



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

ECOLE DOCTORALE AGRICULTURE ELEVAGE ENVIRONNEMENT

THESE

Pour l'obtention du diplôme de **Doctorat en Sciences Agronomiques**

**INFLUENCE DE L'AGROFORESTERIE SUR LA DYNAMIQUE DE
SÉQUESTRATION DU CARBONE DES SOLS FERRALLITIQUES :**

**Cas des régions Itasy, Alaotra Mangoro et Analanjirofo
de Madagascar**

Par

Angelina Rondrotsifantenana RASOARINAIVO-RAZAFINTSALAMA

Soutenue le , devant le jury composé de :

Président

**Rapporteur
interne**

**Rapporteur
externe**

**Examineur
interne**

**Examineur
externe**

Tantely RAZAFIMBELO

Professeur Titulaire
LRI, Université d'Antananarivo

Directeur de thèse

Eric BLANCHART

Docteur HDR
UMR Eco&Sols, IRD Montpellier

**Co-Directeur de
thèse**

Jean TRAP

Docteur
UMR Eco&Sols, IRD Montpellier

**Encadrant
scientifique**



Résumé

La présente thèse vise d'une part à compléter la connaissance sur les diverses pratiques agroforestières à Madagascar afin d'en évaluer la capacité à séquestrer du carbone (C) et à améliorer la disponibilité de l'azote (N) et du phosphore (P) dans le sol, et d'autre part à identifier les principaux facteurs qui influencent la dynamique de C du sol dans ces pratiques. L'étude s'est focalisée sur les Ferralsols dans trois sites localisés dans les régions Itasy (site A), Alaotra Mangoro (site B) et Analanjirofo (site C). L'approche méthodologique utilisée comprend : (i) une enquête réalisée auprès de 50 agriculteurs par site pour caractériser les pratiques agroforestières, (ii) une approche synchronique pour calculer les taux de stockage de C dans le sol par ces pratiques et son impact sur la disponibilité de N et P dans le sol, (iii) des expérimentations pour tester l'effet de l'identité de l'espèce d'arbre et l'arrangement spatial des arbres sur la dynamique de C du sol.

Sept types d'agroforesterie ont été identifiés et décrits. Ce sont : le jardin d'agrumes, les cultures intercalaires d'Eucalyptus et de caféier dans le site A ; le jardin forestier et la culture intercalaire d'arbres fruitiers dans le site B ; l'agroforesterie à base de giroflier simple et complexe dans le site C. Ces systèmes se différencient par l'identité de l'espèce d'arbre, la densité d'arbre, l'arrangement spatial et la gestion de la fertilisation. Les taux de stockage de C dans le sol ont été significativement différents en fonction du site et du type d'agroforesterie tandis que la disponibilité de N et P dans le sol n'a pas été affectée. Les cultures intercalaires d'Eucalyptus avec le riz pluvial au niveau du site A ont enregistré le taux de stockage de C le plus élevé avec une valeur moyenne de $2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sur l'horizon 0 à 30 cm du sol. Les stocks et le stockage de C dans le sol par l'agroforesterie ont été expliqués par la quantité d'intrants organique ($p\text{-value} < 0,001$) et la densité d'arbre ($p\text{-value} < 0,001$). À cela s'ajoute l'effet de l'identité de l'espèce d'arbre, car l'expérimentation sur mésocosme a révélé que l'*Eucalyptus robusta* a permis d'incorporer dix fois plus de C dans le sol par rapport à *Coffea arabica* et *Citrus clementina*. Cet effet spécifique des arbres a été expliqué par la biomasse racinaire ($R^2=0,6$). En outre, l'expérimentation au champ a révélé que les teneurs en C, N et P disponibles du sol ont augmenté en fonction de la distance à l'arbre sur 0 à 10 cm du sol pour ensuite décroître sur l'horizon 10 à 30 cm. Une tendance décroissante de l'abondance des macrofaunes et des nématodes a été également observée en s'éloignant de l'arbre.

À la lumière de ces résultats, il a été démontré que l'agroforesterie a permis d'intensifier les fonctions écologiques du sol, contribuant ainsi à l'atteinte du double objectif d'atténuation du changement climatique et d'assurer la sécurité alimentaire à Madagascar.

Mots-clés : Agroforesterie, carbone, sol, changement climatique, agroécologie, Madagascar

Abstract

This thesis aims to fill out knowledge about agroforestry systems designed by Malagasy farmers, their description, and their potential to sequester carbon (C) into the soil and improve soil nitrogen (N) and phosphorus (P) availability. We also focused on factors that impact soil C sequestration in these practices. The study was carried out on Ferralsols in three sites in Itasy region (Site A), Alaotra Mangoro region (Site B), and Analanjirofo region (Site C). The methodological approach consists of: (i) a survey that has been conducted with 50 farmers per site to describe the main types of agroforestry practices, (ii) a synchronic approach that was used to calculate the soil C sequestration rate by these practices, (iii) the mesocosm and field experiments that were carried out to test the effect of agronomic factors such as tree species and spatial arrangement on soil C dynamic in agroforestry systems.

Seven types of agroforestry were identified and described: Eucalyptus intercropping, Citrus garden and Coffea intercropping in site A; forest garden and fruit trees intercropping in site A; complex and simple cloves based agroforestry in site C. Tree species, tree density, spatial arrangement, and system management were varied among these systems. These practices exhibited different soil C storage rates depending on the site and the type of agroforestry. The highest rate was observed in Eucalyptus intercropping with rainfed rice at site A. This system sequesters an average of 2 tC ha⁻¹ year⁻¹. Unexpectedly, the availability of nitrogen and available phosphorus in soil was not significantly affected by agroforestry. The soil C stocks and storage by agroforestry systems were explained by the amount of organic matter input to the soil (p-value<0.001) and tree density (p-value<0.001). The mesocosm experiment revealed that tree species identity was also a driver of soil C sequestration in agroforestry systems. *Eucalyptus robusta* exhibited the highest tree-derived C by incorporating ten times more C into the soil compared to *Coffea arabica* and *Citrus clementina*. Tree species-specific effect on soil C sequestration was driven by root biomass (R²=0.6). This study also revealed the soil C, N, and available P contents increased with the distance to the tree over the first ten centimeters of the soil, while the opposite trend was observed over the horizons 10 to 30 cm of the soil for these same elements and macrofauna and nematode abundance.

Our results highlight the importance of Malagasy agroforestry practices to intensify the ecological functions of the soil. Agroforestry practices contribute to climate change mitigation and food security in Madagascar.

Key Words: Agroforestry, carbon, soil, climate change, agroecology, Madagascar

Sommaire

Remerciements.....
Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des acronymes et abréviations.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures.....	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Introduction au contexte et problématique.....	1
2. État de l’art.....	3
2.1. Agroforesterie.....	3
2.1.1. Définition.....	3
2.1.2. Les différents types d’agroforesterie.....	3
2.1.3. Production agricole dans les systèmes agroforestiers.....	5
2.1.4. Séquestration de carbone dans le sol par les systèmes agroforestiers.....	5
2.1.5. Cycle des nutriments dans les systèmes agroforestiers.....	6
2.1.6. Fonction biologique du sol dans les systèmes agroforestiers.....	7
2.1.7. Conservation de la biodiversité dans les systèmes agroforestiers.....	7
2.2. Carbone du sol.....	8
2.2.1. Les matières organiques du sol.....	8
2.2.2. Le carbone organique du sol.....	8
2.2.3. Stock, stockage et séquestration de carbone dans sol.....	8
2.2.4. Enjeux agronomiques du stockage de C dans le sol.....	9
2.2.5. Enjeux environnementaux de la séquestration de C dans le sol.....	9
2.2.6. Stock de carbone du sol à Madagascar et importance du sol ferrallitique.....	10
3. Stratégie de recherche.....	11
3.1. Problématique et hypothèses de recherches.....	11
3.2. Objectif général.....	12
3.3. Objectifs spécifiques.....	13
3.4. Zone d’étude.....	13
3.4. Approches méthodologiques générales.....	14
3.5. Organisation du manuscrit.....	15

Chapitre 1. DESCRIPTION DES PRATIQUES AGROFORESTIÈRES ET DES FACTEURS D'ADOPTION DE L'AGROFORESTERIE PAR LES AGRICULTEURS MALGACHES 17

Préface.....	17
Description of agroforestry practices and adoption factors by Malagasy farmers	18
Résumé.....	18
Abstract.....	19
1. Introduction.....	19
2. Materials and methods	20
2.1. Site description.....	20
2.1.1. Imerintsiatosika.....	20
2.1.2. Andasibe	21
2.1.3. <i>Ambodimanga II</i>	21
2.2. Classification criteria.....	21
2.2.1. <i>Principles of classification</i>	21
2.2.2. <i>Description criteria</i>	22
2.3. Data acquirement.....	23
2.3.1. <i>Survey of agroforestry farmers and selection of agroforestry plots</i>	23
2.3.2. <i>Other sources of data</i>	24
2.3.3. <i>Positioning and area measurement of plots</i>	24
2.3.4. <i>Inventory of woody species</i>	24
3. Results.....	24
3.1. Types of agroforestry practices in the three sites	24
3.1.1. <i>Agroforestry practices in Imerintsiatosika</i>	24
3.1.2. <i>Slash-and-burn alternative agroforestry in Andasibe</i>	25
3.1.3. <i>Clove tree-based agroforestry in Ambodimanga II</i>	26
3.2. Adoption factors of agroforestry according to farmers' perception.....	28
3.2.1. <i>Farmers' motivating factors in Imerintsiatosika</i>	28
3.2.2. <i>Farmer's motivation in Andasibe</i>	28
3.2.3. <i>Farmer's motivation in Ambodimanga II</i>	28
4. Discussion	29
4.1. Agroforestry classification base	29
4.2. Agroforestry design by Malagasy farmers	30
4.3. Agricultural production in agroforestry practices	30
4.4. The ecological function of agroforestry practices.....	30
4.5. The economic motivation for agroforestry adoption by Malagasy farmers.....	31

4.6. Limits of the study.....	31
5. Conclusion	31
6. Synthèse des principaux résultats sur la description des pratiques agroforestières	32
Chapitre 2 : IMPACT DE L'AGROFORESTERIE SUR LES STOCKS DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE DU SOL A MADAGASCAR.....	33
Préface.....	33
1. Introduction.....	34
2. Matériels et méthodes	35
2.1. Sites d'étude	35
2.2. Description des systèmes agroforestiers étudiés	36
2.3. Approche utilisée.....	39
2.4. Protocole d'échantillonnage.....	39
2.5. Mesure de la densité apparente du sol.....	40
2.6. Analyses physico-chimiques du sol	40
2.7. Calcul des stocks de C, N et P disponible du sol	40
2.8. Analyse statistique.....	41
3. Résultats.....	41
3.1. Dynamique de C dans les systèmes agroforestiers.....	41
3.1.1. Densité apparente du sol	41
3.1.2. Teneurs en C du sol.....	42
3.1.3. Stocks de C du sol.....	44
3.1.4. Taux de séquestration de C du sol dans les systèmes agroforestiers	44
3.2. Paramètres affectant le stock de C du sol dans les systèmes agroforestiers	45
3.2.1. Effet des composantes et structure des systèmes agroforestiers	45
3.2.2. Effet de la gestion de la fertilité du sol	46
3.3. Évolution des nutriments du sol sous agroforesterie.....	47
3.3.1. Teneurs en azote du sol.....	47
3.3.2. Teneurs en phosphore disponible du sol.....	47
3.3.3. Rapport C/N du sol	47
3.3.4. Stocks de N total et du P disponible du sol.....	47
4. Discussion	48
4.1. Les stocks de C et des nutriments du sol varient en fonction des sites	48
4.2. L'agroforesterie permet une augmentation significative du stock de C du sol par rapport aux cultures annuelles	49
4.3. La structure et la gestion des systèmes influencent le stock de C du sol en agroforesterie	50

4.4. L'agroforesterie favorise une stabilité de la disponibilité des nutriments du sol.....	50
5. Conclusion	51
Chapitre 3. EFFET SPECIFIQUE DES ESPECES D'ARBRES SUR LE CARBONE DU SOL REVELE PAR LA COMPOSITION EN ¹³ C DU SOL DANS UNE ASSOCIATION EXPERIMENTALE D'ARBRES ET DU RIZ	52
Préface.....	52
Tree specific effects on soil carbon sequestration as revealed by soil ¹³ C composition in a rice-trees association mesocosm experiment	53
Abstract.....	53
1. Introduction.....	53
2. Materials and methods	55
2.1. Soil sampling.....	55
2.2. Plant materials	55
2.3. Experimental design.....	56
2.4. Mesocosm set up	57
2.5. Plant measurements.....	57
2.6. Soil collection and analyses at the end of the experiment.....	57
2.7. Data analyses.....	58
3. Results.....	59
3.1. Soil C response to tree species	59
3.2. Soil nutrient content as a function of tree species identity.....	62
3.3. Plant parameters as a function of tree species identity.....	62
4. Discussion.....	64
4.1. <i>Eucalyptus robusta</i> strongly affects soil C content irrespective of rice presence.....	64
4.2. Root biomass drives tree-driven soil C sequestration.....	64
4.3. C: nutrient coupling in tree species-specific effects on soil C sequestration	64
4.4. Limits and perspectives.....	65
5. Conclusion	66
6. Synthèse des résultats de l'effet spécifique des arbres agroforestiers sur le carbone du sol67	
Chapitre 4. VARIABILITE SPATIALE DU CARBONE, DE NUTRIMENTS ET DE BIOTA DU SOL EN FONCTION DE LA DISTANCE A L'ARBRE DANS LES SYSTEMES INTERCALAIRES TROPICAUX	68
Préface.....	68
Spatial variability of soil carbon, nutrient, and biota with distance from trees in a tropical intercropping system.....	69
Abstract.....	69

1. Introduction.....	70
2. Materials and methods	71
2.1. <i>Study site</i>	71
2.2. <i>Description of agroforestry field</i>	71
2.3. Soil sampling design	72
2.4. Soil chemical analyses	72
2.5. Soil biological analysis.....	72
2.5. <i>Data collection for plant biomass analysis</i>	73
2.6. <i>Data analyses</i>	73
3. Results.....	74
3.1. <i>Soil carbon and nutrient spatial variation</i>	74
3.2. <i>Macrofauna spatial variation</i>	76
3.3. <i>Nematode spatial variation</i>	77
3.4. <i>Spatial variation in rice biomass</i>	79
4. Discussions	79
4.1. <i>Soil C and N contents decreased with increasing distance from trees</i>	79
4.2. <i>Macrofauna community changes with distance from the trees</i>	80
4.3. <i>Nematode community changes with distance from the trees</i>	80
4.4. <i>Impact of soil parameters variations on rice biomass</i>	81
4.5. <i>Limits and perspectives of the study</i>	82
5. Synthèse des résultats sur la variabilité spatiale du carbone, des nutriments et de la communauté biologique en fonction de la distance à l'arbre dans les systèmes intercalaires tropicaux	83
DISCUSSION GENERALE- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	84
Préface.....	84
1. Rappel des objectifs et des hypothèses de la thèse	85
2. Synthèse et discussion des résultats	86
2.1. Description des pratiques agroforestières à Madagascar : une stratégie (pratique) de diversification agricole revêtant des enjeux socioéconomiques	86
2.2. L'Agroforesterie en tant que stratégie pour augmenter considérablement les capacités de puits de Carbone du sol	87
2.3. Importance des facteurs qui influencent le stockage et la séquestration de carbone dans le sol au niveau des systèmes agroforestiers à Madagascar	87
2.4. Disponibilité des nutriments dans le sol par les systèmes agroforestiers.....	90
3. Validation des hypothèses de recherches.....	90
4. Perspectives de recherches sur l'agroforesterie	91

4.1.	Etablissement d'une typologie de l'agroforesterie.....	91
4.2.	Etude diachronique de séquestration de carbone dans les systèmes agroforestiers ..	92
4.3.	Amélioration de la technique d'échantillonnage du sol pour une estimation précise de la quantité de carbone séquestré par les systèmes agroforestiers	92
4.4.	Etude qualitative du carbone séquestré par les systèmes agroforestiers	93
4.5.	Etude de l'influence de l'agroforesterie sur la biologie du sol	93
4.6.	Etudier les formes de valorisation agronomique des sous-produits ligneux et non ligneux afin d'optimiser la potentialité de l'agroforesterie stocker du carbone et à restaurer la fertilité du sol	94
4.7.	Etude sur l'effet du changement climatique sur la potentialité de l'agroforesterie à stocker du C	95
5.	Contraintes et opportunités pour l'application de l'agroforesterie dans l'agriculture malgache	95
	Références bibliographiques	97
	ANNEXES	I
	Annexe 1. Communication sous forme de Poster lors de la Conférence internationale sur la vision scientifique multidimensionnelle, au service de la recherche et du développement, Tamatave, Madagascar	II
	Annexe 2. Communication orale lors du 4 ^{ème} Congrès mondial de l'Agroforesterie, 19 Mai 2019, Montpellier, France.....	III
	Annexe 3. Communication sous forme de poster lors de la Conférence internationale sur l'Intensification Durable (CID), 8-10 octobre 2019, Dakar, Sénégal.....	IV
	Annexe 5. Communication orale lors de la Conférence internationale sur le thème « Vers une connexion entre la recherche innovante, la société et les enjeux du développement durable » ; organisée par le Laboratoire des Radio-Isotopes à l'occasion de son 55 ^{ème} Anniversaire, 14-15 janvier 2021, Antananarivo, Madagascar	V
	Support Information 1: mesocosm design and device	VIII
	Support Information 2: Height growth of trees for four months after rice sowing.....	IX

Liste des acronymes et abréviations

¹³C : carbone 13 (isotope stable du carbone)

C : carbone

C/N : Rapport carbone/azote

CC : climate change

CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

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

CO₂ : Dioxyde de carbone

COS : Carbone Organique du Sol

CV : culture vivrière

DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine

DP SPAD : Dispositif de recherche et d'enseignement en Partenariat sur les Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité

Eco&Sols : Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agroécosystèmes ESSA Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques

FAO : Food and Agriculture Organisation

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GPS : Global Positioning System

GPS : Global Positioning System

Gt : gigatone

Ha: Hectare

ICRAF : Centre International de Recherche sur l'Agroforesterie

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LRI : Laboratoire des Radioisotopes

MOS : Matière Organique du Sol

N :nitrogen

ONE : Organisme National pour l'Environnement

ONG : Organisme Non Gouvernemental

P : phosphorus

PRD : Plan Régional de Développement

SECuRE : Soil ECological function REstoration

SoCa: Soil for Organic Carbon for Africa

T: Ton

TSBF : Tropical Soil Biology and Fertility

UNESCO Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la cultur

WAC : World Agroforestry Congres

Yr: Year

Liste des tableaux

Introduction générale

Tableau 1: Les principaux types de systèmes agroforestiers (adapté à partir de Nair et al (2009)).....4

Chapitre 1. Description des pratiques agroforestières

Table 2: Summary of classification criteria23

Table 3. Description of agroforestry practices in the three sites (Imerintsiatosika, Andasibe, Ambodimanga II)27

Chapitre 2. Impact de l'agroforesterie sur les stocks de carbone, d'azote et de phosphore disponible du sol à Madagascar

Tableau 4: Description des sites d'étude36

Tableau 5: Description des systèmes agroforestiers et des principaux modes d'usages du sol dans les trois sites.....38

Tableau 6: Résultats de l'ANOVA avec seuil de significativité de la comparaison des valeurs de Da, les teneurs en C, N et P ainsi que le C/N en fonction du site, mode d'usage du sol et profondeur.....42

Chapitre 3. Effet spécifique des arbres agroforestiers sur le carbone du sol révélé par la composition isotopique du carbone du sol dans une association expérimentale d'arbre et du riz

Table 7. Experiment treatments and associated codes56

Table 8. Three-way ANOVA statistics (*F*-value) on soil parameters after one year of the experiment according to agroforestry tree (AT), rice presence (RP) and soil depth (SD).60

Table 9. Two-way ANOVA statistics (*F*-value) with tree species (TS) and rice presence (RP) as a factor on plant parameters.....62

Chapitre 4. Variabilité spatiale du carbone, des nutriments et du biota en fonction de la distance à l'arbre dans les systèmes intercalaires tropicaux

Table 10: Soil C, N, and available P as a function of soil depth range (SDR), distance from the tree (DFT,) and shoot mean distance (SMD).....74

Liste des figures

Introduction générale

Figure 1 : Taux de séquestration de carbone dans les systèmes agroforestiers suivant l'écorégion (A) et suivant les structures des systèmes (B), adapté de Féliciano et al.,20186

Figure 2 : Séquestration de C du sol selon l’initiative 4 pour 1000 (adaptée selon Ademe, 2015)	10
Figure 3 : Distribution des types de sol à Madagascar (A, Delenne and Pelletier, 1980) et carte des stocks de COS sur 0-30 cm de profondeur, à l’échelle de l’île de Madagascar (B, Ramifehiarivo et al, 2017)	11
Figure 4 :Présentation de la zone d'étude	14
Figure 5 :Schéma conceptuel de la méthodologie générale	16

Chapitre 1. Description des pratiques agroforestières

Figure 6 : Farmers’ motivation for adopting agroforestry practices in the Highlands site (A), in the East site (B) and in the Eastern Coast site (C) in Madagascar.....	29
--	----

Chapitre 2. Impact de l'agroforesterie sur les stocks de carbone, d'azote et de phosphore disponible du sol à Madagascar

Figure 7 : Protocole de prélèvement de sol.....	39
Figure 8 : Variation des paramètres du sol en fonction du site, de la profondeur et des modes d’usage du sol. Les étoiles indiquent une différence entre l’agroforesterie et les autres modes d’usages du sol (*** p <0,001; ** p <0,01; * p <0,0).	43
Figure 9 : Stocks de carbone du sol dans les différents mode d'usage du sol sur 0-30cm sur les sites A,B et C. Les lettres (a et b) indiquent une ANOVA à un facteur du stock de carbone du sol entre les systèmes agroforestiers (AF) et les cultures vivrières annuelles (CV).....	44
Figure 10 : Taux de stockage de carbone du sol par les systèmes agroforestiers (par rapport à des systèmes cultivés de référence, non agroforestiers)	45
Figure 11 : Relation entre stock de C du sol la densité d'arbres en agroforesterie	46
Figure 12 : Evolution du stock de C dans les systèmes agroforestiers en fonction de la quantité d'intrant organique	46

Chapitre 3. Effet spécifique des arbres agroforestiers sur le carbone du sol révélé par la composition isotopique du carbone du sol dans une association expérimentale d'arbre et du riz

Figure 13 : Soil C (A) and N content (B), C isotopic signature ($\delta^{13}C$) (C), and available P content (D) according to the treatments (control and the three tree species). Letters (a and b) indicate significant differences between tree species according to one-way ANOVA. Legend: Control treatments (Ct), Coffea arabica tree (Co), Citrus clementina (Ci), Eucalyptus robusta	
---	--

(Eu), Control with bare soil (CtB), Control including nursery potting substrate (CtN), Control with rice (CtR+).	61
Figure 14: Newly incorporated C derived from agroforestry tree species (C_sp).	62
Figure 15 : Shoot and root biomasses in dry g for agroforestry trees (A) and rice (B) according to treatments. Letters (a and b) indicate significant differences according to one-way ANOVA of plant biomass between treatments.	63
Figure 16 : Relationship between tree root biomass and soil C isotopic signature ($\delta^{13}C$) for all soil samples (A) and for each tree species (B).	63

Chapitre 4. Variabilité spatiale du carbone, des nutriments et du biota en fonction de la distance à l'arbre dans les systèmes intercalaires tropicaux

Figure 17: Soil sampling protocol for assessing the influence of distance from the tree on soil parameters	72
Figure 18: Soil carbon, nutrient, and resin P according to soil depth and the distance from the tree	75
Figure 19: Influence of diameter on soil C and N content	75
Figure 20: Result of NMDS on the absolute abundance of macrofauna (A) and nematode taxa (B)	76
Figure 21: Distribution of functional groups of macrofauna according to distance from the tree	77
Figure 22: Feeding type composition of nematode community	78
Figure 23: Nematode index according to distance from the tree	78
Figure 24: Final rice shoot and root biomass according to distance from the trees. Letters (a and b) indicate significant differences according to one-way ANOVA of rice biomass between the two locations.	79
Figure 25: Bilan des facteurs affectant le stockage de carbone dans le sol par les systèmes agroforestiers malgaches, les flèches noires à contour jaune indique si le stock de carbone du sol augmente (+), ou diffère (#) en fonction des facteurs.	90

INTRODUCTION GENERALE



1. Introduction au contexte et problématique

Le changement climatique (CC) est défini par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) comme des « changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère notamment la concentration en dioxyde de carbone (CO₂), mais aussi le méthane et l'oxyde nitreux, est à l'origine du CC actuel. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, le CO₂ est responsable de 65% du réchauffement climatique global. Depuis le début de l'Ere industrielle (1750) jusqu'en 2019, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est passée d'environ 277 parties par million (ppm) à 410 ppm (Friedlingstein et al, 2020). Au cours de la dernière décennie (2010 et 2019), le taux moyen annuel d'accroissement de cette concentration a atteint $5,1 \pm 0,02$ GtC/ an ($2,4 \pm 0,01$ ppm CO₂/an). Les conséquences de ce CC, entre autre le réchauffement global, l'accentuation les phénomènes climatiques extrêmes comme la sécheresse et les cyclones (Schleussner et al., 2016), peuvent constituer des menaces sur la production agricole mondiale (Leng and Hall, 2019), la sécurité alimentaire (FAO, 2020; Schmidhuber and Tubiello, 2007) et des menaces sur la biodiversité (FAO, 2019; Mace et al., 2008).

Les activités anthropiques notamment la consommation de l'énergie fossile, le changement de mode d'usage des sols, plus particulièrement la déforestation, les émissions agricoles provenant de la gestion des sols et des éléments nutritifs et de l'élevage sont à l'origine de la hausse de la concentration de GES dans l'atmosphère (Houghton et al., 2012). Parmi les différents secteurs d'activités, l'agriculture/déforestation est responsable d'environ un quart de l'émission globale de GES (IPCC, 2014) à travers les pratiques agricoles telles que la culture sur-brulis, le défrichage, la fermentation des déjections d'élevage, la fertilisation minérale qui représentent des sources de CO₂ et de méthane (CH₄) tandis que la fertilisation azotée est à l'origine d'émission de N₂O, autre gaz à effet de serre (Le Quéré et al., 2018).

Pourtant, l'agriculture peut également être un puits pour le CO₂ par la séquestration du C dans les produits de la biomasse et dans le sol, via la photosynthèse (Johnson et al., 2007). L'augmentation du stock de C dans les sols agricoles peut constituer une stratégie clé dans l'atténuation du CC (Lal, 2004). Le sol étant un réservoir important de carbone, son stock de C représente deux à trois fois plus par rapport à ce de l'atmosphère. Plusieurs initiatives internationales, telle que l'initiative 4 pour mille lancée lors de la COP 21, ont l'ambition

d'augmenter les stocks mondiaux de C des sols de 0,4% par an en compensation des émissions anthropiques mondiales de GES (Minasny et al., 2017). L'agriculture peut contribuer à atteindre cet objectif à travers l'adoption de pratiques séquestrantes et en stockant du C dans le sol.

A Madagascar, l'agriculture constitue le pilier de l'activité de production de la population. Plus de 70% de la population sont des agriculteurs. Toutefois, les rendements agricoles restent faibles à l'exemple des rendements en riz, nourriture de base des malgaches, qui dépassent rarement 2 t/ha (Minten and Barrett, 2008). Les petites exploitations familiales malgaches rencontrent des difficultés à assurer l'autosuffisance alimentaire de la population. Ces mêmes difficultés peuvent représenter des freins dans la contribution de l'agriculture malgache à atteindre l'objectif global d'atténuation du CC par stockage et séquestration de C dans le sol. Parmi les nombreux défis auxquels fait face l'agriculture malgache se distinguent : (i) la faible fertilité du sol, (ii) la saturation du bas-fond et (iii) la sensibilité au changement climatique.

Les faibles rendements agricoles à Madagascar sont liés aux caractéristiques des sols constitués principalement de sols ferrallitiques (Delenne et Pelletier, 1981). Ce type de sol est caractérisé par une faible teneur en C (Grinand et al., 2009) et une forte carence en nutriments comme le phosphore et l'azote le rendant très peu fertile et peu productif (Raminoarison et al., 2020; Saito et al., 2019). Ce sont aussi des sols acides avec un pH entre 4 à 5,5 induisant une forte concentration en aluminium dans la solution du sol et une toxicité aluminique chez la plante (Kochian et al., 2004).

L'agriculture malgache fait face aussi à la saturation des bas-fonds par la riziculture irriguée au détriment de l'extension de l'agriculture. L'exploration des sols des collines (tanety) devient souvent une nécessité pour permettre l'extension agricole à travers les cultures pluviales (Rabeharisoa et al., 2012a). Or ces sols de collines sont des sols ferrallitiques, fragiles et très peu fertiles se dégradant rapidement lorsqu'ils sont soumis à des pratiques non adaptées.

A cela s'ajoutent plusieurs risques liés aux changements climatiques pouvant aussi affecter l'agriculture malgache (Harvey et al., 2014). En effet, Madagascar est déjà soumis à des événements climatiques extrêmes périodiques, y compris les cyclones, inondations et sécheresses ; l'intensification de ces phénomènes risque d'affecter l'agriculture sur le long terme (Tadross et al., 2008).

Afin d'accroître les rendements agricoles, de maintenir la fertilité des sols sur le moyen et le long terme et d'augmenter les revenus des ménages, différentes pratiques agricoles ont été testées depuis plusieurs années par les agriculteurs malgaches avec l'appui des organisations non-gouvernementales et des institutions de recherche malgaches (Razafimbelo et al., 2018a).

Sur les Hautes Terres (HT) et le Moyen Ouest (MO) de Madagascar, par exemple, les paysans ont adopté des pratiques de gestion de fertilité du sol impliquant, entre autre, la fertilisation organique d'origine animale, la rotation culturale, l'association culturale et l'agroforesterie (Ben Naâmane et al., 2020). Ces pratiques agricoles font partie des pratiques agroécologiques qui favorisent l'application des principes écologiques dans la production agricole selon le processus d'intensification écologique (Silici, 2014). Par rapport aux autres pratiques, l'agroforesterie est une voie reconnue d'intensification écologique de l'agriculture qui permet de gagner sur différents tableaux : la séquestration de C, la lutte contre l'érosion, la conservation de la biodiversité (Chatterjee et al., 2018).

Une revue de l'état de l'art sur l'agroforesterie et son impact sur la séquestration de C et la disponibilité des nutriments dans le sol permettra de préciser les verrous de la connaissance sur cette pratique.

2. État de l'art

2.1. Agroforesterie

2.1.1. Définition

L'agroforesterie est une pratique associant des cultures avec des arbres dans un même espace agricole (Dupraz and Liagre, 2011). C'est une pratique agricole multi spécifique comportant trois composantes principales dont l'arbre, la culture (annuelle ou pérenne) et quelquefois le pâturage (Somarriba, 1992). Ces composantes peuvent être présentes sur une même surface simultanément ou de manière séquentielle (Torquebiau, 2000). Les termes « système agroforestier » et « pratique agroforestière » sont utilisés pour désigner les systèmes agricoles en agroforesterie (Nair, 1985). L'ICRAF ou Centre International de Recherche sur l'Agroforesterie caractérise l'agroforesterie comme « un système dynamique et écologique de gestion des ressources naturelles qui, par l'intégration des arbres dans les fermes et dans le paysage agricole, permet de diversifier et de soutenir la production pour une meilleure économie ainsi que des avantages environnementaux et sociaux. » Au sens large, l'agroforesterie englobe les systèmes de production intégrant aussi bien les arbres dans les pratiques et les espaces agricoles, que les productions agricoles dans les pratiques forestières et les espaces arborés.

2.1.2. Les différents types d'agroforesterie

Les composantes de base de l'agroforesterie (arbres, culture annuelle, animal) ont été utilisées pour décrire les trois catégories structurales de l'agroforesterie : agrosylviculture (arbre et culture annuelle), sylvopastoralisme (arbre et animal) et agrosylvopastoralisme (arbre, culture et animal) (Combe, 1982). Plusieurs critères tels que l'arrangement spatial, les fonctions

écosystémiques fournies, la destination des produits ont été apportés à cette catégorisation structurale pour établir une classification des systèmes agroforestiers (Nair, 1985). Le tableau suivant (Tableau 1) résume les huit principaux types de systèmes agroforestiers considérés dans la littérature (Cardinael et al., 2018b; Feliciano et al., 2018; Nair et al., 2009).

Tableau 1: Les principaux types de systèmes agroforestiers (adapté à partir de Nair et al (2009))

Type de système agroforestier	Définition
Culture intercalaire d'arbres	Agroforesterie où les cultures sont plantées entre les rangées d'arbres.
Systèmes agroforestiers multi-étagés	Agroforesterie à forte densité d'arbres, multi-étage, souvent diversifiée, associée à des cultures de sous-bois et souvent de l'élevage. Les « jardins-forêts » et les jardins de cases en sont les meilleurs exemples.
Jachère arborée	Système agroforestier séquentiel comprenant à la fois la jachère améliorée et la jachère naturelle.
Haies vives	Plantations linéaires autour du champ qui comprennent également les arbres brise-vent et les clôtures vives.
Terrains boisés agroforestiers	Agroforesterie où les arbres sont cultivés à des besoins de productions précis comme la production de fourrage, de bois énergie ou de la bioénergie.
Système sylvoarable	Espèces ligneuses plantées en rangées d'arbres parallèles pour permettre la mécanisation, associées avec une culture annuelle. Système à faible densité d'arbre par hectare, habituellement trouvé dans les régions tempérées, mais pas exclusivement.
Système de culture pérenne ombragé	Culture des espèces tolérantes à l'ombre telles que le cacao et le café sous ou entre les arbres d'ombrage de l'étage supérieure qui peuvent être utilisés pour le bois ou d'autres produits d'arbres commerciaux.
Système sylvopastoral	Système dans lequel les arbres sont associés à de l'élevage, soit lorsque les animaux pâturent dans un environnement boisé, soit lorsqu'ils sont nourris avec du brouet.

2.1.3. *Production agricole dans les systèmes agroforestiers*

L'agroforesterie est souvent perçue comme un moyen de diversifier la production végétale (Abdulai et al., 2018). En tant qu'association de plusieurs espèces végétales (ligneuses/non ligneuses, annuelles/pérennes), les systèmes agroforestiers offrent une variété de produits agricoles et peuvent engendrer une augmentation en quantité ou en rendement agricole. En Europe par exemple, les cultures intercalaires se révèlent plus compatibles avec la mécanisation et offrent jusqu'à 30% de biomasse supplémentaire par rapport à l'assolement arbres/culture (Dupraz and Liagre, 2011). Dans la région tropicale, la domestication des arbres fruitiers en agroforesterie a permis d'améliorer le revenus et la subsistance des ménages agricoles (Akinnifesi et al., 2006). L'agroforesterie constitue ainsi une stratégie pour atteindre la sécurité alimentaire et l'adaptation au changement climatique en Afrique (Mbow et al., 2014). Néanmoins, en termes de production agricole, des compromis doivent être pris en compte par rapport aux niveaux de couverture du sol par la canopée d'arbres qui doivent être optimisés pour éviter de compromettre à la fois l'approvisionnement et d'autres services écosystémiques (Blaser et al., 2018)

2.1.4. *Séquestration de C dans le sol par les systèmes agroforestiers*

- *Mécanisme de séquestration de C en agroforesterie*

L'agroforesterie contribue à la séquestration de C dans le sol via un transfert indirect de carbone de l'atmosphère vers le sol. L'arbre joue un rôle important dans ce transfert. En premier lieu, l'arbre va assimiler le CO₂ de l'atmosphère par le phénomène de photosynthèse. Le carbone sera ensuite restitué au sol suivant de nombreuses voies. En effet, l'arbre injecte du C dans le sol via la décomposition des litières des feuilles d'arbres (Negash and Starr, 2013), via le renouvellement des racines mortes ou turnover racinaire (Majdi et al., 2005) et la rhizodéposition produisant différents types d'exsudats (Hanson et al., 2000). Ainsi il a été démontré avec différentes espèces végétales, que jusqu'à 20% du C fixé par photosynthèse sont libérés dans le sol pendant la période de végétation par rhizodéposition (Hütsch et al., 2002). En agroforesterie, les végétations herbacées et les résidus des cultures annuelles associées aux arbres apportent aussi des matières organiques qui sont retournées au sol, constituant ainsi d'autres sources de C au sol (Cardinael et al., 2017a).

- *Taux de séquestration de C dans le sol par les systèmes agroforestiers*

Les revues récentes et les méta-analyses récentes suggèrent que la conversion des terres arables en systèmes agroforestiers conduit à une augmentation du stock de C organique du sol (Cardinael et al., 2018a; Corbeels et al., 2019; Lorenz and Lal, 2014). Toutefois, les taux de

séquestration de C dans le sol (SCS) par les systèmes agroforestiers varie en fonction de nombreux facteurs, dont l'écorégion et des types des systèmes agroforestiers (Albrecht and Kandji, 2003a). Ainsi, des études ont permis d'observer que les systèmes agroforestiers sous les climats tropicaux enregistrent un taux élevé de séquestration de C dans le sol que les systèmes agroforestiers dans la zone tempérée (Feliciano et al., 2018) (Figure 1. A). Cette différence est principalement due aux caractères distinctifs de chaque écorégion tels que son climat, ses sols, sa faune et sa flore (Bailey, 2004). A cela s'ajoute la différence en termes de structure des systèmes agroforestiers entre ces deux écorégions. En effet, la structure des cultures intercalaires dans les systèmes tempérés est très différente de celle des systèmes tropicaux (Cardinael et al., 2018b). Dans la zone tempérée, les cultures intercalaires sont caractérisées par un arrangement spatial régulier des arbres suivant des rangées bien définies entre lesquelles sont installées les cultures annuelles, tandis que dans la zone tropicale, les cultures intercalaires sont caractérisées par une structure à forte densité où les arbres sont dispersés irrégulièrement à travers la parcelle. Par ailleurs, les études ont démontré aussi que le système sylvopastoral conduit à un taux de SCS plus élevé par rapport aux systèmes agrosylvicoles (Figure 1.B).

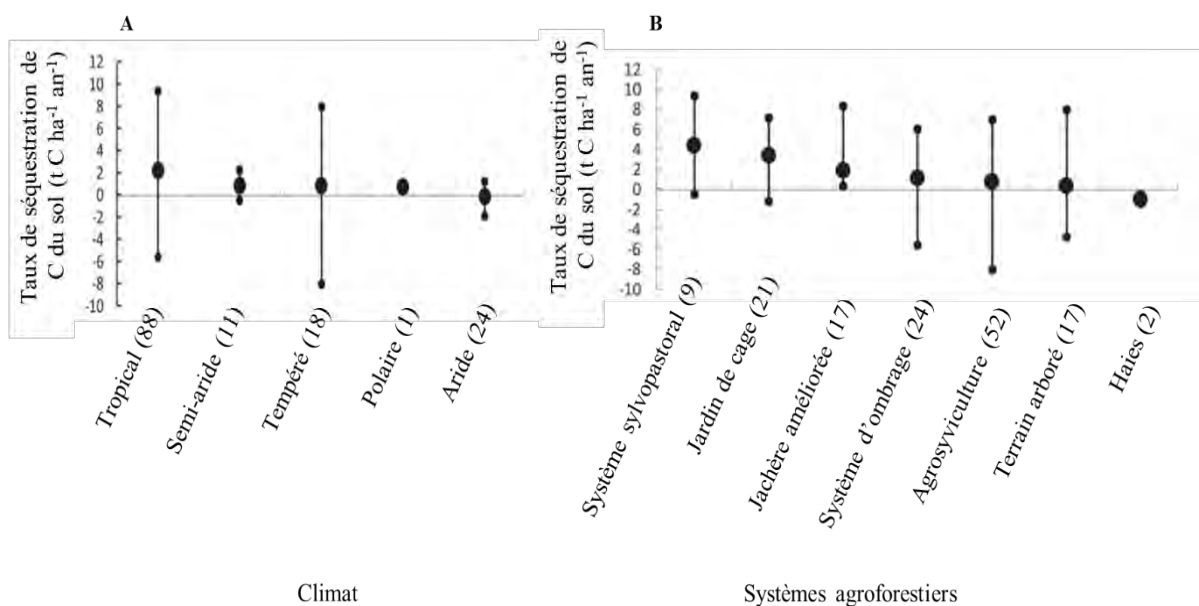


Figure 1 : Taux de séquestration de C dans les systèmes agroforestiers suivant l'écorégion (A) et suivant les structures des systèmes (B), adapté de Feliciano et al., 2018

2.1.5. Cycle des nutriments dans les systèmes agroforestiers

L'arbre dans les systèmes agroforestiers affecte le cycle des nutriments dans le sol et contribue à assurer les besoins nutritifs des plantes cultivées en association (Cardinael et al., 2020). En

effet, la décomposition des résidus d'élagages des arbres permet un transfert des nutriments, principalement d'azote et de phosphore, de l'arbre vers les cultures annuelles associées (Palm, 1995; Tully and Lawrence, 2012; Zingore et al., 2003). De plus, l'utilisation des espèces ligneuses fixatrices d'azotes (légumineuses) conduit à une amélioration de la production agricole (Akinnifesi et al., 2010). Par ailleurs, le soulèvement des nutriments du sous-sol profond par les racines des arbres permet aussi de ramener les nutriments au niveau de la couche arable du sol assurant ainsi la disponibilité des nutriments pour les cultures (Vanlauwe et al., 2005). Les racines des arbres dans les systèmes agroforestiers jouent aussi un rôle de filet de sécurité pour réduire le lessivage des nutriments du sol (Bergeron et al., 2011; Rowe et al., 1999; Tully et al., 2012).

2.1.6. Fonction biologique du sol dans les systèmes agroforestiers

L'agroforesterie implique une multiplication de la diversité végétale ce qui induit qu'elle affecte aussi la biodiversité qui est associée à cette diversité végétale. Une méta-analyse a montré que l'abondance et la diversité de la faune sont plus élevées dans les systèmes agroforestiers que dans les cultures sans arbres (Marsden et al., 2020). Plusieurs auteurs ont trouvé entre autre une augmentation de l'abondance, de la biomasse et de la diversité des vers de terre dans les systèmes agroforestiers (Cardinael et al., 2019; Price and Gordon, 1999). Ces organismes du sol jouent un rôle primordial dans la décomposition de la litière et du carbone organique du sol (Lavelle et al., 2006).

2.1.7. Conservation de la biodiversité dans les systèmes agroforestiers

L'agroforesterie répond aux besoins en production agricole, à l'atténuation du changement climatique mais aussi à la conservation de la biodiversité. Dans le contexte actuel d'un monde où les paysages sont fortement dominés et sculptés par l'homme, l'agroforesterie pourrait constituer un refuge pour la biodiversité en offrant un habitat pour les espèces sauvages (Bhagwat et al 2008). Elle peut aussi contribuer à atténuer la pression sur les réserves naturelles rendant ainsi les stratégies de conservation de la biodiversité plus efficaces (Mcneely and Schroth, 2006). De plus, grâce à la domestication des espèces ligneuses forestières endogènes, cette pratique assure aussi la protection de la biodiversité animale et végétale (Styger et al, 1999).

Parmi les services écosystémiques rendus par l'agroforesterie, sa capacité à séquestrer du carbone dans le sol constitue un enjeu majeur dans la stratégie globale d'atténuation du changement climatique. Cette revue de l'état de l'art sur l'agroforesterie sera donc complétée par une revue de la littérature sur le carbone du sol en précisant le mécanisme de séquestration

ou de stockage de carbone dans le sol et l'importance de ces mécanismes dans la compensation des émissions anthropiques de GES, la restauration des sols dégradés et l'amélioration de la production de biomasse.

2.2. Carbone du sol

2.2.1. Les matières organiques du sol

La végétation absorbe du CO₂ lors de la photosynthèse produisant ainsi les matières organiques dans la biomasse. Cette biomasse végétale constitue la litière aérienne et racinaire qui à leur tour alimenteront le sol en matières organiques (Sokol et al., 2019). Ces matières organiques du sol (MOS) sont principalement constituées de carbone. Elles sont également constituées d'autres éléments comme le phosphore, l'azote, le calcium... La décomposition de ces MOS est d'importance capitale dans la gestion de la fertilité du sol en permettant la libération de ces éléments qui, une fois minéralisés, deviennent disponibles pour la nutrition des plantes.

2.2.2. Le carbone organique du sol

Le carbone organique du sol résulte de la décomposition d'apport organique des végétaux (racines, litières des feuilles, résidus des cultures) laissés au sol ou d'intrants organiques comme du compost ou du fumier. La quantité du carbone organique du sol (COS) est estimée entre 1500 et 2000 Gt à un mètre de profondeur du sol (IPCC, 2000). Grâce à cette importante quantité de stock et sa durée de résidence longue (de l'ordre de 120 ans), le COS est considéré comme un important puits de carbone rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines. Dans ce sens le rôle de l'agriculture et de la foresterie est important dans l'alimentation de ce puits de carbone (GIEC, 2014).

2.2.3. Stock, stockage et séquestration de C dans sol

Le stock de carbone dans le sol est la mesure d'un état à un moment donné de la quantité de carbone dans le sol, pour une superficie donnée, exprimée en unité de masse par surface (Mg C/ha, t C/ha, kg C/m²) sur une profondeur donnée, généralement 0-30 cm telle que recommandée par les Lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2006). Le stockage de carbone est l'augmentation nette du stock de carbone dans le sol due à des apports organiques (biomasse végétale, compost, fumier, etc) ; il tient compte des sorties de carbone dues à la minéralisation des MO en CO₂. Ce stockage (delta Stock C) est donc la différence de stocks de C d'un système entre deux dates (pour une étude diachronique) ou la différence des stocks de C entre deux systèmes ou modes d'usage de sol à une même date (étude dite « synchronique ») (Costa Junior et al., 2013). Évaluer le potentiel de stockage d'une pratique revient à évaluer le stockage de carbone additionnel par

an, par rapport à une pratique de référence. Si le stock de carbone augmente, on parle de stockage, et si le stock diminue, on parle de déstockage.

Le stockage du carbone organique dans le sol doit être différencié de la séquestration du C organique dans le sol (Chenu et al., 2019). La séquestration du C dans le sol est un mécanisme impliquant une réduction nette de CO₂ de l'atmosphère par un puits de carbone ou un compartiment de l'écosystème tel que le sol (Stockmann et al., 2013).

2.2.4. Enjeux agronomiques du stockage de C dans le sol

L'enjeu agronomique du stockage de carbone est lié au rôle de la matière organique dans la fertilité du sol agricole. En effet, la matière organique assure la qualité des propriétés physiques du sol en assurant sa stabilité structurale (Le Bissonnais and Arrouays, 1997). La stabilité des agrégats du sol peut influencer le stockage du carbone organique (COS) dans le sol par sa protection contre la décomposition microbienne (Razafimbelo et al., 2008). Cette stabilité structurale entraîne aussi une bonne rétention d'eau, une résistance contre l'érosion et une disponibilité des nutriments pour la nutrition des plantes (Chenu et al., 2000). La minéralisation de la MOS participe au recyclage des éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Une augmentation de stockage de carbone pourrait donc conduire à une augmentation de la production agricole. La matière organique permet aussi de retenir les cations nécessaires aux plantes et elle permet le développement de l'activité biologique des sols.

2.2.5. Enjeux environnementaux de la séquestration de C dans le sol

La fonction puits de carbone du sol lui confère une fonction essentielle dans la lutte contre le changement climatique via le mécanisme de séquestration de C. En effet, l'adoption des bonnes pratiques de gestion des sols agricoles peut réduire la concentration de CO₂ dans l'atmosphère par la séquestration de C dans le sol à hauteur de 50 à 1000 kg/ha/an. Cela correspond à un potentiel de séquestration globale de 0.9 (\pm 0.3) Gt C/an, réduisant d'un quart à un tiers l'augmentation annuelle de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère estimée à 3.3 Gt C/an (Lal, 2004). Dans l'initiative 4 pour 1000, il a été estimé qu'une augmentation globale de 0,4% par an de la teneur en matière organique du sol pourrait compenser l'émission globale de CO₂ d'origine anthropogénique (Minasny et al., 2017) (Figure 2). L'augmentation de stocks de carbone dans le sol est favorisée par deux principaux mécanismes : un transfert vertical et un transfert horizontal. Le transfert vertical s'effectue par la séquestration de C par les plantes dans les pratiques agricoles telles que l'agroforesterie comme décrit précédemment ou à travers la reforestation. Le transfert horizontal (ou transfert de fertilité) s'effectue par apport régulier

de fertilisants organiques telles que le fumier et le compost (Gilley and Risse, 2000 ; Gregorich et al., 2001, Sommerfeldt et al., 1988). Il a été démontré que l'apport de matière organique est le principal facteur du changement de stock de carbone dans les sols agricoles tropicaux : $8,2 \pm 0,8\%$ des entrées en carbone est converti en carbone organique du sol (Fujisaki et al., 2018).

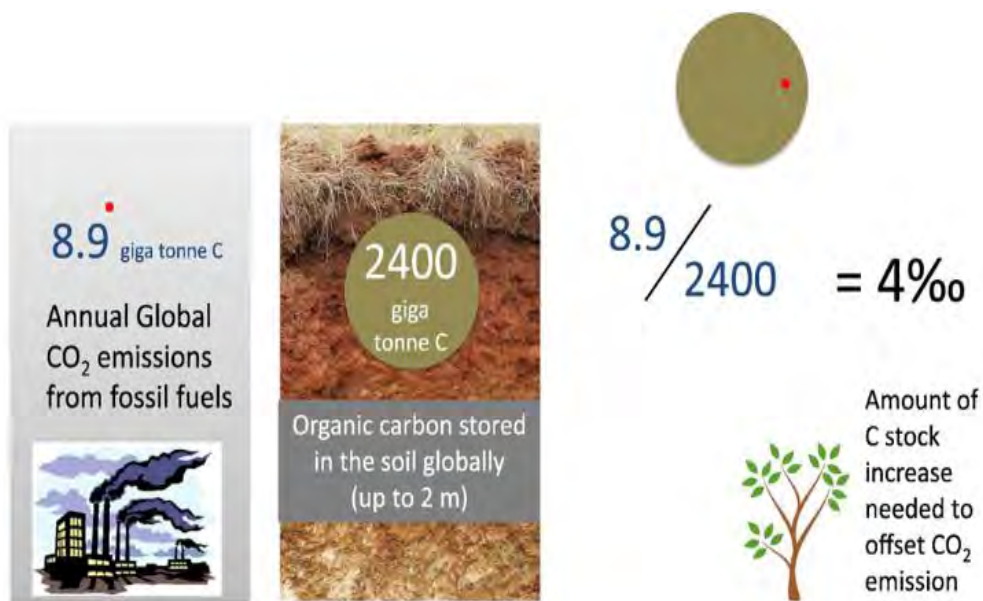


Figure 2 : Séquestration de C du sol selon l'initiative 4 pour 1000 (adaptée selon Ademe, 2015)

2.2.6. Stock de carbone du sol à Madagascar et importance du sol ferrallitique

Selon une étude cartographique récente, les stocks de COS à Madagascar varient, dans la couche de sol 0-30 cm, de 28 à 198 tC ha⁻¹ (Ramifehiarivo et al., 2017). Les résultats de cette même étude ont révélé que les stocks de carbone dans les sols malgaches est influencé par le climat (température moyenne annuelle et précipitation moyenne annuelle), la végétation et le type de sol (Figure 3). Les types de sol dominants à Madagascar sont les sols ferrallitiques (Ferrasols, FAO, 2014) et les sols ferrugineux (Ferric Luvisols, FAO, 2014) couvrant respectivement plus de 46% et 28% de la superficie nationale (Grinand et al., 2009). Les stocks de carbone dans les sols ferrallitiques varient de 35 to 165 tC ha⁻¹. En outre, ces stocks de C du sol sont aussi sensibles aux changements de modes d'usages du sol avec une potentielle augmentation lors de l'application des pratiques agroécologiques (Rakotovao et al., 2020b). Les résultats d'une étude réalisée sur du sol ferrallitique du côté est de l'île ont démontré que l'utilisation d'apports organiques comme le fumier, le compost ou les déchets urbains a induit des augmentations de carbone du sol de 0,16, 0,81 et 0,42 t C ha⁻¹ an⁻¹; tandis que l'agroforesterie a permis de stocker + 0,68 t C ha⁻¹ an⁻¹ par rapport à la riziculture sur brûlis (Razafimbelo et al., 2018a).

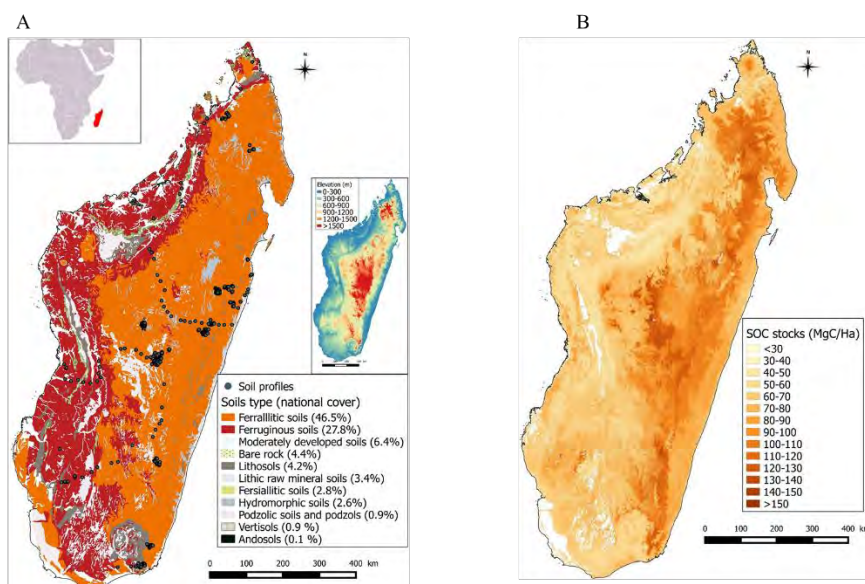


Figure 3 : Distribution des types de sol à Madagascar (A, Delenne and Pelletier, 1980) et carte des stocks de COS sur 0-30 cm de profondeur, à l'échelle de l'île de Madagascar (B, Ramifehiarivo et al, 2017)

3. Stratégie de recherche

3.1. Problématique et hypothèses de recherches

En tenant compte de l'importance du stockage et de la séquestration de C du sol dans l'atténuation du changement climatique et de la sécurité alimentaire globale, et au vu de la faible performance de l'agriculture malgache pour faire face à ces enjeux, la présente thèse se focalise sur les constats scientifiques suivants :

- Il y a un manque de connaissance sur les variabilités des pratiques agroforestières à Madagascar et sur leur capacité à stocker du carbone dans le sol ainsi qu'à son importance dans la mise en valeur et la restauration des sols ferrallitiques des tanety malgaches.

L'avantage des systèmes agroforestiers en termes de régulation du changement climatique est largement reconnu dans les régions tempérée et tropicale (Albrecht and Kandji, 2003a; Chatterjee et al., 2018).

- Très peu de connaissances sur l'effet de l'identité de l'espèce ligneuse concernant la variabilité de séquestration de C dans les différents types d'agroforesterie.

La présence d'arbres dans un agrosystème constitue la spécificité des systèmes agroforestiers par rapport à d'autres pratiques agricoles. Cela favorise l'apport de matière organique par un transfert vertical de carbone de l'atmosphère vers le sol grâce à la photosynthèse par l'arbre et la décomposition de la matière organique qui s'en suit (Stockmann et al., 2013). Pourtant, l'effet de l'identité spécifique de l'arbre est encore peu connu, sachant que les mécanismes de séquestration de C du sol sont différents selon l'espèce considérée (Dignac et al., 2017).

- Insuffisance de connaissances sur l'effet de la présence de l'arbre en système agroforestier sur la distribution horizontale et verticale de carbone au sein d'une parcelle agroforestière.

La présence de l'arbre engendre une hétérogénéité spatiale du C et du fonctionnement biologique du sol au sein même d'une parcelle agroforestière (Bambrick set al., 2010). En effet, une baisse de la teneur en C en s'éloignant de l'arbre car les entrées de litière sont plus grand près de la base de l'arbre (Peichl et al., 2006). Considérer cet effet de l'arbre lors de l'échantillonnage du sol dans les systèmes agroforestiers constitue une difficulté pour l'évaluation du stock de carbone en agroforesterie. Dans les cultures intercalaires en zone tempérée, les teneurs en C dans les rangées d'arbres et les inter-rangs sont considérées (Cardinael et al., 2015a). Pourtant, les pratiques agroforestières paysannes à Madagascar ne présentent pas de structure spatiale régulière, rendant difficile la technique d'échantillonnage du sol.

En tenant compte de ces différentes lacunes de connaissances, cette étude est organisée autour de la question générale suivante : « **Quel est l'apport de l'agroforesterie sur la capacité de stockage de carbone des Ferralsols de Madagascar ?** ». Afin de répondre à cette question générale de recherche, trois hypothèses ont été proposées :

-La première hypothèse (H1) stipule **que les systèmes agroforestiers favorisent une augmentation des stocks de carbone et de la disponibilité des nutriments dans les sols**. Cela aura une conséquence sur la productivité agricole et la contribution à l'atténuation du changement climatique.

-La deuxième hypothèse (H2) suggère que **les espèces d'arbres diffèrent dans leur capacité à séquestrer le carbone dans le sol**. Cela met en exergue l'importance du choix de l'arbre lors de la mise en place du système agroforestier.

- Enfin, la troisième hypothèse (H3) propose qu'**il y a une diminution des teneurs en carbone et en nutriments du sol ainsi que du biota du sol en fonction de la distance à l'arbre**. Il en découlera des recommandations sur la méthode d'échantillonnage du sol tenant compte de l'arbre et de la densité d'arbres dans les systèmes agroforestiers.

3.2. Objectif général

Cette thèse a pour objectif d'évaluer la capacité à stocker du carbone dans les sols des systèmes agroforestiers malgaches et en comprendre le fonctionnement afin de proposer des pistes pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques et contribuer à l'atténuation du CC.

3.3. Objectifs spécifiques

- Objectif spécifique 1 : Décrire les différents systèmes agroforestiers intégrés dans les pratiques paysannes à Madagascar.
- Objectif spécifique 2 : Evaluer la capacité de ces systèmes à favoriser le stockage de carbone, d'azote et de phosphore dans le sol.
- Objectif spécifique 3 : Evaluer les facteurs agronomiques au sein de la pratique agroforestière qui permettent d'intensifier les fonctions des sols : rôle de l'identité de l'arbre et de la distance à l'arbre.

3.4. Zone d'étude

Les études ont été effectuées dans quatre communes localisées dans trois sites de Madagascar, avec des gradients climatiques contrastés, allant des Hautes Terres Centrales (Région Itasy), de l'Est (Région Alaotra Mangoro) aux Côte Est (Région Analanjirofo) (Figure 4).

- Climat

La région Itasy est caractérisée par un climat du type tropical avec une température moyenne annuelle de 21°C et une précipitation moyenne annuelle de 1300mm (ONE, 2007). La région Alaotra Mangoro est caractérisée par un climat tropical chaud et humide avec une température moyenne annuelle de 24°C et une précipitation moyenne annuelle de 2500mm (PRD, Alaotra Mangoro, 2005). La région Analanjirofo est caractérisée par un climat tropical humide avec absence de saison sèche avec une température moyenne annuelle de 25°C et une précipitation moyenne annuelle de 3000mm/an (Razafimbelo et al., 2018).

- Type de sol

Dans les trois sites, l'étude s'est focalisée sur des sols du type Ferralsols suivant la classification de la FAO (FAO/UNESCO, 1974). Il s'agit des sols rouges et des sols jaunes sur rouges, caractéristiques des régions chaudes et humides.

- Pratiques dominantes par région

Les agriculteurs dans la région Itasy pratiquent quatre principaux systèmes de culture à savoir les systèmes en culture annuelle vivrière qui représentent environ 37% de la surface agricole utile ou SAU ; les systèmes en agroforesterie (32%) ; les systèmes en foresterie (8%) et les systèmes en riziculture (23%) (Rakotovao, 2017).

La région Alaotra Mangoro est une région à vocation agricole avec une prédominance de la riziculture. Les agriculteurs dans cette région du Betsimisaraka pratiquent aussi le « tavy » qui

est un système agricole hérité des ancêtres, culturellement enracinée malgré la déforestation et de la dégradation de la fertilité du sol engendré par la coupe et le brûlis des arbres (Styger et al., 2007).

La région Analanjirofo est l'une des régions productrices de girofles à Madagascar (Danthu et al., 2014). Plusieurs pratiques agricoles y sont ainsi basées sur la culture de giroflier à savoir : la monoculture de giroflier, les systèmes agrosylvicoles de giroflier et culture vivrière annuelle, et l'agroforesterie complexe avec des girofliers et d'arbres fruitiers avec d'autres cultures de rente comme la vanille (Arimalala et al., 2018).

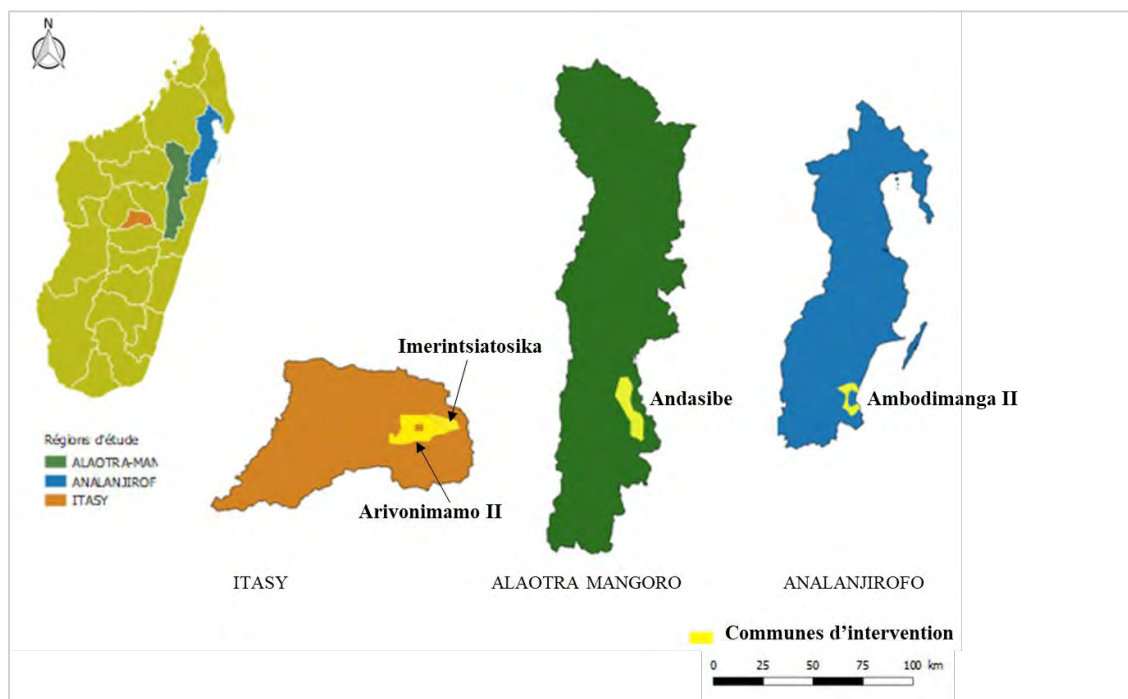


Figure 4: Présentation de la zone d'étude

3.4. Approches méthodologiques générales

Les approches suivantes ont été mises en œuvre afin de répondre aux objectifs de la thèse :

- Pour décrire/caractériser des systèmes agroforestiers, des enquêtes ont été effectuées au niveau des trois sites.
- Pour évaluer le stockage de carbone par les systèmes agroforestiers, les systèmes agroforestiers ont été comparés aux systèmes de référence selon une approche synchronique.
- Pour approfondir les facteurs pouvant impacter le stockage de carbone dans les systèmes agroforestiers, une comparaison prenant en compte différentes espèces d'arbres a été réalisée selon une approche expérimentale.

- Enfin, une approche intra-parcellaire a été utilisée pour aborder l'effet de la distance à l'arbre sur la variabilité du carbone et des paramètres biologiques au sein d'une parcelle (Figure 5).

3.5. *Organisation du manuscrit*

Ce manuscrit est structuré en quatre grands chapitres qui découlent des objectifs spécifiques présentés précédemment.

- Le premier chapitre présentera une description des pratiques agroforestières pratiquées par les agriculteurs dans les sites d'études et des facteurs d'adoption de l'agroforesterie par les agriculteurs malgaches.
 - Le second chapitre présentera les résultats de stockage de carbone par ces pratiques agroforestières afin d'évaluer leur potentialité à atténuer le changement climatique et à restaurer la fertilité du sol en couplant l'étude du carbone avec une évaluation des quantités des nutriments disponibles dans le sol de ces pratiques.
 - Le troisième chapitre présentera les résultats des études sur l'un des facteurs de séquestration de C dans ces systèmes agroforestiers : le choix de l'espèce d'arbre.
 - Le quatrième chapitre présentera les résultats de l'étude de l'hétérogénéité spatiale de la teneur en carbone dans les parcelles agroforestières.
- Enfin, dans une conclusion générale, l'ensemble des résultats acquis sera synthétisé et discuté et quelques perspectives à ce travail seront proposées, en cherchant notamment à fournir des recommandations d'optimisation des potentialités des systèmes agroforestiers malgaches et leur application au niveau des agriculteurs malgaches.

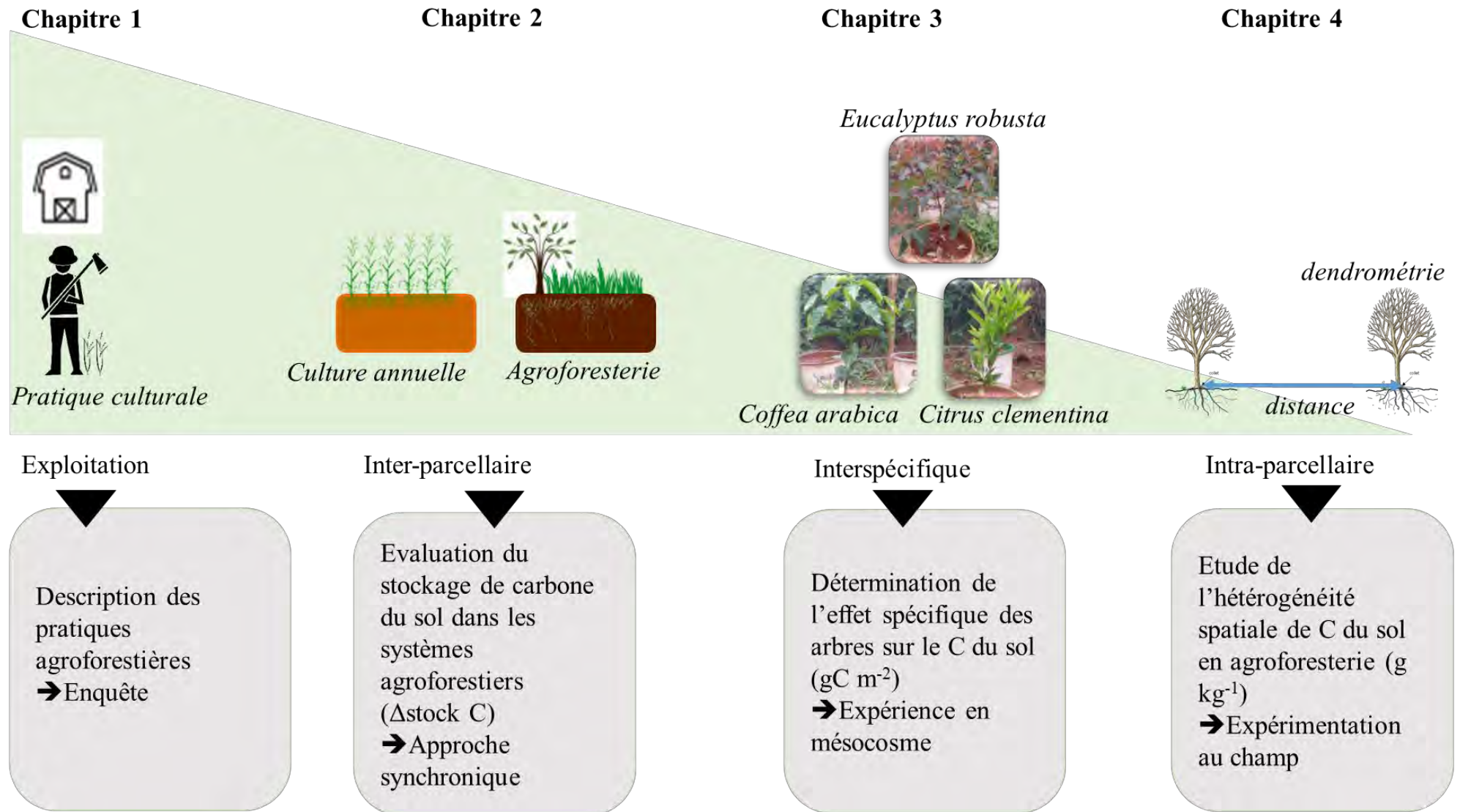


Figure 5: Schéma conceptuel de la méthodologie générale utilisée.

Chapitre 1. DESCRIPTION DES PRATIQUES AGROFORESTIÈRES ET DES FACTEURS D'ADOPTION DE L'AGROFORESTERIE PAR LES AGRICULTEURS MALGACHES

Préface

La description des systèmes agroforestiers présents à Madagascar est très importante pour compléter les connaissances sur la diversité des pratiques et pour présenter à la communauté scientifique l'existence de ces systèmes agroforestiers. Ce premier chapitre constitue une étape primordiale dans l'objectif de cette thèse en identifiant et en caractérisant les composantes et structure des pratiques agroforestières qui peuvent expliquer la variation des stocks et du stockage de carbone dans le sol par les ces pratiques.



Ce chapitre a été rédigé en anglais après sa soumission à une revue lors d'une conférence internationale organisée par l'Université de Toamasina. **L'annexe 1 de ce livre présente le résumé d'une communication internationale sous forme de poster se rapportant à ce premier chapitre.**

Description of agroforestry practices and adoption factors by Malagasy farmers

Résumé

Différents types d'agroforesterie sont observés au niveau des petites exploitations agricoles malgaches. Cependant, aucune classification de ces pratiques n'est encore établie à ce jour. Il apparaît important de définir ces pratiques afin de faciliter leur promotion, compte tenu de leur importance en termes de durabilité agricole. L'objectif de cette étude est de décrire les différents types de pratiques agroforestières à Madagascar et de déterminer les facteurs de motivations des agriculteurs pour leur adoption. Des enquêtes ont été effectuées auprès de 150 agriculteurs répartis dans trois régions, où l'agroforesterie a été le plus développée, suivant un axe Centre-Est. Les sites allant de Hautes Terres Centrales, de l'Est vers la Côte Est de Madagascar, sont localisés respectivement dans les communes d'Imerintsiatosika, Andasibe et Ambodimanga II-Fénériver Est, respectivement. Ces sites sont différents en termes de climat, d'écologie et de contextes socio-économiques. Trois types d'agroforesterie ont été identifiés à Imerintsiatosika : le jardin d'agrume (46%), les cultures intercalaires avec l'Eucalyptus (44%) et les cultures intercalaires avec le caféier (10%). Deux types d'agroforesteries ont été inventoriés à Andasibe: le jardin forestier (40%) et l'arboriculture fruitière dans les anciennes cultures sur brûlis (60%). Ces types d'agroforesterie peuvent être considérés comme une alternative écologique à la culture sur brûlis. Deux types de pratiques agroforestières à base de giroflier ont été aussi observées à Ambodimanga II : l'agroforesterie complexe (48%) et l'agroforesterie simple (58%). Ces deux pratiques diffèrent par la densité et la diversité spécifique des espèces ligneuses. Concernant les facteurs de motivation des agriculteurs, les agriculteurs dans tous les sites étaient surtout motivés par la diversification des produits agricoles pour diversifier les revenus et les cultures vivrières. Pour conclure, les pratiques agroforestières malgaches sont diversifiées en termes d'espèces ligneuses, de structure et de densité des arbres. La description de ces composantes et structure agroforestières est indispensable pour l'étude de la potentialité de l'agroforesterie à séquestration du C dans le sol.

Mots-clés : agroforesterie, pratique, motivation, Madagascar

Abstract

Various types of agroforestry are observed in Malagasy smallholder farmers. Until now, no classification of these practices is established. This study aims thus to describe different types of agroforestry practices in Madagascar and determine the motivating factors of farmers for their adoption. Surveys were carried out among 150 farmers from three regions, where agroforestry was the most developed, along a Center-East axis. The sites going from Central Highlands, East to the East Coast of Madagascar, were located in Imerintsiatosika, Andasibe, and Ambodimanga II-Fénéry Est, respectively. These sites are different in terms of climate, ecology, and socio-economic contexts. Three types of agroforestry were identified at Imerintsiatosika: *Citrus* garden (46%), *Eucalyptus* intercropping (44%) and *Coffee* intercropping (10%). Two agroforestry types were inventoried at Andasibe: forest garden (40%) and fruit plantation in old slash and burn crops (60%). These practices can be considered as an ecological alternative to slash-and-burn cultivation. Two types of clove-based agroforestry were also observed at Ambodimanga II: complex agroforestry (48%) and simple agroforestry (58%). These two practices differed in the tree density and species diversity of woody species. In terms of farmer motivation factors, farmers in all sites were mostly interested in the diversification of agricultural products for diversifying incomes and food crops. To conclude, Malagasy agroforestry practices are diversified in terms of woody species, structure, and tree density. Describing these agroforestry components and structure is useful for further studying agroforestry potential to sequester carbon into the soil.

Keywords: *agroforestry, practice, motivation, Madagascar*

1. Introduction

Agroforestry is presented as a sustainable management system for land that increases overall production, combines crops, tree crops, and forest plants simultaneously or sequentially, and applies management practices that are compatible with the environment and local population context (agro-ecological, economic and cultural) (Bene et al., 1977). Agricultural ecosystems can be improved through agroforestry to increase crop productivity and achieve ecological restoration (Hernandez et al, 2018). Agroforestry is considered synonymous with climate-smart agriculture and a remedy for many modern environmental challenges (Montagnini and Nair, 2004).

In Madagascar, agroforestry is characterized by a diversity of practices that vary according to the local context. Fruit arboriculture combined with food crops was dominant in the Highlands (Rakotovao, 2017); cash crops (cloves, lychee trees, vanilla etc.) associated with food crops in the eastern coasts and the North (Razafimbelo et al., 2018; Mariel et al., 2016, Hendin et al., 2018) and agroforestry with indigenous fruit tree species components in the East (Styger et al., 1999).

These early descriptions of agroforestry are mainly characterized by the types of woody species. To better understand the structural diversity of local agroforestry systems in the study sites, we aimed to describe the major types of agroforestry identified in the three sites by considering several classification variables such as tree species, types of association, tree density, specific richness, age and spatial arrangement. These additional criteria were conforming to the classification method adapted from Nair's (1985) approach by considering the predominant components and land use management.

In addition, this wide variety of agroforestry practices at the level of Malagasy family farming didn't appear among the practices inventoried in the usual world classification of agroforestry (Nair, 1985, Cardinael et al., 2018). So this study contributed also to reveal to the scientific community the originality of agroforestry practices in Madagascar. It also aimed to determine the motivating factors of farmers to adopt agroforestry. To achieve this objective, a survey among 150 agroforestry farmers has been done in the three most developed agroforestry regions from the Central Highland to the East coast of the Island.

2. Materials and methods

2.1. Site description

2.1.1. Imerintsiatosika

The commune of Imerintsiatosika (18°59'00" S, 49°19'00" E) is located in Itasy region at an altitude of 1300 m. The climate is tropical (ONE, 2007). The mean annual temperature is 21 °C. The mean annual precipitation is 1300 mm. The dominant soil type in the study site was Ferralsols (FAO, 2003). The forest cover was characterized by vestiges of natural sclerophyll forest and by the planting of exotic species such as *Eucalyptus* and *Pinus*. Savannah occupied 49.15% of the area of the region in 2005 (TBER Itasy, 2007). Agriculture was the dominant activity of people in this region. Four main cropping systems have been identified, namely the annual food crop systems, which represent around 37% of the useful agricultural area;

agroforestry systems (32%); forestry systems (8%) and rice farming systems (23%) (Rakotovao, 2017).

2.1.2. Andasibe

The commune of Andasibe (18° 56' 00" S, 48° 25' 00" E) is located in Alaotra Mangoro region at an altitude of 1000 m. The climate is tropical humid to per humid. The average annual rainfall exceeded 1500 mm with two dry months (Ramifehiarivo, 2014). The mean annual temperature is 23°C. The forest vegetation is classified in Humbert's phytogeographic division as a dense humid forest at low and medium altitude (Humbert, 1965; Koechlin et al., 1974; Razanaka, 1989). Subsistence farming was the dominant agricultural activity. The staple food crop was rice, either irrigated in valley bottoms or cultivated on uplands. Traditionally primary or secondary forests were slashed and burned (tavy) to produce upland rice (Styger et al., 2007). After the first year of rice production, maize, beans, sweet potatoes and manioc were planted for the two following years before the fields are abandoned.

2.1.3. Ambodimanga II

The commune of Ambodimanga II (17° 16' 00" S, 49° 10' 00" E) is located in the Analanjirofo region at an altitude of 277 m. The climate is humid tropical without any dry season. Soil type is Ferralsol according to FAO classification (FAO/UNESCO, 1974). The mean annual precipitation is 2779 mm. The mean annual temperature is 25 °C (Razafimbelo et al., 2018). In this region, the main crops were rice, sweet potato, cassava, vanilla, coffee, sugar cane, lychees and peppercorns, as well as cloves (Dandoy 1973; Jahiel et al. 2014). Rice occupies the lowlands, and tavy (slash and burn) was commonly practiced on the higher ground in hilly areas (Rqibate et al. 2014). This region belonged to one of the leading producers of cloves throughout Madagascar (Danthu et al., 2014). Several agricultural practices were based on clove cropping, monoculture of clove, agroforestry system of clove and annual food crop, complex agroforestry with cloves and fruit trees with other cash crops like vanilla (Arimalala et al., 2018).

2.2. Classification criteria

2.2.1. Principles of classification

A classification based on predominant components and land use management were used. It was adapted from "the general classification of agroforestry practice" proposed by Sinclair et al. (1999), which was based on Nair's (1985) approach, considering the components involved and their arrangement. The unit of classification used was the "practice" rather than the "system" in order to describe agroforestry at a field scale. Agroforestry practices formed a part of the

whole farm and forest systems. The classification of major types of agroforestry practices was proceeded primarily to identify the **components involved (tree, crop, pasture)** and the **predominant land use (native ecosystem, plantation)**. A secondary scheme further classified these in terms of **the arrangement, density, and diversity of the tree components**.

2.2.2. *Description criteria*

According to the defined principle, five criteria, summarized in Table 2, were selected to describe several agroforestry plots.

- **Agroforestry components**

Different authors and institutions have defined agroforestry practices. Nair (1993) described it as “practices which involve the deliberate integration of trees with crops and/or livestock either simultaneously or sequentially on the same unit of land”. The International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF) defined the term agroforestry as “A land-use system in which woody perennials (trees, shrubs, palms, bamboos) are deliberately used on the same land management unit as agricultural crops (woody or not), animals or both, either in some form of spatial arrangement or temporal sequence. Hence, tree, crop and animal are principal components of agroforestry systems. According to the presence of such components, agroforestry practices was characterized into sylvoarables, silvopastoral and agro-silvopastoral systems.

- **Diversity of tree component**

The tree component of agroforestry can be characterized by tree species identity and tree species richness. Tree species identity was used as the key identification of agroforestry practices as usually used in agroforestry description in the literature such as cacao, mango and sweet chestnut based agroforestry (Musvoto and Campbell, 1995; Rocés-Diaz et al., 2018; Suárez Salazar et al., 2018).

- **Land uses management**

Fertilizer input, especially organic matter input, is considered an important element of land use management in developed and developing countries (Feller et al., 2012). It can also be considered as an important element of agroforestry description in Malagasy context for its contribution to soil fertility restoration. The fertilizer input was evaluated by the average amount of fertilizer provided per unit area.

- **Tree density**

The structure of the agroforestry plot is characterized by tree density. According to tree density, agroforestry systems could be classified as simple (low tree density) and complex agroforestry (high tree density) (Michon et de Foresta, 1999; Arimalala et al., 2018).

- **Spatial arrangement**

The spatial arrangement was an important criterion in the agroforestry description to distinguish practices that respect a regular horizontal arrangement and those with an irregular arrangement (Sinclair, 1999).

Table 2: *Summary of classification criteria*

<i>Classification criteria</i>	<i>Indicators</i>
Predominant components	tree species, annual crop
Diversity of tree component	Tree species
	Specific richness (species/plot)
Fertilizer input	Nature
	Quantity
Structure of agroforestry plot	high tree density
	low tree density
Spatial arrangement	Dispersed (regular or irregular)
	Zoned
	Mean area

2.3. Data acquirement

2.3.1. *Survey of agroforestry farmers and selection of agroforestry plots*

To describe and characterize the agroforestry systems in the study area, individual surveys were carried out among 150 agroforestry farmers from the three sites (50 farmers per site).

The data collected concerned the following points:

- Identification of the farmer: coding, name of the head of household, name of the village
- Description of the agroforestry plot: age, altitude, topographic position, and geographic coordinates.

- Information on the annual crop: main crop, crop rotations, fertilizer inputs.
- Information on the woody species: tree species, age, the destination of the products, the spatial arrangement, the density, etc.
- Information on the motivation for adopting the agroforestry practice: the reason for adoption, the support of an NGO, the nature of the support.

2.3.2. Other sources of data

A database from the SECuRE project working in the Itasy region was used to describe the agroforestry plots in this region. This database contained the result of surveys of 171 farmers carried out in Itasy and Vakinakaratra region. The survey was carried out to identify practices that involve the restoration of soil fertility. Agroforestry was among practices considered by farmers as soil restoration practices. We extracted from this database needed information from 50 agroforestry farmers in the commune of Imerintsitosika in order to describe major agroforestry practices in this site.

2.3.3. Positioning and area measurement of plots

A GPS (Global Positioning System) was used to locate the geographic coordinates of agroforestry plots. In addition, the use of GPS also allowed the measurement of the plot area.

2.3.4. Inventory of woody species

The inventory carried out in the agroforestry plots provide information about tree species identity, their number and their diversity. The spatial arrangement was also observed.

3. Results

3.1.Types of agroforestry practices in the three sites

3.1.1. Agroforestry practices in Imerintsiosika

In the commune of Imerintsiosika, the landscape was dominated by herbaceous savannahs and plantations of exotic species such as the *Eucalyptus* or *Pinus*. The main land uses management were agricultural systems in the lowland and energy wood plantation in the tanety. The mean area of the agroforestry plot was 600 m². Agroforestry practices were integrated into these landscapes by enhancing rainfed crop in the tanety and by introducing trees to farm in the lowland. So, on this site, there was mainly **tree-crop plantations** practices. By considering tree species and density, three main types of agroforestry practices were observed in this site.

The Citrus Garden, Eucalyptus intercropping and Coffee intercropping represented 46%, 44% and 10% among the 50 plots sampled, respectively.

Citrus garden

The citrus garden was an agroforestry practice where citrus was intercropped with food crop like squash, cucumber, cassava, bean. These practices were observed in the humid lowland area. *Citrus clementinia* was the species mostly used with a density of 200 to 500 trees. ha⁻¹ (Table.3). Farmers applied compost and manure fertilizers at an average of 5 t ha⁻¹ in these practices. Trees were dispersed regularly in the plot with a spreading of 4m.

Eucalyptus intercropping

EI practices resulted from integrated annual crop mainly rainfed-rice in *Eucalyptus* plantation. They were observed in the tanety area. The tree species used was *Eucalyptus robusta* which was characterized by a fast-growing tree usually at high densities (Table 3). Farmers applied manure fertilizers at an average of 6 t ha⁻¹ in these practices. Prunings of these trees were used as fuelwood. Trees are dispersed irregularly within the plot.

Coffee intercropping

Coffee was grown in crop fields. The main tree species used was *Coffea Arabica*. It is a perennial commercial crop associated with rainfed rice or cassava or green bean. Trees were dispersed regularly in the plot with a spreading of 4m. The mean tree density was 358 trees. ha⁻¹. They were observed at the bottom of the slope. Farmers applied compost and manure fertilizers at an average of 9 t ha⁻¹ in these practices.

3.1.2. Slash-and-burn alternative agroforestry in Andasibe

Natural humid forest characterized the landscape of the East region at the commune of Andasibe. Slash-and-burn agriculture constituted the main activity of farmers. It consisted of cutting and burning plants in the forest to create a field and in which farmers routinely move from one cultivable area to another. Two significant agroforestry types can be found in this vicinity of natural forest, and slash-and-burn land uses. The forest garden and fruit tree plantation in slash-and-burn cultivation represented 40% and 60% among the 50 plots sampled, respectively. The mean area of the agroforestry plot in this site was 630 m².

Forest garden

The forest garden was defined as agroforestry practices based on existing native tree species. It resulted from the domestication of indigenous tree species (forest species and fruit tree species) by managing naturally established species. These practices were characterized by low tree density but high diversity of tree species. Major native forest species were: *Psiadia*

altissima and *Dalbergia* sp. They were selected by farmers for nutritional and medicinal use. Indigenous fruit tree species like *Dyopsis* sp., *Raphia ruffia* were selected for nutritional need. Food crop like rainfed-rice, pineapple, cassava, sugar cane was cultivated in the clearing area. Farmers applied manure fertilizers at an average of 2 t ha⁻¹ in these practices.

Fruit plantation phase of slash-and-burn cultivation

These agroforestry practices resulted from planting individual trees in agricultural fields. Fruit tree species can be exotic tree species like *Citrus* sp, *Persea americana*, *Litchi chinensis*, or indigenous tree species like *Dyopsis* sp., *Raphia ruffia*. Trees were dispersed irregularly in the plot. The mean tree density was 200 trees. ha⁻¹. Farmers applied compost and manure fertilizers at an average of 2,5 t ha⁻¹ in these practices.

3.1.3. Clove tree-based agroforestry in Ambodimanga II

In the Ambodimanga commune, as in the Analanjirofo region, 90% of farmers practiced cloves plantation (R.O.R., 2012), a perennial cash crop. Clove-based agroforestry is thus the major type of agroforestry in this region. Clove-based agroforestry practices currently provided most of the production of cloves and clove oil in this region. According to species richness and tree density, two agroforestry types were observed: simple clove agroforestry and complex clove agroforestry. The simple and complex agroforestry represented 52% and 48% among the 50 plot sampled, respectively. The mean area of the agroforestry plot in this site was 590 m².

Simple clove agroforestry

This agroforestry practice corresponded to a wooded park where clove trees were dispersed in cultivated fields with low density (less than 200 trees. ha⁻¹), less than density in clove monoculture. The associated crops varied according to rotations: rain-fed rice, corn, cassava, peanuts, sweet potatoes, sugar cane. The clove tree species was *Syzygium aromaticum*.

Complex clove agroforestry

In these agroforestry practices, cloves trees were associated with cultivated woody species. More rarely, forest tree species were maintained by farmers. These practices were in higher tree density (more than 200 trees. ha⁻¹) and higher species richness. Fruit tree species like *Artocarpus altilis*, *Litchi chinensis*, *Coco nucifera*, *Mangifera indica* were observed. The forest species, represented by often small individuals, are generally characteristic of recent secondary formations or disturbed habitats, like *Harungana madagascariensis* or *Ravenal madagascariensis*. The associated crops were also rainfed rice or cassava, or food crops.

Table 3. Description of agroforestry practices in the three sites (Imerintsiatosika, Andasibe, Ambodimanga II)

Study site	type of agroforestry practices	Definition	Variables of classification					
			Major tree species	Density (trees.ha-1)	Specific richness	Mean age	Relative frequency	n
Imerintsiatosika	Citrus garden	Citrus intercropped with food crop like squash, cucumber, cassava, bean- observed in the humid lowland area. Farmers provided compost and manure fertilizers in these practices. Trees were dispersed regularly in the plot with a spreading of 4m.	<i>Citrus</i>	200 to 500	1	7	46%	50
	Eucalyptus intercropping	Resulted from integrated annual crop mainly rainfed-rice in Eucalyptus plantation, observed in the tanety area. Prunings of these trees were used as fuelwood. Trees are dispersed irregularly within the plot.	<i>Eucalyptus</i>	1133	1		44%	50
	Coffee intercropping	Perennial commercial crops such as coffee were associated with rainfed rice. Trees regularly dispersed in the plot with a spreading of 4m.	<i>Coffea Arabica</i>	358	1		10%	50
Andasibe	Forest garden	Resulted from the domestication of indigenous tree species (forest species and fruit tree species) as components of agroforestry systems by managing naturally established species.	<i>Psiadia altissima and Dalbergia sp...., Dypsis sp., Raphia ruffia</i>	236	3	10	40%	50
	Fruit plantation phase of slash-and-burn cultivation	Practices resulted from planting individual trees in agricultural fields. Fruit tree species can be exotic tree species or indigenous species	<i>Citrus sp., Persea americana, Litchi chinensis</i>	200	3		60%	50
Ambodimanga II	Simple clove agroforestry	Practice corresponded to a wooded park where clove trees were dispersed in cultivated fields with low density. The associated crops varied according to rotations: rain-fed rice, corn, cassava, peanuts, sweet potatoes, sugar cane	<i>Syzygium aromaticum.</i>	<200	1	18	52%	50
	Complex clove agroforestry	Cloves trees were associated with cultivated woody species. More rarely, forest tree species maintained by farmers. These practices were in higher tree density (more than 200 trees. ha-1) and higher species richness.	<i>Syzygium aromaticum, Litchi chinensis, artocarpus altilis, Harungana madagascariensis or Ravenal madagascariensis</i>	>200	3		48%	50

3.2. Adoption factors of agroforestry according to farmers' perception

3.2.1. Farmers' motivating factors in Imerintsiatosika

Farmers practicing citrus garden or coffee intercropping are mainly motivated by diversifying incomes through the sale of agricultural products such as fruit and coffee (Figure 6.A). In complement to economic purposes, farmers were also interested in the diversification of agricultural products for domestic uses. It concerns especially rice and vegetables. Farmers estimated rice grain yield in Coffee and rice association to 1.5 t ha⁻¹. Eucalyptus intercropping systems were adopted for multiple purposes: rice production, producing energy wood, and ensuring land security. Rice grain yield in Eucalyptus and rice association was about 2 t ha⁻¹. In addition to farmers' perception, the practice of agroforestry in the Itasy region was also promoted by NGOs which develop agroecological projects. These projects provided input (young plants) and training for agroecological practices such as agroforestry, manuring, and composting.

3.2.2. Farmer's motivation in Andasibe

Farmers in Andasibe were also motivated by economic purposes (Figure 6.B). This economic motivation led to the introduction of exotic fruit trees such as citrus, lychees, avocado trees in traditional slash-and-burn agriculture. There is also sell of crop products like pineapples or ravintsara leaves intended for transformation into essential oil. It was followed by nutritional and medicinal needs, which motivated farmers to keep native species in their agricultural fields. Rice grain yield in agroforestry, including rice crop in Andasibe, was about 1.5 t ha⁻¹. Environmental concern promoted by environmental projects also encouraged farmers to adopt agroforestry practices in this region.

3.2.3. Farmer's motivation in Ambodimanga II

Farmers in Ambodimanga II adopted clove-based agroforestry primary for improving incomes through the sale of cloves and clove leaves for essential oil transformation. Crop production such as rice and over food provided food for the daily population use. Indeed, the clove-based agroforestry produced about 2 t ha⁻¹ of rice grain yield.

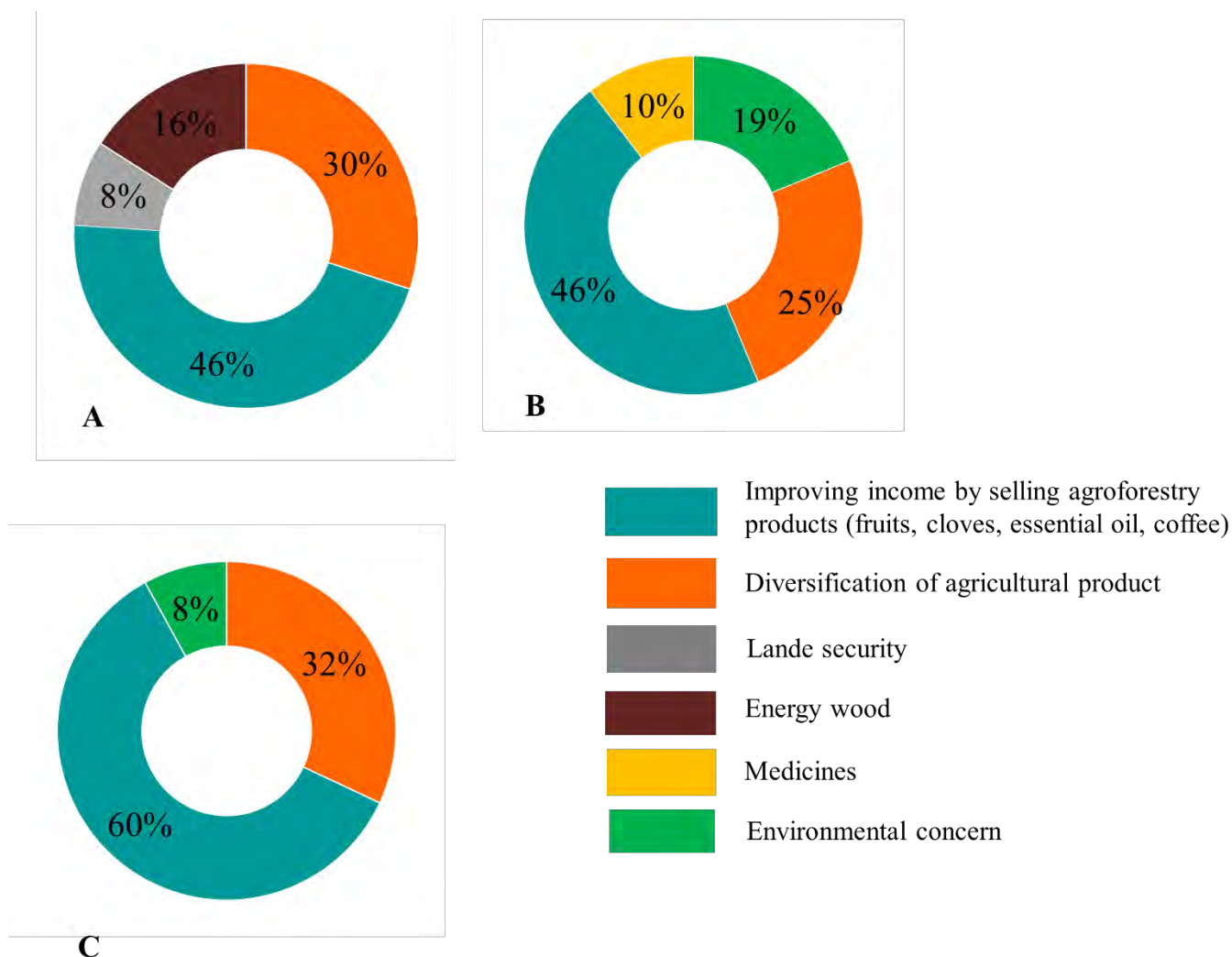


Figure 6 : Farmers' motivation for adopting agroforestry practices in the Highlands site (A), in the East site (B) and in the Eastern Coast site (C) in Madagascar

4. Discussion

4.1. Agroforestry classification base

According to FAO (2011a), there are five main forms of agroforestry, namely **alley cropping**, **forest farming**, **silvopastoral**, **riparian forest buffers**, and **windbreaks**. These integrate technologies such as *contour farming*, *multistorey cropping*, *intercropping*, *multiple cropping*, *bush and tree fallows*, *parkland*, or *home gardens*. Other authors (e.g. Kandji et al., 2006, Feliciano et al., 2018) have also considered other nomenclatures, including silvoarable systems, woodlots, boundary planting, lives fences, multi strata agroforests, hedgerows, or shaded perennial crop systems. Many typologies of agroforestry systems have been developed in the literature, but all are adapted from Nair (1985) classification base as we used in this study. Any classification system is justified, provided that it meets three criteria (Alexandre D Y, 2002):

- 1) be technically usable, that is to say, that the classification criteria are obtained with the means available;
- 2) be discriminating against the systems studied;
- 3) be able to answer the questions that researchers and peasants are asking.

4.2. Agroforestry design by Malagasy farmers

Our result showed that all types of agroforestry in studied sites could be categorized as sylvoarables systems, which consist of intercropping trees with field crops. Agrosilvicultural systems are widespread practices in the tropical region in Africa and in Latin America compared to silvopastoral systems; they are among the most sustainable cropping systems in the tropics (Albrecht and Kandji, 2003a). Similar agroforestry practices as seen in Malagasy farming were also observed in Sri Lanka, where Sinclair (1996) inventoried multilayered tree gardens, shifting cultivation, contour hedgerows, and intercropping and use of multipurpose trees in tree-crop plantations. Our results also showed that the local structure of agroforestry practices as designed by Malagasy farmers was characterized by a large diversity of tree species, tree density, irregular structure and input of organic fertilizer.

4.3. Agricultural production in agroforestry practices

Rice is the Malagasy staple food. Our results reported that upland rice is mainly used in agroforestry in combination with trees. Rice-based agroforestry practices produced an average of 1.8 t ha⁻¹ of rice grain yield. The monoculture of upland rice produces on average 2 t ha⁻¹. Rice production in agroforestry practices appears thus to be similar to annual crop systems. However, further study should be realized to verify this finding by comparing rice production in agroforestry systems and in monoculture. The quantification of crop production in agroforestry is important for the assessment of its contribution to the overall resilience and to address food security (Mbow et al., 2014).

4.4. The ecological function of agroforestry practices

Our results revealed that some agroforestry practices such as citrus garden might provide multiple agroecological impacts on soil fertility restoration through tree integration and compost use. In addition to the role of improving crop system, agroforestry practices like the forest garden in Andasibe contributed to maintaining species diversity face to the high rates of deforestation in many parts of the tropics (Bhagwat et al., 2008; Styger et al., 1999). These results highlight the importance of agroforestry to soil restoration and to biodiversity conservation.

4.5. The economic motivation for agroforestry adoption by Malagasy farmers

Improving incomes by selling agroforestry products such as fruits, cloves, and essential oil is the main factor of agroforestry adoption by farmers. It is consistent with the literature, which reported that commercial incentive is one of the five major determinants of the adoption of agroforestry in the tropical region after preferences, resources dotation, biophysical factors, and risk (Pattanayak et al., 2003). However, the area occupied by agroforestry among the Malagasy farming system seems to be low. Indeed, the area occupied by agroforestry exceeds rarely 0.06ha, namely 6% of overall farming systems if considering that smallholding farm rarely exceeds 1ha. In order to extend agroforestry adoption, farmers should be aware and convinced by overall agroforestry benefits: ecological, agronomic, economic and social benefits.

4.6. Limits of the study

Our results provided more information about the structure and the management of the most widespread agroforestry practices in the study site (Rakotovao, 2017; Razafimbelo et al., 2018b; Styger et al., n.d.). Our objective is to better describe the most important factors of carbon sequestration in these systems. We inventoried seven major agroforestry practices from the study sites, but we did not exclude the existence of other types of association. To fully identify the diversity of practices and to calculate the total area occupied by agroforestry in Madagascar, a typology of agroforestry systems should be carried out in different ecoregion of the Isle with a representative sampling method. Economic motivation appeared to be a determinant in agroforestry adoption by farmers, so the typology study should be accompanied by a socio-economic study.

5. Conclusion

The objectives of this study were (i) to identify the major types of agroforestry practices in three regions of Madagascar and (ii) to identify the reasons which motivated farmers to adopt them. Our results highlighted the diversity of practices characterized by tree species, trees density and species richness. However, all types can be regrouped in sylvoarables practices which combine trees and crops. Agroforestry products like fruits, cloves, rice provide food and income. So in terms of development, agroforestry practices constituted an important way to fight food insecurity in Madagascar. This typology contributed thus to promote agroforestry by showing detailed description of the practices which can be reproduced easily by farmers. In terms of research on agroforestry, this typology is an essential tool in the evaluation of the soil carbon sequestration in these practices. Studies in assessing soil carbon storage under agroforestry practices produce a crucial indicator of soil fertility and carbon sequestration in these ecological practices.

6. Synthèse des principaux résultats sur la description des pratiques agroforestières

Les résultats ont montré que les systèmes agroforestiers dans la zone d'étude sont caractérisés par une diversité d'espèce ligneuse, avec un arrangement spatial généralement irrégulier où les cultures annuelles et arbres sont intimement associés. Ces systèmes sont principalement installés sur les collines ou tanety à l'exception des jardins d'agrumes sur les HT qui sont exclusivement localisées sur les bas-fonds pour leur forte besoin d'humidité. Au total sept types d'agroforesterie ont été observés : culture intercalaire avec l'Eucalyptus, jardin d'agrumes et culture intercalaire avec le caféier (à Imerintsiatosika), jardin forestier et culture intercalaire avec des arbres fruitiers (à Andasibe) et agroforesterie simple et complexe (à Ambodimanga II).



Culture intercalaire
avec l'Eucalyptus



Jardin d'agrumes



Culture intercalaire
avec le caféier



Jardin forestier



Culture intercalaire avec
des arbres fruitiers



Agroforesterie
complexe



Agroforesterie
simple

Chapitre 2 : IMPACT DE L'AGROFORESTERIE SUR LES STOCKS DE CARBONE, D'AZOTE ET DE PHOSPHORE DU SOL A MADAGASCAR

Préface

L'agroforesterie est reconnue par sa potentialité à augmenter les stocks de carbone dans le sol, justifiant son importance en tant que stratégie d'atténuation du changement climatique (CC). À Madagascar, l'enjeu de l'agroforesterie concerne à la fois la contribution à la lutte contre le CC et la sécurité alimentaire. L'évaluation de l'impact de cette pratique sur le stock du carbone, mais aussi sur les stocks des nutriments principalement de l'azote et du phosphore du sol est donc indispensable pour son développement dans l'agriculture malgache. L'étude s'est focalisée sur les pratiques agroforestières décrites dans le premier chapitre.



Les annexes 2, 3 et 4 de ce livre présente les résumés de deux communications orales internationales et d'une communication internationale sous forme de poster se rapportant à ce deuxième chapitre.

1. Introduction

Le sol joue un rôle majeur dans la stratégie d'atténuation du changement climatique. Une augmentation continue du stock de carbone (C) dans le sol peut conduire à une diminution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (Lal, 2004). Le sol agricole peut contribuer à cette finalité par l'application de pratiques agricoles innovantes impliquant entre autre l'intégration d'espèces ligneuses dans le système de production (Dignac, 2017; Paustian et al., 2016). L'agroforesterie fait partie de ces pratiques associant des arbres aux cultures annuelles, favorisant ainsi une forte séquestration de C dans la biomasse végétale et dans le sol (Nair et al., 2009) ainsi qu'à une forte disponibilité des nutriments dans le sol (Pardon et al., 2017).

Une méta-analyse globale portée sur les systèmes agroforestiers a démontré que les taux de séquestration de C du sol sont différents en fonction de l'écorégion. Les systèmes agroforestiers dans les climats tropicaux présentent ainsi un taux de séquestration de C dans le sol plus élevé que dans d'autres types de climats avec une moyenne de 2,23 t C ha⁻¹ an⁻¹ (Feliciano et al., 2018). Cette différence de capacité des systèmes agroforestiers à séquestrer du C dans le sol résulte de plusieurs facteurs dont la structure et les composantes du système mis en place, les espèces ligneuses et la gestion du système (Albrecht and Kandji, 2003b).

A Madagascar, les agriculteurs pratiquent principalement les systèmes agro-sylvicoles combinant des cultures annuelles à des espèces ligneuses sur un même espace agricole. Toutefois, la structure et les composantes des associations agroforestières diffèrent selon les régions. Sur les Hautes Terres, les agriculteurs associent généralement des cultures maraîchères aux arbres fruitiers. Sur la région Côte Est, la riziculture pluviale est habituellement combinée avec des cultures pérennes de rente telle que le giroflier (Arimalala et al., 2018). La description des pratiques agroforestières à Madagascar (chapitre 1) a démontré une grande diversité de ces pratiques pouvant conduire à une capacité variable à stocker du carbone dans le sol.

Les études récentes menées sur les Hautes Terres Centrales et la côte est de Madagascar, sur l'impact des pratiques agroécologiques sur le C du sol ont également montré que l'agroforesterie contribue à améliorer le stock de C du sol par rapport aux cultures conventionnelles (Rakotovao et al., 2020b; Razafimbelo et al., 2018b). Il est toutefois important de noter que les études sur les systèmes agroforestiers à Madagascar sont encore très rares et très localisées. Il manque dans la littérature des données permettant de prendre en compte les facteurs pouvant affecter le stockage de C dans ces systèmes agroforestiers comme les types de pratiques selon les régions, la densité d'arbres, les espèces ligneuses utilisées et les apports ou

non de fertilisants organiques et/ou minéraux. De plus, peu d'études ont abordé la relation entre ce stockage de C et la disponibilité des nutriments, notamment d'azote (N) et de phosphore (P) dans le sol sous agroforesterie (Andriamananjara et al., 2019). Pourtant, plus d'intérêt doit être porté sur le potentiel de l'agroforesterie à impacter le statut des nutriments du sol vu la forte carence des sols ferrallitiques malgaches en phosphore et en azote (Raminoarison et al., 2020).

L'objectif de ce chapitre est d'approfondir les connaissances de l'effet des différents types d'agroforesterie sur le C et les nutriments du sol en adoptant une approche multisites. Dans trois sites présentant des gradients climatiques et biophysiques contrastés, les systèmes agroforestiers ont été comparés à d'autres modes d'usages du sol suivant une approche synchronique. Les stocks de C, N et P disponible du sol sous agroforesterie ont été évalués. Trois hypothèses ont été suggérées. La première hypothèse (H1) stipule que les pratiques agroforestières malgaches favorisent une augmentation des stocks de C du sol. La deuxième hypothèse (H2) suggère que le stock de C dans ces systèmes agroforestiers est influencé par leur structure (densité d'arbres, espèce d'arbre) et leur gestion (fertilisation). Enfin, la troisième hypothèse (H3) suppose que les systèmes agroforestiers favorisent aussi une augmentation des stocks de N et de P disponible du sol.

2. Matériels et méthodes

2.1. Sites d'étude

Cette étude a été conduite dans les trois sites précédemment décrit dans la présentation de zone d'étude de la thèse (Figure 4) et dans le premier chapitre de cette thèse. Pour ce deuxième chapitre, les trois sites ont été nommés site A, B et C pour les communes d'Imerintsiatosika (région Itasy), d'Andasibé (région Alaotra Mangoro) et d'Ambodimanga II (région Analanjirofo) respectivement. Ces sites sont caractérisés par des gradients climatiques contrastés (Tableau 4).

Le site A (46°54'22.66''E, 18°57'25.85''S) est une zone de haute altitude. Le climat y est du type subtropical d'altitude avec deux saisons distinctes : une période sèche et fraîche d'avril à octobre et période chaude et humide de novembre à mars (ONE, 2007). Le sol y est du type ferrallitique avec une texture argileuse. Dans cette région, la riziculture et l'agroforesterie font partie des principaux modes d'usage du sol agricole (Rakotovao, 2017).

Le site B (48° 13' 48''E, 18° 56' 58'' S) est une aussi une zone de haute altitude (PRD, Alaotra Mangoro, 2005). Le climat y est de type tropical chaud et humide. Le sol y est également du

type ferrallitique. Les principaux modes d'usage du sol dans cette région sont la culture sur brûlis et l'agroforesterie (Styger et al., 1999).

Le site C est une zone à basse altitude. Le climat y est du type tropical humide sans saison sèche. Le sol a une texture sablo-argileuse. La région Analanjirofo est une région productrice de girofle, d'où le développement de pratiques agricoles à base de girofliers tel que l'agroforesterie ou la monoculture de girofle (Arimalala et al., 2018).

Tableau 4: Description des sites d'étude

Site	Altitude (m)	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitation moyenne annuelle (mm/an)	Type de sol	Profondeur	Texture du sol (% en Argile/ limon/ sable)	Source
A	1200-1500	21	1300	Ferra lsols	0-30	29/ 58/13	Raminoarison et al, 2020, Rakotovao et al 2020
B	900-1000	24	2500	Ferra lsols	0-30	41/27/32	(Zwartendijk et al., 2017)
C	50-200	25	2779	Ferra lsols	0-30	36/17/47	Andriamananjara et al,2019

2.2. Description des systèmes agroforestiers étudiés

L'étude a été effectuée sur sept types de systèmes agroforestiers répartis dans les trois sites. Chaque système est caractérisé par l'espèce ligneuse principale, la densité d'arbres, la culture annuelle et l'apport en intrants organiques (Tableau 5). L'âge moyen des systèmes agroforestiers étudiés varie de 4 à 14 ans.

Pour le site A, l'étude a été portée sur trois pratiques agroforestières à savoir : le jardin d'agrume (A-JA), la culture intercalaire avec l'Eucalyptus (A-CIE) et la culture intercalaire avec le caféier (A-CIC). Le système A-JA est un système agroforestier associant des agrumes (mandarinier, oranger ou citronnier) avec des cultures maraîchères (courges, poivrons ou tomates) sur les bas de pente. Le système A-CIE est issue de l'introduction du riz pluvial dans les plantations d'Eucalyptus sur collines ou tanety. Le système A-CIC résulte aussi de l'association du riz pluvial mais avec des caféiers sur les bas de pente. Ces trois systèmes agroforestiers ont été comparés avec les cultures vivrières (A-CV) qui constituent les principaux modes d'usage de sol dans la région Itasy (riz pluvial ou manioc). Au niveau de ce site, les systèmes agroforestiers

aussi bien que les cultures vivrières bénéficient d'un apport régulier en fertilisant organique tel que le fumier et le compost mais à différentes quantités.

Pour le site B, l'étude a été portée sur deux types d'agroforesterie : la culture intercalaire avec des arbres fruitiers (B-CIF) et le jardin forestier (B-JF). Le système B-CIF consiste en une introduction d'arbres fruitiers dans les anciens champs de cultures sur brûlis, tandis que le B-JF résulte de l'introduction des cultures annuelles dans des zones éclaircies des forêts naturelles. Le B-JF est un système plus complexe que la B-CIF avec une diversité spécifique et une densité d'arbres plus élevée. Ces deux systèmes agroforestiers ont été comparés aux deux principaux modes d'occupation du sol dans cette région : la culture sur brûlis (B-SB) et la forêt naturelle (B-FN). Par principe, les cultures sur brûlis ou SB bénéficient des matières minérales issues des cendres et d'une période de jachère (Styger et al., 2007) tandis que la culture intercalaire B-CIF qui est un système agroforestier dérivant de cette pratique qui bénéficie d'apport de fumier et de compost pour la fertilisation (Tableau 5).

Pour le site C, deux types de systèmes agroforestiers à base de giroflier et de riz pluvial ont fait l'objet de l'étude : l'agroforesterie simple (C-AS) et l'agroforesterie complexe (C-AC). Le système C-AS est un système à faible densité d'arbres (inférieure à 200 pieds ha⁻¹) et à faible diversité spécifique, tandis que le C-AC est un système à forte densité d'arbres (supérieure à 200 pieds ha⁻¹) et présente une grande diversité spécifique. Ces deux types d'agroforesterie ont été comparés avec les deux principaux modes d'usage du sol dans cette région : la culture vivrière particulièrement la riziculture pluviale (C-CV) et la monoculture de girofliers (C-CG). L'ensemble de ces pratiques sont exemptes d'intrants organiques et minéraux. Les agriculteurs pratiquent le décapage qui consiste à couper la végétation herbacée à la surface du sol avant chaque culture et y laissent les débris sans passage du feu ni labour. Lors du décapage, la coupe de la végétation est accompagnée de grattage de l'horizon très superficiel du sol (0-5 cm) pour préparer le sol aux cultures.

Tableau 5: Description des systèmes agroforestiers et des principaux modes d'usages du sol dans les trois sites

Site	Localisation	Mode d'usage du sol	Espèce ligneuse principale	Type de fertilisation	Quantité moyenne de fertilisant organique (t ha ⁻¹)	Age (ans)	Densité d'arbre	Culture annuelle	Nombre de parcelles
A	Imerintsiatosika,	A-JA	<i>Citrus clementina</i>	Fumier+compost	5	10	390	maraîchage	15
		A-CIE	<i>Eucalyptus robusta</i>	Fumier	6	8	1100	riz, maïs	11
		A-CIC	<i>Coffea arabica</i>	Fumier+compost	9	6	686	riz, manioc	4
		A-CV	–	Fumier+compost	6	10	–	riz, manioc, maïs	30
B	Andasibe	B-CIF	<i>Citrus sp, Persea americana, Litchi chinensis</i>	Fumier+compost	2,5	13	200	riz, ananas	5
		B-JF	<i>Psiadia altissima and Dalbergia sp...., Dypsis sp., Raphia ruffia</i>	Fumier	2	8	236	riz, maïs, manioc	5
		B-SB		Cendre	–	+10			5
		B-FN			–	+80			5
C	Ambodimanga I I	C-AS	<i>Syzygium aromaticum.</i>	Décapage	–	14	<200	Riz	8
		C-AC	<i>Syzygium aromaticum, Litchi chinensis, artocarpus altilis</i>	Décapage	–	12	>200	Riz	8
		C-CV		Décapage	–	+10		Riz	8
		C-CG	<i>Syzygium aromaticum.</i>		–	+30			

2.3. Approche utilisée

L'approche synchronique a été utilisée pour évaluer le taux de stockage de carbone et de nutriments dans le sol sous agroforesterie. Cette approche est considérée comme la plus appropriée pour estimer la séquestration de C par des pratiques agricoles déjà mises en place en milieu paysan (Razafimbelo et al., 2018b). Elle consiste à prélever des échantillons de sol en même temps sur des parcelles d'âge connu depuis un état de référence initial mais actuellement sous différents modes d'usage. Les stocks de C du sol dans ces différents modes d'usages sont ensuite calculés et comparés par rapport aux stocks de C des sols de l'état de référence initial pour avoir le taux de stockage (Costa Junior et al., 2013). La culture vivrière (CV) a été choisie comme cet état de référence initiale pour cette étude car il s'agit des pratiques agricoles les plus pratiquées par les paysans malgaches depuis des décennies. L'étude a été effectuée sur un total de 56 parcelles agroforestières réparties selon les types d'association dans les trois sites (Tableau 5). Le même nombre de parcelle a été considéré pour les autres modes d'usages de sol au niveau de chaque site.

2.4. Protocole d'échantillonnage

Le protocole d'échantillonnage a consisté à prélever les échantillons de sol à l'aide d'une tarière manuelle en acier, sur trois profondeurs différentes : 0–10 cm, 10–20 cm et 20–30 cm. Trois répétitions par parcelle suivant un dispositif triangulaire (de 20 m de côté) ont été considérées pour constituer ensuite un échantillon composite par parcelle pour l'analyse physico-chimique du sol (C, N et P) à chaque profondeur (Rakotovao, 2017). Les échantillons de sol pour la mesure de la densité apparente ont été prélevés au milieu du dispositif sur les trois profondeurs : 0–10 cm, 10–20 cm et 20–30 cm (Figure 7). Un cylindre en acier de 10 cm de hauteur et 8 cm de diamètre a été utilisé pour prélever les échantillons de sol pour la mesure de la densité apparente. Au total, 336 échantillons de sol destinés aux analyses physico-chimiques du sol et 336 échantillons de sol destinés aux mesures de densité apparente du sol ont été prélevés.

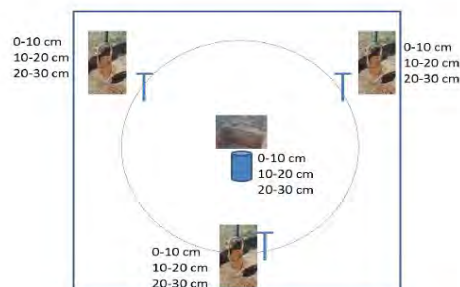


Figure 7: Protocole de prélèvement de sol

2.5. Mesure de la densité apparente du sol

Pour mesurer la densité apparente, les échantillons de sol ont été pesés (poids frais), émiétés, séchés à l'étuve pendant 24 heures à 105 ° C et repesés (poids sec). La densité apparente du sol a été calculée en utilisant le rapport entre le poids sec du sol et le volume du cylindre (502 cm³). Les sols secs ont été tamisés pour éliminer les matières de la fraction grossière (racines fines et graviers ou pierres > 2 mm). Les poids de ces fragments grossiers ont été utilisés pour estimer le pourcentage de fraction grossière, utilisé pour corriger les valeurs de stocks de carbone, d'azote et de phosphore (Poeplau et al., 2017).

2.6. Analyses physico-chimiques du sol

Les échantillons composites ont été utilisés pour l'analyse du carbone(C), azote (N) et phosphore (P) du sol. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air, préparés et tamisés à 2 mm, puis broyés et tamisés à 0,2 mm pour les analyses chimiques. Les teneurs en C organique et N organique total du sol ont été déterminées par combustion sèche au microanalyseur CHN (Flash 2000 series, CHNS/O Analyser Thermo Scientific), tandis que la teneur en P disponible dans le sol a été déterminée suivant la méthode du P résine (Van Veldhoven and Mannaerts, 1987).

2.7. Calcul des stocks de C, N et P disponible du sol

Pour chaque profondeur, les stocks de C (t C ha⁻¹), de N total (tN ha⁻¹) et de P disponible du sol (kg P ha⁻¹) ont été calculés à partir des teneurs (T) en ces éléments multipliées par la densité apparente du sol (Da) et l'épaisseur du sol (E) en excluant la fraction grossière (FG) (Andriamananjara et al., 2019) selon la formule suivante:

$$\text{Stock} = T \times Da \times (1 - FG) \times E \times 0.1$$

Où T est exprimée en g kg⁻¹ pour le carbone et l'azote et en mg kg⁻¹ pour le phosphore disponible. Da est exprimée en g cm⁻³ et E en cm. Dans cette étude, le pourcentage en fragments grossiers étant < 5%, les stocks n'ont pas été surestimés (Poeplau et al., 2017).

Pour l'horizon 0 à 30 cm du sol, les stocks de C, N et P ont été calculés en masse équivalente du sol afin de tenir compte de la variation de la masse du sol entre les différents modes d'usage du sol (Ellert and Bettany, 1995). Le calcul des stocks à masse équivalente permet la comparaison des stocks entre des sites et des modes d'usages de sol ayant des différences de densité apparente significatives.

Le taux de séquestration de C en agroforesterie ($tC\ ha^{-1}\ an^{-1}$) a été obtenu à partir de la différence entre les stocks de C dans le système agroforestier et dans la culture vivrière (CV), divisée par l'âge du système agroforestier (Cardinael et al., 2017b) selon la formule suivante :

$$\text{Taux de séquestration de C} = \frac{\text{Stock C (agroforesterie)} - \text{Stock C (référence)}}{\text{Age (agroforesterie)}}$$

2.8. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (R Development Core Team, 2013). La densité apparente du sol, les teneurs en C, N et P du sol ainsi que le ratio C/N ont été comparés en fonction des sites (A, B, C), la profondeur du sol (0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm) et les systèmes d'utilisation du sol (Agroforesterie ou AF, CV, SB, FN et CG) en utilisant une ANOVA à trois facteurs avec interaction. Les stocks de C, N et P disponible du sol sur 0 à 30 cm de profondeur ont été comparés en fonctions des sites et des modes d'usages de sol en utilisant une ANOVA à deux facteurs. Afin d'expliquer les variations des stocks entre les différents types de pratiques agroforestières, trois facteurs liés aux caractéristiques des systèmes agroforestiers (espèce d'arbre, type de fertilisant et topographie) ont été testés à travers une ANOVA. Après chaque ANOVA, le test post-hoc LSD à un seuil de significativité de 5% a été utilisé pour explorer la différence entre les moyennes de plusieurs groupes. De plus, afin de tester l'effet de la densité d'arbres et de la quantité des intrants organiques sur les stocks de C du sol, un modèle de régression linéaire (lm) a été utilisé.

3. Résultats

3.1. Dynamique de C dans les systèmes agroforestiers

3.1.1. Densité apparente du sol

La densité apparente du sol constitue un élément indispensable dans le calcul du stock de C et des nutriments du sol. L'ANOVA à trois facteurs a révélé que la densité apparente du sol (D_a) varie en fonction du site, du système d'utilisation du sol et de la profondeur (Tableau 6). Dans tous les sites, les valeurs de la D_a du sol ont augmenté avec la profondeur (Figure 8). Les valeurs de D_a les plus élevées sont observées pour le site A ensuite les sites B et C, respectivement. Au niveau du site A, les sols des cultures vivrières ont présenté des valeurs de D_a élevées par rapport aux systèmes agroforestiers ($p=0,002$). La tendance contraire a été observée sur le site B où les valeurs de D_a ont été plus élevées dans les systèmes agroforestiers ($p<0.001$) que dans les deux autres modes d'usage du sol (la forêt naturelle et la culture sur brûlis) où les valeurs

de Da restent uniformes. Sur le site C, aucune différence significative n'a été observée entre les systèmes agroforestiers, le riz pluvial et la monoculture de girofliers ($p=0.361$).

Tableau 6: Résultats de l'ANOVA avec seuil de significativité de la comparaison des valeurs de Da, les teneurs en C, N et P ainsi que le C/N en fonction du site, mode d'usage du sol et profondeur.

Facteur	Paramètres du sol				
	Da	C	N	P disponible	C/N
	$g\ cm^{-3}$	$g\ kg^{-1}$	$g\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	Ratio
Site	***	***	***	***	NS
Système	***	*	***	NS	NS
Profondeur	***	***	***	NS	NS
Site:système	*	NS	*	Ns	NS
Site:profondeur	NS	***	NS	NS	**
Système:profondeur	NS	NS	NS	NS	NS
Site:système:profondeur	NS	NS	*	NS	*

Les signes ***, **, * indiquent les seuils de significativité $<0,001$, $<0,01$ et $<0,05$ respectivement. La lettre NS indique une valeur non significative de la p-value ($>0,05$)

3.1.2. Teneurs en C du sol

L'ANOVA a aussi montré que les teneurs en C varient en fonction du site, du système et de la profondeur (figure 8). Elles diminuent avec la profondeur pour les sites A, B et C. Parmi les trois sites, la teneur en C du sol la plus faible a été observée au niveau du site A. La teneur en C du sol y est significativement plus élevée dans les systèmes agroforestiers que dans les cultures annuelles ($p<0.001$). La teneur en C du sol la plus élevée a été observée au niveau du site B suivie par le site C. Toutefois, il n'y avait pas de différence significative des teneurs en carbone entre les systèmes agroforestiers et les autres systèmes d'utilisation de sol pour ces deux sites (Figure 8).

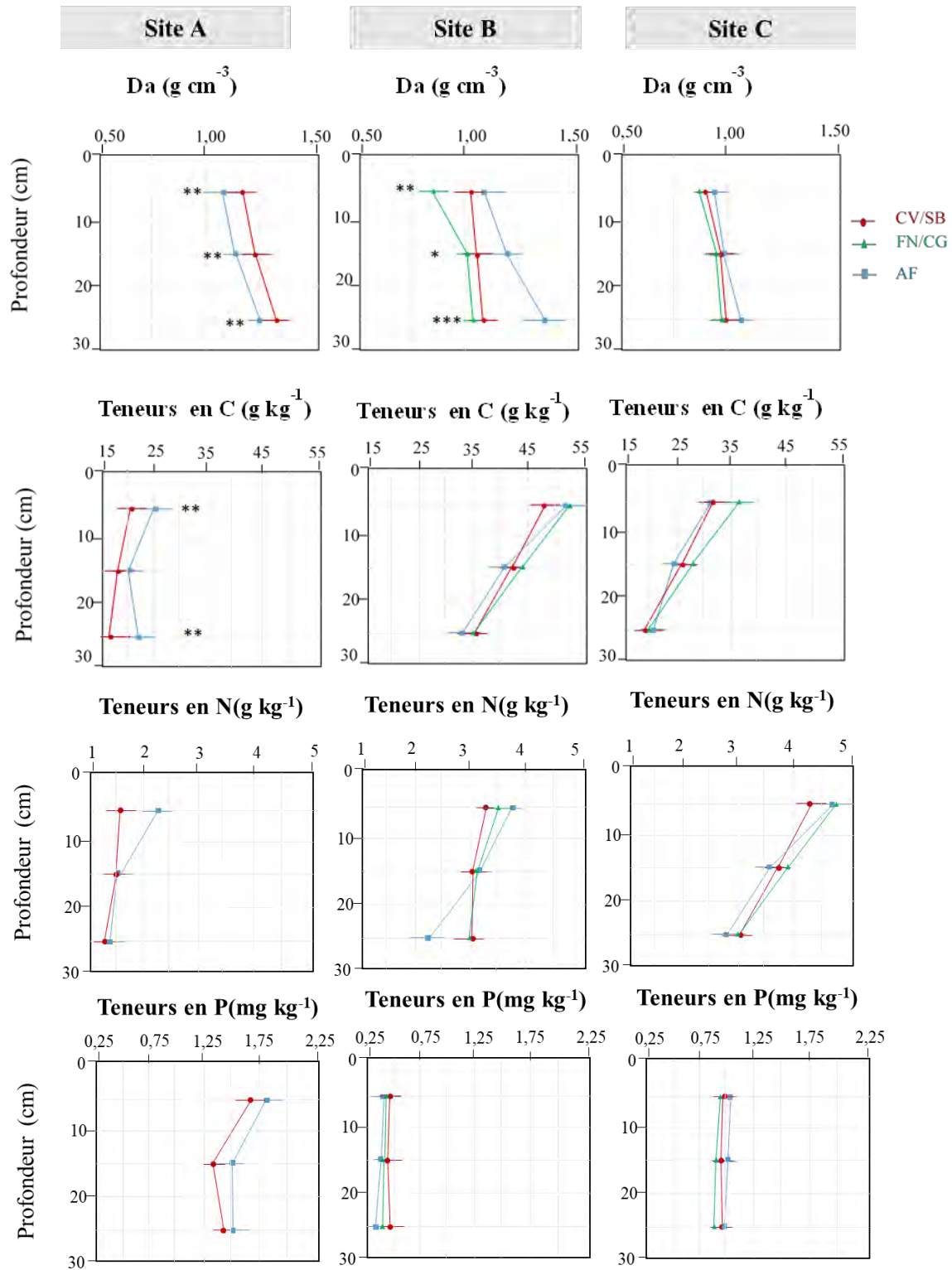


Figure 8 : Variation des paramètres du sol en fonction du site, de la profondeur et des modes d'usage du sol. Les étoiles indiquent une différence entre l'agroforesterie et les autres modes d'usages du sol (*** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05).

3.1.3. Stocks de C du sol

Les stocks de C ont été évalués pour l'horizon 0-30 cm du sol. Les stocks de C du sol sont significativement différents entre les différents sites (p value < 0,001) avec des valeurs moyennes de 81,41 tC ha⁻¹, 103,47 tC ha⁻¹ et 71,10 tC ha⁻¹ pour les sites A, B et C, respectivement. Aucune différence significative des stocks de C du sol n'a été observée entre les systèmes d'occupation du sol et les types d'agroforesterie de chaque site sauf pour le site A (p value = 0,028). Pour ce dernier, les systèmes agroforestiers (AF) ont enregistré des stocks de C du sol plus élevés que dans les cultures annuelles. Similairement, une différence significative a été aussi observée entre les différents types des pratiques agroforestières du site A (p value = 0,036). Ainsi la culture intercalaire avec Eucalyptus (A-CIE) présentait le stock de carbone le plus élevé, suivi par le jardin d'agrume (A-JA) puis la culture intercalaire avec du caféier (A-CIC) (Figure 9).

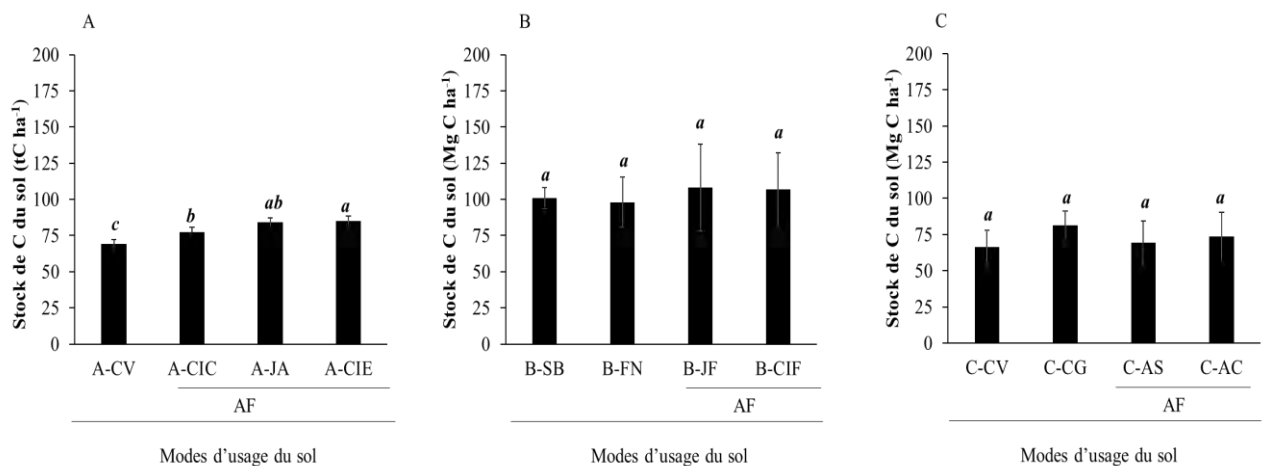


Figure 9 : Stocks de carbone du sol dans les différents mode d'usage du sol sur 0-30cm sur les sites A,B et C). Les lettres (a et b) indiquent une ANOVA à un facteur du stock de carbone du sol entre les systèmes agroforestiers (AF) et les cultures vivrières annuelles (CV).

3.1.4. Taux de séquestration de C du sol dans les systèmes agroforestiers

Le taux moyen de séquestration de C dans les systèmes agroforestiers étudiés a été de 0,87 t C ha⁻¹ an⁻¹ sur les trente premiers centimètres du sol. Les taux de séquestration de C dans le sol ont varié en fonction des types de pratiques agroforestières (Figure 10). La valeur la plus élevée a été observée au niveau de la culture intercalaire d'Eucalyptus (A-CIE) et du riz du site A avec un taux de 2 t C ha⁻¹ an⁻¹. Pour le site B, il n'y a pas eu de différence significative du taux de séquestration de C entre les pratiques B-JF et B-CIF. Pour ce site, les systèmes agroforestiers

âgés de 8 à 13 ans, avec une densité de plantation de 200 à 300 pieds/hectare et fertilisés par du fumier ou par un mélange de fumier et compost avec une dose moyenne de $2,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, présentaient donc un taux de stockage moyen de $+0,69 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Pour le site C, aucune différence significative n'a été observée entre les pratiques agroforestières. Le taux moyen de séquestration de C dans les systèmes agroforestiers à base de girofliers est donc de $+0,37 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

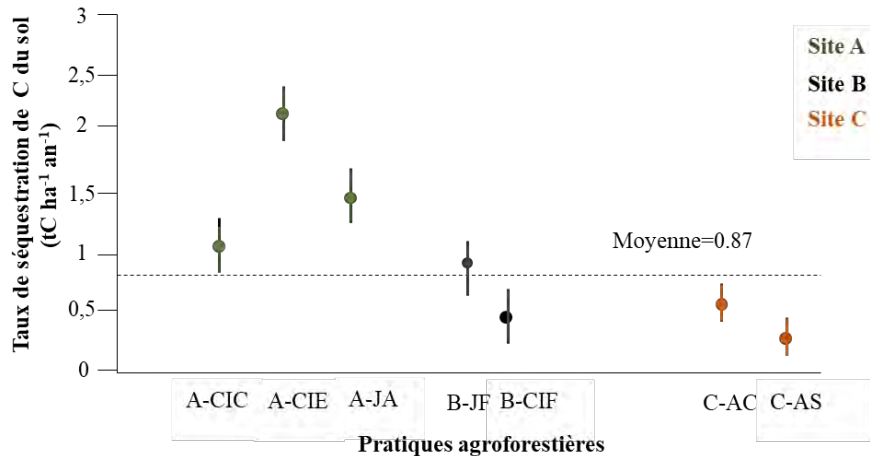


Figure 10: Taux de stockage de carbone du sol par les systèmes agroforestiers (par rapport à des systèmes cultivés de référence, non agroforestiers)

Le changement du mode d'usage du sol sous cultures annuelle en agroforesterie a généralement engendré une hausse du stock de C du sol de l'ordre de +3 à +12% dans l'ensemble des trois. Pour le site A, le changement de culture vivrière en systèmes a favorisé significativement le plus de stockage de C dans le sol ($p \text{ value} < 0,001$). Pour le site B, le changement de la pratique de culture sur brûlis en agroforesterie ainsi que le changement de forêt naturelle en agroforesterie n'avaient pas d'effet significatif sur les stocks de C du sol ($p \text{ value} = 0,17$). Similairement, pour le site C, aucun effet significatif sur les stocks de C du sol n'a été observé pour la transformation des monocultures de girofliers en agroforesterie ($p \text{ value} = 0,21$).

3.2. Paramètres affectant le stock de C du sol dans les systèmes agroforestiers

3.2.1. Effet des composantes et structure des systèmes agroforestiers

Les systèmes agroforestiers se diffèrent des autres modes d'usage du sol par la présence de l'arbre. Ainsi l'effet de l'espèce d'arbre et de la densité d'arbres ont été testés pour expliquer le stock de C du sol entre les différents types d'agroforesterie. Pour le site A, où une différence significative a été observée entre les trois types d'agroforesterie, il n'y a pas eu d'effet significatif des espèces d'arbres ($p \text{ value} = 0,30$) sur les stocks de C du sol. Toutefois, un effet

significatif de la densité d'arbre a été observé (p value < 0,001). Les stocks de carbone du sol sous agroforesterie ont augmenté en fonction de la densité d'arbres avec $R^2=0,66$ (figure 11).

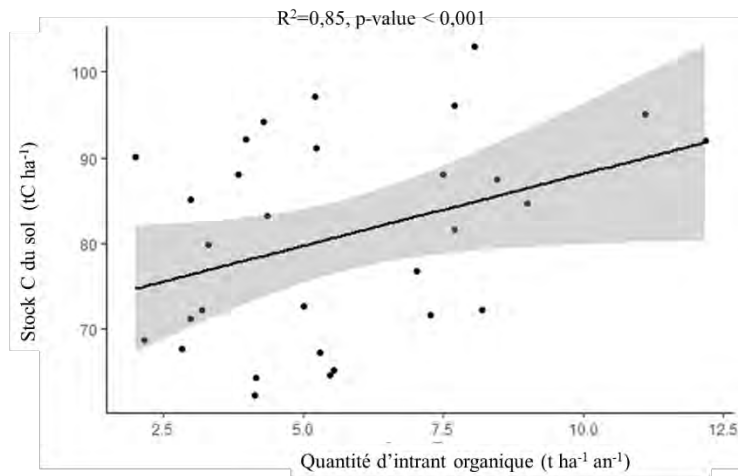


Figure 11 : Relation entre stock de C du sol la densité d'arbres en agroforesterie

3.2.2. Effet de la gestion de la fertilité du sol

Les systèmes agroforestiers étudiés ont bénéficié d'un apport régulier en fertilisant organique tel que le fumier et le compost. Pour le site A, les systèmes agroforestiers ont bénéficié d'un apport en différents types d'intrants organiques (fumier ou en compost ou en mélange de compost et fumier) à de doses différentes. Les doses moyennes en fumier, compost et mélange de compost et fumier sont de l'ordre de $6,34 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et $4,34 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ respectivement. L'analyse de l'effet des intrants organiques apportés aux systèmes agroforestiers sur les stocks de C du sol a montré qu'il n'y a pas d'effet significatif du type de fertilisant (p value = 0,08). Toutefois, un effet positif significatif de la quantité de fertilisant sur le stock de C du sol a été observé avec $R^2=0,85$ dans les systèmes agroforestiers (Figure 13).

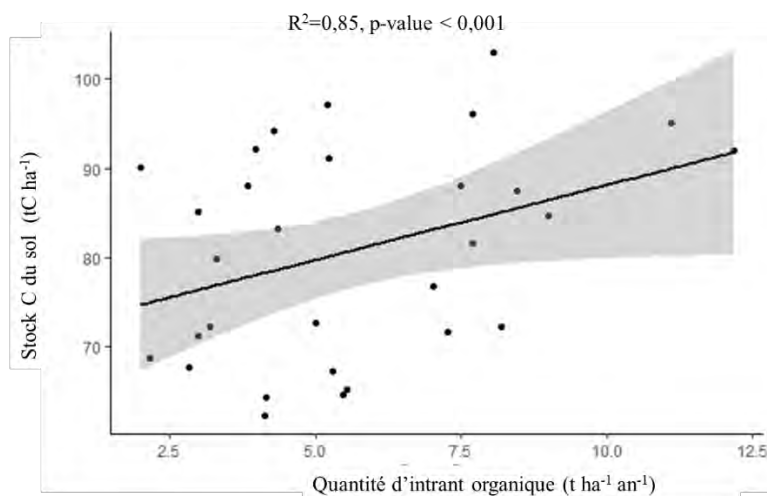


Figure 12: Evolution du stock de C dans les systèmes agroforestiers en fonction de la quantité d'intrant organique

3.3. Évolution des nutriments du sol sous agroforesterie

3.3.1. Teneurs en azote du sol

Dans tous les sites, la teneur en azote total du sol a diminué significativement avec la profondeur du sol ($p < 0,001$). Sa valeur varie significativement en fonction des sites mais n'est pas affectée par les modes d'usage du sol sauf pour le site A (figure 8). La teneur en azote du sol la plus élevée a été observée au niveau du site B avec une moyenne de $3,52 \text{ g kg}^{-1}$, $3,21 \text{ g kg}^{-1}$ à $2,92 \text{ g kg}^{-1}$ pour les horizons du sol de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, respectivement. Le site B est suivi par le site C avec une teneur moyenne en N de $2,65 \text{ g kg}^{-1}$, $2,07 \text{ g kg}^{-1}$ à $1,70 \text{ g kg}^{-1}$ pour les horizons du sol de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, respectivement. Enfin, au niveau du site A où le sol est le plus faible en azote par rapport aux autres sites, les systèmes agroforestiers ont montré une teneur en azote total significativement plus élevée ($2,34 \text{ g kg}^{-1}$) que dans les cultures vivrières ($1,53 \text{ g kg}^{-1}$) sur l'horizon 0-10 cm du sol ($p \text{ value} = 0,001$).

3.3.2. Teneurs en phosphore disponible du sol

La teneur en P disponible du sol varie significativement en fonction du site ($p \text{ value} < 0,001$) mais ne varie pas en fonction de la profondeur du sol ($p \text{ value} = 0,22$) et ni entre les systèmes ($p \text{ value} = 0,07$). La teneur en phosphore disponible du sol la plus élevée a été observée au niveau du site A avec une moyenne de $1,67 \text{ mg kg}^{-1}$, suivi par le site C avec une moyenne de $0,94 \text{ mg kg}^{-1}$ puis le site B avec une moyenne de $0,34 \text{ mg kg}^{-1}$ sur 0-30cm (figure 8).

3.3.3. Rapport C/N du sol

Le rapport C/N du sol varie de 10 à 15 dans l'ensemble de l'observation. Généralement, le rapport C/N diminue avec la profondeur du sol. Toutefois, sa valeur était significativement influencée par l'interaction entre le site et le système ($p \text{ value} = 0,02$). Au niveau du site A, le rapport C/N est significativement plus élevé dans les systèmes agroforestiers (14) par rapport aux cultures vivrières (10) au niveau de l'horizon 20-30 cm du sol. Pour le site B, le rapport C/N reste uniforme entre les systèmes. Similairement au niveau du site C, aucune différence significative du rapport C/N n'a été observée entre les systèmes.

3.3.4. Stocks de N total et du P disponible du sol

Les stocks d'azote total du sol et du phosphore disponible du sol ont été évalués sur l'horizon 0-30 cm. Aucune différence significative n'a été observée entre les différents systèmes d'utilisation du sol d'un même site. Cependant les stocks en N total et en P disponible du sol ont varié en fonction des sites. Le stock d'azote le plus élevé est observé au niveau du site B, suivi par le site A et C avec les moyennes respectives de $7,62 \text{ tN ha}^{-1}$, $6,15 \text{ tN ha}^{-1}$ et $5,45 \text{ tN ha}^{-1}$. Les stocks de P disponible du sol le plus élevé est observé au niveau du site C, suivi par le

site A puis le site B avec des moyennes respectives de 2,10 kgP ha⁻¹, 1,7 kgP ha⁻¹ et 1,17 kgP ha⁻¹.

4. Discussion

4.1. Les stocks de C et des nutriments du sol varient en fonction des sites

Les stocks de C, N total du sol et du P disponible du sol étaient significativement différents en fonction des sites. Le site B présentait le stock de C le plus élevé par rapport aux deux autres sites avec une valeur moyenne de 103,47 Mg C ha⁻¹. Cette tendance de stocks de C en fonction du site correspond à ce qui est observée dans la première cartographie des stocks de C du sol à Madagascar (Grinand et al., 2009). Selon cette cartographie, le site B est localisé dans la zone à forte valeur de stock de C du sol à Madagascar avec une valeur comprise entre 80 à 100 Mg C ha⁻¹ sur 0-30 cm de profondeur. Les deux sites A et C sont localisés dans la deuxième catégorie entre 60 à 80 Mg C ha⁻¹ selon cette même cartographie des stocks de C du sol à Madagascar. Cette différence de stocks de C du sol entre sites peut être expliquée par les conditions climatiques contrastées entre les régions. En effet, il a été démontré que les principales variables affectant la distribution spatiale des stocks de C à Madagascar sont la température moyenne annuelle, la précipitation moyenne annuelle, la végétation ainsi que la différence d'altitude (Ramifehiarivo et al., 2017). La température et la précipitation ont un effet important sur la décomposition de la matière organique du sol (Grace et al., 2006). En effet, dans les sols tropicaux, la teneur en C organique du sol augmente avec les précipitations et la baisse des températures (Davidson and Janssens, 2006; Wang et al., 2013). Ainsi, le stock élevé de C au niveau du site B (zone à forte pluviosité) peut être expliqué par une décomposition importante de la matière organique par les organismes décomposeurs du sol en présence d'une forte humidité.

La différence de stock de C entre les sites peut aussi être expliquée par la texture du sol. La teneur en argile et en limon du sol est fortement corrélée positivement avec la teneur en C du sol (Takimoto et al., 2008). Ainsi le faible stock de C du sol au niveau du site C par rapport aux deux autres sites, malgré une forte précipitation, peut être expliqué par la texture plus sableuse du sol avec une teneur en sable de 47% contre 13,5% de sable pour le site A.

La distribution spatiale des stocks d'azote du sol dans les trois sites a généralement suivi la même distribution spatiale des stocks de C du sol sachant que les facteurs influençant la dynamique de C peuvent également influencer la dynamique de l'azote (Li et al., 2012).

4.2. L'agroforesterie permet une augmentation significative du stock de C du sol par rapport aux cultures annuelles

Conformément à notre première hypothèse, une augmentation des stocks de C du sol a été observée dans les systèmes agroforestiers par rapport aux cultures annuelles (cultures vivrières, cultures sur brûlis). Cette augmentation a été significative au niveau du site A avec un taux moyen de séquestration de C du sol de $1,55 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ces résultats confortent les précédentes études menées à Madagascar sur l'évaluation de l'impact de l'agriculture climato-intelligente et des pratiques agroécologiques, parmi lesquelles est comprise l'agroforesterie, sur le stock de C du sol. En effet, une étude réalisée dans la région Itasy a démontré que les systèmes agroforestiers peuvent entraîner un taux de séquestration de C du sol jusqu'à $2,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Rakotovo et al. 2020). Similairement, des études réalisées sur les systèmes agroforestiers à base de giroflier dans la région CE de Madagascar ont montré un stock de C du sol plus élevé par rapport aux cultures sur brûlis (Andriamananjara et al., 2019). Au niveau du site E, même si l'augmentation du stock de C du sol n'a pas été significative, les systèmes agroforestiers ont enregistré un taux de séquestration de C allant de $0,46$ à $0,92 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Au niveau de ce site, l'agroforesterie pourrait donc constituer une alternative à la culture sur brûlis en maintenant une couverture arborée et en renonçant à la déforestation tout en évitant une détérioration du stock de C du sol.

En effet, Nair et al.(2009) suggèrent des valeurs de séquestration de C dans le sol allant de $0,1$ à $0,25 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pendant 10 ans pour des systèmes agroforestiers en climat tropical humide. Feliciano et al., (2018) suggèrent des valeurs moyennes allant de $0,15$ à $3,36 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans les systèmes agrosylvicoles en Afrique et une valeur moyenne de $2,23 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans les systèmes en climat tropical. Ainsi par rapport aux valeurs de séquestration de COS observée dans les systèmes agroforestiers en climat tropical humide, celles observées à Madagascar sont relativement plus élevées (Razafimbelo et al., 2018b).

Cependant, il est important d'évoquer la tendance de perte continue de carbone dans les cultures annuelles, considérées comme référence dans cette étude. En effet, la récolte continue de cultures avec un faible quantité d'intrants organiques dans les cultures annuelles entraînent une diminution continue de la fertilité du sol et des stocks de carbone du sol dans ces systèmes (Luedeling et al. 2011). Cette diminution du stock de carbone est particulièrement importante lorsque le sol est labouré, accélérant la décomposition de la matière organique du sol (Batjes, 2001). Cela constitue une limite à l'utilisation de ces systèmes en tant que système de référence lors de l'approche synchronique.

4.3. La structure et la gestion des systèmes influencent le stock de C du sol en agroforesterie

Conformément à notre deuxième hypothèse, le stock de C du sol dans les systèmes agroforestiers a pu être expliqué par la structure du système mis en place, notamment la densité d'arbres. Ce résultat conforte ce qui a été observé dans les types de systèmes agroforestiers à forte densité d'arbres et forte richesse spécifique en Inde. Ces systèmes nommés jardins familiaux ou « Homegarden » comparés à d'autres pratiques de plus faible densité d'arbres, présentent des stocks de C du sol plus élevés conduisant ainsi à une séquestration de C plus élevée dans le sol (Saha et al., 2009). La forte séquestration de C dans les systèmes à forte densité d'arbres est due à leur structure et composition qui se rapproche de celles de la forêt (Kumar, 2006), où il y a un apport important en litière qui alimente régulièrement la matière organique du sol (Conforti et al., 2016).

Au niveau global, peu d'études ont rapporté les facteurs qui expliquent la différence de stockage et de séquestration de C du sol entre les types d'agroforesterie. La synthèse des données existantes au niveau global a révélé que le climat, le mode d'usage du sol qui précède l'agroforesterie, la durée ainsi que les composantes de l'agroforesterie mise en place constituent les principaux facteurs expliquant la différence de stock de C du sol entre les types d'agroforesterie. Toutefois, plus de 50% de cette différence de stock de C dans les systèmes agroforestiers restent non expliqués (Feliciano et al., 2018). Pour le cas des systèmes agroforestiers malgaches, les facteurs pouvant les différencier des autres systèmes tropicaux sont la diversité de leurs composantes et structures et spécifiquement l'apport régulier en intrant organique notamment en fumier et compost.

4.4. L'agroforesterie favorise une stabilité de la disponibilité des nutriments du sol

Contrairement à notre troisième hypothèse, aucune différence significative de stock de N total et de P disponible du sol n'a été observée entre les systèmes agroforestiers et les autres modes d'usage du sol. Il y a donc une conservation des stocks en azote et phosphore dans les systèmes agroforestiers. Cela peut être dû à de nombreuses voies de pertes en nutriments dans les systèmes agroforestiers y compris la lixiviation, le lessivage ou la perte gazeuse (pour le N) ainsi que la perte par l'érosion du sol (Isaac et al., 2005). Ces phénomènes sont d'autant plus accentués dans les zones à forte pluie où l'agroforesterie est habituellement pratiquée sur les terrains en pente comme au niveau des sites E et CE. Pour le cas du phosphore particulièrement, la stabilité du P disponible du sol sous agroforesterie pourrait être liée aux propriétés chimiques des sols ferrallitiques qui rendent difficile l'augmentation de la disponibilité de cet élément dans

le sol. En effet, les Ferralsols sont caractérisés par une faible disponibilité en P en raison de la forte fixation du P par les oxy-hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al) (Rabeharisoa et al., 2012b; Randriamanantsoa et al., 2015).

5. Conclusion

Notre études a montré une différence significative entre les systèmes agroforestiers et les autres modes d'usage du sol (culture annuelle, giroflier, forêt naturelle) en termes de stocks et de stockage de carbone dans le sol. En général, les stocks de carbone étaient plus élevés sous agroforesterie que sous cultures annuelles. Les cultures intercalaires avec l'eucalyptus et les arbres fruitiers semblent être plus efficaces pour augmenter le stock de carbone du sol. L'avantage de la pratique agroforestière dépend aussi de la densité d'arbres ; les systèmes plus complexes à forte densité et riche en diversité spécifique favorisent un stock de carbone plus élevé et pourraient aussi offrir une biomasse végétale plus élevée. Cette étude a permis de constater aussi que les systèmes agroforestiers étudiés n'induisent pas une évolution significative des stocks en nutriments dans le sol. Elle met toutefois en exergue la difficulté d'évaluation de l'impact de ces pratiques sur le carbone du sol, entre autres du fait de l'importance de la variabilité spatiale, dont il faut tenir compte, car cette variabilité masque dans certaines situations l'effet des pratiques.

Chapitre 3. EFFET SPECIFIQUE DES ESPECES D'ARBRES SUR LE CARBONE DU SOL REVELE PAR LA COMPOSITION EN ¹³C DU SOL DANS UNE ASSOCIATION EXPERIMENTALE D'ARBRES ET DU RIZ

Préface

La présence de l'arbre constitue la spécificité des systèmes agroforestiers par rapport à d'autres pratiques agricoles. Le premier chapitre de cette thèse a présenté une diversité d'espèces d'arbres utilisées en agroforesterie. Le second chapitre a montré que le stockage de carbone dans le sol est différent en fonction des types de pratiques. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence de stockage de C dans les sols agroforestiers. La littérature rapporte souvent l'effet de densité d'arbre et de la fertilisation organique. Toutefois l'effet spécifique de l'arbre est rarement étudié. Ce chapitre sera donc focalisé sur la quantification du carbone du sol dérivé de quelques espèces d'arbres agroforestiers.



Ce chapitre a été rédigé sous forme d'article en anglais au vu d'une soumission à une revue scientifique internationale.

Rasoarinaivo Angelina Rondrotsifantenana¹, Razafimbelo Tantely Maminaina¹, Blanchart Eric², Chapuis-Lardy Lydie^{2,3}, Bouillet Jean-Pierre^{2,4,5}, Chevallier Tiphaine², Trap Jean^{2S}

Tree specific effects on soil carbon sequestration as revealed by soil ^{13}C composition in a rice-trees association mesocosm experiment

Abstract

Within agroforestry systems, trees greatly contribute to soil carbon (C) sequestration. We still know little of how much of this contribution varies with tree species. Here, we quantified the soil C content derived from three main tree species, *Eucalyptus robusta*, *Coffea arabica* and *Citrus clementina*, used in agroforestry in the Highlands of Madagascar. A full-factorial controlled mesocosm experiment was performed, with seedlings of the tree species planted with or without rainfed rice in a Ferralsol. Natural ^{13}C abundance in soil was measured to assess the tree- and rice-derived C. One year after planting, *Eucalyptus robusta* was the species exhibiting the highest tree-derived C values, with 148 g C m⁻² on average. In contrast, *Citrus clementina* transferred to the soil at only 12 g C m⁻². We did not detect a significant contribution of *Coffea arabica* to the soil C stock. The presence of rice did not affect the growth of tree seedlings or their abilities to provide C in the soil. The difference in soil C sequestration among tree species was highly explained by differential root biomass, with tree root biomass significantly correlated with soil $\delta^{13}\text{C}$. This experimental assay highlighted the contrasting contributions of tree species to ecological processes such as soil C sequestration. Further studies considering tree density and spatial arrangement should be conducted under field conditions to gain insights into tree contributions to soil C sequestration in agroforestry systems.

Keywords: Agroforestry, Eucalyptus, Coffea, Citrus, upland rice, carbon dynamics, tropical regions

1. Introduction

Improved soil carbon (C) sequestration is a key challenge to mitigate climate change and ensure sustainable primary production (Lal, 2004). This challenge is promoted by international initiatives such as “4 per 1000” launched at the COP 21 with the ambition to increase worldwide soil C stocks by 0.4% per year as compensation for the global emission of greenhouse gases by anthropogenic sources (Minasny et al., 2017).

Among soil management practices (e.g. afforestation, soil restoration, land-use conversion, conservation tillage), agroforestry constitutes a promising way to improve soil C stocks in temperate and tropical environments (Cardinael et al., 2017b; De Stefano and Jacobson, 2018; Feliciano et al., 2018; Lorenz and Lal, 2014; Shi et al., 2018). Agroforestry is defined as the

association of woody perennials with farming practices in the same land management (Nair et al., 2009). In silvoarable systems, trees are combined with arable crops. Trees play important roles within these agrosystems by enhancing C transfer from the atmosphere to the soil and by improving soil nutrient availability (Pardon et al., 2017).

There is an important diversity of tree species that can be used to design agroforestry systems. Hence, Von Carlowitz (1987) listed over 1400 tree species that could be used in agroforestry. However, little is known about the different capacities of these tree species to improve soil C sequestration (Jandl et al., 2007), as most of them were evaluated and chosen for their agronomic performance, such as wood, fruit or fodder production (Prasad et al., 2010; Styger et al., 1999; Paterson et al., 1998). This is a serious shortcoming, knowing that trees greatly improve soil C content through various mechanisms that are likely to vary among species (Reich et al., 2005). For instance, for their nutrient requirements, trees develop a more or less vast root system in the soil on the basis of soil C input (Kanime et al., 2013). In mixed crop systems such agroforestry, where plant competition for nutrients is likely to be high (Jose et al., 2004; Schenk, 2006), the contrasting ability of tree species to explore the soil volume may modulate the soil C sequestration rate. Thus, soil nutrient availability and the annual crop with which the tree competes for nutrients are potential drivers of tree specific effects on soil C sequestration.

In Madagascar, rice-based agroforestry appears to be a favorable strategy to promote synergies between food security and climate change mitigation (Rakotovao et al., 2020a). Malagasy farmers use several tree species in rice-based agroforestry practices, such as clove trees, fruit trees, coffee trees and eucalyptus (Razafimbelo et al., 2018c). This defined agroforestry association provides a framework for the study of how tree C transfer to soil affect soil C contents and how. Previous studies on the eastern coast and in the Central Highlands of Madagascar have already reported a high soil C sequestration rate in these agroforestry practices (Andry Andriamananjara et al., 2019; Rakotovao et al., 2020b). All these studies in rice-based agroforestry did not investigate the relative importance of the trees in soil C sequestration or the potential influence of annual crops on tree-driven soil C sequestration.

We aimed to quantify the distinct effects of three agroforestry tree species, alone or in association with rice as the annual crop, on the soil C stock and dynamics after 12 months of growth in controlled conditions. A mesocosm approach was selected in order to assess the causal relationships between tree species and soil functions. To assess tree species-specific effects, we used natural ^{13}C abundance to quantify the amount of incorporated C in soil by each

tree species (Bender, 1971). We first hypothesized that tree species differ in their ability to improve soil C stocks. We supposed that these variable abilities of trees in soil C sequestration depend on root biomass which reflects the production of root litter and possible rhizodeposition (Kätterer et al., 2011; Rasse et al., 2005) (Balesdent et al., 2011). We also expected that rice associated with trees, by competing for soil resources, could influence tree-driven soil C sequestration.

2. Materials and methods

2.1. Soil sampling

The soil used in the mesocosm experiment originates from the eastern part of the Itasy region in the Highlands of Madagascar, near Imerintsiatosika (19°05'40" S; 47°25'65" E, 1480 m asl). We collected the first 10 cm of a clayey acid red Ferralsol (FAO classification) from a natural savannah composed of *Aristida sp.* aged more than 100 years. A total of 1.8 Mg of fresh soil was collected and transported at the Laboratory of Radio-Isotopes (University of Antananarivo). Soil samples were air-dried, homogenized and then sieved at 5 mm. The initial isotopic soil C composition was highly marked by C4 vegetation with a $\delta^{13}\text{C}$ value of $-11.62 (\pm 0.04) \text{‰}$. This soil layer was characterized by a pH between 4 and 5 and was composed of 28.9% clay, 42.4% fine silt, 15.3% coarse silt, 8.6% fine sand and 4.6% coarse sand and was deficient in major nutrients such as N and P (Raminoarison et al., 2020).

2.2. Plant materials

The upland rainfed rice (*Oryza sativa L.*) cultivar Chhromrong Dhan was used. This cultivar which is able to grow at cold temperatures and high elevations (Raboin et al., 2013), is widely used by farmers in the Highlands. The seeds were provided by the agronomic station of the National Agronomic Institute of Madagascar FOFIFA, based at Antsirabe. The agroforestry tree species were: *Coffea arabica L.*, *Citrus clementina hort. Ex Tanaka* and *Eucalyptus robusta Sm.* The latter is largely used in the region to produce energy, wood and charcoal. All these species, rice and trees, are C3 plants exhibiting low $\delta^{13}\text{C}$ values, i.e. -23.65‰ , -24.95‰ , -26.73‰ and -26.69‰ for *Oriza sativa*, *Coffea Arabica*, *Citrus clementina* and *Eucalyptus robusta*, respectively, according to our measurements. These values were consistent with literature findings (Amador et al., 2013; Brewitt et al., 2015; Gealy and Fischer, 2010; Maquere et al., 2008). Tree seedlings were provided by a local nursery called the Kambana nursery in the Itasy region. At the beginning of the experiment, the 6-month-old seedlings were approximately 20 cm high. Tree seedlings were provided with substrates from the nursery,

which consisting of a pot of 5 cm in diameter and 10 cm in height containing 40% of soil, 30% of sand and 30% of manure. The $\delta^{13}\text{C}$ value of this potting substrate was -17.35 ‰.

2.3. Experimental design

We conducted a full factorial mesocosm experiment including nine treatments : (1) bare soil without plants, serving as a control (Ct), (2) bare soil with the substrate from the nursery, (3) soil planted with rice, (4) soil planted with *C. arabica* without rice, (5) soil planted with *C. arabica* with rice, (6) soil planted with *C. clementina* without rice, (7) soil planted with *C. clementina* with rice, (8) soil planted with *E. robusta* without rice, and (9) soil planted with *E. robusta* with rice (Table 7). Each treatment was replicated five times. Finally, 45 mesocosms were set up. The replicates were placed in square blocks spaced by 50 cm apart. Each mesocosm was spaced 30 cm within each block. The position of the treatments within the blocks was randomly chosen. Tree seedlings were planted with their substrates in the middle of the mesocosm at 20 cm from the edge. Two rice seeds were sown in the mesocosms in two symmetrically opposed locations forming an equilateral triangle of 20 cm side with the tree seedling. The distance between the tree seedling and the rice was thus 20 cm (Support Information 1). A similar triangular pattern was used for mesocosms with rice alone.

Table 7. Experiment treatments and associated codes

Treatments	Details	Final codes
1	Bare soil serving as the control (Ct)	CtB
2	Bare soil with nursery substrate	CtN
3	Soil planted with <i>Oryza sativa</i> (rice)	CtR+
4	Soil planted with <i>Coffea arabica</i> (Co) without rice	CoR-
5	Soil planted with <i>Coffea arabica</i> (Co) with rice	CoR+
6	Soil planted with <i>Citrus clementina</i> (Ci) without rice	CiR-
7	Soil planted with <i>Citrus clementina</i> (Ci) with rice	CiR+
8	Soil planted with <i>Eucalyptus robusta</i> (Eu) without rice	EuR-
9	Soil planted with <i>Eucalyptus robusta</i> (Eu) with rice	EuR+
Factors	Agroforestry tree	AT
	Contrast 1. Tree presence	TP
	Contrast 2. Tree species identity	TS
	Rice presence	RP
	Soil depth	SD

2.4. Mesocosm set up

We used bottomless 40 cm × 40 cm × 40 cm plastic mesocosms. The mesocosms were placed outside on a terraced piece of land prepared for this experiment at the Laboratory of Radio-Isotopes. In each mesocosm, 44 kg of sieved dry soil was added. We applied 4.8 g of NPK fertilizer and 2 g of urea in each mesocosm at the beginning of the experiment and when sowing rice seeds to mimic farmer practices, corresponding to the rate of 300 kg ha⁻¹ of NPK (grade 11-22-16) and 100 kg ha⁻¹ of urea (N). NPK fertilizer was carefully diluted in a large volume of water brought to the soil surface at the start of the experiment. Ten percent, 40% and 50% of the total amount of urea was applied at the beginning and at two and at five weeks after rice sowing, respectively. The experiment started with plantations of tree seedlings in the mesocosms in March 2018. In November 2018, two rice seeds were sown in each mesocosm according to the treatment with rice in order to mimic one crop season of rainfed rice in the agroforestry system. Therefore, the trees grew alone for eight months before the rice was sown. The mesocosms were left watered by the rain. Weeds were regularly removed by hand, as was any external litter that was not from the experimental plants. Moreover, we observed very little leaf litter falling from the three tree species during the experiment; therefore, we did not quantify it.

2.5. Plant measurements

Plant height was measured every two weeks. At the end of the experiment (March 2019), plant shoots and roots were sampled and separated. Trees and rice roots were gently extracted separately from the mesocosm by disassembling the mesocosm and separating the roots from the soil. Tree roots that grew in the deep horizons below the bottom of the mesocosms were not harvested (such as Eucalyptus roots), i.e., only the roots inside the mesocosms were harvested. The roots were then carefully washed in tap water. Shoot and dry root biomasses were determined after oven-drying at 65°C for 48 hours.

2.6. Soil collection and analyses at the end of the experiment

After one year, soil samples were collected in each mesocosm using an auger. The sampling point was equidistant from the two plants (tree and rice) (Support information 1). Five hundred grams of soil was collected over two depth ranges: 0-20 cm and 20-40 cm. Soil samples were air-dried and sieved at 2 mm before being analyzed. A subsample of the soil was also dried in an oven at 105°C for 48 hours and weighed to calculate the moisture content. Total organic C

and total nitrogen (N) were measured on a finely ground (<0.2 mm) subsample by dry combustion in a CHN analyzer (Flash 2000 series, CHNS/O 122 Analyzer Thermo Scientific, IRCOF, France). The $\delta^{13}\text{C}$ analysis of soil and plant samples was carried out with the EA Eurovector autoanalyzer and the Isoprime mass spectrometer. The soil bulk density in the mesocosm was used to express C-sp by an area unit (g C m^{-2}). As the quantity of soil added in each mesocosm (44 kg) and the volume (51200 cm^3) were known, the calculated bulk density was determined to be 0.86 g cm^{-3} . The available P content of the soil was measured using an anion exchange resin (Saggar et al, 1990). Briefly, the fraction of the resin was measured by stirring a 2-g aliquot of dry soil in 30 ml of distilled water with an anion exchange membrane ($31 \times 20 \text{ mm}$, 55,164 2S, BDH Laboratory Supplies, Poole, England) previously converted to HCO_3^- . After 16 hours of stirring, the P adsorbed by the resins was desorbed in 20 ml of 0.5 M hydrochloric acid (HCl) for 4 hours (50 revolutions per minute). The P contained in the HCl extract was analyzed colorimetrically at 610 nm using the malachite green method (Van Veldhoven and Mannaerts, 1987).

2.7. Data analyses

We computed the newly incorporated C from trees and rice, called hereafter "C_sp", using the following equations (Bernoux et al., 1998):

$$\text{(Eq.1) } C_{\text{tot}} = CC_4 + C_{\text{sp}}$$

$$\text{(Eq.2) } C_{\text{tot}} \delta_{\text{tot}} = CC_4 \delta C_4 + C_{\text{sp}} \delta_{\text{sp}}$$

Using Eq. 1 and Eq.2 allow to calculate C_sp

$$\text{(Eq.3) } C_{\text{sp}} = (\delta_{\text{tot}} - \delta C_4) / (\delta C_3 - \delta C_4) \times C_{\text{tot}}$$

where C_{tot} and δ_{tot} are the soil C content and $\delta^{13}\text{C}$ in the mesocosm at the end of the experiment, respectively. C_{sp} is the soil C content derived from trees or rice, and δ_{sp} is their respective $\delta^{13}\text{C}$ value. CC_4 and δC_4 are the soil C contents derived from the initial mesocosm soil, i.e., C inherited from savannah vegetation constituted by *Aristida* sp. and its $\delta^{13}\text{C}$ value of -11.78 ‰ (Codron et al., 2005).

All statistical analyses were performed with R software (R Development Core Team, 2013). The potential effect of the nursery substrate on soil parameters was assessed using one-way ANOVA performed on the control treatments. We did not find a random effect of the blocks. Soil total C and N contents, $\delta^{13}\text{C}$ value, and available P contents were averaged per treatment and compared as a function of agroforestry tree or "AT" with four modalities (absence of tree, *E. robusta*, *C. clementina* and *C. Arabica*), rice presence or "RP" with two modalities (with or without rice) and soil depth or "SD" with two modalities also (0-20 cm or 20-40 cm) using

three-way ANOVA. Contrasts were added within this three-way ANOVA for the AT factor to separate the effect of tree presence or TP and tree species identity or TS. The contrast "tree presence" refers to the contrast that opposed the control (Ct) to other treatments (OT). The contrast "tree species identity" refers to the contrast that opposed the tree species two by two: *E. robusta* versus *C. clementina*, *E. robusta* versus *C. arabica* and *C. clementina* versus *C. arabica*. Two-way ANOVA with TS and RP as factors was used for plant parameters. The normality of the data was verified using the Shapiro-Wilk test. LSD post hoc tests were used to identify significant changes among the treatments at the 5% threshold with the package "agricolae". A generalized linear model (glm) was used to determine the effect of root biomass on the soil $\delta^{13}\text{C}$ value.

3. Results

3.1. Soil C response to tree species

We did not find significant effects of the nursery substrate on the soil C content, $\delta^{13}\text{C}$ value, total N content or available P content (P-value > 0.05) (Figure 13). Likewise, these soil parameters were not significantly impacted by rice presence (RP) or soil depth (SD), as revealed by three-way ANOVA (Table 8). In contrast, agroforestry trees (AT) strongly affected the soil C content (P-value<0.001) and the soil $\delta^{13}\text{C}$ value (P-value<0.001). Irrespective of rice presence and soil depth, tree presence (TP) led to an increase of +3.79% in soil C content (Figure 13. A) and a decrease of -0.27 ‰ in the $\delta^{13}\text{C}$ value compared to the control soil (Figure 13.C). Similarly, we noticed that this trend was specifically different according to tree species identity (TS). We found high contrasts between *E. robusta* and *C. clementina* in their ability to impact the soil $\delta^{13}\text{C}$ value (P-value=0.02), even if their soil C content was not significantly different (P-value=0.081). Contrasts were also observed between *E. robusta* and *C. arabica* in terms of their ability to affect the soil $\delta^{13}\text{C}$ value (P-value=0.027). There was no contrast between *C. clementina* and *C. arabica* in the soil C response (Table 8).

Table 8. Three-way ANOVA statistics (*F*-value) on soil parameters after one year of the experiment according to agroforestry tree (AT), rice presence (RP) and soil depth (SD).

Factors	Variables	C	$\delta^{13}\text{C}$	N	P	C/N	C/P	pH
	Units	g.kg^{-1}	‰	g.kg^{-1}	mg.kg^{-1}	ratio	ratio	
	Df	F	F	F	F	F	F	F
AT	1	6.89***	8.50***	4.07*	4.27**	13.80***	8.73***	0.43
TP: CtvsOT	3	17.79***	14.9***	3.01	0.21	9.81**	0.60	0.27
TS: EuvsCi	1	0.05	5.47*	7.77**	8.93**	15.65***	14.08***	0.95
TS: EuvsCo	1	2.55	5.11*	1.45	3.66	15.93***	10.62**	0.07
TS: CivsCo	1	2.47	0.062	0.12	9.94**	2.18	0.60	0.52
RP	1	0.00	2.62	0.30	0.88	1.05	0.48	0.14
SD	1	1.20	3.88	3.12	8.29**	1.55	14.30***	81.34***
AT:RP	3	1.26	1.14	0.94	3.96*	1.35	3.69*	0.74
TP:RP:CtvsO								
T	1	1.54	1.28	0.06	0.00	1.53	0.094	1.76
TS:RP: EuvsCi	1	1.86	2.13	2.63	4.97*	0.48	6.63*	0.33
TS:								
RP:EuvsCo	1	0.37	0.00	0.14	6.92*	2.03	4.32*	0.14
TS:RP: CivsCo	1	1.54	1.47	0.06	1.35	1.53	0.26	0.37
AT:SD	3	1.93	1.95	1.22	1.29	0.19	1.17	1.72
SD:RP	1	0.99	0.19	0.18	2.08	3.55	4.80*	0.54
AT:RP:SD	3	0.19	0.77	0.04	2.36	0.50	1.09	0.98

*Significance codes: ***P-value < 0.001; **P-value < 0.01; *P-value < 0.05. Contrasts such as tree presence TP and tree species identity TS were added within this three-way ANOVA for the AT factor in order to separate the effect of trees presence and trees identity. Interactions between factors that were not significant were omitted in order to lighten the table.*

Planting *E. robusta* led to an increase of +4.2% in soil C content and a depletion of -3.8% (-0.44 ‰) in soil $\delta^{13}\text{C}$ value compared to the control. The C derived from *E. robusta* was approximately 0.43 g.kg⁻¹, namely, 2% of the total soil C content (Figure 14). *C. clementina* had the same effects on the soil $\delta^{13}\text{C}$ value and the soil C content; it increased the soil C content by +4% and led to a decrease of -2.01‰ in the $\delta^{13}\text{C}$ value, but its tree-derived C was lower than that of *E. robusta* (Figure 14). The C derived from *C. clementina* was approximately 0.03 g.kg⁻¹, namely, 0.12% of the soil total C content. Planting *C. arabica* led to slight but not significant increases in soil C and total N contents, with gains of 2.72% and 2.54%, respectively (Figure 13.A, B). However, the nonsignificant difference in the soil $\delta^{13}\text{C}$ value prevented us from calculating the tree-derived C from this tree species.

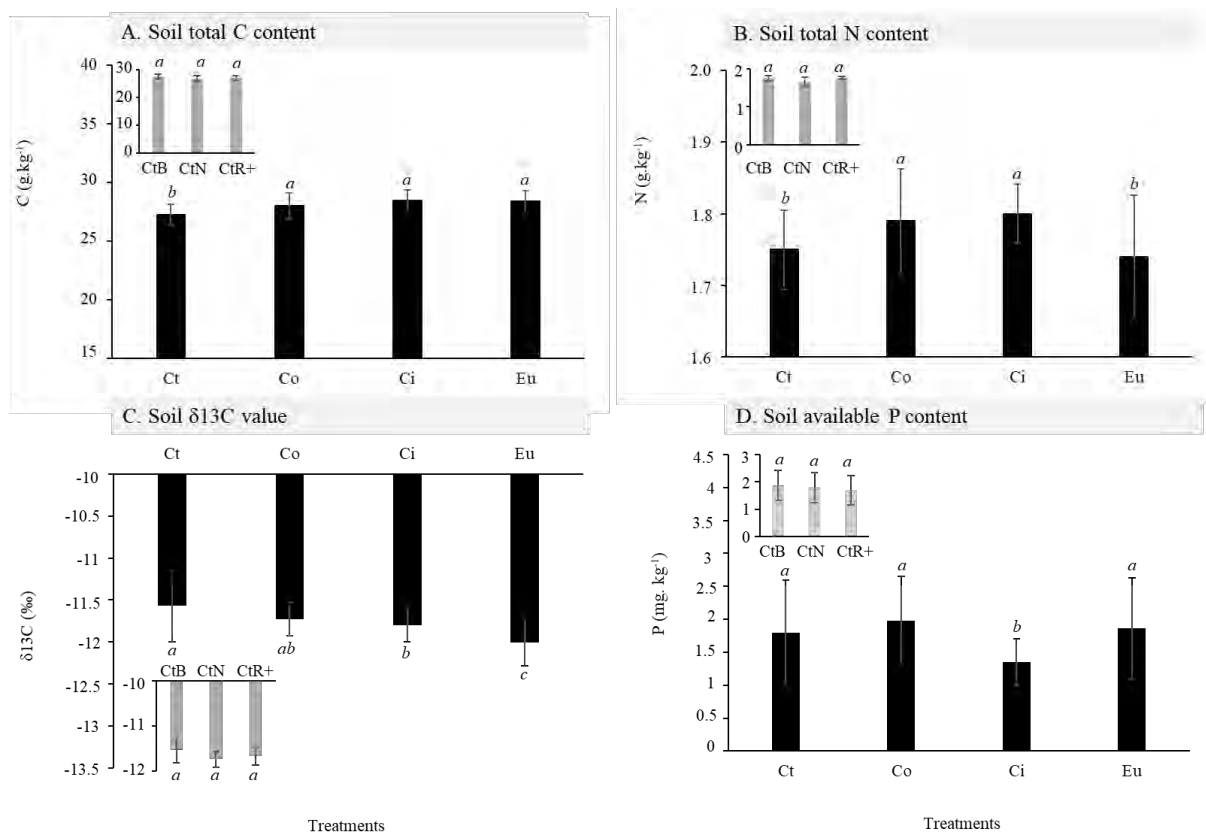


Figure 13 : Soil C (A) and N content (B), C isotopic signature ($\delta^{13}\text{C}$) (C), and available P content (D) according to the treatments (control and the three tree species). Letters (a and b) indicate significant differences between tree species according to one-way ANOVA. Legend: Control treatments (Ct), Coffea arabica tree (Co), Citrus clementina (Ci), Eucalyptus robusta (Eu), Control with bare soil (CtB), Control including nursery potting substrate (CtN), Control with rice (CtR+).

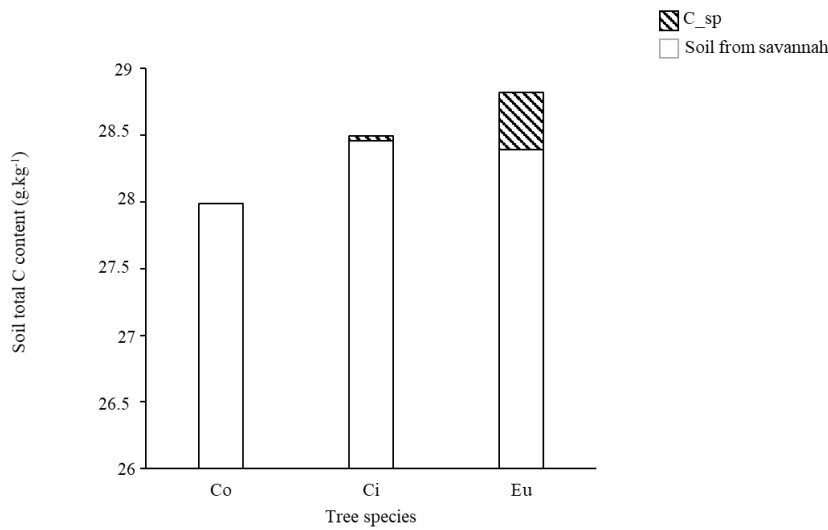


Figure 14: Newly incorporated C derived from agroforestry tree species (C_{sp}).

3.2. Soil nutrient content as a function of tree species identity

We did not find significant differences in soil total N and soil available P contents in the *E. robusta* and *C. arabica* treatments compared to the control (CtB). In contrast, *C. clementina* highly impacted soil nutrients, with an increase of +2.96% in soil total N content and a 30% decrease in soil available P content compared to *E. robusta* and *C. arabica* (Figure 13.B,D). In parallel with this decrease in available P, a lower pH value (4.69) was observed with *C. clementina*.

3.3. Plant parameters as a function of tree species identity

We observed highly significant effects of tree species on plant parameters, irrespective of rice presence (Table 9).

Table 9. Two-way ANOVA statistics (F-value) with tree species (TS) and rice presence (RP) as a factor on plant parameters.

Factors	Variables				
	Tree shoot biomass dry g	Tree root biomass dry g	Rice shoot biomass dry g	Rice root biomass dry g	Total biomass dry g
TS	25.12***	50.76 ***	3.94*	4.09**	30.45 ***
RP	0.02	0.47	//	//	0.84
Interaction	0.03	0.11	//	//	0.99

Significance codes: ***P-value < 0.001; **P-value < 0.01; *P-value < 0.05

Tree biomass varied markedly among species (P -value <0.001). The highest shoot and root biomass values were found for *E. robusta*, followed by *C. arabica* and *C. clementina* (Figure 16.A). Likewise, the rice biomass varied according to the presence and identity of trees (P -value <0.0001). Rice shoot and root biomasses were lower under *E. robusta* than under *C. clementina* and *C. arabica* (Figure 16.B). Similar patterns were found for plant height (Support Information 2).

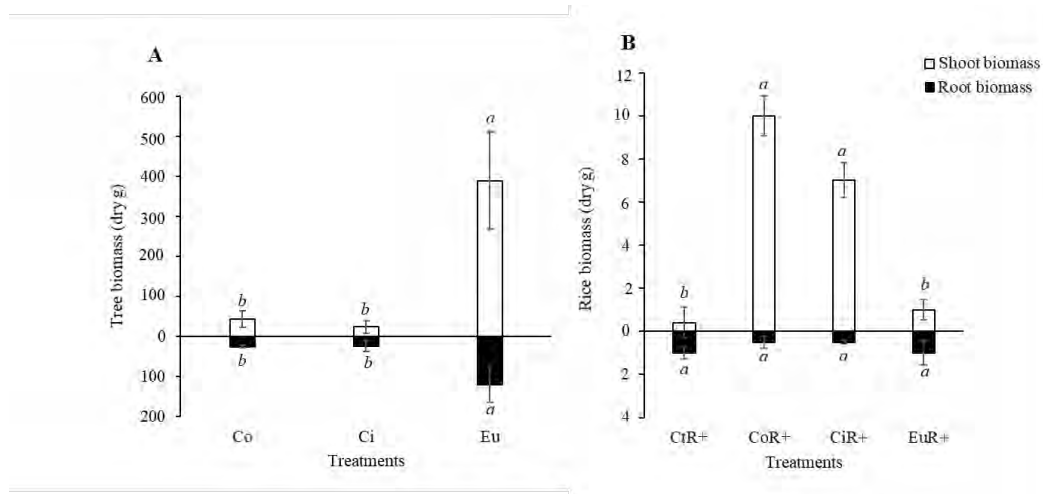


Figure 15 : Shoot and root biomasses in dry g for agroforestry trees (A) and rice (B) according to treatments. Letters (a and b) indicate significant differences according to one-way ANOVA of plant biomass between treatments.

At the end of the experiment, the soil $\delta^{13}\text{C}$ value was significantly explained by tree root biomass ($R^2 = 0.61$, P -value <0.001) (Figure 16.A). This trend was significant for *E. robusta* ($R^2 = 0.76$; slope = -0.009; P -value = 0.019) and for *C. arabica* ($R^2 = 0.76$; slope = -0.026; P -value = 0.009) but not for *C. clementina* (Figure 16.B).

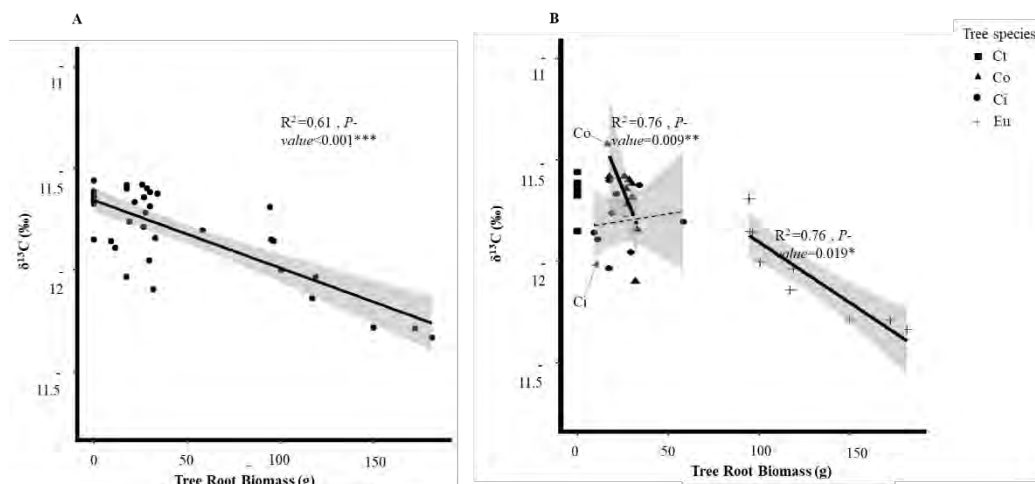


Figure 16 : Relationship between tree root biomass and soil C isotopic signature ($\delta^{13}\text{C}$) for all soil samples (A) and for each tree species (B)

4. Discussion

4.1. *Eucalyptus robusta* strongly affects soil C content irrespective of rice presence

Consistent with our first hypothesis, trees strongly enhanced the soil C content irrespective of the presence of rice. However, the tree-derived C in soil C was different according to tree species identity. The tree species with high tree-derived C was *E. robusta*, followed by *C. clementina*. The former incorporated approximately 0.43 g C kg⁻¹, which represented 148 g C m⁻² during the one-year experiment. The latter incorporated approximately 0.03 g C kg⁻¹, which represented 12 g C m⁻². The high C-sequestration abilities of *E. robusta* were previously observed in Congo over stand rotation from young (6 months) to old (up to 172 months) plantations (Epron et al., 2009). This study showed that after six months of plant growth alone, Eucalyptus-derived C was 60 g C m⁻². Tree species choice provides options in agroforestry systems to benefit a great soil carbon stock.

4.2. Root biomass drives tree-driven soil C sequestration

Consistent with our second hypothesis, the variable abilities of trees in soil C sequestration were mostly explained by differences in root biomass. Providing C into the soil by roots through root exudation and decomposition has been defined as one of the most effective methods (Jobbágy and Jackson, 2000; Rothe et al., 2002). Our results also highlighted the strong correlation between tree root biomass and the soil isotopic C value. Lower soil $\delta^{13}\text{C}$ values were observed with higher tree root biomasses (Figure 16). Higher root biomass-fueled higher newly tree-derived C inputs in the soil. This can explain the high potentiality of *E. robusta*, a fast-growing tree with symmetrical vertical growth (Christina et al., 2011), to transfer C in the soil in our study. This tree species provided approximately 1.22 g C m⁻² per dry g of root biomass against 0.5 g C m⁻² per dry g of root biomass for *C. Clementina*. In parallel, the lower capacity of *C. arabica* to sequester C to the soil can also be attributed to their lower root biomass. Differences among tree species may also be attributable to the rate of transfer of C from leaf litter to soil (Paul et al., 2002). However, this hypothesis is unlikely in our case, as during the first year of the plantation, there was relatively little input of C from aboveground parts due to the low rate of litterfall.

4.3. C: nutrient coupling in tree species-specific effects on soil C sequestration

It is known that some root traits, such as root exudation, are related to plant nutrient uptake strategies (De Deyn et al., 2008). Tree species develop dissimilar root systems due to their nutrient requirements, with contrasting consequences on soil volume exploration by roots (Bardgett et al., 2014). Our third hypothesis was not validated, as rice presence did not

significantly affect the soil C content or soil $\delta^{13}\text{C}$ value. It is thus unlikely that the presence of rice induced competition for nutrients with cascading effects on C transfer by trees. However, in response to low pH and aluminium (Al) toxicity in acidic soil such as Ferralsols, plants develop an Al tolerance mechanism that consists of the release of organic acid (OA) anions (viz. malate, citrate and oxalate) by roots (Zhang et al., 2019). Many Al-tolerant plant species, including Citrus, were observed to release high levels of malate and citrate under Al stress (Yang et al., 2011). These anions compete with orthophosphate ions for ligand exchange reactions in soil solution. The decrease in soil available P under C. Clementina may be attributed to soil acidification under this tree species, which is known to secrete organic anions (Hinsinger, 2001). Indeed, the influence of plant roots on P availability has been related to local changes in pH through the secretion of organic anions or the secretion of phosphatase enzymes that can mobilize P (Henintsoa et al., 2017). Although the lowest pH value (4.69) was observed with C. clementina, the difference with the other treatments was not significant. We can speculate that this pH decrease may be mainly due to high organic anion secretion, such as citrate, by Citrus tree roots. High organic anions can also be related to the higher soil C content with this tree species. To conclude, in Ferralsol, we cannot fully reject the hypothesis that tree-driven soil C sequestration is linked to nutrient availability and plant nutrient acquisition strategies.

4.4. Limits and perspectives

To decipher the tree species-specific effects on soil C sequestration in annual crop-tree associations, we used a mesocosm approach. This choice was motivated to limit as many confounding effects as possible as can be found in the field. The causal relationships between species identity and soil C sequestration can be assessed with more reliable data. However, the mesocosm approach deviates from field conditions to a certain degree. For instance, weeds were removed in our experiment, and NPK fertilizer was applied to ensure the survival of the seedlings. Additionally, the experimental conditions limited the soil volume and, thus, the duration of the experiment. To fully understand the dynamics of soil C sequestration in agroforestry plots implemented by smallholders, further works should be performed at the field scale to evaluate the stability of C derived from different tree species. Our results provide new data that can improve both our understanding of soil-plant interactions in mixed systems and agronomic models contributing to agronomic innovation in Madagascar or elsewhere in the world. Agroforestry in controlled conditions is an original method to decipher the ecological

process involved in annual crop-tree association with no confounding effects. We can thus assess the causal relationships between species identity and soil C sequestration, while field studies may provide some confusing effects, such as variable organic amendments. However, the mesocosm approach obviously deviates to a certain degree from field conditions. For instance, the weeds have been removed in our experiment, and NPK fertilizer was applied to ensure the survival of the seedlings. Also, the experimental conditions limited the soil volume and thus the duration of the experiment. Nevertheless, we believe that this experimental approach, the limits mentioned above, provide new results that can both improve our understanding of soil-plant interactions in mixed systems and feed agronomic models participating in agronomic innovation in Madagascar or elsewhere in the world.

5. Conclusion

Agroforestry systems that associate trees and annual crop are believed to have a higher potential to transfer C in soils compared to field crops. This assumption is based on the fact that trees incorporation would result in a greater soil C sequestration. The result of our study confirmed that soil C was enhanced by tree presence and subsequently modulated by tree species. Two of our hypothesis formulated in the introduction were validated: (i) tree species differ in their ability to improve soil C stocks, (ii) these variable abilities of trees in soil C sequestration depend on root biomass. The third hypothesis was partially refuted: (iii) rice associated with trees could influence this variability of tree specific effect on soil C. However, we do not exclude that this C sequestration should be influenced by other factors such as soil C quality and its stability along time or trees density in field scale. To fully understand the dynamics of soil C sequestration in agroforestry plot in such an agroforestry context implemented by smallholders, further works should be done at field scale on the stability of C derived from tree species and at field scale the study of variation of plant parameters such as rice yield, biological parameters and soil parameters according to the distance from tree and trees density.

Acknowledgements

This study was supported by the project SOCA (Soil Organic Carbon for Africa), funded by the Climate Initiative of the BNP Paribas Foundation. The SOCA project also granted a PhD fellowship to Angelina Rasoarinaivo. We thank analytical platforms such as "L2 laboratory, UMR Eco et Sols Montpellier" and "Atelier des Isotopes Stables, UMR BPMP Montpellier", which supported us in soil analysis. We also thank the colleagues and students who collaborated with us on this work.

6. Synthèse des résultats de l'effet spécifique des arbres agroforestiers sur le carbone du sol

L'arbre joue un rôle important dans la séquestration du carbone (C) dans le sol par les systèmes agroforestiers. Pourtant, nous savons très peu sur la part de cette contribution de l'arbre dans la quantité de carbone dans le sol. La quantité de carbone du sol provenant de l'arbre pourrait varier selon les espèces d'arbres. Dans ce chapitre, nous avons quantifié la teneur en C du sol provenant de trois principales espèces d'arbres : *Eucalyptus robusta*, *Coffea arabica* et *Citrus clementina*. Ce sont les espèces d'arbres les plus utilisés en agroforesterie dans les Hautes Terres de Madagascar. Une expérimentation en mésocosme a été réalisée où des jeunes plants de ces espèces d'arbres ont été plantés avec ou sans riz pluvial dans un Ferralsol. L'abondance naturelle en ^{13}C dans le sol a été mesurée pour évaluer les C d'origine arboricole et rizicole. Un an après la plantation, l'*Eucalyptus robusta* était l'espèce affichant les valeurs de C-derivés des arbres les plus élevées, avec 148 g de C.m⁻² en moyenne. En revanche, *Citrus clementina* a incorporé dans le sol seulement 12 g C.m⁻². Nous n'avons pas observé de contribution importante de *Coffea arabica* au stock de C du sol. La présence de riz n'a pas affecté la croissance des arbres ni à leur capacité à séquestrer du C dans le sol. La différence de séquestration du C dans le sol entre les espèces d'arbres a été fortement expliquée par la différence en termes de biomasse racinaires. La biomasse des racines des arbres étant significativement corrélée avec le $\delta^{13}\text{C}$ du sol. Cet essai expérimental a mis en évidence la différence de contribution des espèces d'arbres aux processus écologiques tels que la séquestration du C dans le sol. D'autres études tenant compte de la densité des arbres et de l'arrangement spatial des arbres devraient être menées au champ afin de mieux comprendre les contributions des arbres à la séquestration du C dans le sol dans les systèmes agroforestiers.

Chapitre 4. VARIABILITE SPATIALE DU CARBONE, DE NUTRIMENTS ET DE BIOTA DU SOL EN FONCTION DE LA DISTANCE A L'ARBRE DANS LES SYSTEMES INTERCALAIRES TROPICAUX

Préface

Le précédent chapitre a mis en évidence la variabilité des teneurs en C et en nutriments du sol en fonction de l'identité de l'espèce d'arbre agroforestier. Une forte potentialité à séquestrer du carbone dans le sol a été constatée au niveau de l'association agroforestière à base d'*Eucalyptus robusta*. Afin d'approfondir, l'étude de l'interaction entre les paramètres du sol, l'arbre et la culture du riz dans cette association, ce quatrième et dernier chapitre du livre aborde l'étude de la variabilité spatiale intra-parcellaire du C, N et P disponible ainsi que de la communauté biologique du sol en fonction de la distance à l'arbre.



Ce chapitre a été rédigé sous forme d'article en anglais au vu d'une soumission à une revue scientifique internationale.

Spatial variability of soil carbon, nutrient, and biota with distance from trees in a tropical intercropping system

Abstract

Agroforestry consists of growing annual crops with trees in the same area following regular structure as observed in alley-cropping or irregular structure as usually practiced in tropical intercropping systems. Spatial variation in soil carbon and biological communities was well defined in agroforestry with regular structure. However, little is known about the impact of agroforestry with an irregular structure on these soil parameters. Previous studies (in chapter 2 and 3), revealed high potential to sequester soil C of Eucalyptus intercropping system which is a practice with irregular spatial structure. To better understand interaction between trees, crops and soil in these specific systems, this study aims to assess how soil organic carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and biota varied according to distance from the trees. We characterized soil properties at varying distances from different individual eucalypt trees. In the first 10 cm, the soil C, N, and P increased with increasing distance from the trees. The pattern was reversed for the two deeper soil layers (10-20 and 20-30 cm). Decreasing trends with distance from trees were also found for the abundance of macrofauna and nematode in the soil. The proximity of the trees induces low biomass of rice. The spatial heterogeneity in these soil physicochemical and biological parameters due to the presence of trees should be carefully considered in soil sampling design in the agroforestry field.

1. Introduction

Agroforestry is a land management approach that received increasing recognition during the past three decades by its soil carbon (C) sequestration potential (Nair et al., 2009). Agroforestry systems (AF) are very common in developing countries. In developed countries, where a massive loss of tree cover has resulted from the intensification and specialization of agriculture, AF is being reconsidered and spreading (Dupraz and Liagre, 2011). There is a diversity of agroforestry practices, ranging from complex associations found in home gardens, multi strata systems, or agroforests to simple systems such as alley cropping or windbreaks (Cardinael et al., 2020). Agroforestry includes practices with regular (alley cropping, boundary planting) and dispersed (home garden, intercropping) spatial structure according to the way trees and crops are combined (Sinclair, 1999).

Agroforestry structure and components influence both the quality and the quantity of the vegetal biomass returned to the soil. Higher soil C sequestration was associated with high species richness, and high-density stands agroforestry (Ramachandran Nair et al., 2010; Saha et al., 2009). The impact of alley-cropping systems on soil C and biota was well established and revealed high positive tree influence in tree row compared to inter-row (Cardinael et al., 2019, 2015b). The soil under the rows of trees presented additional soil C compared to soil in inter-row (Cardinael et al., 2017b). However, tree influence on the spatial distribution of soil parameters should be quite different in agroforestry with irregular structures compared to alley cropping.

Distance between trees could create a spatial heterogeneity of soil C stocks and biota within an agroforestry field (Bambrick et al., 2010). This spatial variation in soil C stock is likely to be driven by the amount of litterfall which may be more or less equally distributed across the width of the crop alley (Peichl et al., 2006). There is also a potential effect of the root system as tree root length density declined with increasing distances from a tree (Odhiambo et al., 2001). Carbon inputs were expected to be higher close to the tree (Zinke, 1962), but this trend is not consistent among studies. Some studies showed significantly higher soil C at 1 m and 2 m from trees compared to the further distance at the middle of the crop alley (Howlett et al., 2011; Thevathasan and Gordon, 2004). But more recent studies indicated no significant difference in soil C content with distance from the tree (Cardinael et al., 2015b; Takimoto et al., 2009).

Here, at a plot scale, we aimed at assessing the spatial variation in soil parameters according to the distance from the trees in a Eucalypt and rice intercropping field with high tree density and dispersed spatial structure. This agroforestry type is mainly practised in the highlands of Madagascar with different tree densities. We hypothesized that there is a decrease in the soil C, N and available P contents and soil biota according to the distance from trees. To understand tree-crop interaction for the nutrient requirement was measured rice biomass at the half distance between two neighbour trees and at the closest point to the tree. We suggested that rice biomass variation follows similar trends as soil parameters.

2. Materials and methods

2.1. Study site

The agroforestry plot was located at Imerintsiatosika (18°59'00" S; 49°19'00" E, 1300 asl) in the Highlands of Madagascar. The soil was a Ferralsol according to the FAO classification (FAO/UNESCO, 1947). The climate of the region is tropical altitude with two seasons: a dry and cool period lasting from April to October and a warm and humid period from November to March (ONE, 2007). The mean annual temperature is 21.7°C. The mean annual precipitation is 112.2 mm (based on climate data of 1981 to 2010). In this region, 80% of the land is intended for rainfed agriculture, such as rainfed rice and agroforestry (Rakotovao et al., 2020b).

2.2. Description of agroforestry field

The study was conducted in a Eucalyptus intercropping field resulting from the introduction of rainfed rice in a *Eucalyptus robusta* plantation at a density of 1100 trees ha⁻¹. The study was carried out in 5 years Eucalyptus intercropping system. However, the Eucalyptus plantation is an old-coppice stand (more than 50 years) that may be generated by spontaneous generation. It resulted from the natural dissemination of seed of the Eucalyptus coppices planted at the top of the slopes by gravity, allowing an advance of the plants in the direction of the slope. Indeed, the plot is located on the slope. Trees were therefore dispersed inside the plot with various spacings. Farmers planted rice between trees. The spontaneous generation and the lack of silvicultural treatments of the Eucalyptus plantation (stools have not been renewed, all stems (shoots) are left after coppicing for natural thinning) induced irregular spatial structures of the agroforestry field. To ensure crop production, farmers brought an average of 5 t ha⁻¹yr⁻¹ of manure to rainfed crops. Rice yield was estimated to around 2 t ha⁻¹yr⁻¹.

2.3. Soil sampling design

Soil sampling was designed to allow the assessment of the influence of distance from the trees on soil parameters. We selected ten trees (coded “alpha”) at various positions in the field to cover a large area representative of the total area of the field. For each of the ten trees, we have identified the closest neighbour tree, and a linear transect has been marked between the two trees. We thus obtained ten linear transects ranging from 2.5 to 3.8 m in length. Seven sampling points symmetrically distributed along the transect were established: one sampling point at half distance, two sampling points at the quarter, half-quarter distances, and close to the tree at about 20 cm from each tree. Seventy sampling points were therefore defined. (Figure 17). Sampling points were thus located at varying distances from the main tree. Three depth ranges were considered: 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30cm.

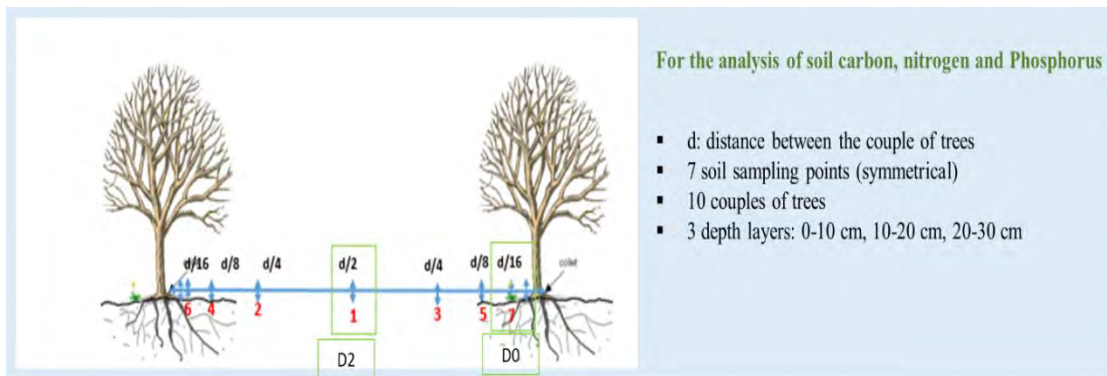


Figure 17: Soil sampling protocol for assessing the influence of distance from the tree on soil parameters

2.4. Soil chemical analyses

Total organic C, nitrogen (N), and available phosphorus (P) were measured for all soil layers and soil sampling points. First, the soil was finely grounded (< 0.2 mm), and its C and N contents were analyzed by dry combustion in a CHN analyzer (Flash 2000 series, CHNS/O 122 Analyzer Thermo Scientific, IRCOF, France). The available P content of the soil was measured using an anion exchange resin (Saggar et al., 1990).

2.5. Soil biological analysis

Soil sampling for the biological study was carried out using Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) method (Anderson and Ingram, 1993). TSBF consists of sampling a soil monolith of 25 x 25 cm to hand sort macrofauna individuals (invertebrates whose diameter is greater than 2 mm). Soil monoliths were sampled at two distances: at a half distance (D2) and at the point closest to the tree (D0) (Figure 17). Two depth ranges were considered: 0-10 cm and 10-20 cm.

Macrofauna sampling was carried out in March 2019, before the end of the rainy season. Collected organisms were stored in 70% alcohol before being identified, counted, and weighed. Macrofauna identification was carried out in the laboratory using binocular loupe and using insect and arthropod determination keys (Lacroix, 2014). (Razafindrakoto et al., 2010) and (Csuzdi et al., 2012) were used for earthworm identification. The density of macrofauna was expressed in the number of individuals per m². The taxonomic richness was translated by the number of orders obtained. The macrofauna was classified into functional groups: geophagous, saprophagous, herbivorous, and predators (Turbé, 2010).

About one hundred grams of soil were also collected from the 0-10 cm soil monolith for nematode extraction. A tray-modified Baermann method was used for nematode extraction (Whitehead and Hemming, 1965). Nematode taxa were identified and classified into feeding types as omnivorous, bacterivorous, fungivorous, herbivorous, and predators (Yeates et al., 1993). Nematode herbivores were classified into alga feeders, root hair feeders, ectoparasites, semi-endoparasites, migratory endoparasites, and sedentary parasites (Yeates et al., 1993). According to life-strategy features, nematode taxa were also classified along with cp and pp scales (Bongers, 1999, 1990). Nematode total density, maturity index (MI), plant parasite index (PPI), structure index (SI), and enrichment index (EI) (Ferris et al., 2001) were calculated according to distance from trees.

2.5. Data collection for plant biomass analysis

Rice root and shoot of one rice pan were sampled with soil monoliths at the half distance (D2) and at the closest point to the tree (D0) in order to evaluate the influence of the distance from the tree on rice biomass. Rice root was extracted from soil monoliths after cutting the aerial compartment. Separated shoot and root biomasses were oven-dried at 60°C for 72 hours and weighed for obtaining dry biomasses. A complete inventory of the agroforestry plot was realized to collect dendrometric variables such as tree shoots diameter, height, and stump circumference. The Shoot mean diameter (SMD) and the shoot mean height (SMH) were calculated for each tree

2.6. Data analyses

The mixed-effects models with lmer function in lme4 package (Bates et al., 2014) were used. The individuals sampled trees were considered as a random effect. The soil organic C content, soil N content, and available P were then compared as a function of soil depth range (SDR), distance from the closest tree (DFT) and tree shoot mean diameter (SMD). Tree SMD was

considered as co-variable in the lmer model. Indeed, tree dendrometric characteristics such as SMD and shoot mean height (SMH) were evaluated to explain the heterogeneous distribution of soil elements. We found that these two co-variables were highly correlated positively ($R^2=0.88$, $p<0.001$), but SMD presented a lower variance inflation factor (VIF) value.

One-way ANOVA was used to test the effect of tree distance on the soil biological parameters (e.g. macrofauna density and biomass, nematodes indices) and rice biomass. More precisely, we compared the soil biota between the half distance (D2) and the nearest point from the tree (D0).

Non-metric multidimensional scaling (NMDS) was used for the analysis of macrofauna and nematode communities.

We used multi-levels pattern analyses (i.e. “multipatt” function from the “indicspecies” package) to identify the species associated with trees or rice (De Cáceres et al., 2010). The statistical analyses were performed using R version 4.0.2 (R Development Core Team, 2020) at a significance level of <0.05 .

3. Results

3.1. Soil carbon and nutrient spatial variation

Significant effects of soil depth and distance from trees were found for soil C content (p-value= 0.021), soil total N content (p-value= 0.005) and soil resin P (p-value= 0.043) (table 10).

Table 10: Soil C, N, and available P as a function of soil depth range (SDR), distance from the tree (DFT,) and shoot mean distance (SMD)

Variables	Unit	Factors						
		SDR	DFT	SMD	SDR:DFT	SDR:SMD	SDR:SMD	SDR:DFT:SMD
Total C content	g.kg ⁻¹	551.57***	1.15	22.03***	3.90*	0.41	4.46*	1.99
Total N content	g.kg ⁻¹	495.96***	1.4	13.23***	5.25**	1.23	5.33*	3.01
Resin P	mg.kg ⁻¹	16.44***	0	0.06	3.19*	2.61	0.95	2.4

All these elements decreased with soil depth. Soil total C content, total N content, and resin P increased significantly with increasing distance from tree in the 0-10 cm depth (Figure 18). In contrast, soil total C and N contents decreased at 10-20 cm and 20-30 cm depths with increasing distance from the tree. For available soil P, a stable trend was observed in 10-20 cm and in 20-30 cm soil depths.

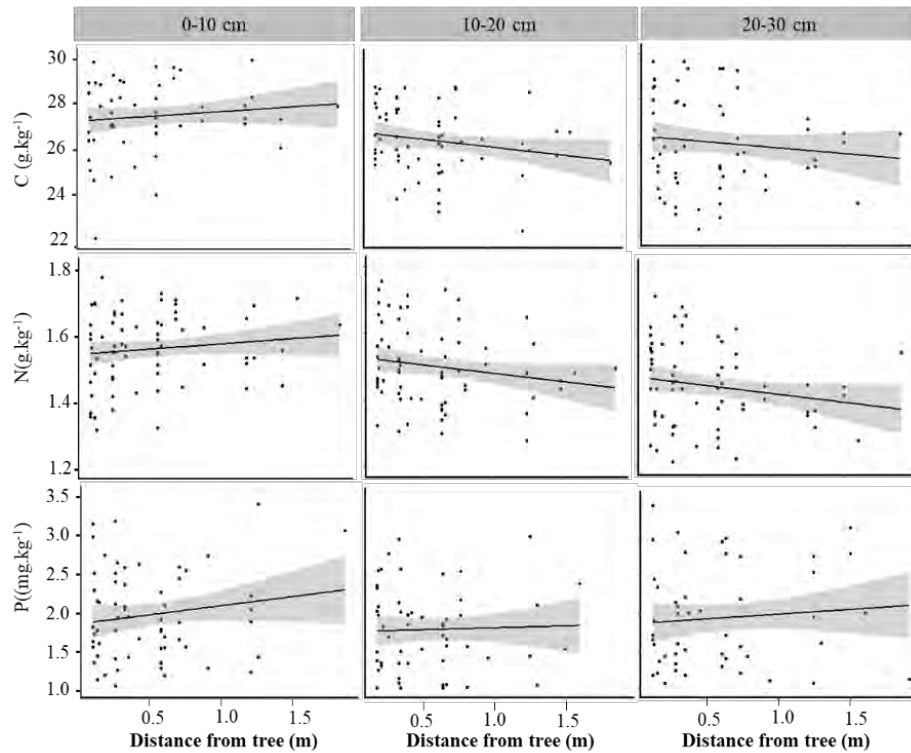


Figure 18: Soil carbon, nutrient, and resin P according to soil depth and the distance from the tree

Tree shoot means diameter (SMD) varied from 5 cm to 20 cm. The dominated SMD class was between 10 and 15 cm. We found that SMD significantly affected soil C content (p-value=0.035) and soil total N (p-value=0.021) (figure 19). Contents of C and N were thus higher under larger trees. In contrast, the distribution of available soil P was not affected by tree dimension (p value=0.06).

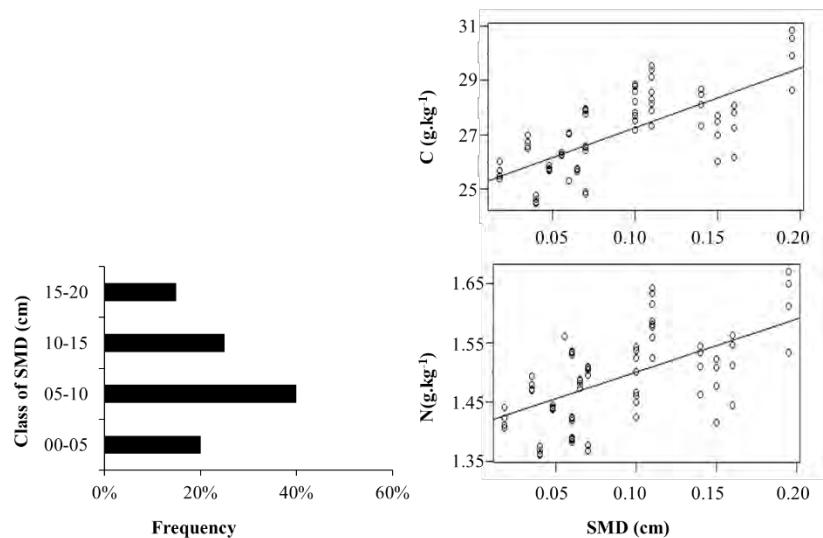


Figure 19: Influence of diameter on soil C and N content

3.2. Macrofauna spatial variation

We identified 16 species of macrofauna from 745 individuals collected. They were classified in 9 orders and in 4 functional groups (Supplementary information 1). There was no significant variation of macrofauna total density according to soil depth (p-value=0.7). However, NMDS analysis revealed a high macrofauna abundance at D0 than at D2 in the 0-20 cm depth (figure 20.A) (p-value= 0.043). Multilevel pattern analysis revealed that the macrofauna community in the soil close to the tree was especially characterized by a high density of Hymenoptera (p-value= 0.009). Insect species in the Hymenoptera order included *Nylanderia*, *Monomorium*, *Tetramorium*, and *Camponotus*. The Macrofauna community at half distance between trees was characterized by a high density of earthworms (p-value= 0.02) (Supplementary information 2). Oligochaete order included two species of earthworms, i.e., *Pontoscolex corethrurus* and *Dichogaster bolau*. *P. corethrurus* is a medium-size endogeic geophagous earthworm, and *D. bolau* is a small epigeic earthworm.

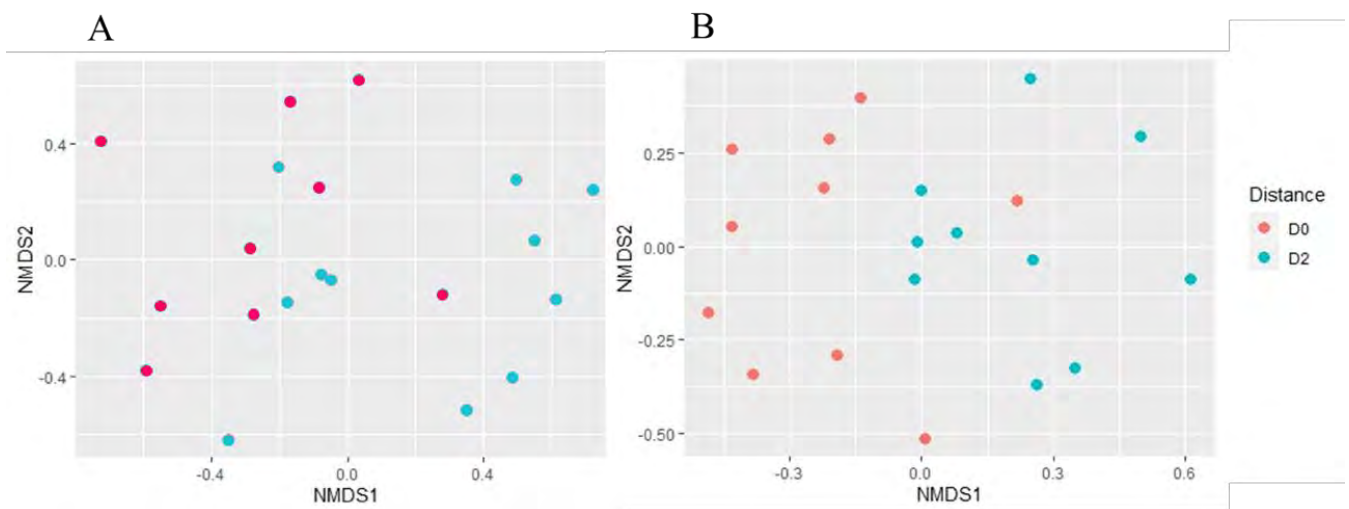


Figure 20: Result of NMDS on the absolute abundance of macrofauna (A) and nematode taxa (B)

The biomass of geophagous macrofauna (earthworms) was significantly higher than the biomass of all other functional groups (p-value <0.001). It increased significantly with distance from the sampled tree. In contrast, there was no significant effect of distance on the biomass of phytophagous, saprophagous and predator (Figure 21).

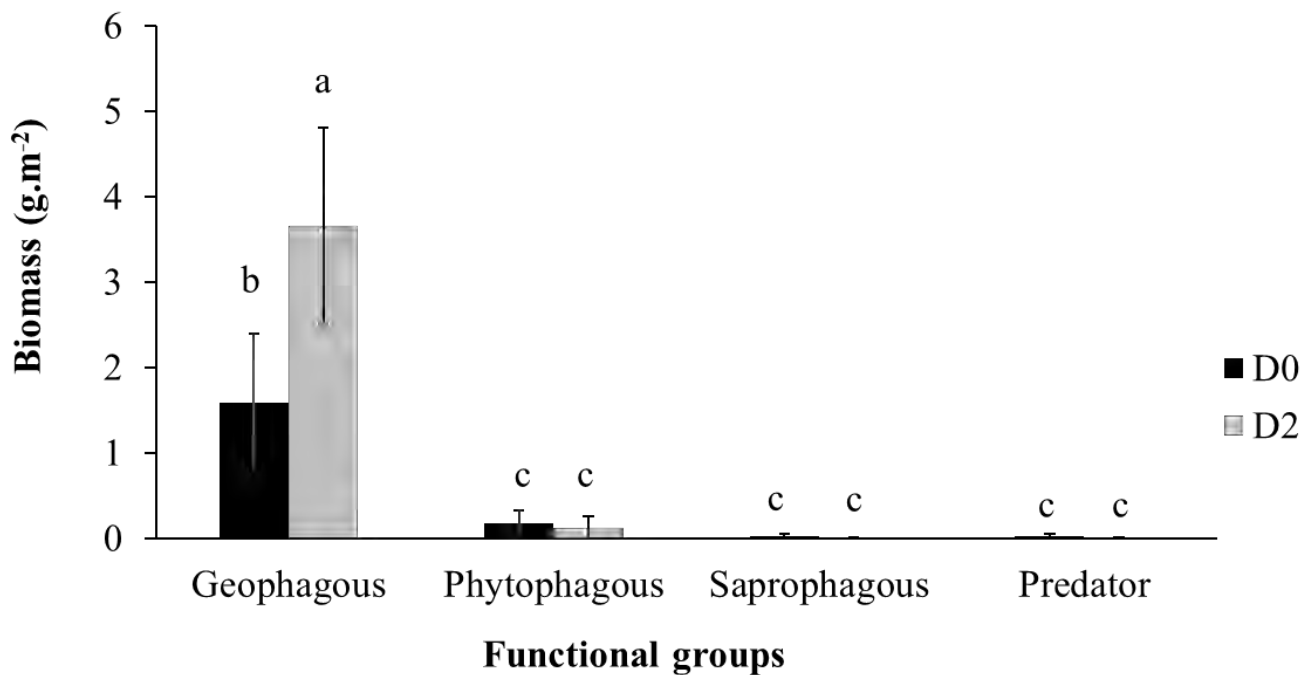


Figure 21: Distribution of functional groups of macrofauna according to distance from the tree

3.3. Nematode spatial variation

We found 24 taxa of nematodes divided into five feeding groups: herbivores, fungivores, bacterivores, predators, and omnivores (Supplementary information 3). NMDS analysis revealed a higher nematode abundance close to the tree than at a half distance between two trees (Figure 20.B). The *Qudsianematidae* was the main family in the community at the half distance (p-value=0.001), while *Pratylenchus* was the main taxa of the community close to the tree (p-value= 0.014).

Nematode feeding groups were also affected by the distance to the tree. The high density of *Pratylenchus* close to the tree was associated with a higher rate of migratory endoparasite at this location (30.6%) than at the half distance to the tree (6.9%). The same trend was observed for all herbivores, with 34.3% close to the tree and 23.3% at half distance. The opposite trend was observed for omnivores nematodes, with 4.6% close to the tree and 17.1% at the half distance (Figure 22).

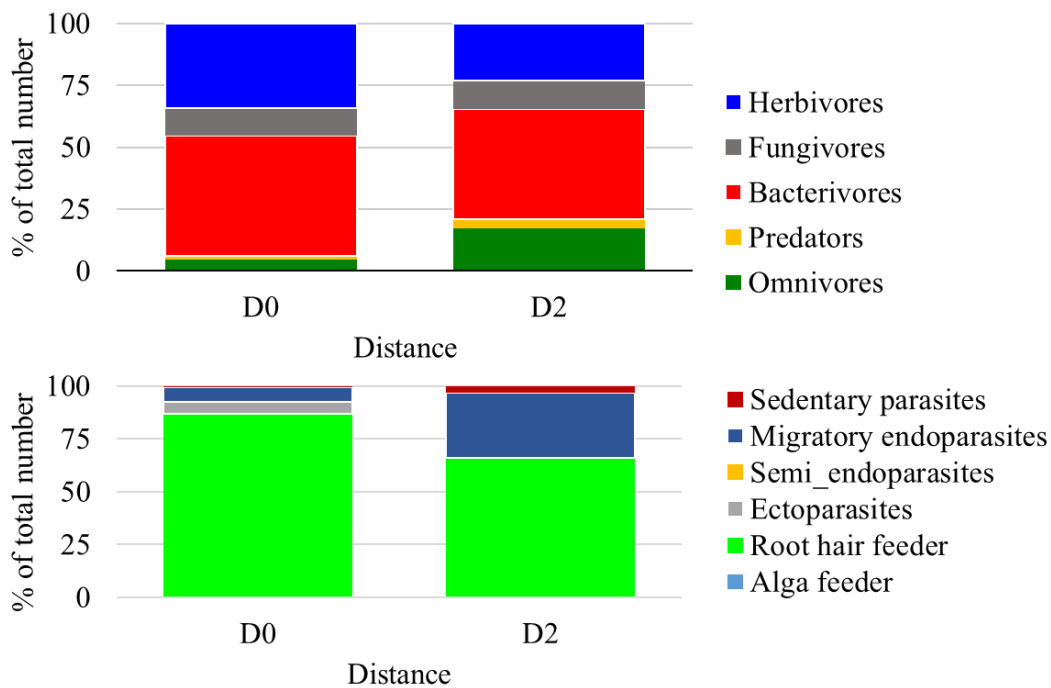


Figure 22: Feeding type composition of nematode assemblage and herbivore nematode assemblage

Some indices of nematode structure were significantly affected by the distance to the trees (Figure 23). The Maturity Index (MI) of the nematode community decreased according to the distance from the trees (P-value=0.0158 *). Conversely, the PPI index increased with the distance from the tree (P-value=0.0145 *).

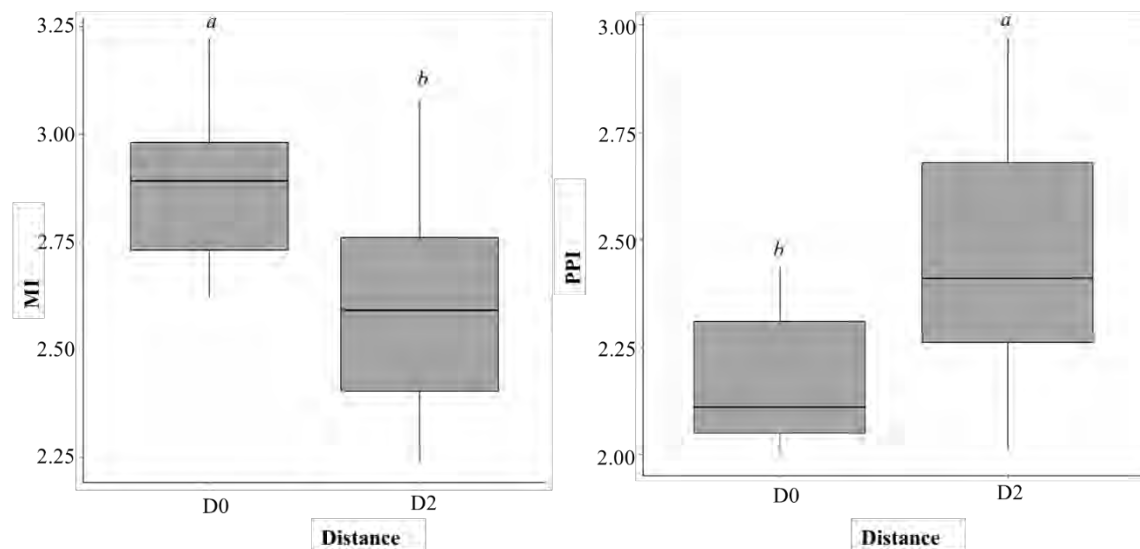


Figure 23: Nematode index according to distance from the tree

3.4. Spatial variation in rice biomass

Rice biomass was affected by the distance from the sampled tree (p-value <0.001). Higher shoot and root biomasses were observed for rice at a half distance from the sampled tree (Figure 24). Rice biomass was also affected by tree dimension (p-value <0.001) as higher biomasses were observed according to larger trees.

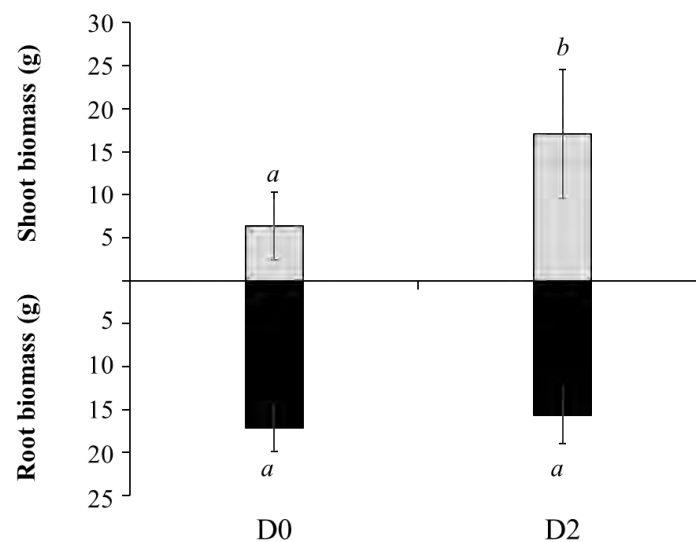


Figure 24: Final rice shoot and root biomass according to distance from the trees. Letters (*a* and *b*) indicate significant differences according to one-way ANOVA of rice biomass between the two locations.

4. Discussions

4.1. Soil C and N contents decreased with increasing distance from trees

Consistent with our first hypothesis, a general decreasing trend was found for soil C and N contents in the 10-30 cm of soil. However, a slight increase of these parameters was observed in the top 10 cm of soil with increasing distance from the trees.

This decreasing pattern can be explained by the decreasing influence of the tree at varying distances from the tree canopy and crop area. Indeed, the difference in total soil C in tree-crop association without fertilizer input was fully explained by tree contribution (Bayala et al., 2007). The tree has maximum influence on soil property under the crown canopy, and the influence decreases outward from the tree. The major reason for this pattern is the difference between the relative leaf litter input at varying distances from the tree trunk: more leaf litterfall was observed near the tree resulting in much carbon input at this location (Peichl et al., 2006). In comparison,

the absence or the low input of litter in the opening area (at half distance between trees) provided low carbon input at this location.

The unexpected increasing trend with distance from the trees in the upper soil layer (0-10 cm) may be explained by the impact of organic matter input (mostly animal manure) in the rice crop area to support rice yield. The low C and N under tree canopy in the first 10 cm may also be due to the impact of bark litter, especially eucalypt bark litter which is usually very acidic and results in acidic soil, low in base, in carbon, and nutrient (Zinke, 1962).

4.2. Macrofauna community changes with distance from the trees

Soil invertebrates carry out an essential role in soil functioning, specifically soil organic matter decomposition and soil structure regulation (Blanchart et al., 1997; Lavelle et al., 2006, 1997). The land management change is expected to affect the macrofauna community (Rakotomanga et al., 2016). Our result highlighted that macrofauna species distribution and macrofauna density were modified by the distance from the trees. Close to the tree was characterized by a high absolute abundance of macrofauna and specifically by a high density of ants. It may be due to the shading effect of the tree canopy, the lower soil temperature, the higher soil moisture (Tian et al., 2000), the lower level of soil disturbance (Hauser et al., 1998), and the higher amount of food, i.e., organic matter (Frouz et al., 2009) under the tree canopy. However, while earthworm density was expected to be higher under trees canopy (Cardinael et al., 2019), we were surprised by the high density of earthworms at half distance from the trees. It may be due to the allelopathic effect of Eucalyptus trees, mainly due to their high phenolic content of leaf litter under the tree canopy (Bernhard-Reversat, 1999). Moreover, a negative relationship between Hymenoptera and earthworms could indicate an antagonistic effect at D0 (Huerta and van der Wal, 2012). Furthermore, the high density of endogenous earthworms at D2 may be related to the influence of organic matter input in rice crop areas in the top 10cm of the soil. Indeed, (Guo et al., 2016) showed a positive correlation between cattle manure input and earthworm density.

4.3. Nematode community changes with distance from the trees

Our results showed a change in nematode taxa distribution and taxa densities with distance from the trees. Two great groups of soil nematodes can be considered free-living and plant parasites because of the different ways in which their population could change. The second group is linked to the occurrence of the host plant, although these plants are not always known. In this study, we found that free-living nematodes, especially omnivorous, were abundant at D0 than

at D2. It may be explained by the general decrease trend of soil carbon content with distance from the trees. An increase of nematode number with increasing carbon content is generally reported (Yeates et al., 1993). Consequently, the decrease of nematode abundance may be due to decreasing carbon content. This relationship between nematode community and carbon dynamic following the distance from the trees showed the importance of nematode in carbon and nutrient cycling in agroforestry systems.

Seven taxa of plant-parasitic nematodes were observed in this Eucalyptus intercropping systems: *Ecphyadophoroides*, *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Scutellonema*, *Trichodorus*, *Tylenchidae*, and *Xiphinema*. These species were also observed in the previous study as parasitic nematodes of Eucalypt plantation (Loubana and Reversat, 1996; Reversat, 2001). Two species of plant-parasitic nematodes belonging to the genus *Xiphinema* were parasites of eucalypt roots (*X. parasetariae* and *X. souchaudi*) and were found to be the potential threat to Eucalyptus plantations in the Congo (Baujard et al., 1998). Here, the variation of the nematode community according to the distance from the trees was characterized by a high density of migratory endoparasites nematodes such as *Pratylenchus* close to the tree. It may be explained by greater root density under tree canopy (Cardinael et al., 2015c). Moreover, both litter addition and root presence significantly increased soil nematode (Zhao et al., 2021).

4.4. Impact of soil parameters variations on rice biomass

In addition to soil carbon and nutrients contents, nematofauna indices such as MI and PPI are biological indicators of ecosystem stability. At the plot scale, our results highlighted high MI and low PPI values at D0 (figure 23). Consequently, the micro-ecosystem close to the trees is more mature and stable and poor in parasitic plants. In contrast, the micro-ecosystem at D2 may be considered as less stable, more disturbed, and rich in parasitic plant nematodes. This difference of stability of ecosystems at D0 and D2 is consistent with the variation soil carbon and nutrients content of the soil, knowing that there is a more organic matter near the tree, which confers more stability at this distance. Moreover, the disturbance at D2 could also be related to tillage practice when preparing the soil before the cultivation of rain-fed rice. However, the high density of earthworms at D2 restores a balance for the ecosystem away from the tree, thanks to the many ecological functions of earthworms for soil restoration. Moreover, this high density of macrofauna at D2 could be the source of the high biomass of rice at this distance. Indeed, the presence of earthworms is known to increase the plant shoot: root ratio, which has been shown, in particular, for the Ferralsols in the highlands of Madagascar

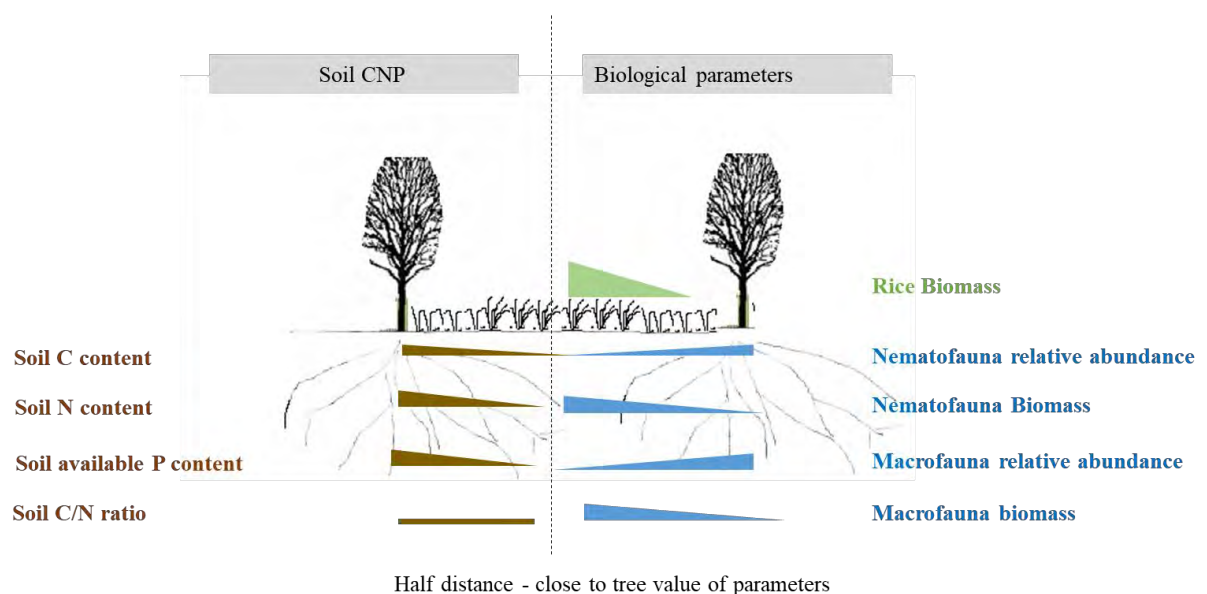
(Ratsiatosika et al., 2019). This result validated our second hypothesis, which suggested that rice biomass variation follows similar trends as soil parameters in this Eucalyptus intercropping system.

4.5.Limits and perspectives of the study

To evaluate the influence of the distance from the tree on soil parameters in agroforestry with irregular structures, our study was conducted at one plot scale. Important soil cores from different sampling points in different transects were collected to fully assess the distribution of soil parameters within the plot. This study joins other recent studies that initiate discussions about the heterogeneous distribution of soil parameters in irregular agroforestry systems in Madagascar. However, further study in more agroforestry plots with irregular structures should be driven to confirm our findings. Nevertheless, the heterogeneous pattern of soil parameters observed in this study questions the current soil sampling method in agroforestry systems, especially in the case of Madagascar, where the same sampling method was used in agroforestry plots and in annual crops. The existence of areas with a high and a low influence of the tree must be taken into account in the soil sampling method in agroforestry, which could avoid an overestimation or an underestimation of the value of soil carbon sequestration. Moreover, further study of the impact of rice biomass variation on rice grain yield should be carried out to assess the agronomic impact of the intercropping systems. In short, this study is intended to present a full assessment of the influence of agroforestry structure on both chemical and biological parameters of the soil. However, more studies should be done concerning the biological interaction in agroforestry systems as knowledge of soil macrofauna and nematode associated with eucalyptus association in agroforestry systems is very limited (Majer, 1997).

5. Synthèse des résultats sur la variabilité spatiale du carbone, des nutriments et de la communauté biologique en fonction de la distance à l'arbre dans les systèmes intercalaires tropicaux

L'agroforesterie consiste à associer des cultures annuelles avec des arbres dans un même espace suivant une structure régulière telle qu'elle est observée dans la culture en allée ou suivant une structure irrégulière comme c'est habituellement le cas dans les systèmes intercalaires tropicaux. Les variations spatiales du carbone du sol et des communautés biologiques ont été bien définies en agroforesterie avec une structure régulière. Cependant, on en sait peu sur l'impact de l'agroforesterie dont la structure est irrégulière sur ces paramètres du sol. Cette étude vise à évaluer la variation du carbone organique (C) du sol, de l'azote (N), du phosphore (P) et de la biologie du sol (macrofaune et nématodes) dans un champ d'eucalyptus et de riz intercalaire. Nous avons caractérisé les propriétés du sol à différentes distances de l'arbre. Dans les 10 premiers cm, le C, N et P disponible du sol ont augmenté avec la distance à l'arbre. La tendance contraire a été observée pour les profondeurs du sol allant de 10 à 30 cm. Une tendance décroissante de l'abondance des communautés de macrofaune et de nématode a été aussi observé en fonction de la distance à l'arbre. La proximité des arbres induit une faible biomasse de riz. L'hétérogénéité spatiale de ces paramètres physicochimiques et biologiques du sol en raison de la présence d'arbres doit être soigneusement prise en compte dans le plan d'échantillonnage du sol dans les parcelles agroforestières.



DISCUSSION GENERALE- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Préface

Cette dernière section du manuscrit est consacrée à la synthèse des principaux résultats obtenus et à la vérification de la validité des hypothèses émises dans le cadre de cette thèse. Elle permet aussi de discuter et de présenter les limites méthodologiques de l'étude afin de présenter des nouvelles pistes de recherche ainsi que des recommandations pratiques pour l'application de l'agroforesterie dans le cadre du développement de l'agriculture à Madagascar.



1. Rappel des objectifs et des hypothèses de la thèse

La thèse a été menée dans le but d'analyser l'influence de l'agroforesterie sur la dynamique de séquestration de C et des propriétés nutritionnelles et biologiques des sols ferrallitiques. L'objectif était de compléter les connaissances des diverses pratiques agroforestières à Madagascar afin d'en évaluer la capacité à impacter les stocks de C, la biologie des sols et la disponibilité des nutriments du sol.

Trois hypothèses générales, portant sur l'impact de l'agroforesterie sur les stocks de carbone et des nutriments du sol et sur les facteurs pouvant influencer la variation de stocks de ces éléments dans le sol, ont été testées dans le cadre de cette thèse.

- **Hypothèse 1** : Les systèmes agroforestiers favorisent une augmentation des stocks de C et de la disponibilité des nutriments dans le sol.
- **Hypothèse 2** : Les espèces d'arbres agroforestiers diffèrent dans leur capacité à séquestrer le C dans le sol.
- **Hypothèse 3** : Dans une parcelle agroforestière, les teneurs en C, N et P disponible du sol ainsi que les communautés biologiques diminuent en fonction de la distance à l'arbre.

Afin d'atteindre les objectifs émis et de vérifier ces hypothèses, la thèse a été structurée en quatre chapitres. Le premier chapitre est une description détaillée des pratiques agroforestières présentes dans la zone d'étude. La description des pratiques agroforestières présentée dans ce premier chapitre constitue un outil pour évaluer le stockage de C dans le sol par l'agroforesterie à Madagascar. Les trois chapitres suivants présentent les résultats permettant de vérifier les hypothèses générales. Ainsi, le deuxième chapitre présente les résultats d'une étude synchronique permettant d'évaluer les stocks de C, N et P disponible du sol. L'objectif était de comparer les stocks en ces éléments dans les systèmes agroforestiers par rapport à d'autres modes d'usage du sol. Le troisième chapitre présente l'effet de l'identité de l'arbre agroforestier qui est un facteur agronomique permettant d'expliquer la dynamique de séquestration de C dans le sol en agroforesterie. L'objectif était d'apporter des éléments de réponse relatifs aux facteurs déterminant la séquestration C dans le sol par les systèmes agroforestiers et de bien différencier l'effet de la présence de l'arbre et l'effet de l'identité de l'espèce d'arbre. Le quatrième et dernier chapitre présente l'influence de la structure de l'agroforesterie sur la distribution de la teneur en C, N et P du sol et sur la communauté biologique du sol. L'objectif était de déterminer la relation entre la distribution de ces paramètres du sol et la distance à l'arbre dans le contexte d'un système agroforestier à structure hétérogène.

2. Synthèse et discussion des résultats

2.1. Description des pratiques agroforestières à Madagascar : une stratégie (pratique) de diversification agricole revêtant des enjeux socioéconomiques

Les enquêtes menées auprès des agriculteurs malgaches ont permis de décrire sept types d'agroforesterie dans les trois sites d'études. Les systèmes tels que la culture intercalaire avec l'Eucalyptus, le jardin d'agrumes et la culture intercalaire avec le caféier sont pratiqués sur les Hautes Terres Centrales (Site A). Le jardin forestier et la culture intercalaire avec des arbres fruitiers ont été identifiés dans la région Est. Des systèmes agroforestiers à base de girofliers subdivisés en agroforesterie simple et complexe selon la densité d'arbres sont pratiqués sur la Côte Est de l'Île.

La différence des pratiques agroforestières entre les sites réside souvent sur la différence des conditions biophysiques et socio-économiques des régions (Mwase et al., 2015). Le paysage de la région Itasy est dominé par la savane et les activités agricoles sont constituées principalement des cultures annuelles (ONE, 2007; Rakotovao, 2017). Ainsi les formes d'agroforesterie pratiquées par les agriculteurs y résultent d'une dynamique de reforestation impliquant l'introduction d'arbres dans les champs agricoles ou l'introduction de cultures dans un terrain reboisé. La situation contraire est observée au niveau de la région Alaotra Mangoro qui est une zone forestière subissant une déforestation croissante depuis des décennies à cause de la pratique d'agriculture itinérante (Styger et al., 2007). Les formes d'agroforesterie y résultent d'une dynamique de restauration de forêt naturelle dégradée en étant une alternative aux cultures sur brûlis. Un contexte différent est observé au niveau de la région Analanjirofo qui est une zone productrice de girofle, une des cultures d'exportation les plus importantes à Madagascar (Danthu et al., 2014). Les formes d'agroforesterie y résultent d'une logique économique des agriculteurs qui consiste à la fois à prioriser la culture de rente et à diversifier la production agricole pour assurer l'autoconsommation. Par conséquent, la structure et la gestion des systèmes agroforestiers sont déterminées par un ensemble de déterminants tels que le contexte écologique, la stratégie des agriculteurs, le contexte social et économique qui peuvent varier dans l'espace et dans le temps.

Ces résultats montrent aussi que les agriculteurs dans ces trois sites pratiquent surtout l'agrosylviculture qui est une catégorie structurale de l'agroforesterie associant arbres et cultures annuelles (Brakas and Aune, 2011). Il s'agit des types d'agroforesterie les plus pratiqués dans la zone tropicale (Nair et al., 2009) où les agriculteurs sont motivés par des

besoins économiques. En effet, les produits agroforestiers fournissent des produits destinés à la vente ou à la consommation domestique (Mbow et al., 2014).

2.2. L'Agroforesterie en tant que stratégie pour augmenter considérablement les capacités de puits de Carbone du sol

Nos résultats ont permis de montrer que les systèmes agroforestiers malgaches ont favorisé une augmentation des stocks de carbone du sol par rapport aux cultures annuelles. Le taux de séquestration de C dans le sol par ces systèmes varie de + 0,37 tC ha⁻¹ an⁻¹ à + 1,55 tC ha⁻¹ an⁻¹ sur l'horizon 0 à 30 cm du sol. Ces taux de séquestration de C représentent une augmentation comprise entre 0,4 % et 1,9 % par an. Ces résultats montrent que les systèmes agrosylvicoles malgaches peuvent contribuer à atteindre l'objectif fixé par l'initiative internationale 4 pour mille qui consiste à augmenter (au moins) de 0,4% par an le stock de carbone du sol au niveau global sur l'horizon 0-30 cm (Lal, 2016). Les taux de séquestration de C dans le sol par les systèmes agroforestiers observés à Madagascar sont généralement élevés par rapport au seuil 4 pour mille (Rakotovo et al., 2020). Un tel taux a été aussi observé dans certaines pratiques agroforestières en Afrique Sub-Saharienne où plus de quatre-vingt pour cent des observations présentaient des taux de séquestration de C du sol supérieurs à 4 ‰ par an (Corbeels et al., 2019). Les taux les plus élevés ont été observés dans les jachères améliorées et dans les systèmes agroforestiers multi-stratifiés. Le taux le plus faible a été observé dans les parcs arborés, probablement dû à une faible densité d'arbres (Takimoto et al., 2008). En effet, la densité d'arbres fait partie des principaux facteurs influençant le taux de séquestration de C dans le sol par les systèmes agroforestiers (Laganière et al., 2010). Une forte densité d'arbres implique une importante quantité de litière aériennes et un système racinaire dense. Le carbone dérivé des racines constitue probablement la source la plus importante de séquestration de C dans le sol car elle est plus susceptible d'être stabilisée dans le sol par des processus physico-chimiques que le carbone dérivé des litières aériennes (Balesdent and Balabane, 1996; Menichetti et al., 2015).

2.3. Importance des facteurs qui influencent le stockage et la séquestration de C dans le sol au niveau des systèmes agroforestiers à Madagascar

Nos résultats ont permis d'établir un bilan des principaux facteurs qui affectent la dynamique de carbone dans les systèmes agroforestiers à Madagascar (Figure 25).

- **Effet de la matière organique apportée**

L'étude a révélé que les stocks de carbone dans le sol sous agroforesterie diffèrent en fonction du site, principalement à cause de la différence en termes de climat et de végétation (Ramifehiarivo et al., 2017). A cela s'ajoute une différence dans la gestion des systèmes agroforestiers entre les régions. En effet, les agriculteurs dans les communes Imerintsiatosika (Région Itasy) et Andasibe (Région Alaotra Mangoro) apportent de la fertilisation organique sous forme de fumier et de compost (à raison de 4 à 6 t ha⁻¹ an⁻¹) contrairement aux agriculteurs dans la commune Ambodimanga II (Région Analanjirofo). Les résultats de cette étude ont démontré que le stockage de carbone dans le sol par les systèmes agroforestiers à Madagascar est influencé par la quantité d'apport en matière organique. Fujisaki et al. (2018) dans une méta-analyse, corroborent ce résultat en démontrant que le taux d'accumulation de carbone dans le sol par les systèmes agricoles tropicaux augmente de façon linéaire avec l'apport en matière organique car près de 8% de la matière organique apporté est converti en carbone organique du sol.

- **Effet de la densité d'arbres**

L'étude a aussi mis en évidence une augmentation des stocks de carbone dans les systèmes agroforestiers en fonction de la densité d'arbres avec un coefficient R² de 0,66 (p-value<0,001). Certaines pratiques telles que les cultures intercalaires avec l'Eucalyptus et le riz pluvial ont enregistré la densité d'arbres la plus élevée (supérieure à 1000 pieds à l'hectare). Ce sont ces systèmes qui ont présenté le taux de séquestration de C du sol le plus élevé avec 2,15 tC ha⁻¹ an⁻¹ en moyenne. L'effet de la densité d'arbres a aussi été démontré par plusieurs études dans la littérature (Shi et al., 2018). Parmi les différents types d'agroforesterie au niveau mondial, la densité et la diversité des arbres sont plus élevées dans les jardins de cases ou jardins familiaux, suivis par les cultures en allées (ou cultures intercalaires), les systèmes sylvopastoraux, et le plus bas dans les brise-vent (Zomer et al., 2016). La plus forte augmentation des stocks de C du sol dans les jardins de cases est ainsi due à sa densité d'arbres et à sa production de litière plus élevées que dans d'autres systèmes agroforestiers (Islam et al., 2015). La pratique de l'agroforesterie favorise donc une intensification des services écosystémiques par l'arbre qui s'accroît en fonction de la densité d'arbres. Il est toutefois important de bien équilibrer cette densité d'arbres afin d'atteindre à la fois l'objectif de production agricole et la séquestration de C par les arbres.

- **Effet de l'identité de l'espèce**

L'étude a aussi démontré que la séquestration de C dans le sol par les systèmes agroforestiers à Madagascar était influencée par l'identité de l'espèce ligneuse. L'espèce *Eucalyptus robusta*, a montré une forte potentialité à séquestrer du carbone dans le sol par rapport à *Citrus clementina* et à *Coffea arabica*. Par rapport aux autres espèces ligneuses testées, Eucalyptus est caractérisée par une croissance rapide (Razakamanarivo et al., 2011) et une forte biomasse racinaire qui était corrélée positivement avec la quantité de carbone nouvellement incorporé dans le sol par cette espèce (Chapitre 3). Ces résultats soulignent l'importance du choix de l'espèce ligneuse utilisée dans les systèmes agroforestiers afin d'optimiser les bénéfices de l'agroforesterie non seulement en termes de potentialité à séquestrer du carbone mais aussi à satisfaire d'autres besoins socio-économiques (Garrity, 2004).

- **Effet de l'arrangement spatial des arbres sur les paramètres du sol**

Les résultats du dernier chapitre de cette thèse ont démontré l'effet de la structure des systèmes agroforestiers sur la variation des teneurs en carbone, en nutriments et en organismes vivants du sol. L'objectif de ce chapitre était de vérifier si l'hétérogénéité spatiale de la structure de la parcelle agroforestière implique une variation de la distribution verticale et horizontale de ces paramètres du sol. Nos résultats ont révélé une augmentation de la teneur en C, N et P disponible du sol avec la distance à l'arbre sur l'horizon 0-10 cm du sol et une diminution sur l'horizon 10-20 cm et 20-30 cm du sol. Une tendance décroissante de la densité du macrofaune et des nématodes a été observée sur les 20 premiers centimètres du sol. Les teneurs élevées en carbone et en nutriments du sol loin de l'arbre sur le premier horizon du sol résultent probablement du stockage engendré par les amendements organiques apportés aux cultures annuelles. Tandis que la tendance décroissante de ces paramètres du sol sur les horizons 10-20 cm et 20-30 cm traduit l'apport des litières aériennes et racinaires qui est généralement plus abondant près de l'arbre (Bambrick et al., 2010; Peichl et al., 2006).

Ces résultats supposent l'importance de la considération de la distance à l'arbre lors de l'échantillonnage du sol dans les systèmes agroforestiers présentant une structure hétérogène. Dans les systèmes agroforestiers avec arrangement spatial bien défini comme les cultures en allée, les points d'échantillonnage sont répartis dans les rangs et les inter-rangs d'arbres d'une manière systématique (Cardinael et al., 2015a; Oelbermann et al., 2006).

2.4. Disponibilité des nutriments dans le sol par les systèmes agroforestiers

Une amélioration de la disponibilité des nutriments est attendue dans les systèmes agroforestiers par rapport aux monocultures grâce aux apports supplémentaires de matière organique par l'arbre (Muchane et al., 2020). Pourtant, nos résultats ont démontré aucun effet significatif de la pratique agroforestière sur les stocks d'azote et de phosphore disponible du sol. Le mélange des plantes appartenant à différents groupes fonctionnels au sein d'un système agroforestier peut engendrer à la fois une facilitation et une compétition pour les éléments essentiels du sol (Jose et al., 2004). De plus, la disponibilité des éléments minéraux dans le sol est conditionnée par le taux de minéralisation de la matière organique qui varie considérablement en fonction de la qualité biochimique l'espèce ligneuse (Partey et al., 2016). Certaines études ont même démontré un faible taux de minéralisation dans les systèmes agroforestiers par rapport aux systèmes forestiers se traduisant par une augmentation de stockage de la matière organique dans le sol et une réduction de la disponibilité des nutriments (de Souza et al., 2017).

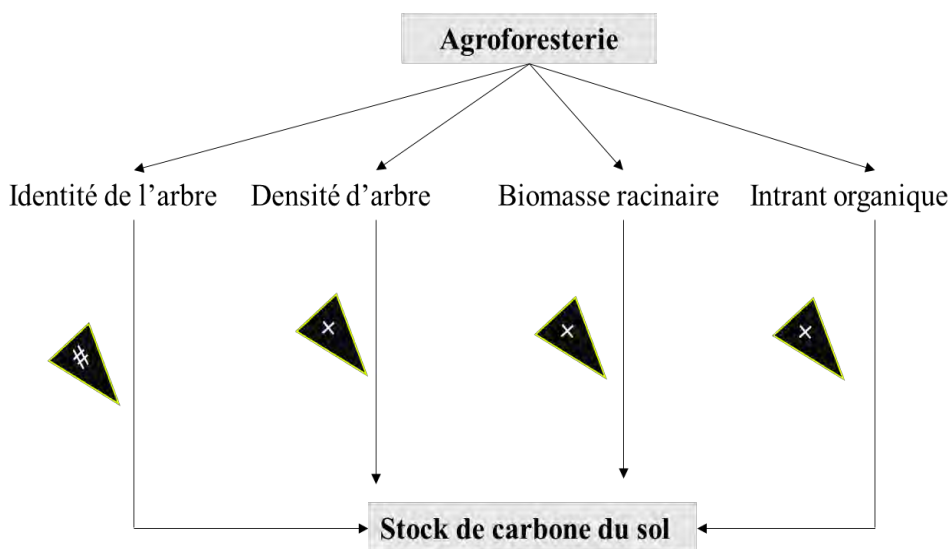


Figure 25: Bilan des facteurs affectant le stockage de carbone dans le sol par les systèmes agroforestiers malgaches, les flèches noires à contour jaune indique si le stock de carbone du sol augmente (+), ou diffère (#) en fonction des facteurs.

3. Validation des hypothèses de recherches

La première hypothèse a été testée dans le cadre de l'étude synchronique comparant les stocks de C, N et P disponible du sol entre les systèmes agroforestiers et un système de référence. Les stocks de carbone ont été généralement plus élevés dans les systèmes agroforestiers par rapport aux cultures annuelles (considérées comme référence). Pour

l'ensemble des pratiques étudiées, le taux de stockage de C est évalué à $0,87 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Par contre, aucune différence significative des stocks d'azote et de phosphore disponible du sol n'a été déterminée entre les systèmes agroforestiers et les autres modes d'usage du sol. Ainsi la première hypothèse qui stipule que « Les systèmes agroforestiers favorisent une augmentation de stock de carbone et la disponibilité des nutriments dans les sols » est partiellement validée.

La seconde hypothèse a été testée dans le cadre d'une expérimentation menée dans le cadre du chapitre 3. Les résultats ont montré une différence significative de l'effet des trois espèces ligneuses sur le carbone du sol. Par ailleurs, l'*Eucalyptus robusta* a présenté une forte potentialité à injecter du carbone dans le sol par rapport à *Coffea arabica* et *Citrus clementina*. Ainsi la deuxième hypothèse qui stipule que « Les espèces d'arbres agroforestiers diffèrent dans leur capacité à séquestrer le carbone dans le sol » a été validée.

La troisième hypothèse a été testée dans le dernier chapitre. Une tendance croissante des teneurs en carbone, azote et phosphore disponible du sol a été observée sur la première couche du sol (0-10 cm). Par contre, un déclin de ces paramètres du sol ainsi que de la densité de certaines communautés biologiques en fonction de la distance à l'arbre a été observée sur l'horizon 10 à 30 cm du sol. Ces résultats ont validé partiellement l'hypothèse selon laquelle « Les teneurs en carbone et en nutriments ainsi que les communautés biologiques déclinent en fonction de la distance à l'arbre dans une parcelle agroforestière ».

4. Perspectives de recherches sur l'agroforesterie

Nos travaux soulèvent encore beaucoup de question auxquelles les recherches futures devraient répondre. Ci-après sont proposées quelques pistes d'études qui pourraient compléter les résultats déjà acquis sur la séquestration de C dans le sol et la biologie du sol par les systèmes agroforestiers.

4.1. Etablissement d'une typologie de l'agroforesterie

La présente thèse a présenté une description détaillée des pratiques agroforestières dans trois communes de la région Itasy, Alaotra Mangoro et Analanjirofo. Toutefois, elle n'est pas représentative de ces régions. L'établissement d'une typologie régionale et nationale de l'agroforesterie à Madagascar est donc une piste de recherche importante afin d'inventorier et de classer les différents types d'agroforesterie à Madagascar. En effet, cette étude ultérieure pourrait identifier d'autres types d'agroforesterie comme les systèmes sylvopastoraux ou les systèmes multi-étages, qui présentent autant d'importance pour la séquestration de C dans le

sol que les cultures intercalaires étudiés dans la présente thèse. La typologie étant un outil indispensable dans l'évaluation du bilan carbone d'un écosystème. Cette typologie pourrait être aussi combinée à une étude cartographique des surfaces occupées par l'agroforesterie à Madagascar ce qui constitue un outil de prise de décision dans le développement de cette pratique dans l'agriculture à Madagascar.

4.2. Etude diachronique de séquestration de C dans les systèmes agroforestiers

L'utilisation de différentes méthodes de quantification du carbone séquestré dans le sol par les systèmes agroforestiers engendre une variabilité des résultats. L'uniformisation des approches d'échantillonnage devient une nécessité pour assurer la précision des taux de séquestration de C obtenus dans les études au niveau global (Corbeels et al 2019). En effet, le taux de séquestration de C peut être calculé à la fois par une méthode synchronique et une méthode diachronique. L'approche diachronique est souvent recommandée par rapport à la méthode synchronique (Costa Junior et al., 2013) car cette dernière est souvent reprochée d'engendrer de l'incertitude liée à des variabilités des propriétés du sol dans les différents modes d'usage du sol comparés (Cerri et al., 2004). Ainsi, il est recommandé de compléter les résultats synchroniques par une approche diachronique pour calculer la différence de stocks de carbone d'un système agroforestier entre deux dates (échelle pluriannuelle supérieure à 10 ans) (Chevallier et al., 2020).

4.3. Amélioration de la technique d'échantillonnage du sol pour une estimation précise de la quantité de carbone séquestré par les systèmes agroforestiers

Cette étude a démontré que la structure hétérogène observée dans la majorité des systèmes agroforestiers à Madagascar engendre une distribution spatiale irrégulière des différents paramètres du sol. Il existe des zones à forte et à faible concentration en carbone et en nutriments du sol près et loin de l'arbre respectivement. Ces deux zones doivent être pris en compte lors de l'échantillonnage afin de tenir compte de la présence de l'arbre. Les mêmes nombres d'échantillons pourraient être prélevés dans chaque zone. Cependant, la validation de ces résultats nécessite un échantillonnage exhaustif incluant plusieurs types d'agroforesterie de structure similaire, représentés par un nombre important de répétitions. Cette étude ultérieure pourrait suggérer un protocole d'échantillonnage du sol bien défini tenant compte de la présence de l'arbre dans les systèmes agroforestiers. L'échantillonnage du sol doit être aussi accompagné de l'échantillonnage des litières des feuilles des arbres afin de quantifier les litières apportées par les arbres à différentes distances à l'arbre. En outre les résultats de cette étude montrent

aussi l'importance de la prise en compte de différentes profondeurs lors de l'évaluation de stockage et de séquestration de C dans les systèmes agroforestiers. Bien que les directives de GIEC (2006) recommandent une profondeur de référence de 30 cm, il est important d'avoir l'estimation des stocks de carbone du sol de toute la zone racinaire ou à une profondeur de 1 ou 2 m, en particulier dans les systèmes agroforestiers (Batjes, 2004; Cardinael et al., 2018a).

4.4. Etude qualitative du carbone séquestré par les systèmes agroforestiers

Un des résultats majeurs de cette thèse est la contribution des systèmes agroforestiers à séquestrer une quantité supplémentaire de carbone dans le sol. Or il y a peu d'informations sur la qualité et la stabilité du carbone séquestré par ces systèmes agroforestiers. Pourtant ces informations sont importantes pour évaluer le potentiel de ces systèmes à stocker du carbone dans le sol à long terme. Le carbone organique du sol est composé de pool labile et de pool stable avec une durée de résidence différente dans le sol. Le carbone labile, avec un taux de renouvellement rapide, constitue une source d'énergie importante pour les organismes vivants du sol et influence le cycle des nutriments pour maintenir la qualité du sol et sa productivité (Chan et al., 2001). Le carbone stable ou récalcitrant est très lentement altéré par les activités microbiennes (Sherrod et al., 2005). Certains pools de carbone comme la biomasse microbienne, le carbone minéralisable, le carbone organique extractible à l'eau et le carbone organique oxydable sont aussi utilisés comme indicateurs de la qualité du sol. Ils répondent aux changements de gestion agricole et d'utilisation des terres plus rapidement que le carbone organique total et pourraient donc être utilisés comme indicateurs sensibles de la qualité des sols dans les systèmes agroforestiers (Benbi et al., 2012). La méthode Permanganate oxydable carbone (PoxC) pourrait être utilisée pour quantifier le carbone labile du sol de manière rapide et à moindre coût (Culman et al., 2012). Cette méthode est considérée comme la plus sensible aux changements de mode d'usage du sol (Hurisso et al., 2016); à condition d'être mesurée rigoureusement (Pulleman et al., 2021). A cela s'ajoute d'autres techniques comme le fractionnement granulométrique ou la pyrolyse Rock-Eval (Disnar et al., 2003) qui permettent de caractériser la matière organique du sol suite à un changement de pratique agricole. Les échantillons de l'étude synchronique pourraient être utilisés pour effectuer cette étude qualitative de carbone du sol dans les systèmes agroforestiers.

4.5. Etude de l'influence de l'agroforesterie sur la biologie du sol

Les résultats du quatrième chapitre de cette thèse ont mis en évidence l'effet de la présence de l'arbre sur les communautés de macrofaune et de nématode du sol. Compte tenu de l'importance

de la biologie du sol sur la fertilité du sol mais aussi sur la phytopathologie agricole, des études ultérieures sur l'effet de l'agroforesterie sur la communauté biologique ainsi que sur les activités biologiques doivent être menées. Une étude menée sur des systèmes agroforestiers de la région tropicale a en effet démontrée un effet positif lorsque l'agroforesterie est comparée aux cultures annuelles, et neutres ou négatifs par rapport aux forêts (Marsden et al., 2020). Pourtant, peu de publications mesurent réellement les fonctions de la faune du sol ou caractérisent leurs interactions et leur évolution dans le temps et dans l'espace en fonction de la conception et de la gestion du système agroforestiers. D'autres travaux sur la faune du sol en agroforesterie devraient donc exploiter les réseaux d'interactions écologiques et la manière dont ils déterminent le fonctionnement de l'écosystème.

4.6. Etudier les formes de valorisation agronomique des sous-produits ligneux et non ligneux afin d'optimiser la potentialité de l'agroforesterie stocker du carbone et à restaurer la fertilité du sol

L'agroforesterie permet d'obtenir divers produits et sous-produits ou résidus issus des cultures annuelles et des arbres. Ces produits peuvent être valorisés sous diverses formes notamment pour l'alimentation animale et pour la production d'engrais pour les plantes (cultures et arbres). Les investigations menées lors de notre étude ont révélé que les agriculteurs apportent régulièrement de fertilisants organiques sous formes de fumier ou de compost aussi bien dans les systèmes agroforestiers que dans les cultures annuelles. Cela pourrait intensifier la forte concurrence pour la biomasse déjà existante entre les systèmes agricoles au niveau des exploitations malgaches (Alvarez et al., 2014). Afin d'assurer le besoin en intrant organique des systèmes agroforestiers, la biomasse issue des résidus des cultures et celle issue des arbres pourrait être utilisée afin d'optimiser l'efficacité et la durabilité du système. Le choix de l'espèce agroforestière y trouve une importance particulière afin de favoriser les plantes à forte production de biomasse et dont les feuilles possèdent une meilleure qualité nutritionnelle. Ainsi une piste de recherche peut être suggérée concernant la détermination de la quantité et la qualité des biomasses produites par des feuilles des arbres utilisées dans les pratiques agroforestières à Madagascar. Des études sur la minéralisation et la quantité des nutriments dans les feuilles et les résidus des arbres agroforestiers peuvent être menées afin de mieux orienter le choix de l'espèce (Zeng et al., 2010). Du point de vue agronomique, cela peut pallier au manque de matière végétale dans la production de fertilisant organique au niveau de l'agriculture malgache. L'utilisation des arbres fertilisants comme les légumineuses pour améliorer le statut

azoté du sol dans les systèmes agroforestiers constitue aussi une piste de recherche intéressante (Sileshi et al., 2014). L'amélioration en qualité et en quantité des apports organiques dans les systèmes agroforestiers permet d'optimiser la capacité de ces systèmes à stocker du carbone dans le sol et à restaurer la fertilité du sol notamment dans le contexte du sol ferrallitique malgache. Outre la production de biomasse végétale pour produire des intrants organiques, les produits et sous-produits des arbres et culture agroforestiers constituent aussi un véritable ressource en fertilisant minéraux. En effet les agriculteurs malgaches utilisent déjà dans leur pratique courante les cendres de bois d'Eucalyptus et les cendres de balles de riz qui sont très riches en éléments nutritifs (notamment en P) pour les plantes (Ben Naâmane et al., 2020).

4.7. Etude sur l'effet du changement climatique sur la potentialité de l'agroforesterie à stocker du C

Le réchauffement global et l'augmentation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère ont des impacts sur la photosynthèse qui est le processus clé dans l'intensification écologique en agroforesterie (Reich et al., 2018). Une augmentation de l'énergie solaire pourrait augmenter l'activité photosynthétique des plantes (notamment des arbres) ce qui est favorable pour la séquestration du C dans le sol. Toutefois, l'augmentation de la température engendre aussi une augmentation de la minéralisation ce qui entraîne une perte de carbone (Dalias et al., 2001). En outre, les problèmes de sécheresses et la diminution de la précipitation occasionés par le changement climatique constituent aussi des menaces sur la capacité des systèmes agricoles tels que l'agroforesterie à stocker du carbone dans le sol. A Madagascar, certains phénomènes climatiques considérés comme manifestation du CC, comme la diminution de la précipitation ou le retard de la saison des pluies, sont perçus par les agriculteurs. Toutefois, il manque dans la littérature des études qui traitent l'effet de ces événements climatiques sur la production agricole et notamment sur la potentialité des pratique agro-écologiques telle que l'agroforesterie à séquestrer du carbone dans le sol.

5. Contraintes et opportunités pour l'application de l'agroforesterie dans l'agriculture malgache

L'agroforesterie fait partie des pratiques paysannes qui devient de plus en plus pratiquée à Madagascar. Elle est considérée comme une nouvelle technologie agricole permettant d'assurer la durabilité de l'écosystème et la production agricole. Comme certaines technologies agricoles introduite à Madagascar, il y a des contraintes qui constituent des barrières à leur application par les agriculteurs. Parmi ces barrières se distinguent: le manque de moyen financier

permettant d'acquérir les intrants nécessaires pour l'établissement de la pratique et l'attachement des agriculteurs aux pratiques traditionnelles (Moser and Barrett, 2003). A cela s'ajoute le manque d'encadrement et de formation pour la mise en place et la gestion des pratiques ainsi que les contraintes liées à l'insécurité foncières à Madagascar (Minten and Barrett, 2008).

Cependant, il y a actuellement des opportunités qui se présentent comme leviers pour l'application de l'agroforesterie à Madagascar. En premier lieu, le premier chapitre de cette thèse a mis en évidence l'existence d'une initiative locale des agriculteurs pour créer des systèmes agroforestiers à partir de leur besoin économique et les moyens disponibles à leur niveau. Cette initiative locale constitue un levier important dans l'extension de l'agroforesterie à Madagascar. Elle doit être encouragée et appuyée par les services techniques compétentes. Ensuite, il y a les appuis des organismes non gouvernementaux (ONG) qui apportent des formations techniques pour la mise en place et l'entretien des pratiques et qui octroient quelque fois des intrants tels que les jeunes plants d'arbres (Rakotovao, 2017). De plus, il y a actuellement le programme national de reboisement qui a comme objectif final de reboiser 40 000 hectares par an ce qui est accompagné d'une facilitation de l'obtention des jeunes plants et sensibilise les agriculteurs à des activités de reforestation. A cela s'ajoute aussi les résultats des recherches au niveau des institutions de recherche universitaires et partenaires internationales qui met en évidence plusieurs facteurs agronomiques qui permet d'optimiser les bénéfices de l'agroforesterie. Ainsi le choix de l'espèce a été démontré comme une étape importante lors de la mise en place du système agroforestier en choisissant une espèce qui peut répondre aux objectifs agricoles et environnementaux du système. Il convient aussi de bien déterminer la densité d'arbres afin de permettre un bon développement des cultures annuelles et une amélioration du stock de carbone dans le sol par les arbres. L'arrangement spatial des composantes du système constitue aussi un paramètre important à considérer pour optimiser à la fois le développement des cultures annuelles et ce des arbres. Un arrangement spatial régulier des arbres et des cultures pourrait faciliter les activités de préparation du sol, l'entretien des cultures et la récolte des produits agroforestiers. Le développement de l'agroforesterie au niveau de l'agriculture malgache pourrait constituer une stratégie favorable pour promouvoir la sécurité alimentaire et l'atténuation du changement climatique via la diversification de la production agricole et la séquestration de C dans le sol.

Références bibliographiques

-A-

Abdulai, I., Jassogne, L., Graefe, S., Asare, R., Van Asten, P., Läderach, P., Vaast, P., 2018. Characterization of cocoa production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana. *PLoS ONE* 13 (4).

Akinnifesi, F.K., Ajayi, O.C., Sileshi, G., Chirwa, P.W., Chianu, J., 2010. Fertiliser trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 615–629.

Akinnifesi, F.K., Kwesiga, F., Mhango, J., Chilanga, T., Mkonda, A., Kadu, C.A.C., Kadzere, I., Mithofer, D., Saka, J.D.K., Sileshi, G., Ramadhani, T., Dhliwayo, P., 2006. Towards the development of miombo fruit trees as commercial tree crops in Southern Africa. *Forests, Trees and Livelihoods* 16, 103–121.

Albrecht, A., Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99, 15–27.

Alvarez, S., Rufino, M.C., Vayssières, J., Salgado, P., Tittonell, P., Tillard, E., Bocquier, F., 2014. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems* 126, 25–37.

Amador, J.A., Winiarski, K., Sotomayor-Ramirez, D., 2013. Earthworm communities along a forest-coffee agroecosystem gradient: preliminary evidence supporting the habitat-dependent feeding hypothesis. *Tropical Ecology* 54, 365–374.

Amer, F., Boudlin, D.R., Black, C.A., Duke, F.R., 1955. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32 equilibration. *Plant and Soil* 6, 391-408.

Anderson, J.M., Ingram, J.S.I., 1993. *Tropical Soil Biology and Fertility Methods: a handbook of methods* (2nd edition). (CAB International: Wallingford, UK).

Andriamananjara, A., Chevallier, T., Masse, D., Razakamanarivo, H., Razafimbelo, T., 2019. Land management modifies the temperature sensitivity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in a Ferralsol. *Applied Soil Ecology* 138, 112-122.

Andriamananjara, A., Rakotoson, T., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Razafimanantsoa, M.-P., Masse, D., 2019. Farmyard manure improves phosphorus use efficiency in weathered P deficient soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 115, 407–425.

Arimalala, N., Penot, E., Michels, T., Rakotoarimanana, V., Michel, I., Ravaomanalina, H., Roger, E., Jahiel, M., Leong Pock Tsy, J.-M., Danthu, P., 2018. Clove based cropping systems on the east coast of Madagascar: how history leaves its mark on the landscape. *Agroforestry Systems* 93, pages 1577–1592.

-B-

Bailey, R.G., 2004. Identifying Ecoregion Boundaries. *Environmental Management* 34, S14–S26.

Balesdent, J., Derrien, D., Fontaine, S., Kirman, S., Klumpp, K., Loiseau, P., Marol, C., Nguyen, C., Pean, M., Personeni, E., Robin, C., 2011. Contribution de la rhizodéposition aux matières organiques du sol, quelques implications pour la modélisation de la dynamique du carbone. *Etude et Gestion des Sols* 18, 201–216.

Bambrick, A.D., Whalen, J.K., Bradley, R.L., Cogliastro, A., Gordon, A.M., Olivier, A., Thevathasan, N.V., 2010. Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. *Agroforest Syst* 79 :343–353.

Bardgett, R.D., Mommer, L., De Vries, F.T., 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution* 29, 692–699.

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S., 2014. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48.

Batjes, N.H., 2004. Estimation of Soil Carbon Gains Upon Improved Management within Croplands and Grasslands of Africa. *Environment, Development and Sustainability* 6: 133–143.

Batjes, N.H., 2001. Options for increasing carbon sequestration in West African soils: an exploratory study with special focus on Senegal. *Land Degrad. Dev.* 12, 131–142.

Baujard, P., Luc, M., Reversat, G., 1998. Description of *Xiphinema souchaudi* n. sp. and observations on *X. yapoense* Luc, 1958 and *X. algeriense* Luc & Kostadinov, 1982 (Nematoda: Longidoridae). *Fundam. appl. Nematol.* 21,637-644.

Bayala, J., Balesdent, J., Marol, C., Zapata, F., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S.J., 2007. Relative contribution of trees and crops to soil carbon content in a parkland system in Burkina Faso using variations in natural ¹³C abundance. *Nutr Cycl Agroecosyst* 76, 193–201.

Ben Naâmane, C.K., Autfray, P., Audouin Sarah, Bélières Jean-François, Blanchart Eric, Razafimahatratra Hanitriniana Mamy, Razanakoto Onjaherilanto R., Salgado Paulo, Bernard Laetitia, Muller Bertrand, Rakotoarivelo Njaramanana Naliharilala Miora, Rakotondravelo Jean-Chrysostome, Rabary Bodovololona, Raharimalala Sitrakiniaina, Rakotofiringa Hery Zo Nantenaina, Ramanantsoanirina Alain, Randriamanantsoa Richard, Randriamihary Fetra Sarobidy Eddy Josephson, Ratsiatosika Onja Hasinahary, Raveloson Harinjaka, Razafimbelo-Andriamifidy Tantely, Razafindrakoto Malalatiaina, Razanamalala Kanto, Ripoche Aude, Trap Jean, Vom Brocke Kirsten, 2020. Gestion comparée de la fertilité au niveau des exploitations agricoles familiales du Moyen-Ouest de la région Vakinankaratra et des Hautes-Terres de la région Itasy à Madagascar.

Références bibliographiques

- Benbi, D.K., Brar, K., Toor, A.S., Singh, P., Singh, H., 2012. Soil carbon pools under poplar-based agroforestry, rice-wheat, and maize-wheat cropping systems in semi-arid India. *Nutr Cycl Agroecosyst* 92, 107–118.
- Bender, M.M., 1971. Variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation. *Phytochemistry* 10, 1239–1244.
- Bene, J.G., Beall, H.W., Côté, A., 1977. Trees, food, and people: land management in the tropics. International Development Research Centre, IDRC, Ottawa, Canada.
- Bergeron, M., Lacombe, S., Bradley, R.L., Whalen, J., Cogliastro, A., Jutras, M.-F., Arp, P., 2011. Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforest Syst* 83, 321–330.
- Bernhard-Reversat, F., 1999. The leaching of Eucalyptus hybrids and Acacia auriculiformis leaf litter: laboratory experiments on early decomposition and ecological implications in congolese tree plantations. *Applied Soil Ecology* 12, 251–261.
- Bhagwat, S.A., Willis, K.J., Birks, H.J.B., Whittaker, R.J., 2008. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution* 23, 261–267.
- Blanchart, E., Lavelle, P., Braudeau, E., Le Bissonnais, Y., Valentin, C., 1997. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 431–439.
- Blaser, W.J., Oppong, J., Hart, S.P., Landolt, J., Yeboah, E., Six, J., 2018. Climate-smart sustainable agriculture in low-to-intermediate shade agroforests. *Nat Sustain* 1, 234–239.
- Bongers, T., 1999. The Maturity Index, the evolution of nematode life history traits, adaptive radiation and cp-scaling. *Plant and Soil* volume 212, pages13–22.
- Bongers, T., 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83, 14–19.
- Brewitt, K., Piñol, J., Werner, C., Beyschlag, W., Espadaler, X., Pérez Hidalgo, N., Platner, C., 2015. Evaluating the importance of trophobiosis in a Mediterranean ant community: a stable isotope analysis. *Insectes Sociaux* 62, 81–95.

-C-

- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B.G., Saby, N.P.A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., Chenu, C., 2015a. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon — A case study in a Mediterranean context. *Geoderma* 259–260, 288–299.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B.G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E., Chenu, C., 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 243–255.

Références bibliographiques

- Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T., Chenu, C., 2018a. High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system – combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences* 15, 297–317.
- Cardinael, R., Hoeffner, K., Chenu, C., Chevallier, T., Béral, C., Dewisme, A., Cluzeau, D., 2019. Spatial variation of earthworm communities and soil organic carbon in temperate agroforestry. *Biol Fertil Soils* 55, 171–183.
- Cardinael, R., Mao, Z., Chenu, C., Hinsinger, P., 2020. Belowground functioning of agroforestry systems: recent advances and perspectives. *Plant Soil* 453, 1–13.
- Cardinael, R., Mao, Z., Prieto, I., Stokes, A., Dupraz, C., Kim, J.H., Jourdan, C., 2015b. Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system.
- Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L., Bernoux, M., 2018b. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters*. 1-50.
- Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., Paustian, K., Bernoux, M., Mellilo, J.M., 2004. Combining Soil C and N Spatial Variability and Modeling Approaches for Measuring and Monitoring Soil Carbon Sequestration. *Environmental Management* 33, S274–S288.
- Chan, K.Y., Bowman, A., Oates, A., 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys: *Soil Science* 166, 61–67.
- Chatterjee, N., Nair, P.K.Ramachandran., Chakraborty, S., Nair, V.D., 2018. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 266, 55–67.
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188, 41–52.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1479–1486.
- Chevallier, T., Razafimbelo, T.M., Chapuis-Lardy, L., Brossard, M. (Eds.), 2020. Carbone des sols en Afrique: Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. IRD Éditions.
- Christina, M., Laclau, J.-P., Gonçalves, J.L.M., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., 2011. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere* 2, 1-10.
- Combe, J., 1982. Agroforestry techniques in tropical countries: potential and limitations. *Agroforestry Systems* 1, 13–27.
- Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G., Buttafuoco, G., 2016. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *CATENA* 144, 23–33.

Références bibliographiques

Corbeels, M., Cardinael, R., Naudin, K., Guibert, H., Torquebiau, E., 2019. The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research* 188, 16–26.

Costa Junior, C., Corbeels, M., Bernoux, M., Piccolo, M.C., Siqueira Neto, M., Feigl, B.J., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., Scopel, E., Lal, R., 2013. Assessing soil carbon storage rates under no-tillage: Comparing the synchronic and diachronic approaches. *Soil and Tillage Research* 134, 207–212.

Csuzdi, C., Razafindrakoto, M., Blanchart, E., 2012. New and little known earthworm species from Central Madagascar (Oligochaeta: Kynotidae). *Zootaxa* 3578, 36–42.

Culman, S.W., Snapp, S.S., Freeman, M.A., Schipanski, M.E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L.E., Franzluebbers, A.J., Glover, J.D., Grandy, A.S., Lee, J., Six, J., Maul, J.E., Mirksy, S.B., Spargo, J.T., Wander, M.M., 2012. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal* 76, 494–504.

-D-

Dalias, P., Anderson, J.M., Bottner, P., 2001. Long-term effects of temperature on carbon mineralisation processes. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 1049-1057.

Danthu, P., Penot, E., Ranoarisoa, K.M., Rakotondravelo, J.C., Michel, I., Tiollier, M., Michels, T., Normand, F., Razafimamonjison, G., Fawbush, F., Jahiel, M., 2014. The clove tree of Madagascar: a success story with an unpredictable future. *Bois et Forêts des Tropiques* 320, pp.83-96.

Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165–173.

De Cáceres, M., Legendre, P., Moretti, M., 2010. Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos* 119, 1674–1684. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18334.x>

De Deyn, G.B., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., 2008. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecol Letters* 11, 516–531.

de Souza, J.C., Pereira, M.A., da Costa, E.N.D., da Silva, D.M.L., 2017. Nitrogen dynamics in soil solution under different land uses: Atlantic forest and cacao–cabruca system. *Agroforest Syst* 92, 425–435.

De Stefano, A., Jacobson, M.G., 2018. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry Systems* 92, 285–299.

Dignac, M.-F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., Basile-Doelsch, I., 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 14.

Références bibliographiques

Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34, 327–343.

Dupraz C, Liagre F. 2011. *Agroforesterie – des arbres et des cultures*, 2nd edn. Paris, France: Groupe France Agricole.

-E-

Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil. Sci.* 75, 529–538.

Epron, D., Marsden, C., Thongo M'Bou, A., Saint-André, L., d'Annunzio, R., Nouvellon, Y., 2009. Soil carbon dynamics following afforestation of a tropical savannah with *Eucalyptus* in Congo. *Plant and Soil* 323, 309–322.

-F-

FAO, 2020. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>

FAO, 2019. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture 576.

FAO, 2014. World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resource Report* 106.

FAO/UNESCO, 1947. Soil map of the world.

Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., Nayak, D.R., 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 254, 117–129.

Feller, C., Blanchart, E., Bernoux, M., Lal, R., Manlay, R., 2012. Soil fertility concepts over the past two centuries: the importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58, S3–S21.

Ferris, H., Bongers, T., de Goede, R.G.M., 2001. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology* 18, 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00152-4)

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., ... Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269–3340.

Frouz, J., Pižl, V., Cienciala, E., Kalčík, J., 2009. Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation. *Biogeochemistry* 94, 111–121.

Références bibliographiques

Fujisaki, K., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Albrecht, A., Razafimbelo, T., Masse, D., Ndour, Y.B., Chotte, J.-L., 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 259, 147–158.

-G-

Garrity, D.P., 2004. Agroforestry and the achievement of the Millennium Development Goals. *Agroforestry Systems* 61,5–17.

Gealy, D.R., Fischer, A.J., 2010. ^{13}C Discrimination: A Stable Isotope Method to Quantify Root Interactions between C_3 Rice (*Oryza sativa*) and C_4 Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in Flooded Fields. *Weed Science* 58, 359–368.

GIEC, 2014. Changements Climatiques 2014 : Rapport de Synthèse ; Contribution des Groupes de Travail I, II et III au cinquième Rapport D'évaluation du Groupe D'experts Intergouvernemental sur L'évolution du Climat ; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds; GIEC: Genève, Switzerland.

GIEC, 2006. Méthodologies génériques applicables à diverses catégories d'affectation des terres.

Grace, J., Jose, J.S., Meir, P., Miranda, H.S., Montes, R.A., 2006. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *J Biogeography* 33, 387–400.

Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T., Albrecht, A., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 16, 23-33.

Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X., Jiang, G., 2016. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research* 156, 140–147.

-H-

Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., Andrews, J.A., 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* volume 48, 115–146.

Harvey, C.A., Rakotobe, Z.L., Rao, N.S., Dave, R., Razafimahatratra, H., Rabarijohn, R.H., Rajaofara, H., MacKinnon, J.L., 2014. Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 369, 20130089.

Hauser, S., Asawalam, D.O., Vanlauwe, B., 1998. Spatial and temporal gradients of earthworm casting activity in alley cropping systems. *Agroforestry Systems* volume 41, 127–137.

Henintsoa, M., Becquer, T., Rabeharisoa, L., Gerard, F., 2017. Geochemical and microbial controls of the effect of citrate on phosphorus availability in a ferralsol. *Geoderma* 291, 33–39.

Références bibliographiques

Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237, 173–195.

Houghton, R.A., House, J.I., Pongratz, J., van der Werf, G.R., DeFries, R.S., Hansen, M.C., Le Quéré, C., Ramankutty, N., 2012. Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences* 9, 5125–5142.

Howlett, D.S., Moreno, G., Mosquera Losada, M.R., Nair, P.K.R., Nair, V.D., 2011. Soil carbon storage as influenced by tree cover in the Dehesa cork oak silvopasture of central-western Spain. *J. Environ. Monit.* 13, 1897-1904.

Huerta, E., van der Wal, H., 2012. Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *European Journal of Soil Biology* 50, 68–75.

Hurisso, T.T., Culman, S.W., Horwath, W.R., Wade, J., Cass, D., Beniston, J.W., Bowles, T.M., Grandy, A.S., Franzluebbers, A.J., Schipanski, M.E., Lucas, S.T., Ugarte, C.M., 2016. Comparison of Permanganate-Oxidizable Carbon and Mineralizable Carbon for Assessment of Organic Matter Stabilization and Mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 80, 1352–1364.

Hütsch, B.W., Augustin, J., Merbach, W., 2002. Plant rhizodeposition — an important source for carbon turnover in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 397-407.

-I-

IPCC, 2014. *Climate Change 2014 Synthesis Report*.

IPCC, 2000. *Emissions scenarios: summary for policymakers: a special report of IPCC Working Group III*. WMO (World Meteorological Organization): UNEP (United Nations Environment Programme), Geneva.

Isaac, M.E., Gordon, A.M., Thevathasan, N., Oppong, S.K., Quashie-Sam, J., 2005. Temporal changes in soil carbon and nitrogen in west African multistrata agroforestry systems: a chronosequence of pools and fluxes. *Agroforestry Systems* 65, 23–31.

Islam, M., Dey, A., Rahman, M., 2015. Effect of Tree Diversity on Soil Organic Carbon Content in the Homegarden Agroforestry System of North-Eastern Bangladesh. *Small-scale Forestry* 14, 91–101.

-J-

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K., Byrne, K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137, 253–268.

Références bibliographiques

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10, 423–436.

Johnson, J.M.-F., Franzluebbers, A.J., Weyers, S.L., Reicosky, D.C., 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution* 150, 107–124.

Jose, S., Gillespie, A.R., Pallardy, S.G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* volume 61, 237–255.

-K-

Kanime, N., Kaushal, R., Tewari, S.K., Raverkar, K.P., Chaturvedi, S., Chaturvedi, O.P., 2013. Biomass production and carbon sequestration in different tree-based systems of Central Himalayan Tarai region. *Forests, Trees and Livelihoods* 22, 38–50.

Kätterer, T., Bolinder, M.A., Andrén, O., Kirchmann, H., Menichetti, L., 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141, 184–192.

Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., Piñeros, M.A., 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55, 459–493.

Kumar, B.M., 2006. Carbon sequestration potential of tropical homegardens, in: Kumar, B.M., Nair, P.K.R. (Eds.), *Tropical Homegardens, Advances in Agroforestry*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 185–204.

-L-

Lacroix, M. (2014) *Melolonthidae Malgaches (Coleoptera, Scarabaeoidea)*. Editions Marc Lacroix, Collection Hannetons, Paris, 260 pp.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., et al, 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology* 33, 159–193.

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42, S3–S15.

Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48, 39–48.

Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A.C., Korsbakken, J.I., Peters, G.P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Boden, T.A., Tans, P.P., Andrews, O.D., Arora, V.K., Bakker, D.C.E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R.A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Cosca, C.E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R.A., Hunt, C.W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Kato, E., Kautz, M.,

Références bibliographiques

Keeling, R.F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padin, X.A., Peregon, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B.D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Laan-Luijkx, I.T., van der Werf, G.R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A.P., Watson, A.J., Wiltshire, A.J., Zaehle, S., Zhu, D., 2018. Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data* 10, 405–448.

Leng, G., Hall, J., 2019. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. *Science of The Total Environment* 654, 811–821.

Li, D., Niu, S., Luo, Y., 2012. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist* 195, 172–181.

Lorenz, K., Lal, R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 443–454.

Loubana, P.M., Reversat, G., 1996. Effect of exotic tree plantations on free living and plant parasitic soil nematodes and population changes with eucalypt hybrids and plantation age. In Reversat F.B., 2001. Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo Savanna: with special reference to Eucalyptus. Centre for International Forestry Research, New York, pp 43–48.

-M-

Mace, G.M., Collar, N.J., Gaston, K.J., Hilton-Taylor, C., Akçakaya, H.R., Leader-Williams, N., Milner-Gulland, E.J., Stuart, S.N., 2008. Quantification of Extinction Risk: IUCN's System for Classifying Threatened Species. *Conservation Biology* 22, 1424–1442.

Majdi, H., Pregitzer, K., Morén, A.-S., Nylund, J.-E., I. Ågren, G., 2005. Measuring Fine Root Turnover in Forest Ecosystems. *Plant Soil* 276, 1–8.

Majer, J.D., 1997. The use of pitfall traps for sampling ants – a critique. *Mem. Natl. Mus. Vic.* 56, 323–329.

Maquere, V., Laclau, J.P., Bernoux, M., Saint-Andre, L., Gonçalves, J.L.M., Cerri, C.C., Piccolo, M.C., Ranger, J., 2008. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science* 59, 863–877.

Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M., Capowiez, Y., 2020. How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. *Plant Soil* 453, 29–44.

Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P.A., Kowero, G., 2014. Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6, 61–67.

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S.,

Références bibliographiques

Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86.

Minten, B., Barrett, C.B., 2008. Agricultural Technology, Productivity, and Poverty in Madagascar. *World Development* 36, 797–822.

Moser, C.M., Barrett, C.B., 2003. The disappointing adoption dynamics of a yield-increasing, low external-input technology: the case of SRI in Madagascar. *Agricultural Systems* 76, 1085–1100.

Muchane, M.N., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., Barrios, E., 2020. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 295, 106899.

Musvoto, C., Campbell, B.M., 1995. Mango trees as components of agroforestry systems in Mangwende, Zimbabwe. *Agroforest Syst* 32, 247–260.

Mwase, W., Sefasi, A., Njoloma, J., Nyoka, B.I., Manduwa, D., Nyaika, J., 2015. Factors Affecting Adoption of Agroforestry and Evergreen Agriculture in Southern Africa. *Environment and Natural Resources Research* 5, 148-157.

-N-

Nair, P.K., Mohan Kumar, B., Nair, V.D., 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 10–23.

Nair, P.K.R., 1985. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 3:9 7-128.

Negash, M., Starr, M., 2013. Litterfall production and associated carbon and nitrogen fluxes of seven woody species grown in indigenous agroforestry systems in the south-eastern Rift Valley escarpment of Ethiopia. *Nutr Cycl Agroecosyst* 97, 29–41.

-O-

Odhiambo, H.O., Ong, C.K., Deans, J.D., Wilson, J., Khan, A.A.H., Sprent, J.I., 2001. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya. *Plant and Soil* 235, 221–233.

Oelbermann, M., Voroney, R.P., Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Kass, D.C.L., Schlönvoigt, A.M., 2006. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforest Syst* 68, 27–36.

ONE, 2007. Tableau de Bord Environnemental de la Région Itasy.

-P-

Palm, C.A., 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58, 61-74.

Références bibliographiques

- Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P., Verheyen, K., 2017. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247, 98–111.
- Partey, S.T., Thevathasan, N.V., Zougmore, R.B., Preziosi, R.F., 2016. Improving maize production through nitrogen supply from ten rarely-used organic resources in Ghana. *Agroforest Syst* 92,375–387.
- Paterson, R.T., Karanja, G.M., Roothaert, R.L., Nyaata, O.Z., Kariuki, I.W., 1998. A review of tree fodder production and utilization within smallholder agroforestry systems in Kenya. *Agroforestry Systems* 41, 181–199.
- Pattanayak, S.K., Mercer, D.E., Sills, E., Yang, J.-C., 2003. Taking stock of agroforestry adoption studies. *Agroforestry Systems* 57, 173–186.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., Khanna, P.K., 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168, 241–257.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532, 49–57.
- Peichl, M., Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., Huss, J., Abohassan, R.A., 2006. Carbon Sequestration Potentials in Temperate Tree-Based Intercropping Systems, Southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* 66, 243–257.
- Poeplau, C., Vos, C., Don, A., 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3, 61–66.
- Prasad, J.V.N.S., Korwar, G.R., Rao, K.V., Mandal, U.K., Rao, C.A.R., Rao, G.R., Ramakrishna, Y.S., Venkateswarlu, B., Rao, S.N., Kulkarni, H.D., Rao, M.R., 2010. Tree row spacing affected agronomic and economic performance of Eucalyptus-based agroforestry in Andhra Pradesh, Southern India. *Agroforestry Systems* 78, 253–267.
- PRD, Alaotra Mangoro, 2005. Plan-Regionale-de-developpement-Alaotra-Mangoro-Region-Alaotra-Mangoro.
- Price, G.W., Gordon, A.M., 1999. Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada.
- Pulleman M. Wills S., Creamer R., Dick R., Ferguson R., Hooper D., Williams C., Margenot A.J., 2021. Soil mass and grind size used for sample homogenization strongly affect permanganate-oxidizable carbon (POXC) values, with implications for its use as a national soil health indicator. *Geoderma* 383, 114742.

-R-

R Development Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing.

R Development Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Références bibliographiques

- Rabeharisoa, L., Razanakoto, O.R., Razafimanantsoa, M.-P., Rakotoson, T., Amery, F., Smolders, E., 2012a. Larger bioavailability of soil phosphorus for irrigated rice compared with rainfed rice in Madagascar: results from a soil and plant survey: P use of rainfed and irrigated rice in Madagascar. *Soil Use and Management* 28, 448–456.
- Raboin, L.-M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J.-L., Frouin, J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J., Ahmadi, N., 2013. Upland rice varieties for the highlands of Madagascar: Review of a 25-year-long breeding program. *Cahiers Agricultures* 22, 450–458.
- Rakotomanga, D., Blanchart, É., Rabary, B., Randriamanantsoa, R., Razafindrakoto, M., Autfray, P., 2016. Diversité de la macrofaune des sols cultivés sur les Hautes- Terres de Madagascar. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 20, 495-507.
- Rakotovao, H.N., 2017. Impacts environnementaux de l'adoption des pratiques agroécologiques : empreinte carbone d'exploitation agricole et stocks de carbone : Région Itasy, Madagascar. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Rakotovao, N.H., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Deffontaines, S., Mathé, S., Ramarofidy, M.A., Rakotoniamonjy, T.H., Lepage, A., Masso, C., Albrecht, A., Razafimbelo, T.M., 2021. Impacts on greenhouse gas balance and rural economy after agroecology development in Itasy Madagascar. *Journal of Cleaner Production* 291,
- Rakotovao, N.H., Ramifehiarivo, N., Grinand, C., Razakamanarivo, H.R., Albrecht, A., Razafimbelo, T.M., 2020b. Effects of agroecological practices on soil organic carbon sequestration using synchronic and diachronic approaches in Madagascar. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 121, 113–125.
- Ramachandran Nair, P.K., Nair, V.D., Mohan Kumar, B., Showalter, J.M., 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems, in: *Advances in Agronomy* 108, 237–307.
- Ramifehiarivo, N., Brossard, M., Grinand, C., Andriamananjara, A., Razafimbelo, T., Rasolohery, A., Razafimahatratra, H., Seyler, F., Ranaivoson, N., Rabenarivo, M., Albrecht, A., Razafindrabe, F., Razakamanarivo, H., 2017. Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. *Geoderma Regional* 9, 29–38.
- Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., Trap, J., 2020. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. *Journal of Plant Nutrition* 43, 270–284.
- Randriamanantsoa, L., Frossard, E., Oberson, A., Bünemann, E.K., 2015. Gross organic phosphorus mineralization rates can be assessed in a Ferralsol using an isotopic dilution method. *Geoderma* 257–258, 86–93.
- Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F., 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* 269, 341–356.
- Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Feller, C., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research* 98, 140–149.

Références bibliographiques

Razafimbelo, T.M., Andriamananjara, A., Rafolisy, T., Razakamanarivo, H., Masse, D., Blanchart, E., Falinirina, M.-V., Bernard, L., Ravonjjarison, N., Albrecht, A., 2018. Impact de l'agriculture climato-intelligente sur les stocks de carbone organique du sol à Madagascar. *Cahiers Agricultures* 27, 35001.

Razafindrakoto, M., Csuzdi, C., Rakotofiringa, S., Blanchart, E., 2010. New records of earthworms (Oligochaeta) from Madagascar. *Opusc. Zool. Budapest* 41, 231–236.

Razakamanarivo, R.H., Grinand, C., Razafindrakoto, M.A., Bernoux, M., Albrecht, A., 2011. Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: A multiple regression approach. *Geoderma* 162, 335–346.

Reich, P.B., Oleksyn, J., Modrzyński, J., Mrozinski, P., Hobbie, S.E., Eissenstat, D.M., Chorover, J., Chadwick, O.A., Hale, C.M., Tjoelker, M.G., 2005. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters* 8, 811–818.

Reich, P.B., Sendall, K.M., Stefanski, A., Rich, R.L., Hobbie, S.E., Montgomery, R.A., 2018. Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature* 562, 263–267.

Roces-Diaz, J.V., Díaz-Varela, E.R., Barrio-Anta, M., Álvarez-Álvarez, P., 2018. Sweet chestnut agroforestry systems in North-western Spain: Classification, spatial distribution and an ecosystem services assessment. *Forest Systems* 27, e03S.

Rothe, A., Kreutzer, K., Küchenhoff, H., 2002. Influence of tree species composition on soil and soil solution properties in two mixed spruce-beech stands with contrasting history in Southern Germany. *Plant and Soil* 240, 47–56.

Rowe, E.C., Hairiah, K., Giller, K.E., Van Noordwijk, M., Cadisch, G., 1999. Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by ¹⁵N placement at different soil depths, in: Auclair, D., Dupraz, C. (Eds.), *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications*, Forestry Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 81–93.

-S-

Saggar, S., Hedley, M.J., White, R.E., 1990. A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soils. *Fertilizer Research* 24, 173–180.

Saha, S.K., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Kumar, B.M., 2009. Soil carbon stock in relation to plant diversity of homegardens in Kerala, India. *Agroforest Syst* 76, 53–65.

Saito, K., Vandamme, E., Johnson, J.-M., Tanaka, A., Senthilkumar, K., Dieng, I., Akakpo, C., Gbaguidi, F., Segda, Z., Bassoro, I., Lamare, D., Gbakatchetche, H., Abera, B.B., Jaiteh, F., Bam, R.K., Dogbe, W., Sékou, K., Rabeson, R., Kamissoko, N., Mossi, I.M., Tarfa, B.D., Bakare, S.O., Kalisa, A., Baggie, I., Kajiru, G.J., Ablede, K., Ayeva, T., Nanfumba, D., Wopereis, M.C.S., 2019. Yield-limiting macronutrients for rice in sub-Saharan Africa. *Geoderma* 338, 546–554.

Références bibliographiques

- Schenk, H.J., 2006. Root competition: beyond resource depletion: Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology* 94, 725–739.
- Schleussner, C.-F., Lissner, T.K., Fischer, E.M., Wohland, J., Perrette, M., Golly, A., Rogelj, J., Childers, K., Schewe, J., Frieler, K., Mengel, M., Hare, W., Schaeffer, M., 2016. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth Syst. Dynam.* 7, 327–351.
- Schmidhuber, J., Tubiello, F.N., 2007. Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 19703–19708.
- Sherrod, L.A., Peterson, G.A., Westfall, D.G., Ahuja, L.R., 2005. Soil Organic Carbon Pools After 12 Years in No-Till Dryland Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1600–1608.
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation & Development* 29, 3886–3897.
- Sileshi, G.W., Mafongoya, P.L., Akinnifesi, F.K., Phiri, E., Chirwa, P., Beedy, T., Makumba, W., Nyamadzawo, G., Njoloma, J., Wuta, M., Nyamugafata, P., Jiri, O., 2014. Agroforestry: Fertilizer Trees, in: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Elsevier, pp. 222–234.
- Silici, L., 2014. Agroecology: what it is and what it has to offer. IIED Issue Paper, London
- Sinclair, F.L., 1999. A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems* 46, 161–180.
- Sokol, N.W., Sanderman, J., Bradford, M.A., 2019. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Glob Change Biol* 25, 12–24.
- Somarriba, E., 1992. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems* 19, 233–240.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmermann, M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164, 80–99.
- Styger, E., Rakotoarimanana, J.E.M., Rabevohitra, R., Fernandes, E.C.M., 1999. Indigenous fruit trees of Madagascar: potential components of agroforestry systems to improve human nutrition and restore biological diversity. *Agroforestry Systems* 46, 289–310.
- Styger, E., Rakotondramasy, H.M., Pfeffer, M.J., Fernandes, E.C.M., Bates, D.M., 2007. Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, 257–269.

Références bibliographiques

Suárez Salazar, J.C., Ngo Bieng, M.A., Melgarejo, L.M., Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., 2018. First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PLOS ONE* 13, e0191003.

-T-

Tadross, M., Randriamarolaza, L., Rabefitia, Z. and Zheng, K.Y. 2008. Climate change in Madagascar; recent past and future. World Bank, Washington, DC. 18 p.

Takimoto, A., Nair, P.K.R., Nair, V.D., 2008. Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125, 159–166.

Takimoto, A., Nair, V.D., Nair, P.K.R., 2009. Contribution of trees to soil carbon sequestration under agroforestry systems in the West African Sahel. *Agroforest Syst* 76, 11–25.

Thevathasan, N.V., Gordon, A.M., 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* 61, 257–268.

Tian, G., Olimah, J.A., Adeoye, G.O., Kang, B.T., 2000. Regeneration of Earthworm Populations in a Degraded Soil by Natural and Planted Fallows under Humid Tropical Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 222–228.

Torquebiau, E.F., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 323, 1009–1017.

Tully, K.L., Lawrence, D., 2012. Canopy and leaf composition drive patterns of nutrient release from pruning residues in a coffee agroforest. *Ecological Applications* 22, 1330–1344.

Tully, K.L., Lawrence, D., Scanlon, T.M., 2012. More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 161, 137–144.

Turbé, A., 2010. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 529-538.

-V-

Van Veldhoven, P.P., Mannaerts, G.P., 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. *Analytical Biochemistry* 161, 45-48.

Vanlauwe, B., Aihou, K., Tossah, B.K., Diels, J., Sanginga, N., Merckx, R., 2005. *Senna siamea* trees recycle Ca from a Ca-rich subsoil and increase the topsoil pH in agroforestry systems in the West African derived savanna zone. *Plant Soil* 269, 285–296.

Von Carlowitz, P.G., 1987. ICRAF's multipurpose tree and shrub information system. *Agroforestry Systems* 5, 319–338.

-W-

Références bibliographiques

Wang, G., Zhou, Y., Xu, X., Ruan, H., Wang, J., 2013. Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon Mineralization along an Elevation Gradient in the Wuyi Mountains, China. *PLoS ONE* 8, e53914.

Whitehead, G., Hemming, J.R., 1965. A comparison of some quantitative methods of extracting small vermiform nematodes from soil. *Annals of applied Biology* 55, 25–38.

-Y-

Yang, L.-T., Jiang, H.-X., Tang, N., Chen, L.-S., 2011. Mechanisms of aluminum-tolerance in two species of citrus: Secretion of organic acid anions and immobilization of aluminum by phosphorus in roots. *Plant Science* 180, 521–530.

Yeates, G.W., Bongers, T., DE GOEDE, R.G.M., FRECKMAN, D.W., GEORGIEVA, S.S., 1993. Feeding Habits in Soil Nematode Families and Genera--An Outline for Soil Ecologists. *The Journal of Nematology*. 25, 315–331.

-Z-

Zeng, D.-H., Mao, R., Chang, S.X., Li, L.-J., Yang, D., 2010. Carbon mineralization of tree leaf litter and crop residues from poplar-based agroforestry systems in Northeast China: A laboratory study. *Applied Soil Ecology* 44, 133–137.

Zhang, X., Long, Y., Huang, J., Xia, J., 2019. Molecular Mechanisms for Coping with Al Toxicity in Plants. *Int. J. Mol. Sci.* 20, 1551-1567.

Zhao, C., Guo, E., Shao, Y., Zhang, W., Zhang, C., Liu, Y., Li, Y., Zou, X., Fu, S., 2021. Impacts of litter addition and root presence on soil nematode community structure in a young Eucalyptus plantation in southern China. *Forest Ecology and Management* 479, 118633.

Zingore, S., Mafongoya, P., Nyamugafata, P., Giller, K.E., 2003. Nitrogen mineralization and maize yields following application of tree prunings to a sandy soil in Zimbabwe. *Agroforestry Systems* 57, 199–211.

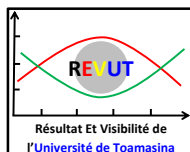
Zinke, P.J., 1962. The Pattern of Influence of Individual Forest Trees on Soil Properties. *Ecology* 43, 130–133.

Zomer, R.J., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., van Noordwijk, M., Wang, M., 2016. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports* 6, 29987.

Zwartendijk, B.W., van Meerveld, H.J., Ghimire, C.P., Bruijnzeel, L.A., Ravelona, M., Jones, J.P.G., 2017. Rebuilding soil hydrological functioning after swidden agriculture in eastern Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239, 101–111.

ANNEXES

Annexe 1. Communication sous forme de Poster lors de la Conférence internationale sur la vision scientifique multidimensionnelle, au service de la recherche et du développement, Tamatave, Madagascar



Vision scientifique multidimensionnelle, au service de la recherche et du développement

Colloque international - Première Edition

Décembre 2020

Agroforesterie : une pratique écologique à motivation socio-économique pour les agriculteurs malgaches

RASOARINAIVO Rondrotsifantenana Angelina a , RAZAFIMBELO Tantely Maminiaina a , BLANCHART Eric b , CHAPUIS-LARDY Lydiebc, RAKOTOVAO Narindra Harisoa a , TRAP Jean b a

Laboratoire des Radioisotopes, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar bUMR Eco&Sols, IRD, Cirad, Inra, SupAgro, Montpellier, France cLMI IESOL, IRD, Dakar, Senegal *Email: tsifantenana@yahoo.fr

L'agroforesterie est actuellement reconnue comme étant un système permettant à la fois d'améliorer les conditions de vie des petites exploitations agricoles et de contribuer au stockage de carbone dans le sol. Madagascar présente des systèmes agroforestiers variés résultant de l'association d'espèces annuelles ou pluriannuelles avec d'espèces ligneuses pouvant être fruitières ou forestières, d'espèces autochtones ou introduites. Afin de connaître la typologie des ces pratiques et la motivation des agriculteurs de leur adoption, des enquêtes ont été effectuées auprès d'une cinquantaine d'agriculteurs dans chacune des régions d'études : Itasy, Alaotra Mangoro et Analanjirofo. Les résultats ont montré que sur les Hautes Terres Centrales, l'agroforesterie résulte d'initiatives paysannes pour des fins précises telles que la diversification des produits agricoles (récolte des fruits et autres dérivés), l'approvisionnement en sources d'énergie (charbon ou bois de chauffe) ou à des valorisations d'espaces. La typologie des systèmes agroforestiers dans cette région est ainsi caractérisée par l'association des arbres fruitiers avec le riz pluvial (44%), suivi par l'association de riz pluvial avec des espèces exotiques à dominance de l'Eucalyptus (46%) et l'association du caféier au riz pluvial (10%). Dans la partie Est qui est une zone forestière, l'agroforesterie est plutôt une alternative écologique à la culture sur brûlis soit en introduisant des arbres fruitiers dans les terrains épuisés après plusieurs feux (60%), soit en cultivant dans les zones éclaircies dans la forêt naturelle (40%). Sur la Côte Est de l'île, l'agroforesterie est caractérisée par des associations à base de girofliers où le riz pluvial est introduit dans les champs de girofliers pour de fin de diversification de produits agricoles. En fonction de la densité de girofliers, il y a des pratiques à forte densité d'arbre à densité supérieure à 200 pieds/ha (48%) et des pratiques à faible densité à densité inférieure à 200 pieds/ha (58 %). En somme, la motivation principale des agriculteurs pour adopter l'agroforesterie reste d'ordre socio-économique à des fins de diversification des produits agricoles. Toutefois, les avantages écologiques notamment sur le stockage de carbone dans le sol commencent à être démontrés scientifiquement et devront faire l'objet de vulgarisation auprès des agriculteurs. **Mots clés** (3-5) : agroforesterie, pratique, motivation, Madagascar

Annexe 2. Communication orale lors du 4^{ème} Congrès mondial de l'Agroforesterie, 19 Mai 2019, Montpellier, France



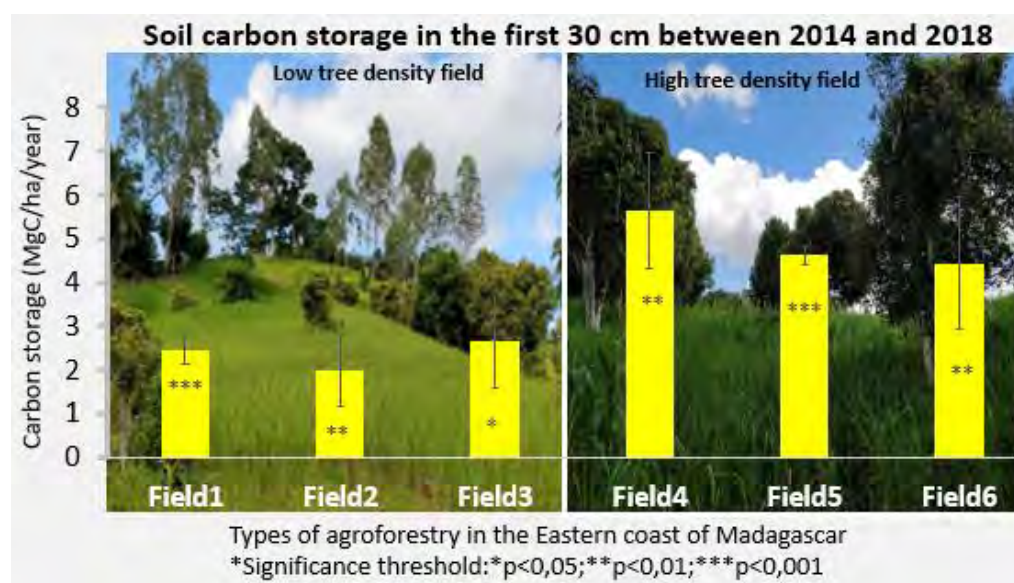
Does soil carbon storage in agroforestry reach the 4 per 1000 objectives? A diachronic analysis in Madagascar

Rasoarinaivo Angelina Rondrotsifantenana¹, Razafimbelo Tantely Maminiaina¹, Blanchart Eric², Lydie Chapuis-Lardy², Razakamanarivo Ramarson Herintsitohaina¹, Andriamananjara Andry¹, Rakotovao Narindra¹, Trap Jean²

¹Laboratoire des Radio-Isotopes, University of Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar

²Eco&Sols, University of Montpellier, CIRAD, INRA, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

Agroforestry is recognized as a strategy to store carbon and to improve food security under the afforestation and the biomass production by crops. This work aimed to analyze the soil carbon storage in agroforestry systems in Madagascar using a diachronic approach. In 2014 and 2018, the soil carbon stocks were measured in the same fields from two types of agroforestry in the eastern coast of Madagascar differing by the tree density: low-density agroforestry with tree density less than 200 trees per ha and high-density agroforestry with tree density higher than 200 trees per ha. The first 30 cm of the soil were sampled in three fields per agroforestry type. Both type associated clove tree *Syzygium aromaticum* with rainfed rice during more than 28 years. Results showed that the mean soil carbon stocks were 90,42 MgC.ha⁻¹ and 85.34 MgC.ha⁻¹ in 2014, respectively in the low-density and high-density agroforestry. Soil carbon storage during the 4-years period varied from 2.35 MgC.ha⁻¹. year⁻¹ in the low-density agroforestry to 4.9 MgC.ha⁻¹. year⁻¹ in the high-density one. This induce increase of 2.6% per year and 5.74% per year, respectively in the low and high-density systems. These practices provided thus higher rate than 0.4 %, the threshold required to offset the global emissions of anthropogenically-derived greenhouse gases as promoted by 4 % initiative.



Annexe 3. Communication sous forme de poster lors de la Conférence internationale sur l'Intensification Durable (CID), 8-10 octobre 2019, Dakar, Sénégal

Agroforestry in Eastern of Madagascar: is it a relevant practice to increase soil storage capacity of carbon and nutrients?

Rasoarinaivo Angelina Rondrotsifantenana^{1*}, Razafimbelo Tantely Maminiana¹, Blanchart Eric², Lydie Chapuis-Lardy^{2,3}, Ranarijaona Mickael¹, Rakotovao Narindra¹, Trap Jean²

¹Laboratoire des Radio-Isotopes, University of Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar

²Eco&Sols, University of Montpellier, CIRAD, INRA, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

³LMI IESOL, Dakar, Senegal

*Contact: tsifantenana @yahoo.fr

In Madagascar, food security is threatened by low agricultural yields resulting from poor soil organic and mineral fertility and unpredictable climate events. Facing to this, farmers tend to adopt agroforestry with the aim to increase soil fertility and agricultural production. In the Moramanga district of the eastern of Madagascar, two types of agroforestry can be found in the vicinity of natural forest (NF) and slash-and-burn (SB) land uses, i.e. agroforestry based on existing native tree species (NTS) and agroforestry based on annual crop fields where fruit trees have been planted (FTP). In 2018, we compared the storage carbon and nitrogen capacity in the first 30 cm of the soil of each land uses. Five fields per land use were sampled as true replications. The soil organic carbon stock (SOC) was 97.8 MgC.ha⁻¹ and 106.9 MgC.ha⁻¹ for NTS and FTP, respectively. FTP has a higher stock, probably due to a greater organic fertilizer input (a mixture of manure and compost). Compared to the NF and the SB systems, agroforestry systems maintained the soil carbon stock as there is no significant difference of SOC between the four land uses. The soil C/N ratio was respectively 14.6 and 14.9 for NTS and FTP showing nitrogen production and its availability for plants. From a soil quality perspective, these practices appear as alternatives to the slash-and-burn cultivation forgoing deforestation by maintaining the soil C stock despite high plant biomass removal.

Table 1 : Agroforestry systems descriptions and soil parameters in the eastern of Madagascar

Land use description					Soil parameters	
Land uses	Age of the ecosystems (Years)	Organic fertilizer input T. ha ⁻¹ . year ⁻¹	Rice yield T. ha ⁻¹ . year ⁻¹	Trees density (Trees. ha ⁻¹)	SOC MgC.ha ⁻¹	C/N
NTS	8	1.87 a	1.31	439	97.8 +/- 17.6 a	14.6
FTP	13	2.97 b	1.91	189	106.9 +/- 25.4 a	14.9
NF	+50	—	—	—	108.3 +/- 29.9 a	13.8
SB	Fallow (2–3)	—	1.06	—	100.89 +/- 7.1 a	13.3

Different letters represent significant differences between land management systems at $p < 0.05$ according to one-way ANOVA. NTS: native tree species-based agroforestry. FTP: Fruit trees planted agroforestry. NF: Native forest. SB: slash-and-burn cultivation.

Annexe 5. Communication orale lors de la Conférence internationale sur le thème « Vers une connexion entre la recherche innovante, la société et les enjeux du développement durable » ; organisée par le Laboratoire des Radio-Isotopes à l’occasion de son 55^{ème} Anniversaire, 14-15 janvier 2021, Antananarivo, Madagascar

L’agroforesterie est-elle une pratique innovante pouvant améliorer la capacité de stockage du carbone des sols malgaches ?

Rasoarinaivo Angelina Rondrotsifantenana¹, Razafimbelo Tantely Maminiaina¹, Blanchart Eric², Lydie Chapuis-Lardy^{2,3}, Rakotovao Narindra¹, Trap Jean²

¹*Laboratoire des Radioisotopes-Université d’Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, BP 3383.*

²*Eco&Sols, Université de Montpellier, CIRAD, INRA, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France*

³*LMI IESOL, Dakar, Sénégal*

Introduction

Le sol constitue un important réservoir de carbone. L’amélioration de sa capacité à séquestrer du carbone constitue une stratégie clé dans l’atténuation du changement climatique (Lal, 2004). Cette stratégie est promue par plusieurs initiatives internationales telle que l’initiative 4 pour mille lancées lors de la COP 21 avec l’ambition d’augmenter les stocks mondiaux de C des sols de 0,4% par an en compensation des émissions mondiales de gaz à effet de serre par des sources anthropiques (Minasny et al., 2017). L’écosystème agricole peut contribuer à atteindre cet objectif à travers des pratiques agroécologiques telle que l’agroforesterie qui est une agroécosystème associant des arbres et des cultures annuelles sur un même espace agricole. L’agroforesterie constitue une pratique innovante reconnue pour sa potentialité à stocker du carbone dans le sol aussi bien dans la région tempérée que dans la région tropicale (Albrecht and Kandji, 2003; De Stefano and Jacobson, 2018). A Madagascar, il existe une grande diversité de pratiques agroforestières associant des cultures vivrières dont le riz et des arbres fruitiers ou des espèces ligneuses faisant partie de culture de rente comme le giroflier (Razafimbelo, 2011). Des études ont déjà été initiées pour évaluer la capacité de stockage du carbone de quelques pratiques agroforestières malgaches. Dans la présente étude, nous cherchons à approfondir nos connaissances de l’effet de ces pratiques agroforestières sur le carbone du sol et à identifier d’autres types de pratiques dans trois zones d’étude allant des Hautes Terre Centrales vers la Côte Est de l’Île. Après l’identification et la description de ces pratiques agroforestières, nous avons évalué leur capacité à stocker du carbone dans le sol.

Matériels et méthodes

L’étude a été effectuée dans trois districts allant des Hautes Terres Centrales (HTC), de l’Est (E) aux Côtes Est (CE) dont Arivonimamo (Région Itasy), Moramanga (Région Alaotra Mangoro) et Fénérive Est (Région Analanjirofo) respectivement. Une enquête a été réalisée au niveau de 150 agroforestiers à raison de 50 agroforestiers par district afin (i) de décrire les pratiques agroforestières dans cette zone et (ii) d’identifier les facteurs de leur adoption par les paysans. Le questionnaire s’est focalisé sur les informations concernant les types d’associations, les cultures annuelles et les espèces ligneuses utilisées. De plus, une approche synchronique a été utilisée pour évaluer le stockage de carbone dans les systèmes agroforestiers identifiés. Cela consiste à calculer la capacité de stockage du carbone dans les agroforesteries (AF) en les comparant à des systèmes de références dont les cultures vivrières (CV) généralement de la riziculture pluviale. Les cultures annuelles ont été choisies comme référence car il s’agit des agroécosystèmes les plus pratiqués par les paysans malgaches. Les échantillons ont été prélevés sur 30, 10 et 16 parcelles d’agroforesterie, respectivement sur les sites HTC, E et CE. L’échantillonnage a été effectué sur la couche arable du sol : entre 0 à 30 cm de profondeur. Le même nombre d’échantillons a été sélectionné pour les systèmes de références.

Les études ont été menées sur des sols ferrallitiques qui constituent la majorité des types de sols malgaches.

Résultats et discussion

1. Les types de pratiques agroforestières dans la zone d'étude

Une grande diversité de pratique agroforestière est observée dans les trois sites (Figure 1). Ces pratiques sont généralement caractérisées par les types d'espèces ligneuses utilisées et la densité de ces espèces ligneuses. Trois types d'agroforesterie ont été identifiés au niveau des HTC : le **jardin d'agrume (JA)**, les **cultures de riz pluvial intercalaires avec l'Eucalyptus (CIE)** et les **cultures intercalaires avec le caféier (CIC)**. Dans la région Est, deux types d'agroforesteries ont été inventoriés : le **jardin forestier (JF)** et la **culture d'arbres fruitiers dans les anciennes cultures sur brûlis (CIF)**. Sur la Côte Est de l'île, deux types de pratiques à base de girofler ont été aussi observées : **l'agroforesterie complexe (AFC)** et **l'agroforesterie simple (AFS)**. Ces deux pratiques diffèrent par la densité et la diversité spécifique des espèces ligneuses (Tableau 1). Sur les HTC, les paysans sont motivés par les avantages de la diversification des produits agricoles issus de l'agroforesterie. Dans les régions orientales, la diversification des produits agricoles et l'incitation commerciale des produits de rente ainsi que la production d'huiles essentielles de girofle sont les principales motivations des paysans pour adopter les pratiques agroforestières.

2. Stockage de carbone dans les systèmes agroforestiers

Les stocks de carbone dans les systèmes agroforestiers sont différents en fonction des sites. De plus, les pratiques agroforestières enregistrent généralement un stock de carbone plus élevé dans le sol par rapports aux cultures annuelles (Figure 2). Sur les HTC, il a été observé que les stocks de carbone dans le sol sur 0-30cm de profondeur dans les systèmes agroforestiers ont été significativement élevés comparés aux cultures annuelles ($p\text{-value} = 0.0006$). Sur des systèmes âgés de 8 à 10 ans, avec une densité de plantation de 200 à 500 pieds/hectare et fertilisés au compost à hauteur de 9 à 12 t/ha, l'agroforesterie a permis de séquestrer +2,8 tC/ha/an. Dans la région Est, sur des systèmes âgés de 8 à 13 ans, avec une densité de plantation de 200 à 300 pieds/hectare et fertilisés au fumier avec une dose de 2,97 t/ha, la différence de stock par rapport à des pratiques de riziculture est de +0,46 tC/ha/an. Dans la région CE, sur des systèmes à base de girofliers, âgés de 15ans, avec une densité de plantation de 150 à 500 pieds/hectare et fertilisés par des débris végétaux, l'agroforesterie a permis de séquestrer + 0,2 tC/ha/an par rapport aux pratiques de riziculture sur brûlis.

3. Les facteurs de stockage du carbone dans les systèmes agroforestiers

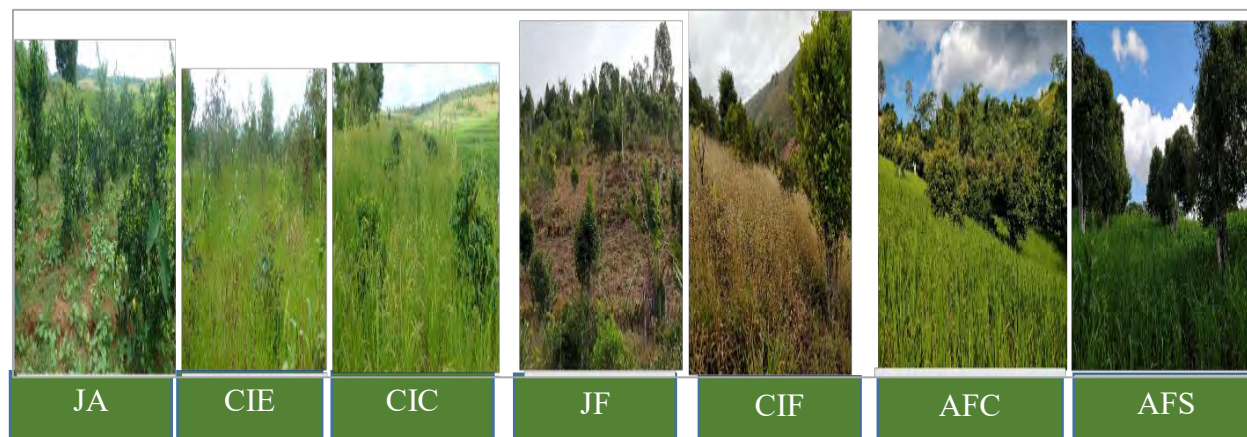
Le stockage élevé du carbone du sol dans les systèmes agroforestiers par rapport aux cultures annuelles peut être expliqué par la présence de l'arbre. Plusieurs études ont déjà démontré un taux de séquestration de carbone dans le sol élevé en agroforesterie par rapport aux cultures sans arbres (Albrecht and Kandji, 2003a; Corbeels et al., 2019). En plus de la séquestration de carbone dans le sol, les systèmes agroforestiers favorisent aussi une séquestration de carbone plus importante dans la biomasse aérienne grâce à la présence de l'arbre et d'autant plus grâce à une diversité spécifique d'arbres (Ma et al., 2020). Nous constatons aussi que les systèmes agroforestiers sur les HTC et la région Est bénéficient d'un apport régulier de fumier et de compost mais à différentes doses. Une dose plus élevée d'apport en fertilisant pourrait expliquer le taux de séquestration de carbone plus élevé dans les systèmes agroforestiers sur les HTC par rapport aux systèmes agroforestiers dans la région Est : +2,8 tC/ha/an contre +0,46 tC/ha/an. En effet, des intrants organiques plus élevés entraînaient généralement des stocks de carbone plus élevés dans le sol (Fujisaki et al., 2018).

Conclusion

A Madagascar, l'agroforesterie est une pratique innovante testée et pratiquée par les paysans. Elle couvre deux enjeux principaux : l'atténuation du changement climatique et la sécurité

alimentaire. Des stocks de carbone plus élevés ont été observés au niveau des pratiques agroforestières malgaches leur attribuant ainsi une contribution majeure aux efforts globaux d'augmenter la capacité de stockage de carbone dans le sol. Cette hausse de stock de carbone dans le sol se traduit par une compensation de l'émission de de GES dans l'atmosphère mais aussi par une augmentation de la matière organique dans le sol qui est synonyme de restauration de la fertilité de sol. Pour un pays très dépendant de l'agriculture comme Madagascar, cette capacité de l'agroforesterie à restaurer le sol est d'une importance capitale pour l'exploration des sols de collines (tanety) favorisant ainsi l'extension de l'agriculture pluviale. L'existence d'une grande diversité de pratiques et d'association de différentes espèces ligneuses, souvent des espèces multifonctionnelles, favorise une diversification des produits agricoles.

Figure 26: Photographie des pratiques agricoles dans la zone d'étude

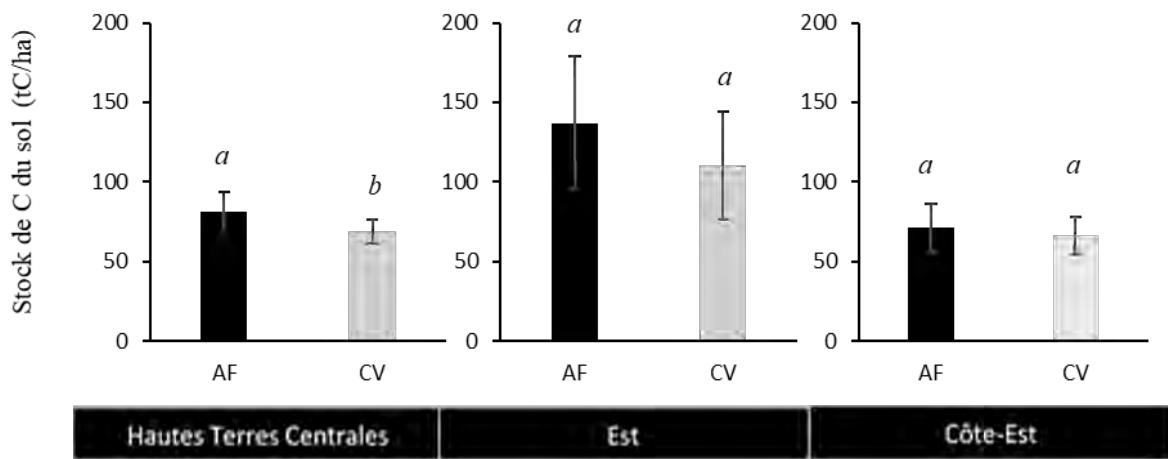


Signification des acronymes : **JA** (Jardin d'Agrume), **CIE** (Culture Intercalaire avec l'Eucalyptus), **CIC** (Culture Intercalaire avec le Cafèier), **JF** (Jardin Forestier), **CIF** (Culture Intercalaire avec des arbres Fruitières), **AFC** (Agroforesterie Complexe) et **AFS** (Agroforesterie Simple)

Tableau 11 : Description des pratiques agroforestières

Site	Type	Espèce ligneuse	Culture annuelle associée	Densité des arbres	Age moyen	Topographie	Fréquence relative	N
HTC	JA	<i>Citrus clementina</i>	maraîchère	200 à 500	8 à 10	bas-fond	46%	50
	CIE	<i>Eucalyptus robusta</i>	riz pluvial	1133	8 à 10	Tanety	44%	50
	CIC	<i>Coffea arabica</i>	riz pluvial	358	8 à 10	bas de pente	10%	50
Est	JF	<i>Psiadia altissima</i> , <i>Dyopsis sp.</i> , <i>Raphia ruffia</i>	annanas, riz	236	8 à 13	Tanety	40%	50
	CIF	<i>Citrus sp.</i> , <i>Persea americana</i> , <i>Litchi chinensis</i>	culture fruitière, riz	200	8 à 13	Tanety	60%	50
CE	AFC	<i>Syzygium aromaticum</i> , <i>Litchi chinensis</i> , <i>artocarpus altilis</i>	Riz pluvial, manioc	>200	18	Tanety	52%	50
	AFS	<i>Syzygium aromaticum</i>	riz pluvial	<200	18	Tanety	48%	50

Figure 27: Stock de carbone dans les systèmes agroforestiers



Les lettres (a et b) indiquent une ANOVA à un facteur du stock de carbone du sol entre les systèmes agroforestiers (AF) et les cultures vivrières annuelles (CV)

Mots-clés

Agroforesterie, stockage, carbone, sol

Support Information 1: mesocosm design and device

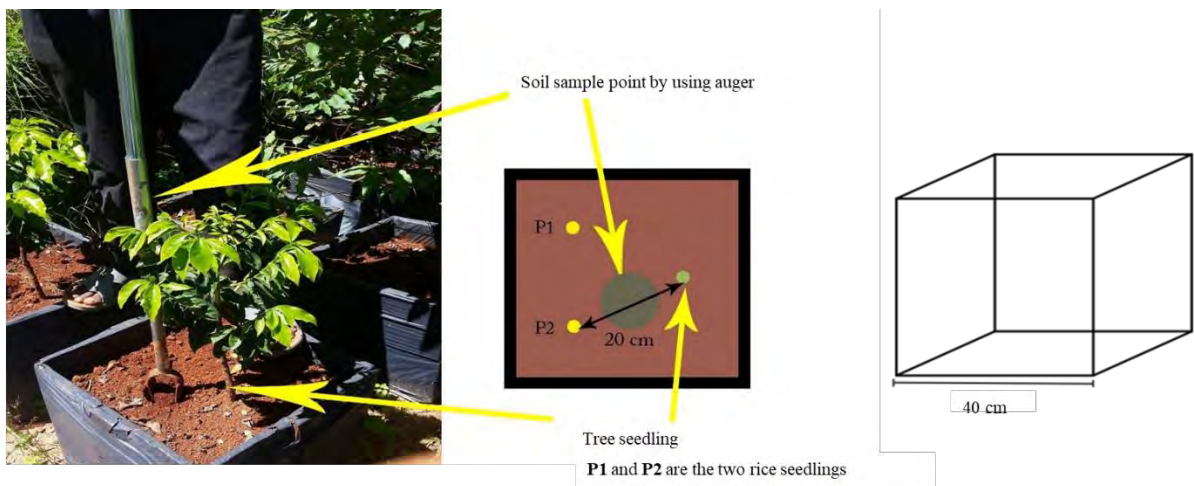


Photo of one mesocosme with *C. Arabica* during soil sampling

upper surface of mesocosm

mesocosm dimension

Support Information 2: Height growth of trees for four months after rice sowing