) villes (en rouge) et village (en vert) et (b) par lieu avec GI (Gilé) en vert, NB (Naburi) en bleu, MUS (Musseia) en noir et ML (Malema) en rouge sur les deux premiers axes de l'ACOP

Nous observons donc une différence de composition liée aux perturbations anthropiques (villes et villages) et des différences locales avec le cas de Naburi.

#### Espèces dominantes :

L'espèce *Julbernardia globiflora*, l'une des espèces dominantes du miombo, est également l'une des 5 premières espèces dominantes de chaque lieu à l'exception de Naburi (Tableau VI). C'est une espèce ubiquiste (Smith et Allen, 2004) et communes dans les brousses secondaires (Carriere, 1994) mais sensible au feu.

Malema, Musseia et Gilé partagent 3 espèces dominantes communes sur les 5 premières présentées : *Margaritaria discoidea var. triplosphaera, Julbernardia Globiflora* et *Brysocarpus orientalis. Margaritaria discoidea var. triplosphaera* est une espèce dominante du Miombo ubiquiste (Seleck *et al.*, 2013), fréquente dans les zones touchées par le feu et exploitées pour l'agriculture (Smith et Allen, 2004). Seule l'espèce *Brysocarpus orientalis* est l'une des 5 espèces dominantes que l'on retrouve dans les 4 lieux. C'est une espèce fréquente sur les sols sableux (Smith et Allen, 2004) et dans les brousses secondaires (Carriere, 1994). Naburi partage une seule espèce avec les 3 autre lieux.

Tableau VI: Les 5 espèces dominantes pour chaque lieu calculé avec l'IVI transformé

	Espèces					
Ordre IVI	Gilé	Naburi	Malema	Musseia		
1	Julbernardia globiflora	Annona senegalensis	Margaritaria discoidea var. discoidea	Margaritaria discoidea var. triplosphaera		
2	Terminalia sericea	Byrsocarpus orientalis	Julbernardia globiflora	Julbernardia globiflora		
3	Margaritaria discoidea var. triplosphaera	Millettia stuhlmannii	Margaritaria discoidea var. triplosphaera	Xylopia aethiopica		
4	Byrsocarpus orientalis	Combretum molle	Millettia stuhlmannii	Strychnos madagascariensis		
5	Hymenocardia acida	Lannea stuhlmanii	Byrsocarpus orientalis	Byrsocarpus orientalis		

#### 3.2.4. Influence des différents facteurs

#### <u>Influence de l'ensemble des facteurs :</u>

Parmi les facteurs testés avec le modèle linéaire généralisé, les facteurs ayant une influence significative sur la richesse spécifique sont la période de déforestation (avant 1990), la distance à la ville et la distance à la limite de la RNG (Tableau VII). Les facteurs pour lesquels les résultats n'étaient pas significatifs n'ont pas été affichés. La déforestation avant 1990 montre le résultat significatif le plus important (p(H0)=0,000198\*\*\*) et le coefficient montre que ce facteur influence de façon négative la richesse spécifique. La distance à la ville montre une significativité plus faible (p(H0)=0,045001\*) indiquant que les placettes plus distantes de la ville ont une richesse spécifique plus importante que celles se trouvant plus proches. Enfin, la distance à la RNG (p(H0)=0,004676\*\*) indique que les placettes plus proches de la RNG (à la forêt mature) montre une richesse spécifique plus importante.

Tableau VII: Tableau résumant les résultats significatifs des facteurs testés sur la richesse spécifique du modèle linéaire généralisé avec une loi de Poisson

•	Influence des facteurs sur la richesse spécifique					
	Coefficient Ecart-type p(H0)					
Intercept	4.107e+00	1.104e+00	0.000198 ***			
Déforestation avant 1990	-2.045e-01	6.018e-02	0.000679 ***			
Distance à la ville	8.727e-06	4.353e-06	0.045001 *			
Distance à la RNG	-2.634e-05	9.314e-06	0.004676 **			

Parmi les facteurs testés avec le modèle linéaire généralisé, les facteurs ayant une influence significative sur l'abondance sont la période de déforestation (avant 1990), la distance à la ville, la pluviométrie, l'altitude et la température. La déforestation avant 1990 (p(H0)=  $<2^e$ - $16^{***}$ ), avec un coefficient négatif, montre que ces placettes ont une abondance plus faible (Tableau VIII). De même, l'abondance des placettes diminuent en s'éloignant de la ville (p(H0)=0,000620\*\*\*). En revanche, la pluie (p(H0)=0,000491\*\*\*), l'altitude (0,026351\*) et la température (0,025202\*) influence positivement l'abondance des placettes.

Tableau VIII: Tableau résumant les résultats significatifs des facteurs testés sur l'abondance du modèle linéaire généralisé avec une loi de Poisson

	Influence des facteurs sur l'abondance			
	Coefficient	Ecart-type	p(H0)	
Intercept	-1.477e+01	8.050e+00	0.066513.	
Déforestation avant 1990	-3.212e-01	2.724e-02	< 2e-16 ***	
Distance à la ville	-1.002e-05	2.928e-06	0.000620 ***	
Pluie	1.462e-03	4.194e-04	0.000491 ***	
Altitude	3.009e-03	1.355e-03	0.026351 *	
Température	7.071e-01	3.159e-01	0.025202 *	

Les modèles linéaires généralisés n'ont pas montré de résultats significatifs pour la diversité (indice deShannon).

#### <u>Influence de l'intensité d'utilisation</u>:

La Figure 7 nous montre que les placettes où la déforestation a eu lieu avant les années 1990 (zone présentant de nombreux cycles de culture et une durée d'exploitation longue) présentent une richesse spécifique (ANOVA : df=1, F=22,48, p(H0)= 1.69e-05 \*\*\*), une diversité (ANOVA : df=1, F= 7,528, p(H0)= 0.00832 \*\*) et une abondance (ANOVA : df=1, F= 5,979, p(H0)=0.0179 \*) significativement plus faibles que les placettes où la déforestation a eu lieu après les années 1990.

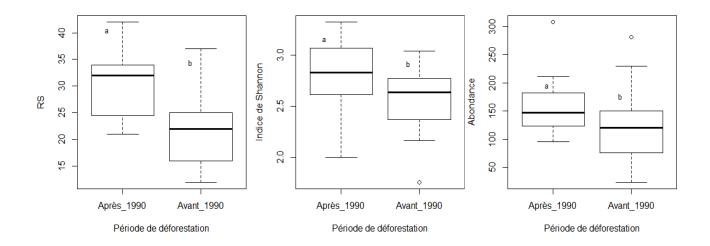


Figure 7: Richesse spécifique, diversité et abondance en fonction de la période de déforestation des jeunes jachères. Comparaison des moyennes réalisée avec l'ANOVA suivie du test HSD de Tukey

#### Influence des propriétés du sol :

Les entretiens sur le terrain et les analyses physiques du sol ont permis de révéler deux type de sols principaux bien distincts sur les 15 jachères de la ville de Gilé. Les caractéristiques physiques des deux types de sol sont présentées dans le Tableau IX. Les appellations ont été données en langue locale (Lomwé), elles seront donc utilisées dans la suite des analyses.

Tableau IX: Caractéristiques des deux types de sol de la zone d'étude

Appellation du sol	Matières organiques	Drainage	Granulométrie	Texture	Couleur
Otaco	Peu de matières organiques en surface mal décomposée et absente en profondeur	Bon drainage, aucune rétention d'eau	Granulométrie grossière	Texture sableuse: le sol crisse au toucher et n'adhère pas	Couleur jaune très clair lessivée
Ecotxocua	Matières organiques importante en surface et en profondeur	Rétention d'eau	Granulométrie fine	Texture argileuse malgré  la présence de petits  eléments grossiers, le  sol adhère	

La richesse spécifique et la diversité des placettes des 15 jachères de 5 ans de la ville de Gilé ne montrent pas de différences significatives en fonction des deux types de sol (Tableau X). En revanche, l'abondance est significativement plus importante dans les placettes de sol Ecotxocua (ANOVA: df=1, F=6,156, p(H0)=0,0276\*).

Tableau X: Richesse spécifique, diversité et abondance des jachères de 5 ans en fonction de leur type de sol. Comparaison des moyennes réalisée avec l'ANOVA suivie du test HSD de Tukey.

Catégorie	RS	Indice de Shannon	Abondance
Ecotxocua	21,7 ( ± 2,2)a	2,4 ( ± 0,2)a	175,4 ( ± 78,5)a
Otaco	18,8 ( ± 4,1)a	$2,3 (\pm 0,1)a$	97,1 (±40,1)b

L'ACOP présentée dans la Figure 8 montre deux groupes distincts en termes de composition spécifique selon les types de sol Otaco et Ecotxocua.

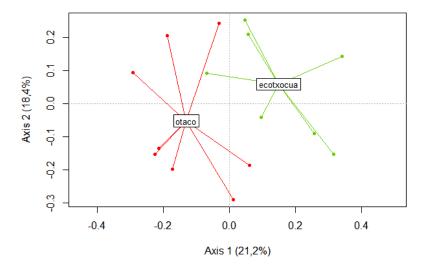


Figure 8: Représentation graphique des 15 placettes de jeunes jachères de 5 ans par type de sol Otaco (en rouge) et Ecotxocua (en vert) sur les deux premiers axes de l'ACoP basés sur la matrice de distance de Bray-Curtis calculée sur les données d'abondance en espèces

Les résultats de l'IVI transformé (Tableau XI) montrent des différences d'espèces dominantes entre les placettes avec un sol de type Ecotxocua et les placettes avec un sol de type Otaco bien qu'elles partagent 5 espèces dominantes (Julbernardia globiflora, Terminalia sericea, Brysocarpus orientalis, Brackenridgea zanguebarica et Diplorhynchus condylocarpo).

Tableau XI: Les 10 espèces dominantes pour les deux types de sols calculé avec l'IVI transformé

	Espèces						
Ordre IVI	Ecotxocua	Otaco					
1	Julbernardia globiflora	Byrsocarpus orientalis					
2	Terminalia sericea	Julbernardia globiflora					
3	Margaritaria discoidea var. triplosphaera	Diplorhynchus condylocarpon					
4	Byrsocarpus orientalis	Strychnos madagascariensis					
5	Brackenridgea zanguebarica	Acacia nilotica					
6	Brachystegia spiciformis	Balanites cf maughamii					
7	Cassia petersiana	Terminalia sericea					
8	Diplorhynchus condylocarpon	Hymenocardia acida					
9	Diospyros mespiliformis	Annona senegalensis					
10	Albizia versicolor	Brackenridgea zanguebarica					

⇒ Les deux types de sol influence davantage la composition spécifique et l'abondance que la diversité et la richesse des jachères.

## 3.3. Les dynamiques de régénération naturelle

Les résultats de cette partie concernent les inventaires des jachères des différentes classes d'âge ([0-3], [4-6], [8-12], [20-25], [30-35]) et de la forêt mature dont seuls les individus de plus de 5cm de DBH ont été pris en compte. Les jachères de [0-3] ans ne comportant pas d'individus de plus de 5cm de DBH ont donc été retirées des analyses.

## 3.3.1. Richesse spécifique et diversité

Comparaison des sites de la forêt mature et des anciennes jachères : Le test de Kruskal-Wallis réalisé sur les jachères de [20-25], [30-35] ans et la forêt mature révèle des différences statistiques sur les résultats de richesse spécifique non transformée ( $R^2$ =24,249, df=4, p(H0)= 7.121e-05). Ce sont les jachères de [20-25] ans qui ont la richesse spécifique la plus élevée (19,250 ± 6,135) et les placettes de la forêt mature qui ont la plus faible (14,125 ± 1,642).

**Comparaison des jeunes jachères:** Les jeunes jachères de [4-6] et [8-12] ans sont également significativement différentes ( $R^2$ =24,249, df=4, p(H0)= 7.121e-05) avec une richesse spécifique de (5,00 ± 3,023) pour les jachères de [4-6] ans et de (10,875 ± 15,312) pour les jachères de [8-12] ans.

Comparaison de l'ensemble des catégories: L'estimateur de richesse spécifique Bootstrap étant calculé avec l'ensemble des échantillons par catégorie, la réalisation d'un test de comparaison est impossible. Même si la significativité n'est pas mesurable, les jachères de [4-6] ans montrent une richesse spécifique Bootstrap plus faible que les autres (Tableau XII). Les jachères de [8-12], [20-25] et [30-35] ans montrent une richesse spécifique Bootstrap plus élevée que la forêt mature mais la richesse augmente en fonction de l'âge de la jachère.

La diversité (indice de Shannon estimé) varie de 1,3  $\pm$  0,6 pour les jachères de [4-6] ans à 2,6 pour les jachères de [20-25] et [30-35] ans et la forêt mature. Le test de Kruskal-Wallis nous montre des différences significatives entre les catégories (K-W :  $R^2$ =21,28, df=4, p(H0)=0,0002787). Les jachères de [20-25] et [30-35]ans et la forêt mature montrent une diversité statistiquement identique (groupe a) plus importante que celle des jachères de [8-12] ans (groupe b) et de [4-6] ans (groupe c).

L'abondance par hectare varie de  $404,3 \pm 106,3$  pour la forêt mature à  $1057,4 \pm 473,8$  pour les jachères de [20-25] ans. Les différences entre les différentes catégories sont significatives (K-W :  $R^2$ =26,198, df=4, p(H0)= 2.886e-05). La diversité des jachères de [8-12] et [20-25] ans ne montrent pas de différence statistique (groupe a) et est plus importante que la diversité des jachères de [4-6], [30-35] ans et de la forêt mature qui appartiennent au groupe b.

Tableau XII: Richesse spécifique cumulée, estimateur Bootstrap et indice de Shannon estimé et abondance/ha des jeunes, anciennes jachères et de la forêt mature. Comparaisons réalisées avec le test de Kruskal-Wallis.

Catégorie	RS cum	Estimateur Bootstrap	Indice de Shannon estimé	Abondance/ha
[4-6] ans	24	39,98214286	1,3 ( ±0,6)c	441,8 (± 244,5)b
[8-12] ans	41	69,98214286	2,1 ( ±0,5)b	975,3 ( ± 295,3)a
[20-25] ans	61	87,10714286	2,6 ( ±0,3)a	1057,4 ( ± 473,8)a
[30-35] ans	61	95,875	2,6 ( ±0,4)a	609,5 ( ± 280,6)b
Forêt mature	38	46,19642857	2,6 ( ± 0,2)a	404,3 ( ±106,3)b

### 3.3.2. Composition spécifique et structure

## 3.3.2.1. Composition spécifique

Les résultats d'IVI sur les 10 premières espèces dominantes ( Tableau XIII) révèlent que *Julbernardia globiflora* est la seule espèce partagée par toutes les classes d'âge. Elle est l'une des espèces dominantes du Miombo. Alors que les jachères de [20-25] et [30-35] ans partagent 5 espèces communes avec la forêt mature, les jachères de [8-12] et [4-6] ans n'en partagent que 3 et 4 respectivement. Les jachères de [4-6] ans possèdent deux espèces dominantes qui ne sont pas présentes dans les autres jachères, *Bauhinia petersiana* (résistante au feu) et *Combretum adenogonium*, les jachères de [8-12] ans en possèdent 4 (*Amblygonocarpus andongenis, Swartizia madagascariensis, Vitex payos et Xylopia aethiopica)*, les jachères de [20-25] ans n'en possèdent qu'une (*Burkea africana*), celles de [30-35] ans en possèdent 2 (*Byrsocarpus orientalis et Strychnos spinosa*) et la forêt mature en possède 3 (*Dalbergia nitudila, Pseudolachnostylis maprouneifolia et Pterocarpus angolensis*).

Tableau XIII: Résultats d'IVI pour les 10 premières espèces dominantes des jeunes, anciennes jachères et de la forêt mature

	Espèces								
Ordre IVI	[4-6] ans	[8-12] ans	[20-25] ans	[30-35] ans	Forêt mature				
1	Julbernardia globiflora	Julbernardia globiflora	Julbernardia globiflora	Brachystegia spiciformis	Brachystegia spiciformis				
2	Bauhinia petersiana	Albizia versicolor	Millettia stuhlmannii	Annona senegalensis	Julbernardia globiflora				
3	Diplorhynchus condylocarpon	Brachystegia spiciformis	Diplorhynchus condylocarpon	Pterocarpus angolensis	Dalbergia nitudila				
4	Erythrophleum africanum	Strychnos madagascariensis	Annona senegalensis	Julbernardia globiflora	Brachystegia boehmii				
5	Combretum zeyheri	Millettia stuhlmannii	Erythrophleum africanum	Brachystegia boehmii	Pseudolachnostylis maprouneifolia				
6	Millettia stuhlmannii	Erythrophleum africanum	Strychnos madagascariensis	Strychnos madagascariensis	Diplorhynchus condylocarpon				
7	Combretum adenogonium	Xylopia aethiopica	Burkea africana	Albizia versicolor	Pterocarpus angolensis				
8	Annona senegalensis	Vitex payos	Combretum zeyheri	Pteleopsis myrtifolia	Millettia stuhlmannii				
9	Pteleopsis myrtifolia	Amblygonocarpus andongenis	Brachystegia boehmii	Strychnos spinosa	Pericopsis angolensis				
10	Albizia versicolor	Swartizia madagascariensis	Pteleopsis myrtifolia	Byrsocarpus orientalis	Annona senegalensis				

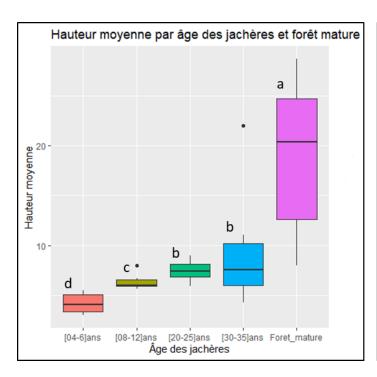
⇒ Nous retenons donc que plus la jachère est ancienne, plus sa composition spécifique se rapproche de celle de la forêt mature en termes d'espèces dominantes.

## **3.3.2.2.** Structure

Les analyses de cette partie concerne la hauteur moyenne et le DBH moyen relevés à l'occasion de l'inventaire des ligneux.

**Hauteur moyenne**: La différence de hauteur moyenne entre les différentes catégories de jachères est significative (K-W: R²=28,6772, df=4, p(H0)= 9.115e-06). C'est la forêt mature qui montre la hauteur moyenne la plus importante (Figure 9) puisqu'elle appartient au groupe a. Les jachères de [20-25] et [30-35] ans montrent une hauteur moyenne statistiquement semblable (groupe b). Enfin, les jachères de [8-12] ans (groupe c) et celles de [4-6] ans (groupe d) montrent les hauteurs moyennes les plus faibles.

**DBH moyen :** La différence de DBH moyen entre les différentes catégories de jachère est significative (K-W : R²=18,788, df=4, p(H0)= 0.000865). La forêt mature et les jachères de [30-35] ans montre un DBH moyen statistiquement identique (groupe a) et plus important que les jachères de [8-12] ans (groupe b) et que celles de [4-6] ans (groupe c). Les jachères de [20-25] ans (groupe ab) montrent un DBH moyen intermédiaire puisqu'elles appartiennent en même temps au groupe a et au groupe b (Figure 9).



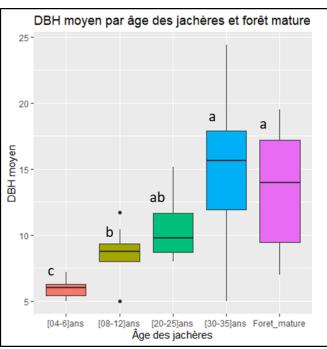


Figure 9: Boxplot de la hauteur moyenne (à gauche) et du DBH moyen (à droite) en fonction de l'âge des jachères. La comparaison des moyennes a été réalisée avec le test de Kruskal-Wallis.

⇒ La hauteur moyenne des individus de la forêt mature est donc significativement bien plus grande que celle des jachères. En revanche, les jachères de [30-35] ans ont un DBH moyen statistiquement identique à celui des forêts alors que les autres classes de jachère ont un DBH statistiquement inférieur.

### 4. Discussion

# 4.1. Impact du degré de perturbation anthropique et influence des facteurs sur les premiers stades de régénération

#### Comparaison ville/village:

Nos résultats confirment notre hypothèse selon laquelle la richesse spécifique et la diversité sont plus importantes dans les jachères de villages que dans celles de villes. Les résultats peuvent être expliqués par les caractéristiques différentes présentes entre les 4 zones. Les villes font face à des perturbations de plus forte intensité que les villages. La densité de population est plus importante à Gilé et Naburi où plus de ¾ des placettes ont été ouvertes avant 1990 sur lesquelles la richesse spécifique et la diversité sont significativement plus faibles que sur les placettes ouvertes après cette date. Le temps d'occupation des sols et le nombre de cycles de culture sont donc un facteur d'importance majeure. Nos résultats viennent confirmer les observations de Jew *et al.* (2016) qui avait observé une diminution de la richesse spécifique et de la diversité avec une augmentation du degré de perturbation dans des zones de Miombo (Tanzanie). Il observait en revanche une diminution de l'abondance que nous n'observons pas dans nos résultats. Jew *et al.* (2016) soulève qu'une perturbation modérée peut être associée à une richesse et une abondance importante qui diminuent lorsque la perturbation devient plus intense. Il décrit cela comme « l'effet de la perturbation intermédiaire ». Cet effet pourrait expliquer nos différences de résultats en ce qui concerne l'abondance.

Malgré la faible richesse spécifique et diversité autour des villes, les jachères se régénèrent. Pourtant, certaines zones autour de la RNG semblent dépourvues de végétation. Ces observations peuvent être dues à des perturbations répétées (cycles de culture sans repos ou récolte de bois de chauffe et de construction). Connaissant la forte capacité de régénération du Miombo, on peut penser que ces zones parviendraient à se régénérer avec suffisamment de temps, isolées des perturbations anthropiques.

#### Composition spécifique :

Nous avons observé une différence de composition spécifique liée aux perturbations anthropiques (villes et villages) et des différences locales avec le cas de Naburi. Dans son étude sur le Miombo, Jew *et al.* (2016) notait que plusieurs facteurs (distance à la ville, distance à la forêt mature, récolte de PFNL, la récolte et la coupe de bois) influencent à 68% la composition spécifique. Or, l'intensité de ces pressions est plus importante dans les villes que dans les villages, ce qui explique nos résultats.

#### Facteurs:

Parmi les facteurs étudiés, la période de déforestation (avant 1990), la distance à la ville et la distance à la RNG influencent la richesse spécifique des jachères. La période de déforestation (avant 1990), la distance à la ville, les précipitations moyennes annuelles, les températures moyennes annuelles et les températures moyennent influencent l'abondance. Les GLM n'ont pas montré de différences significatives en ce qui concerne la diversité. La distance à la ville et à la RNG apparaissent comme deux gradients influençant la régénération: plus l'on s'éloigne de la ville, plus la richesse est importante. A l'inverse, plus on s'éloigne de la limite de la RNG moins la richesse est importante. Les jachères plus proches de la RNG peuvent bénéficier de la présence des semenciers et ainsi se régénérer plus facilement puisque la repousse dépend des individus aux alentours (Chidumayo, 2013) tandis que les jachères proches de la ville sont des zones plus accessibles pour les populations, donc plus exploitées (Jew et al., 2016).

En revanche, les facteurs pluie, altitude et température n'influencent que l'abondance. La richesse spécifique et la diversité ne sont pas influencées par ces facteurs mais ces résultats ne sont pas surprenants compte tenu de la distance relativement faible (moins de 100 km) entre les sites d'étude et donc du peu de variabilité de ces facteurs.

Tandis que certains auteurs (Ribeiro et al., 2016) montrent que le feu est un facteur écologiques majeur pour le Miombo, nous n'observons pas d'influence de ce facteur dans notre étude. Cela peut être dû à la résolution des données utilisées (données satellite MOdis) qui possèdent une résolution de 250m. Il se peut que cette résolution ne soit pas assez précise pour observer la variabilité des feux entre les placettes.

Si les deux types de sols ne montrent pas de différence pour la richesse spécifique et la diversité, l'abondance reste tout de même plus importante dans les zones à sol dit Ecotxocua. Ces résultats sont cohérents avec nos observations qui confirment celles de Lamarre (2017) qui définit les sols Ecotxocua (ou Kotxokua) comme des sols rouges argilo-sableux avec un structure stable et les sols Otaco (ou Muthaka) comme des sols blancs sableux érosifs facilement engorgés à la saison des pluies à cause de la lixiviation des argiles colmatées dans les horizons profonds. Les sols Otaco disposant d'une faible CEC, il est donc normal d'y trouver moins d'abondance. Ce sont d'ailleurs les sols les moins recherchés pour l'agriculture (Lamarre, 2017). En termes de composition spécifique, les analyses (l'ACOP et l'IVI) montrent qu'il existe une composition spécifique différente entre les deux types de sol.

Nos observations confirment les recherches de Högberg (1987) qui avait mis en lumière le lien entre la qualité du sol et les différences de composition spécifique du Miombo. Floret et Pontannier (2001) ont également affirmé que les propriétés édaphiques influencent la composition spécifique. Notre étude croisant des données de végétation et de sol (savoirs locaux et relevés physiques) apporte des informations intéressantes car il existe peu d'études concernant l'affinité des espèces du Miombo aux différents types de sols. De plus, les différentes données nationales ou internationales concernant les sols disponibles pour le

Mozambique (carte nationale des sols, SoilGrid) sont bien souvent imprécises et ne correspondent pas toujours aux réalités du terrain.

## 4.2. Les dynamiques de régénération naturelle

Dans les jeunes et anciennes jachères, un total de 94 espèces ligneuses de plus de 5cm de DBH a été inventorié sur une surface totale de 1,79 ha. Dans la forêt mature, un total de 38 espèces ligneuses de plus de 5cm de DBH a été inventorié sur un total de 0,6ha.

Les résultats nous montrent une richesse spécifique plus importante dans les jachères (sauf celles de [4-6] ans) que dans la forêt mature. Syampungani (2009) avait également constaté une importante richesse spécifique dans les jeunes stades de régénération. Même en ne prenant en compte que les individus de plus de 5cm de DBH, les jachères de [20-25] et [30-35] ans ont une richesse spécifique plus importante que la forêt mature. Les jachères de [20-25] ans montrent la richesse spécifique la plus importante, puis une diminution ensuite dans les jachères de [30-35] ans. Ces observations ont été faites auparavant notamment par Williams et al. (2008), qui ont observé une chute de la richesse spécifique après 20 ans de jachère. En effet dans la forêt mature, peu de petites régénérations sont observées. Cela peut-être dû à la fermeture de la canopée qui limite la présence de petites régénérations héliophiles, présentent en nombre dans les jeunes stades de régénération (De Rouw, 1993). Si les jachères de [4-6] ans montrent un indice de Shannon estimé assez faible, il devient moyen pour les jachères de [8-12] ans à fort pour les jachères de [20-25] et [30-35] ans. Les jachères de [20-25] et [30-35] ans ont donc la même diversité estimée que les placettes de la forêt mature. Kalaba et al. (2013) affirmait que 2 à 3 décennies étaient suffisantes aux jachères pour retrouver les caractéristiques semblables à celles de la forêt mature après une dégradation (charbon, agriculture). Ainsi, notre zone d'étude montre une forte capacité de régénération, comme cela a déjà pu être montré dans la littérature (Williams et al. 2008, Chinuwo et al. 2010, Kalaba et al. 2013, Shirima et al. 2015, Montfort, 2016).

Sur le terrain, un nombre important de régénérations ont été observées sur les souches coupées ou brûlées, ce qui confirme que le Miombo doit sa forte stabilité et sa forte capacité de régénération à la repousse du taillis et de drageons, ce qui est un comportement symptomatique des forêts touchées par le feu (Chidumayo, 2004, Williams *et al.* 2008 et Shirima, 2015).

Notre étude montre que la composition et la structure du Miombo nécessitent plus de temps que la richesse et la diversité pour se régénérer, à l'instar des observations de Shirima (2015) et Rozendaal *et al.*( 2019). En effet, la hauteur moyenne des ligneux de la forêt mature inventoriés reste bien supérieure à celle des jachères. Dans notre analyse, nous avons observé un DBH moyen dans les jachères de [30-35] ans

similaire voire supérieur au DBH moyen de la forêt mature (Figure 8). Le DBH moyen de la forêt mature serait alors retrouvé à partir de la troisième décennie de la jachère. Jacobs, dans son ouvrage de 1988, affirme qu'un retour de la composition des jachères à la composition de la forêt mature prend plusieurs siècles. D'après Rozendaal *et al.* (2019), il faudrait 54 ans aux jachères pour une régénération complète en termes de richesse spécifique et 780 ans pour une régénération en termes de composition. Il explique ce phénomène par la pauvre capacité de dispersion des espèces rares. D'après lui, une régénération complète en termes de composition spécifique pourrait être impossible. Notre étude confirme cependant sa mise en garde selon laquelle la composition des jachères, en vieillissant, ressemble de très près à la composition de la forêt mature et que seule une étude très détaillée permet de mettre en lumière les différences. Nous observons que la composition en termes d'espèces dominantes se rapproche de celle de la forêt mature à mesure que les jachères vieillissent. Cependant, notre étude à travers les espèces dominantes apparait insuffisante si l'on veut étudier une chronoséquence avec des jachères plus vieilles que les nôtres car on pourrait déduire à tort que la composition est identique.

Dans toutes nos classes d'âge, nous trouvions des espèces dominantes correspondant aux espèces dominantes du Miombo. La présence de ces espèces dominantes même dans les jeunes jachères peut être expliquée par leur capacité à former des symbioses ectomycorhiziennes et avoir un meilleur accès aux nutriments du sol présents en quantité, notamment le phosphore (Timberlake et Chidumayo, 2001 et Shirima, 2015).

## 4.3. Perspectives de l'étude

Comme nous l'avons dit plus tôt, le manque de données disponibles sur les sols du Mozambique pose un problème dans notre étude alors que c'est un élément important influençant la régénération forestière. Malheureusement, les échantillons de sol prélevés pendant notre étude pour la réalisation d'analyses chimiques n'ont pas pu être analysés à temps et n'ont donc pas pu être inclus dans nos analyses. L'analyse physique des sols est bien souvent limitante pour comprendre les relations entre le sol et la végétation et ne permet pas de comprendre les dynamiques pédologiques après perturbations. De plus, l'utilisation des différentes aires d'échantillonnages peut avoir inclus un biais dans nos analyses puisque nous avons eu recours à des estimateurs. Il serait peut-être judicieux dans de prochaines études, d'échantillonner à aires égales pour faciliter les analyses comparatives et éviter les biais.

Toutefois, notre étude apporte une meilleure compréhension des facteurs naturels et anthropiques locaux qui influencent la régénération ainsi que les dynamiques naturelles de la forêt de Miombo. Ces connaissances peuvent nous permettre de concentrer les efforts de conservation et de restauration là où ils sont nécessaires et accroître leurs chances de succès. Notre connaissance des zones subissant les plus

fortes intensités de perturbation (autour de villes comme Gilé, par exemple) nous permet de savoir où concentrer les efforts où les perturbations répétées semblent être un frein clef à la régénération.

Chazdon et Guariguata (2016) mettent en avant la nécessité de travailler sur la conservation et la restauration à l'échelle du paysage en se concentrant sur les problématiques sociales pour parvenir à restaurer les processus écologiques et minimiser la perte de biodiversité.

La restauration à large échelle doit être pensée en termes de diversité de paysages et d'utilisation des terres, puisque la diversité contribue à la richesse des écosystèmes (Chazdon, 2016). Pour cette raison, la restauration active (plantation) ne devrait être utilisée que dans les cas où les capacités de régénération sont très faibles, ce qui n'est pas notre cas ici. De plus, c'est une méthode très coûteuse qui n'est pas adaptée ni nécessaire dans les cas où la forêt connaît une bonne régénération naturelle (Shono, 2007).

En raison des fortes capacités de régénération de la forêt de Miombo dans notre zone d'étude, la régénération naturelle assistée (RNA) qui a déjà fait ses preuves (Chazdon, 2016 et Shono, 2007) semble être une méthode adaptée. Peltier (2015) ajoute que c'est une méthode adaptée dans le cas où l'agriculture sur brûlis est utilisée. Dans notre zone, cette technique peut être mise en place avec les agriculteurs en choisissant quelques arbres à conserver lors de l'abattis-brûlis, arbres qui peuvent leur être utiles (ombre, fruits) et qui favoriseront la régénération lors de la mise en jachère (Peltier, 2015).

Plusieurs études se sont intéressées à l'utilisation des produits forestiers non ligneux (PFNL) dans les villages autour de la RNG (IGF, 2019). Les PFNL (insectes, champignons, gibiers...) sont des ressources non négligeables pour les populations locales. Ainsi, des compromis pourraient être trouvés avec les populations locales, comme la conservation de zones de régénération forestières au profit de produits forestiers non ligneux.

#### **CONCLUSION**

Cette étude apporte de nouvelles connaissances sur les dynamiques de régénération forestière du Miombo soumis à différents gradients de perturbation et différents facteurs environnementaux autour de la Réserve Nationale de Gilé. Les résultats montrent des faibles capacités de régénération dans les zones à fortes et moyennes perturbations, comme dans les villes de Gilé et Naburi, dues à des cycles de cultures plus nombreux, une utilisation des terres plus ancienne et une récolte des ressources (PFNL, coupe et récolte de bois de chauffe et de construction) plus importante. Une grande partie des facteurs environnementaux (pluie, température, pente, altitude...) n'influence pas significativement la richesse spécifique, la diversité et la composition floristique, ce qui est lié en grande partie à la proximité des sites d'études et donc aux faibles gradients environnementaux observés. En revanche, les caractéristiques du sol, majoritairement sableux et sablo-argileux, influencent significativement la composition floristique. L'analyse des dynamiques permet de réaffirmer le caractère rapide de la régénération de cet écosystème en termes de richesse spécifique et diversité. En revanche, la composition et la structure floristique mettent plus de temps à atteindre des caractéristiques similaires à la forêt mature.

A une échelle locale, la connaissance des zones les plus touchées par les perturbations où la capacité de régénération naturelle est plus faible peut permettre de mieux concentrer les efforts de conservation et de restauration. De plus, la connaissance des facteurs influençant la régénération naturelle peut permettre de mieux cibler les types d'intervention à mettre en place sur le terrain. Ces éléments justifient la volonté de Nitidae d'inclure le volet social et agronomique aux problématiques environnementales. De plus, ils justifient la pertinence de la mise en place de techniques de restauration passive, comme la RNA, dans notre zone d'étude pour préserver le capital forestier et assurer les besoins à long terme des populations qui en sont dépendantes.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

- Aquino R., Jerneck A., Jacobs K., Seck M. et Lovei M., 2017. Integrated landscape and forest management in Mozambique. *The World Bank Group*, Washington
- Ayala-Orozco, Bárbara, Mayra E. Gavito, Francisco Mora, Ilyas Siddique, Patricia Balvanera, Víctor J. Jaramillo, Helena Cotler, Luz P. Romero-Duque, et Enrique Martínez-Meyer., 2018. Resilience of Soil Properties to Land-Use Change in a Tropical Dry Forest Ecosystem: Soil Resilience to Land-Use Change in a Tropical Dry Forest. Land Degradation & Development 29, no 2: 315-25.
- BELL, R.H.V., 1982. The effect of soil nutrient availability on community structure in African ecosystems. In: *Ecology of Tropical Savannas* (Eds B. J. Huntley and B. H. Walker). Springer- Verlag, New York.
- Béringuier M., 2018. L'agroécologie face à la déforestation : Comment concilier production agricole et conservation des écosystèmes ? Cas de l'intervention du projet Mozbio, Réserve Nationale de Gilé, au Mozambique. Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud (SAADS) spécialité Ressources, Systèmes Agraires et Développement (RESAD) Monpellier : Montpellier SupAgro, Mémoire de stage Nitidae, 91p
- Blackie R, Baldauf C, Gautier D, Gumbo D, Kassa H, Parthasarathy N, Paumgarten F, Sola P, Pulla S, Waeber P and Sunderland T., 2014. Tropical dry forests: The state of global knowledge and recommendations for future research. *Discussion Paper. Bogor*, Indonesia: CIFOR
- Bray R.J., Curtis J.T., 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.*, 27, pp. 325-349.
- Berton S., 2013. Evaluation du potentiel de diffusion de l'agroécologie dans la zone tampon de la Réserve Nationale de Gilé (RNG). p. Rapport de mission. Agrisud International, 51 p.
- Buckingham, Sebastian, Nick Murphy, et Heloise Gibb., 2019. Effects of Fire Severity on the Composition and Functional Traits of Litter-Dwelling Macroinvertebrates in a Temperate Forest. *Forest Ecology and Management* 434: pp. 279-288.
- Campbell B.M. (Éd.), 1996. The miombo in transition: woodlands and welfare in Africa. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia, 266 p.
- Carrière M., 1994. *Plantes de Guinée à l'usage des éleveurs et des vétérinaires*. Minist. Coop. Fr., CIRAD-EMVT (éds.), 235 p.
- Chazdon, Robin L., et Manuel R. Guariguata., 2016. Natural Regeneration as a Tool for Large-Scale Forest Restoration in the Tropics: Prospects and Challenges. *Biotropica* 48, no 6, pp. 716 30.

- Chidumayo, E. N., and Gumbo, D. J., 2010. *The dry forest and woodlands of Africa : managing for products and services. Center for International Forestry Research*. Earthscan, Washington DC, USA.
- Chinuwo T., Gandiwa E., Mugabe P.H., Mpofu I.D.T., Timpong-Jones, 2010. Effects of previous cultivation on regeneration of Julbernadia globiflora and Brachystegia spiciformis in grazing areas of Mupfurudzi Resettlement Scheme, Zimbabwe. *African Journal of Range and Forage Science*, 27 (1), pp. 45-49.
- Coe, M. J., D. H. Cumming, et J. Phillipson., 1976. Biomass and Production of Large African Herbivores in Relation to Rainfall and Primary Production. *Oecologia* 22, no 4, pp. 341-54.
- de Koning, J., 1993. *Checklist of vernacular plant names in Mozambique*. Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- de Rouw A., 1993. Regeneration by sprouting in slash and burn rice cultivation, Taï rain forest, Côte d'Ivoire. *Journal of tropical ecology*, 9 (4), pp. 387–408.
- Delbergue A., 2015. Analyse du système du suivi écologique de la grande faune de la Réserve Nationale de Gilé : Bilan et Perspectives d'avenir. Province du Zambèze, Mozambique. p. Mémoire de fin d'étude, Agroparistech, Montpellier, 65 p.
- FAO. 2015 Évaluation des ressources forestières mondiales 2015-Comment les forêts de la planète changent-elles? Rome (disponible à http://www.fao.org/3/a-i4793f.pdf)
- Floret C., Pontanier R., Serpantie G., 1993. La jachère en Afrique tropicale. *Dossier MAB* n° 16. Unesco, Paris, France, 86 p.
- Fournier, F., Sasson A., 1983. éd. *Écosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique*. Recherches sur les ressources naturelles, ORSTOM-UNESCO 19. Paris.
- Giliba, Richard A., Emmanuel K. Boon, Canisius J. Kayombo, Emmanuel B. Musamba, Almas M. Kashindye, et Philipina F. Shayo., 2011. Species Composition, Richness and Diversity in Miombo Woodland of Bereku Forest Reserve, Tanzania. *Journal of Biodiversity* 2, no 1, pp.1-7.
- Glassman, Sydney I, Carrie R Levine, Angela M DiRocco, John J Battles, et Thomas D Bruns., 2016.

  Ectomycorrhizal Fungal Spore Bank Recovery after a Severe Forest Fire: Some like It Hot. *The ISME Journal* 10, no 5, 1228-1239.
- GoM, 2018. Mozambique's Forest Reference Emission Level for Reducing Emissions from Deforestation in Natural Forests. Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. República de Moçambique. 50p
- González-Castro, Aarón, Suann Yang, et Tomás A. Carlo., 2019. How Does Avian Seed Dispersal Shape the Structure of Early Successional Tropical Forests? » Édité par Matthias Schleuning. *Functional Ecology* 33, no 2, pp. 229-238.

- Hoffmann, William A., Ryan Adasme, M. Haridasan, Marina T. de Carvalho, Erika L. Geiger, Mireia A. B. Pereira, Sybil G. Gotsch, et Augusto C. Franco., 2009. Tree Topkill, Not Mortality, Governs the Dynamics of Savanna–Forest Boundaries under Frequent Fire in Central Brazil. *Ecology* 90, no 5, pp. 1326-1337.
- HögbergP., 1986. Soil Nutrient Availability, Root Symbioses and Tree Species Composition in Tropical Africa: A Review. *Journal of Tropical Ecology* 2, no 04, pp. 359-372.
- Jew, Eleanor K.K., Andrew J. Dougill, Susannah M. Sallu, Jerome O'Connell, et Tim G. Benton., 2016. Miombo Woodland under Threat: Consequences for Tree Diversity and Carbon Storage. Forest Ecology and Management 361, pp. 144-153.
- Kalaba F.K., Quinn C.H., Dougill A.J., Vinya R., 2013. Floristic composition, species diversity and carbon storage in charcoal and agriculture fallows and management implications in Miombo woodlands of Zambia. *Forest Ecology and Management*, 304, pp. 99-109.
- Leadley, P., Pereira, H.M., Alkemade, R., Fernandez-Manjarrés, J.F., Proença, V., Scharlemann, J.P.W., Walpole, M.J., 2010. *Scénarios de biodiversité : Projections des changements de la biodiversité et des services écosystémiques pour le 21e siècle*. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, Montréal. Cahier technique n°50, 55 p.
- Lamarre E. 2015. Diagnostic des territoires et des pratiques agricoles, Etat des lieux DRAFT. *Agrisud International*
- Mace, G.M., 2014. Whose conservation? Science, 345, pp. 1558–1560.
- Malaisse, F.P., 1979 L'écosystème miombo. In: Ecosystèmes forestiers tropicaux. UNESCO/PNUE/FAO, pp. 641-659.
- Malmer A., 2007. General ecological features of miombo woodlands and considerations for utilization and management. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, vol.* 50, pp.34–42
- Mercier C., Grinand C., Randrianary T., Nourtier M., Rabany C., 2016. *Background study for the preparation of the Zambézia Integrated Landscapes Management Program Corentin Merciera Clovis Grinanda Telina Randrianarya Marie Nourtiera Cédric Rabanyb*. Report for Government of Mozambique and FCPF. Etc Terra., 196 p
- Mésochima P., Langa F., Chardonnet P., 2008. *Preliminary survey of large herbivores in Gilé National Reserve*, Zambezia province, Mozambique, IGF Fundation and Direcção Provincial do Turismo, Zambezia, Moçambique, Paris, 38

- Montfort F., 2016. Etude de la régénération de la forêt de Miombo en périphérie de la Réserve Nationale de Gilé à la suite de changements d'usage du sol, Mozambique, master Biodiversité, Ecologie, Evolution spécialité Biodiversité végétale et gestion des écosystèmes tropicaux (BIOGET), Université de Montpellier, Mémoire de stage ETC Terra, 67p
- Mousain D., Matumoto-Pintro P., et Quiquampoix H., 1997. Le Rôle des mycorhizes dans la nutrition phosphatée des arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, no sp 67.
- Munyanziza, E., 1994. *Miombo trees and mycorrhizae. Ecological strategies, a basis for afforestation*. Ph.D, thesis, Wageningen Agricultural University.
- ONF, 2007. Travaux forestiers-Régénération forestière Consulté sur http://www1.onf.fr/lire\_voir\_ecouter/++oid++e37/@@display\_media.html
- Peltier R., Dubiez E., Diowo S., Gigaud M., Marien J-N., Marquant B., Peroches A., Proces P., Vermeulen C., 2014. Assisted Natural Regeneration in slash-and-burn agriculture: Results in the Democratic Republic of the Congo, *Bois et forêts des tropique*, N° 321 (3), pp. 67-79
- Parker, V. Thomas. 1997. The Scale of Successional Models and Restoration Objectives. *Restoration Ecology* 5, n° 4, 301-306.
- Prin T., 2008. Typologie et cartographie de la végétation de la Réserve Nationale de Gilé (Mozambique):

  Etude préalable à la réintroduction de grands mammifères. Rapport de stage de seconde année.

  Université de Montpellier, Montpellier, 41 p.
- Ribeiro, Natasha S, Céu N Matos, Isabel R Moura, Robert A Washington-Allen, et Ana I Ribeiro., 2013.

  Monitoring Vegetation Dynamics and Carbon Stock Density in Miombo Woodlands . *Carbon Balance and Management* 8, n° 1, 11.
- Ribeiro, N. S., A. Cangela, A. Chauque, R. R. Bandeira, et A. I. Ribeiro-Barros., 2017. Characterisation of Spatial and Temporal Distribution of the Fire Regime in Niassa National Reserve, Northern Mozambique. *International Journal of Wildland Fire* 26, n° 12, 1021. Rodrigues de Aquino, André; Jerneck, Amanda Teresia; Jacobs, Katie Lauren; Seck, Madjiguene; Lovei, Magda., 2017. *Integrated landscape and forest management in Mozambique* (English). Washington, D.C.: World Bank Group.
- Rozendaal, Danaë M. A., Frans Bongers, T. Mitchell Aide, Esteban Alvarez-Dávila, Nataly Ascarrunz, Patricia Balvanera, Justin M. Becknell, et al., 2019. Biodiversity Recovery of Neotropical Secondary Forests. Science Advances 5, no 3, pp. 311-314.
- Ryan, Casey M., Mathew Williams, et John Grace., 2011. Above- and Belowground Carbon Stocks in a Miombo Woodland Landscape of Mozambique: Carbon Stocks in a Miombo Woodland . *Biotropica* 43, n° 4, pp. 423-432.

- Shirima D.D., Totland Ø., Munishi P.K.T., Moe S.R., 2015. Does the abundance of dominant trees affect diversity of a widespread tropical woodland ecosystem in Tanzania? *Journal of Tropical Ecology*, 31 (4), pp. 345–359.
- Shono, K., E. A. Cadaweng and P. B. Durst. 2007. Application of assisted natural regeneration to restore degraded tropical forestlands. *Restor. Ecol.* 15, pp.620–626.
- Smith P., Allen Q., 2004. *Field Guide to the Trees and Shrubs of the Miombo Woodlands*. Royal Botanic Gardens, Kew, 176 p.
- Stirling, E., L.M. Macdonald, R.J. Smernik, et T.R. Cavagnaro. Post Fire Litters Are Richer in Water Soluble Carbon and Lead to Increased Microbial Activity. *Applied Soil Ecology* 136 (avril 2019): 101-5.
- Teixeira G-M., Figueiredo P., Valcarcel R., de Azevedo Amorim T.,2014. Regeneration in the atlantic forest under different levels of anthropic disturbance: Implications for restoration. *Forest Sciences* 42(104), pp. 543-554
- The R Core Team, 2016. R: *A Language and Environment for Statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 3501 p. Disponible sur Internet: http://www.R-project.org/[Diffusé le 02/02/2016].
- Timberlake J., Chidumayo E., 2011. Miombo Ecoregion Vision report. Occasional Publication in Biodiversity. WWF SARPO.
- UNDP. 2016. UNDP, about Mozambique. (disponible à http://www.mz.undp.org/content/mozambique/en/home/countryinfo/)
- van Wyk B., van Wyk P., 2013. Field Guide to Trees of Southern Africa. Struik Publishers. Cape Town, 732 p.
- White F., 1983. The Vegetation of Africa, a descriptive memoir to accompany the Unesco/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa. Unesco natural resources research report XX. Paris, 366 p.
- Williams M., Ryan C.M., Rees R.M., Sambane E., Fernando J., Grace J., 2008. Carbon sequestration and biodiversity of re-growing miombo woodlands in Mozambique. Forest Ecology and Management, 254 (2), pp. 145-155.
- Williams-Linera G., Palacios-Rios M., Hernández-Gómez R., 2005. Fern richness, tree species surrogacy, and fragment complementarity in a Mexican tropical montane cloud forest. *ResearchGate*, 14 (1), pp. 119-133.

# **ANNEXES**

# Annexe A: Fiche terrain utilisée lors des prospections

	Inform	nations prospect	ion p	lacette				
Date:	Nom-âge:		Observateurs:					
Localisation GPS	7							
	Distance à la ville (village)			Distance à la forêt				
Photos n° -	$\dashv$							
Distance à la route	Dropriátair	e: OUI / NON		Zone □ achetée ( ) □héritée ( )				
Très fréquentée: OUI / NON	Depuis qua			□prêtée (				
The strequentee. Out y Non	Depuis que			oprëtee ( ) olouee ( )				
		Description z						
Type sol-Noms locaux	Nom zone	Lomwé/descriptio	n pari	interlocuteı	ır:			
Présence végétation: OUI / NON	1	Présence de souch	es: Ol	JI / NON	Présence ilôt régé: OUI / NON			
□ligneuse(%)□herbacée(	%)	Nbr souches viva	ntes:		Taille: □ petit □moyen □grand			
□sol nu(%)		Nbr souches mor	tes:		Commentaire:			
Espèce dominante:		Nbr souches avec	trace	s de				
		régénération:						
,	EQUENCE:			Présence anacardier: OUI / NON				
		□ moyenne □ forte		Combien:				
Si volontaire, pour quelles raisons	5?			Depuis qu				
				Pourquoi a	voir décidé d'en planter?			
Présence termitières: OUI / NON		Distance à la	termit	tière:				
Nbr actives: Nbr non ac	tives:	Town and become						
Exploitées: OUI/ NON Nbr en installation:		Type d'explo	ortatic	on:				
Psce végération: OUI / NON		Hau		uteur:				
Commentaires:		TAILLE	ÍF					
			Sup	perficie:				
		Usages et perce	•					
Quelle sont les différences entre	les jachères	et ces zones aban	donn	ées?				
Usages antérieurs connus: OUI / NO	N ⊓agricole	□coune hois nou	rcharl	on □chass	e □collecte PENI			
coupe bois construction cancien					2 230.110000 11.112			
□AUTRES:								
Combien de temps a duré l'exploitation	n de la zone?							
Si différentes utilisations, quelles ont	été les succes	ssions? (Ordre, temp	os poui	r chaque)				

# Annexe A (suite)

Si agriculture:	Si abandon lié à la fertilité:				
Type de culture:	Indicateurs:				
Temps de culture: Temps de jachère entre cultures:	Définition (différents mots Lomwé?)				
Abandon Depuis combien de temps la zone a-t-elle été abandonnée?	La fertilité du sol est-elle récupérable? Comment?				
Raison(s) abandon:	Des essais ont-ils déjà été faits? Lesquels?				
Usages actuels: □agricole □coupe bois pourcharbon □chas □coupe bois construction □anciennes habitations □pâture □AUTRES:		Notes usages actuels:			
Si agriculture:	Devenir de la zone:	enir de la zone:			
Type de culture:	Retour: OUI / NON Pou	rquoi?			
Temps de culture: Temps de jachère entre cultures:	Abandon total: OUI / NON Pourquoi?				
Perception de la personne interrogée sur la zone précise e	et sur les autres zones d	e ce type			
Pourquoi ne pas être parti ailleurs pour trouver une meille	eure zone?				

# Annexe B: Fiche terrain pour la réalisation des inventaires des ligneux Fiche d'inventaire

# Informations placette:

Date	
Collecteur(s)	
Information	ons placette
n°	Type sol
GPS	Topographie
Coupe	Récolte
Feu	Pâturage
Comment.	

Place	tte n°:		Date :				N° fi	che :	
N° ind	Туре	Nom Lomwé	Commenta	nires	Photos	Haut (m		DHP (cm)	Nbre de rejet

# Annexe C: Fiche terrain pour l'analyse physique du sol

Informations placette								
Date:			n° placette					
Localisation	on GPS			n° échantillon /				
				Code écha		,		
Photos n°	-			Altitude				
	nts climatiques:			Végétatio	n			
Antecede	nits ciiniatiques.			vegetatio	/I I			
				Géologie	(nom roch	e	Pen	te%
Observate	eurs			dominant	:e)			
			Description	on du sol				
Hydro	ologie	٦	1-			; 2-Saturé de		
	hydrique)			3-humide	en permane	ence; 4-sec d		
(regime i	nyanque)						5-continuel	lement sec
Humi	dité (prof en cm)	COULEUR		terrain		cod	de Munsell	
0-10	1-sec	0-10						
10-20	2-frais	10-20						
20-30	3-humide	20-30						
30-40	4-très humide	30-40						
40-50	5-saturé	40-50						
50-60	6-noyé	50-60						
60-70	o noye	60-70						
70-80		70-80						
80-90		80-90						
90-100		90-100						
	Texture	100 100	abondance		Tâche	S couleur	terrain   coo	de Munsell
0-10	1-argileux		0-10	0-pas	de tâches	0-10		
10-20	2-limoneux		10-20	1-<2%		10-20		
20-30	3-sableux		20-30			20-30		
30-40	4-argilo-sabl	eux	30-40	3-5à1		30-40		
40-50	5- argilo-limo		40-50	4- 15 à		40-50		
50-60	6-limono-ar		50-60	5-40 à		50-60		
60-70	7-limono-sal		60-70	6->809		60-70		
70-80	8- sablo-argi		70-80		70	70-80		
80-90	9-sablo-arg		80-90			80-90		
90-100	3-5abio-ai;	Riieux	90-100			90-100		
RACINES	abondance	dir	nension		mycorh			
0-10	0-pas de racines	0-10		es (<0,5mm)	0-10			
10-20	1-peu nombreuses	10-20		,5 à 2mm)	10-20	0-pas de	e mycorhizes	
20-30	2-nombreuses	20-30	3-moyer		20-30	1-psce	-	
30-40	3-très nombreuses	5mm)	-		mycorl	_		
40-50	$\dashv$	30-40			30-40		e mycorhizes	
50-60	_	40-50	5-très gr	osses	40-50	b-racine	25	
70-80	$\dashv$	(>20mn	Ī		mycorh 50-60	C-hon de	mycorhizes	
80-90	$\dashv$	60-70	Ī		60-70		,	
90-100		70-80			70-80			

# Annexe C (suite)

Commont	airos:							
Commentaires:								
abondano	ce %  Eléments grossiers	taille		Tra	ces d'activité	<u></u> ဘ်ဌ		
0-10	0-10	1 tarrie	0-10	0-ABS		1-coquilles		
10-20	10-20		10-20	1-	10-20	2-turricules		
20-30	20-30	1-Graviers	peu		20-30	3-coprolithes		
30-40	30-40	2-Cailloux	20-30	2-	30-40	4-racines		
40-50 50-60	40-50 <u>50-60</u>	3-Pierres 4-Blocs	nbreus 30-40	] ] 3-très	décom	5-galeries		
60-70	60-70	. 5.003	40-50	] 5 1.163	rongeu	5 gareries		
70-80	70-80		nbreus		50-60	6-mycélium		
80-90	80-90		50-60		60-70	7-poteries		
90-100	90-100	háma du mafil s	60-70		70-80	8- charbon de		
	50	chéma du profil, p	protonaeur i	norizons				
					1			
		Obser	vations					

#### **RESUME**

Les forêts de Miombo font face à des menaces importantes, notamment liée à la déforestation. Pour atténuer ces impacts, la régénération passive est une solution adaptée, mais les connaissances sur les dynamiques et facteurs de régénération du Miombo sont encore limitées. L'objectif de cette étude est d'analyser les dynamiques et les facteurs de régénération de la forêt de Miombo sous différents gradients de perturbation sur des zones en jachère après agriculture sur brûlis autour de la Réserve Nationale de Gilé, au Nord-Est du Mozambique. 84 placettes dans des jachères suivant une chronoséquence allant de 1 à 35 ans et 8 placettes dans de la forêt mature ont été inventoriées. 54 placettes inventoriées dans des villes (Gilé et Naburi) et villages (Musseia et Malema) ont montré que la richesse et la diversité spécifique sont davantage liées au degré de perturbation qu'à l'âge de la jachère. Les 15 placettes où l'analyse physique du sol a été effectuée révèlent que les facteurs édaphiques influencent significativement la composition floristique des zones. Les 32 placettes de chronoséquence de 4 à 35 ans, comparée à 8 placettes de la RNG montrent une bonne régénération de l'écosystème du miombo en l'absence de perturbation anthropique en termes de richesse et diversité spécifique mais une régénération lente en terme de composition et structure floristique. Ces observations justifient la nécessité de concentrer les efforts de restauration sur les zones à fortes perturbations et motivent l'utilisation des méthodes de restauration passive comme la RNA, dans notre zone d'étude.

Mot-clés : forêt sèche de Miombo, régénération naturelle, régénération naturelle assistée, perturbation anthropique, Mozambique

#### **ABSTRACT**

Miombo woodland is facing important threats including deforestation. To mitigate these impacts, passive forest regeneration is a key solution but little is known about the dynamics of this particular biome. The objective of this study is to analyze the regeneration dynamics under different gradients of disturbance and environmental factors of the Miombo woodlands on fallows after slash and burn agriculture around the Gilé National Reserve, in the North-East of Mozambique. 84 plots in re-growing after agriculture (1-35 years old) and 8 plots of mature forest have been inventoried. 54 plots inventoried in cities (Gilé and Naburi) and villages (Musseia and Malema) showed that richness and species diversity are more linked to the degree of disturbance rather than the age of the fallow. Plots where the physical analysis of the soil has been performed reveals that the edaphic factors impacts significantly the floristic composition of the areas. The 32 plots of chronosequence from 4 to 35 years old, compared to 8 plots from the mature forest show a good regeneration of the miombo woodlands in the absence of anthropogenic disturbance in terms of richness and species diversity but a slow regeneration in terms of floristic composition and structure. These observations justify the need of conservation and restoration to be focused on the highly disturbed areas and motivates the use of passive restoration method such as ANR, in our study area.

Key-words: Miombo dry forest, natural regeneration, assisted natural regeneration, anthropic disturbance, Mozambique

#### **SUMARIO**

As florestas de Miombo enfrentam ameaças significativas, incluindo o desmatamento. Para mitigar esses impactos, a regeneração passiva é uma solução adequada, mas o conhecimento da dinâmica e dos fatores regenerativos do Miombo ainda é limitado. O objetivo deste estudo foi analisar as dinâmicas de regeneração sob diferentes gradientes de perturbação e fatores ambientais das florestas de miombo em parcelas de regeneração pós-agrícolas nos arredores da Reserva Nacional de Gilé, no nordeste de Moçambique. 84 parcelas de regeneração y 8 parcelas de floresta madura foi inventariadas. 54 parcelas inventariadas em cidades (Gilé e Naburi) e aldeias (Musseia e Malema) mostraram que a riqueza e diversidade de espécies estão mais ligadas ao grau de perturbação do que à idade do pousio. As 15 parcelas onde a análise física do solo foi realizada revelam que o propriededes do solo impacta significativamente a composição florística das áreas. As 32 parcelas de cronosequência de 4 a 35 anos, comparadas com 8 parcelas da RNG, mostram uma boa regeneração da do miombo na ausência de perturbações antropogénicas em termos de riqueza e diversidade de espécies mas uma regeneração lenta em termos de composição e estrutura florística. Estas observações justificam que a necessidade de conservação e restauração seja focada nas áreas altamente perturbadas e motivam o uso de métodos de restauração passiva, como o RNA, em nossa área de estudo.

Palavras-chave : floresta seca de Miombo, regeneração natural, regeneração natural assistida, perturbação antropogénica, Moçambique