



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
ECOLE DOCTORALE AGRICULTURE ELEVAGE ENVIRONNEMENT**

**THESE**

**Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques**

**IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'ADOPTION DES  
PRATIQUES AGROECOLOGIQUES : EMPREINTE CARBONE  
D'EXPLOITATION AGRICOLE ET STOCKS DE CARBONE  
Région Itasy, Madagascar**

Par

**RAKOTOVAO Harisoa Narindra**

Soutenue le 12 Avril 2017 devant le jury composé de :

Lilia RABEHARISOA	Professeur Titulaire ESSA, Université d'Antananarivo	Président du jury
Tantely RAZAFIMBELO	Professeur LRI, Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
Alain ALBRECHT	Docteur HDR IRD, La Réunion	Co-Directeur de thèse
Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO	Docteur HDR LRI, Université d'Antananarivo	Rapporteur interne
Samuel RAZANAKA	Docteur HDR CNRE, Madagascar	Rapporteur externe
Harilala ANDRIAMANIRAKA	Docteur HDR ESSA, Université d'Antananarivo	Examineur
Eric BLANCHART	Docteur HDR IRD, Madagascar	Examineur





## *Remerciements*

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet MAHAVOTRA « Agroécologie et foresterie paysanne en Itasy » dont je tiens vivement à remercier les bailleurs et tous les partenaires de m'avoir permis de mener à bien mes travaux de recherche et de m'avoir octroyé une bourse d'étude.

Je remercie également l'Agence Nationale de la Recherche pour son programme « Investissements d'avenir » et coordonné par Agropolis Fondation, dans le cadre de la convention de soutien apportée à l'Institut de Recherche pour le Développement qui m'a octroyé des bourses d'étude et de mobilité à travers le projet CARIM.

Cette thèse a également bénéficié de l'appui financier et matériel de l'International Foundation for Science (IFS) que je tiens sincèrement à remercier.

Cette thèse n'a pas pu aboutir sans la contribution et l'aide de loin ou de près de nombreuses personnes à qui j'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

Ma gratitude et se tourne vers mes Directeurs de thèse :

- Madame Tantely Maminiaina Razafimbelo, Professeur à l'Université d'Antananarivo qui a dirigé cette thèse. Malgré ses multiples occupations, elle a toujours su me consacrer du temps pour l'écoute, l'échange et les conseils sur la conduite de cette thèse. Qu'elle trouve ici ma profonde reconnaissance pour la confiance qu'elle m'a accordée depuis le début de cette thèse et l'appui qu'elle a apporté tout au long de mon cursus universitaire.
- Monsieur Alain Albrecht, Directeur de Recherche à l'IRD qui a co-encadré cette thèse. Ses partages d'expérience, conseils, analyses et idées inépuisables m'ont beaucoup aidé dans la concrétisation de ce travail. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier vivement tous les membres du Jury de cette thèse :

- Madame Lilia Rabeharisoa, Directeur de l'Ecole Doctorale Agriculture – Elevage – Environnement et Professeur à l'Université d'Antananarivo, de m'avoir accueillie au Laboratoire des Radioisotopes au tout début de mes travaux de recherche et de me faire l'honneur de présider le jury de cette soutenance de thèse.
- Madame Herintsitohaina Razakamanarivo, Chercheur-Enseignant à l'Université d'Antananarivo qui a accepté d'être rapporteur interne de cette thèse malgré ses multiples occupations.
- Monsieur Samuel Razanaka, Chercheur au Centre National de Recherche sur l'Environnement d'avoir accepté d'être rapporteur externe de cette thèse malgré ses nombreuses occupations.
- Monsieur Harilala Andriamaniraka, Enseignant Chercheur à l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté d'examiner cette thèse malgré ses multiples responsabilités.

- Monsieur Eric Blanchart, Directeur de Recherche à l'IRD qui a accepté d'examiner cette thèse malgré ses nombreuses responsabilités.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à :

- Tous les collègues, chercheurs, doctorants, techniciens, stagiaires, et amis du Laboratoire des Radiosotopes (LRI) et de l'Institut de Recherche pour le développement (IRD) à l'étranger et à Madagascar pour leur convivialité et soutien apporté tout au long de la réalisation de cette thèse.
- Thierry Becquer qui m'a beaucoup conseillé et aidé dans la facilitation des différentes démarches administratives pour mes déplacements en France et mes travaux de terrain.
- Modeste Rakotondramanana et Marie Paule Razafimanantsoa pour leur aide et collaboration lors des analyses des échantillons et des différents travaux au laboratoire.
- Stéphan Rakotosamimanana pour ses conseils et aide précieuse durant les travaux de terrain en Itasy. J'adresse également mes sincères remerciements à l'endroit de toute sa famille pour leur générosité et hospitalité durant mes déplacements en Itasy.
- Ramifehiarivo Nandrianina pour l'aide qu'il a apporté pour le traitement de données.
- Tous les étudiants qui ont participé et contribué à la réalisation de cette thèse. Je pense particulièrement à Topaniaina Andrianirina, Arimamy Mahefa, Felahasina Rabarison et Mihajaso Georgine Razafisoazara.
- Toute l'équipe d'Agrisud International qui m'a apporté une aide inestimable pour la bonne marche de mes travaux de terrain dans la Région Itasy
- Tous les partenaires du projet Mahavotra que ce soit à Madagascar ou en France pour leur collaboration et leur appui: l'association Etc Terra, L'ONG Agrisud International, l'association Amadese et l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo.
- Tous les exploitants agricoles avec qui on a travaillé tout au long de cette étude.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous mes amis qui m'ont toujours soutenu dans la vie et particulièrement m'ont encouragé dans la réalisation de cette thèse. Je ne pourrais pas tous les citer ici, mais ils se reconnaîtront☺.

J'adresse également mes sincères remerciements à toute ma famille et à ma belle-famille pour leur soutien et encouragement incessant.

Chers parents et cher petit frère, voici le livre, le fruit de toutes ces années de travail durant lesquelles vous m'avez toujours encouragé et soutenu par tous les moyens mais surtout dans vos prières. Soyez rassuré de ma plus profonde gratitude.

Enfin, **Antsa** et **Fahasoavana**, vous êtes la source de ma motivation et de toute mon inspiration. En témoignage de mon amour et de ma profonde reconnaissance pour le soutien et le réconfort que vous m'avez toujours apporté, c'est à vous que je dédie ce travail.



## RESUME

La diffusion des pratiques agroécologiques telles que l'agroforesterie, la foresterie paysanne, la fabrication de compost et le système de riziculture intensif (SRI) vise à améliorer le revenu des exploitations agricoles par l'augmentation et la diversification des produits agricoles et par la gestion durable des ressources naturelles. Cette thèse se propose d'évaluer l'impact de l'adoption de ces pratiques agroécologiques sur (1) l'empreinte carbone des exploitations agricoles et (2) le stockage de carbone dans le sol.

Un échantillonnage de 200 exploitations agricoles représentatives de la région Itasy a été sélectionné pour l'étude. Des enquêtes ont été réalisées pour collecter les données permettant de caractériser chaque exploitation (taille, surface, types de culture et intrants agricoles, élevage, consommation d'énergie). Les flux de biomasses et de matières au sein de chaque exploitation ont été représentés via les cartes des flux de ressource. L'empreinte carbone de chaque exploitation a été calculée à partir d'un outil élaboré dans le cadre de cette thèse appelé: TropiC Farm Tool. Cet outil, développé sur Microsoft Excel intègre tous les facteurs d'émission et de stockage de gaz à effet de serre (GES) adapté au contexte de l'Itasy. Pour l'étude des stocks de carbone du sol, 700 parcelles de culture ont été inventoriées et ont fait l'objet de prélèvement d'échantillons de sol sur une profondeur de 30 cm. La technique de la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR) a été utilisée pour déterminer les stocks de carbone du sol.

L'empreinte carbone des exploitations agricoles étudiées a été estimée en moyenne à  $0,8 \pm 5,5$  tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup> si rapportée en unité de surface et  $0,08 \pm 2,4$  tCO<sub>2</sub>eq.t<sup>-1</sup> si rapporté en unité de production agricole. L'intégration des pratiques agroécologiques à l'échelle de la ferme a permis de réduire l'empreinte carbone des exploitations agricoles jusqu'à 364% grâce à la séquestration de GES via les puits de carbone comme la biomasse ligneuse et le sol.

L'application de la SMIR a permis d'élaborer des modèles performants et robustes pour la détermination du carbone organique du sol pour chaque type de sol dominant de la Région Itasy à savoir les sols ferrallitiques ( $R^2=0,9$  et RPD=3,15) et les sols volcaniques ( $R^2=0,95$  et RPD=4,31). L'étude a montré que le type de sol est un fort déterminant à l'origine de la grande variabilité spatiale du stock de carbone du sol de la Région Itasy. Les sols volcaniques ont montré un stock de carbone moyen de  $125 \pm 22$  MgC.ha<sup>-1</sup> tandis que les sols ferrallitiques ont affiché une valeur moyenne des stocks de  $74 \pm 46$  MgC.ha<sup>-1</sup>. Sur un même type de sol, il a été observé que l'adoption des pratiques agroécologiques induit une tendance positive au stockage de carbone par l'apport de matière organique au sol. Néanmoins, il a été proposé comme perspective d'étude de travailler sur des parcelles paysannes contrôlées et sur des systèmes de plus longue durée pour pouvoir approfondir les effets de chaque pratique agroécologique sur le stockage de carbone dans le sol.

Cette étude a ainsi permis de montrer que l'intégration des pratiques agroécologiques à l'échelle de la ferme offre des bénéfices environnementaux à la fois (i) en termes de réduction des émissions de GES via les techniques de gestion des effluents d'élevage et de gestion de l'eau sur les systèmes de riziculture inondée et (ii) en termes de séquestration de carbone dans la biomasse ligneuse par la plantation d'arbres et dans le sol par l'apport de matières organiques.

**Mots clés :** empreinte carbone, agroécologie, gaz à effet de serre, spectrométrie infrarouge, ferrallitiques, andosols, changement climatique

## ABSTRACT

Agroecological practices such as agroforestry and forestry systems, composting of organic matters, and system of rice intensification (SRI) aim to improve farmers' income by increasing and diversifying agricultural products and restoring environment through the sustainable management of natural resources. This thesis proposes to evaluate the impact of the adoption of these agroecological practices on farms carbon footprint and on carbon storage in soil.

Two hundred (200) representative farms of the Itasy region were selected for the study. Surveys were carried out to collect data to characterize each farm (farm size, area, crop and agricultural systems, inputs, livestock, energy consumption). The biomass and material flows within each farm were represented via resource flow maps. The carbon footprint of each farm was calculated using a tool developed during this thesis: TropiC Farm Tool. This tool, developed on Microsoft Excel, integrates all GHG emission and storage factors adapted to the Itasy context. To study soil carbon stocks, 700 plots were inventoried and soil samples were taken from a depth of 30 cm. The mid-infrared spectrometry (MIRS) technique was used to determine soil carbon stocks.

The average carbon footprint of farms was estimated to  $0.8 \pm 5.5 \text{ tCO}_2\text{eq.ha}^{-1}$  in terms of land surface, and  $0.08 \pm 2.4 \text{ tCO}_2\text{eq.t}^{-1}$  in terms of crop production. Agroecological practices integrated at farm scale reduced significantly farms carbon footprint up to 364%, signifying an important GHG sequestration in woody biomass and in soils.

The application of MIRS allowed to develop performant and robust models for the determination of soil organic carbon on ferralsols ( $R^2 = 0.9$  and  $\text{RPD} = 3, 15$ ) and andosols ( $R^2 = 0.95$  and  $\text{RPD} = 4.31$ ). The study showed that the type of soil is a strong determinant of the spatial variability of the soil carbon stock. The adoption of agroecological practices caused a positive effect on soil carbon storage by the supply of organic matter. Nevertheless, it was proposed as a perspective, to work on controlled plots and on longer-term systems in order to assess the effects of each agroecological practice on carbon storage in soil.

This study showed that the integration of agroecological practices at the farm level provides benefits in terms of (i) GHG mitigation through livestock manure management and water management on flooded rice systems and (ii) carbon sequestration in woody biomass by planting trees and carbon sequestration in the soil by the addition of organic matter.

**Key words:** carbon footprint, agroecology, greenhouse gas, mid-infrared spectrometry, ferralsols, andosols, climate change

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
1 Contexte scientifique de l'étude .....	3
2 Cadrage de la thèse dans le projet Mahavotra .....	6
3 L'Agroécologie .....	6
3.1 Le concept et définition .....	6
3.2 Les pratiques agroécologiques .....	7
4 L'empreinte carbone .....	9
4.1 Concept et définitions .....	9
4.2 Méthodes d'évaluation dans le secteur de l'Agriculture .....	10
5 Le stockage de carbone dans le sol .....	11
5.1 Enjeux agronomiques .....	11
5.2 Enjeux environnementaux .....	12
6 Présentation du milieu d'étude .....	13
6.1 Situation géographique .....	13
6.2 Relief .....	13
6.3 Climat .....	14
6.4 Type de sol .....	14
7 Objectifs et Hypothèses de l'étude .....	15
<b>Partie 1 : EMPREINTE CARBONE D'EXPLOITATION AGRICOLE .....</b>	<b>17</b>
Chapitre 1 : Caractérisation des exploitations agricoles et carte des flux de ressources .....	18
1 Introduction .....	18
2 Matériels et méthodes .....	18
2.1 Echantillonnage des exploitations agricoles .....	18
2.2 Acquisition de données .....	19
2.3 Carte des flux de ressource .....	20
3 Résultats .....	21
3.1 Description des exploitations agricoles .....	21

3.2	Caractérisation des exploitations suivant les zones d'étude .....	23
3.3	Adoption des pratiques agroécologiques .....	31
Chapitre 2 : Elaboration d'un outil de calcul de l'empreinte carbone d'exploitation agricole : TropiC Farm Tool .....		
	Farm Tool .....	33
1	Présentation générale de TropiC Farm Tool .....	33
2	Spécificité de TropiC Farm Tool .....	34
3	Structure générale de l'outil .....	34
4	Méthodologie générale .....	36
5	Guide à la saisie de données .....	37
5.1	Volet Description .....	37
5.2	Volet Agriculture .....	38
5.3	Volet Elevage .....	41
5.4	Volet Foresterie .....	42
5.5	Volet Energie .....	43
5.6	Volet Résultat .....	43
Chapitre 3: Empreinte carbone d'exploitations agricoles suite à l'adoption des pratiques agroécologiques .....		
	.....	46
1	Introduction .....	47
2	Materials and methods .....	49
2.1	Description of case study .....	49
2.2	Farm survey and resource flow mapping .....	50
2.3	Carbon footprint calculation .....	50
2.4	Development of a dedicated farm carbon footprint calculator .....	57
2.5	Data analysis .....	57
3	Results .....	58
3.1	Carbon footprint of farms .....	58
3.2	GHG sources and sinks at farm scale .....	58
3.3	Comparison between farms CFP using Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and in cropland soil .....	59

4	Discussion .....	60
4.1	Comparison with similar studies in different contexts.....	60
4.2	Contribution of practices to farms CFP .....	61
4.3	Influence of agroecological practices on CFP reduction.....	62
5	Conclusion .....	64
<b>Partie 2 : STOCKS DE CARBONE DES SOLS.....</b>		<b>70</b>
Chapitre 1 : Recherche méthodologique pour simplifier le processus de préparation d'échantillons de sol en vue de la prédiction de la teneur en carbone organique des sols par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR) .....		
		71
1	Introduction .....	72
2	Material and methods.....	72
2.1	Soil samples.....	72
2.2	Sample preparation .....	72
2.3	Soil organic carbon references analysis .....	73
2.4	Spectrum acquisition and pre-processing .....	73
2.5	Statistical analysis .....	73
2.6	Regression analysis.....	73
3	Results and discussion.....	74
3.1	Reference carbon data .....	74
3.2	Effect of sample preparation on soil spectra .....	74
3.3	Model performances of different soil sample preparations .....	76
4	Conclusion .....	77
Chapitre 2 : Prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sols de la région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR) .....		
		78
1	Introduction .....	80
2	Matériels et méthodes .....	80
2.1	Zone d'étude et localisation des parcelles .....	80
2.2	Protocole d'échantillonnage de sol.....	81
2.3	Préparation des échantillons et analyses spectrales.....	81

2.4	Analyse du carbone organique et de la texture en laboratoire.....	82
2.5	Prétraitements des données spectrales.....	82
2.6	Elaboration des modèles de prédiction.....	82
2.7	Paramètres de performance d'évaluation des modèles.....	83
3	Résultats.....	83
3.1	Caractéristiques des spectres moyens par type de sol.....	83
3.2	Statistique descriptive des résultats d'analyse au laboratoire.....	84
3.3	Calibration et validation des modèles de prédiction.....	84
4	Discussions.....	85
5	Conclusion.....	88
Chapitre 3: Etude des stocks de carbone des sols et influence des pratiques agroécologiques.....		91
6	Introduction.....	91
7	Matériels et méthode.....	92
7.1	Zones d'étude et échantillonnage.....	92
7.2	Inventaire des parcelles de culture.....	92
7.3	Prélèvement de sols.....	93
7.4	Classification des types de sol suivant leur signature spectrale.....	93
7.5	Détermination de la teneur en carbone organique du sol.....	94
7.6	Détermination de la densité apparente du sol.....	96
7.7	Détermination de la texture du sol.....	96
7.8	Calcul du stock de carbone organique du sol.....	96
7.9	Analyses statistiques.....	96
8	Résultats et discussions.....	97
8.1	Classification et identification des types de sol.....	97
8.2	Densité apparente et teneur en carbone organique du sol.....	98
8.3	Stocks de carbone suivant le type de sol.....	100
8.4	Stock de carbone du sol en fonction de la texture du sol.....	101
8.5	Stocks de carbone du sol suivant la position topographique.....	103
8.6	Stock de carbone du sol suivant les systèmes et pratiques agricoles.....	104

8.7	Influence des déterminants du stock de carbone du sol .....	105
8.8	Effet des pratiques agroécologiques sur le stock de carbone du sol.....	108
9	Conclusion et perspectives.....	110
Chapitre 4 : Cartographie des stocks de carbone des sols.....		112
1	Introduction .....	112
2	Méthodologie.....	112
2.1	Zone d'étude .....	112
2.2	Détermination du stock de carbone du sol .....	113
2.3	Traitement des données spatiales .....	113
2.4	Modélisation des stocks de carbone.....	116
3	Résultats.....	116
3.1	Stocks de carbone du sol.....	116
3.2	Résultats de la modélisation .....	117
4	Conclusion et perspectives.....	120
<b>SYNTHESES ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>121</b>
1	Synthèse des résultats .....	121
2	Perspectives de l'étude .....	123
2.1	L'outil TropiC Farm Tool.....	123
2.2	Mesure et modélisation de facteurs d'émission et de séquestration de GES .	124
2.3	Application des modèles de prédiction du carbone organique du sol.....	124
2.4	Cartographie du carbone.....	124
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>125</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>126</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>i</b>

## **LISTE DES ABBREVIATIONS**

- ACM : Analyse des Correspondances Multiples
- AFD : Agence Française de Développement
- AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use
- AP: Agroecological Practices
- BSI : British Standard Institution
- CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
- CF: Carbon Footprint
- CH<sub>4</sub> : Méthane
- CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone
- CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone
- COP : Conférence des Parties
- DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GHG: Greenhouse Gas
- GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GPS : Global Positioning System
- Ha: Hectare
- I.O.G.A : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
- IGBP : Programme International Géosphère Biosphère
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- IRD : Institut de Recherche pour le Développement
- LRI : Laboratoire des Radioisotopes
- MNT : Modèle Numérique de Terrain
- N<sub>2</sub>O : Oxyde nitreux
- NDVI : Indice de Végétation Normalisé
- PAS 2050 : Publicly Available Specifications-2050
- PCA: Principal Component Analyses
- PLS : Partial Least Square
- PLSR : Partial Least Square Regression
- RMSE : Root Mean Square Error
- RMSECV : Root Mean Squared Error Of Cross-Validation
- RPD : Ratio of Standard Deviation of Prediction
- SAU : Surface Agricole Utile
- SCV : Systèmes sous Couverture Végétale
- SMIR : Spectrométrie en Moyen InfraRouge
- SNV : Standard Normal Variate
- SOC : Soil Organic Carbon
- SRA : Système de Riziculture Amélioré
- SRI : Système de Riziculture Intensif
- SRT : Système de Riziculture Traditionnel
- T: Ton
- Yr: Year

## Liste des figures

Figure 1: Schéma de la thèse illustrant l'agencement des parties et chapitres traités .....	2
Figure 2: Concentrations atmosphériques de CO <sub>2</sub> , de CH <sub>4</sub> et de N <sub>2</sub> O durant les 10 000 dernières années (grands graphiques) et depuis 1750 (médaillons). Les mesures proviennent des carottes de glace (symboles de couleurs différentes correspondant aux diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges). Les forçages radiatifs correspondants par rapport à 1750 sont indiqués sur les axes à droite des grands graphiques. ....	3
Figure 3: Augmentation de la concentration mondiale moyenne mensuelle de CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère entre 2011 et mars 2015 (NOAA) .....	4
Figure 4: Émissions de GES par secteur en 2004.....	4
Figure 5: Emissions de GES de l'agriculture (Tubiello et al., 2014) .....	5
Figure 6: Evolution temporelle de l'échelle et de la dimension d'application de l'agroécologie (Wezel et al., 2009).....	7
Figure 7: Illustration des activités et processus associés aux activités agricoles à considérer dans l'évaluation de l'empreinte carbone (Pandey et Agrawal, 2014) .....	11
Figure 8 : Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP,1998) et (IPCC, 2000).....	12
Figure 9 : Caractéristique des systèmes rizicoles irrigués rencontrés en Région Itasy .....	22
Figure 10 : Carte des flux de ressource zone Imerintsiatosika .....	24
Figure 11 : Carte des flux de ressource zone Miarinarivo II .....	24
Figure 12 : Carte des flux de ressource zone Alatsinainikely .....	25
Figure 13 : Carte des flux de ressource zone Analavory .....	25
Figure 14 : Superficie moyenne des terres suivant les zones d'étude .....	26
Figure 15: Superficie moyenne des systèmes de culture rencontrés par zone d'étude .....	29
Figure 16 : Rendement moyen du riz irrigué par zone étudiée .....	29
Figure 17 : Nombre moyen de tête de bœufs et de porcs par exploitation .....	30
Figure 18 : Application moyenne d'intrants agricoles par exploitation .....	31
Figure 19: Nombre d'arbres plantés en moyenne par exploitation .....	31
Figure 20 : Superficie moyene convertie en Système de Riziculture Intensif par exploitation.....	32
Figure 21 : Production annuelle moyenne de compost par exploitation .....	32
Figure 22: Les différents volets du calculateur .....	35
Figure 23: Volet Description .....	37
Figure 24: Emissions de méthane dues au riz du volet agriculture .....	38
Figure 25: Emissions directes et indirectes de N <sub>2</sub> O dues à la gestion des parcelles de culture .....	39
Figure 26: Estimation de l'azote ajouté aux sols par les résidus de récolte de l'onglet "help" .....	39
Figure 27: Emissions de CO <sub>2</sub> dues au chaulage et à l'urée du volet agriculture .....	40

Figure 28: Emissions de GES dues à l'utilisation de pesticides du volet agriculture .....	40
Figure 29: Emissions de GES dues au brulage de biomasse .....	41
Figure 30: Calcul du stockage annuel de carbone dans les sols du volet agriculture .....	41
Figure 31: Emissions de GES du volet Elevage .....	42
Figure 32: Stockage de carbone dans la biomasse des arbres si espèces répertoriées.....	43
Figure 33: Stockage de carbone dans la biomasse des arbres si espèces non répertoriées.....	43
Figure 34: Emissions de GES dues à la consommation d'énergie .....	44
Figure 35 : Tableau montrant les émissions et séquestrations de GES par volet et par rubrique.....	44
Figure 36 : Présentation graphique des émissions et séquestrations de GES par volet et par rubrique.	45
Figure 37 : Présentation de l'empreinte carbone d'exploitation agricole rapportée en unité de surface et en unité de production .....	45
Figure 38: Farming system compartments and GHG inventory.....	51
Figure 39: TropiC Farm Tool.....	57
Figure 40: Contribution of AP adoption to farms CFP reduction .....	58
Figure 41: Contribution of practices to farms CFP .....	59
Figure 42: Distribution of farms CFP according to various levels of AP adoption and farm land surface .....	63
Figure 43: Farms CFP according to various scenarii of sequestration practices and farm land surface	63
Figure 44 : Principal component analysis (PCA) of spectra of all soil samples ground (0.2mm), sieved (2 mm) and non-prepared - PC1-PC2-Scoreplot .....	75
Figure 45: Average spectra of soil samples ground (0.2mm), sieved (2 mm) and non-prepared.....	75
Figure 46 : Comparisons between reference measurements and MIRS predictions of soil organic carbon over the cross-validation for different sample preparations: ground < 0.2 mm, sieved at 2 mm and non-prepared soils.....	76
Figure 47: Allure des spectres moyens des différents types de sol dominants de la zone d'étude .....	85
Figure 48: COS mesuré vs prédit en calibration des modèles par type de sol.....	86
Figure 49 : Méthode de prélèvement de sol sur chaque parcelle de culture.....	94
Figure 50: Spectre moyen de chaque type de sol .....	99
Figure 51: Densité apparente du sol (g.cm-3) sur 30 cm de profondeur pour chaque type de sol .....	100
Figure 52 : Teneur en carbone organique du sol (g.kg-1) sur 30 cm de profondeur pour chaque type de sol .....	101
Figure 53 : Stock de carbone du sol sur 30 cm de profondeur suivant les types de sols dominants rencontrés dans l'Itasy.....	101
Figure 54 : Relation entre stock de carbone du sol et teneur en argile + limon fin sur 30 cm de profondeur pour les sols ferrallitiques kaolinitiques et sols ferrallitiques gibbsitiques.....	103
Figure 55: Stock de carbone du sol suivant la position topographique des parcelles.....	104

Figure 56 : Stock de carbone du sol suivant les systèmes de culture .....	105
Figure 57: Analyse des correspondances multiples (ACM) des déterminants du stock de carbone du sol .....	107
Figure 58: Analyse des correspondances multiples (ACM) des déterminants du stock de carbone du sol en intégrant la teneur en argile et limon fin.....	107
Figure 59: Comparaison entre système culture vivrière et agroforesterie (AgroF = agroforesterie, CV = culture vivrière).....	108
Figure 60: Comparaison entre l'utilisation de compost et de fumier sur le stock de carbone du sol (CS = compost solide, FB = fumier de bovin ; BF = bas-fond ; BV = bas versant ; V = versant ; S= sommet).....	109
Figure 61 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Alatsinainikely - Andranomody (Source : Andrianirina T., 2015) .....	114
Figure 62 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Analavory - Ankonabe (Source : Andrianirina T., 2015).....	114
Figure 63 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Ampasamanantongotra (Source : Andrianirina T., 2015) .....	114
Figure 64 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Imerintsiatosika (Source : Andrianirina T., 2015) .....	115
Figure 65: Modélisation du stock de carbone du sol (a) en set de calibration n=321 et (b) en set de validation n=139.....	118
Figure 67: Résumé graphique des résultats de l'évaluation de l'empreinte carbone suivant l'adoption des pratiques agroécologiques.....	122

### **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Signification des figures et icônes utilisés pour l'élaboration des cartes des flux de ressource.....	26
Tableau 2: Caractéristiques générales des 200 exploitations agricoles étudiées dans les communes Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely .....	27
Tableau 3: Description of each cluster of farms.....	52
Tableau 4 : GHG emissions from farm activities.....	54
Tableau 5: Tier 3 factors of carbon returned in soils according to the type of organic matter.....	55
Tableau 6: Tier 3 factors of annual carbon sequestration in woody biomass.....	56
Tableau 7: Comparison of farms CFP using Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and cropland soils.....	60
Tableau 8 : Statistic descriptive of organic carbon reference values.....	74

Tableau 9 : SOC models according to soil sample preparations .....	76
Tableau 10 : Résultat statistique des analyses du COS et de la texture des sols .....	84
Tableau 11 : Performance des modèles de prédiction du COS en calibration et validation .....	87
Tableau 12 : Performance des modèles de prédiction de la texture du sol en cross-validation.....	87
Tableau 13 : Caractéristiques des zones étudiées .....	92
Tableau 14: Distribution des parcelles échantillonnées suivant le type de sol, la position topographique et les systèmes de culture .....	95
Tableau 15 : Texture du sol sur 30 cm de profondeur.....	102
Tableau 16: Les quatre zones de la région Itasy où les travaux d'échantillonnage ont été effectués..	113
Tableau 17: Stocks de carbone du sol sur 30 cm de profondeur par type de sol et par occupation de sol (MgC.ha-1).....	117

### **Liste des cartes**

Carte 1 : Carte de localisation de la Région Itasy et des zones d'activités du projet Mahavotra .....	13
Carte 2: Carte pédologique de la région Itasy (FTM, BD 200) .....	15
Carte 3 : Carte de localisation des 200 exploitations agricoles objet de l'étude .....	19
Carte 4: Localisation des parcelles d'échantillonnage dans les quatre communes d'étude de la Région Itasy .....	81
Carte 5 : Carte du stock de carbone (MgC.ha-1) des zones étudiées (a) Alatsinainikely, (b) Analavory, (c) Ampasamanantongoatra, (d) Imerintsiatosika sur une profondeur de 0 à 30 cm .....	119

## INTRODUCTION GENERALE

Dans les régions tropicales comme Madagascar, l'agriculture a été toujours au centre des divers enjeux que ce soit en matière de sécurité alimentaire qu'en matière de vulnérabilité aux effets du changement climatique. A Madagascar, l'agriculture généralement de type familial est caractérisée par une faible performance en termes de productivité et de compétitivité. Face à cela, nombreuses sont les actions qui ont été menées pour appuyer les agriculteurs afin d'améliorer leur revenu agricole et les amener à une autonomie économique. Depuis des années, des pratiques alternatives aux pratiques traditionnelles ont été diffusées afin d'améliorer la productivité et augmenter la production agricole des ménages. Dans la région Itasy, le concept de l'agroécologie a été introduit récemment en adoptant l'approche exploitation agricole. En effet, il s'agit d'aider individuellement les ménages à l'adoption des dites pratiques agroécologiques pour améliorer leur production agricole donc leur revenu tout en maintenant une faible pression sur leur environnement de production (sol, ressource en eau, biodiversité, plante). Si ces pratiques agroécologiques ont déjà prouvé leur efficacité en termes de production par rapport aux pratiques traditionnelles, il se pose la question des impacts environnementaux notamment en termes de flux de gaz à effet de serre de stocks de carbone dans les puits de carbone comme le sol.

La présente thèse sera axée sur l'étude des impacts environnementaux des pratiques agroécologiques à l'échelle exploitation agricole par l'étude de l'empreinte carbone et à l'échelle parcellaire par l'étude des effets des pratiques agroécologiques sur le stocks de carbone du sol. Il s'agit d'une approche axée d'une part sur les flux de gaz à effets de serre et d'autre part sur les stocks de carbone.

Après l'introduction générale qui présentera une synthèse bibliographique de l'état des connaissances sur le sujet étudié et des hypothèses de travail, s'en suivront les deux grandes parties de la présente thèse; chaque partie étant subdivisée en chapitres.

La première partie traitera les flux de gaz à effet de serre par l'étude de l'empreinte carbone des exploitations agricoles suite à l'adoption des pratiques agroécologiques. Trois chapitres composeront cette partie, à savoir :

- i. La caractérisation des exploitations agricoles étudiées ;
- ii. L'élaboration d'un outil de calcul de l'empreinte carbone d'exploitation agricole nommé *TropiC Farm Tool* ;
- iii. L'étude de l'empreinte carbone des exploitations agricoles suivant leur niveau d'adoption des pratiques agroécologiques.

La deuxième partie concernera l'étude des stocks de carbone du sol. Cette partie comportera quatre chapitres, à savoir :

- i. La mise en place de démarche méthodologique pour simplifier le processus de préparation d'échantillons de sol en vue de la prédiction de la teneur en carbone organique des sols par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)
- ii. La prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sols de la Région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)
- iii. L'étude des stocks de carbone du sol et effet des pratiques agroécologiques
- iv. La cartographie du stock de carbone du sol au niveau de la zone d'étude

Une conclusion générale qui comportera la synthèse des principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives qui ressortent de l'étude sera présentée à la fin du livre (Figure 1).

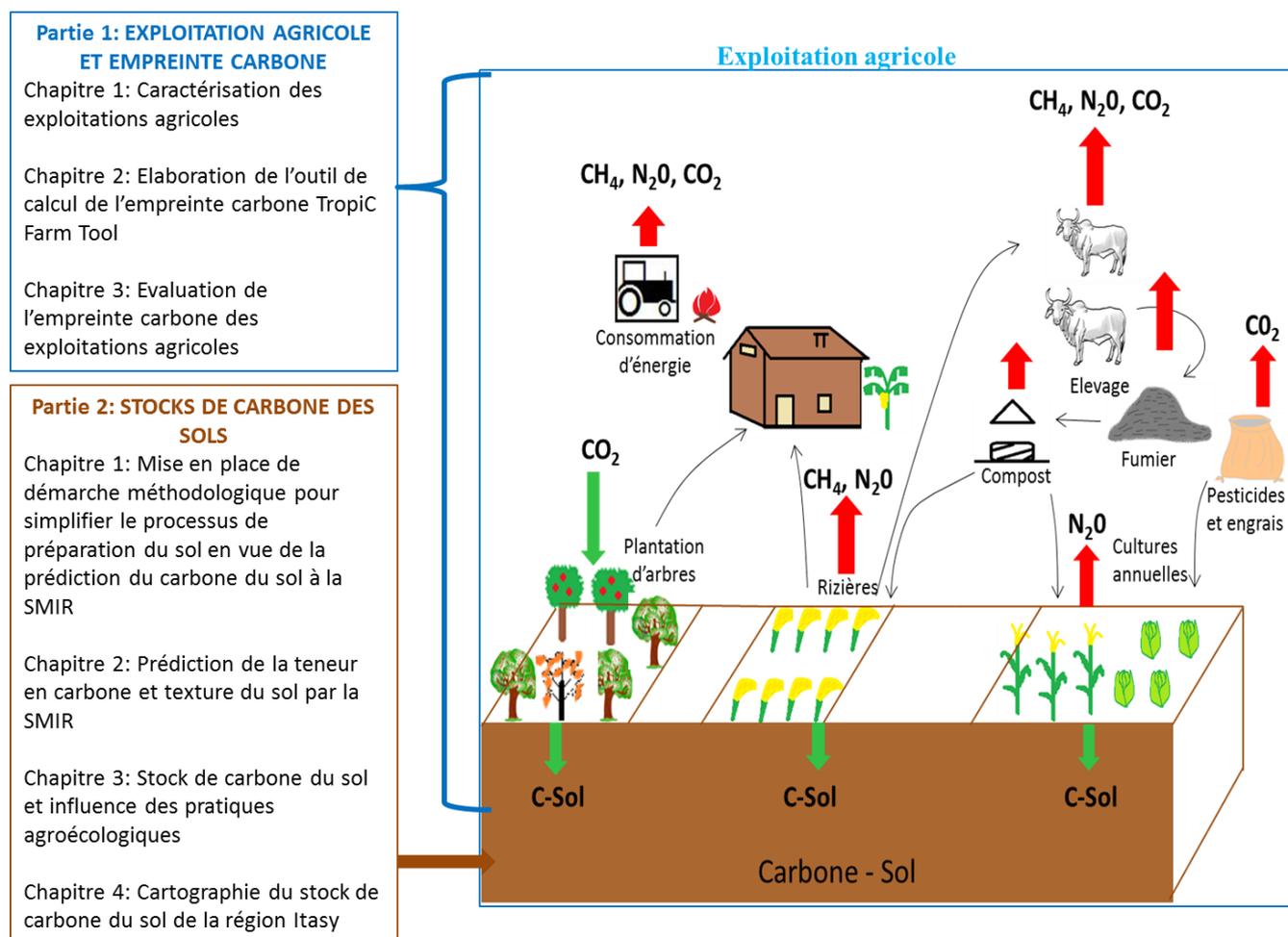
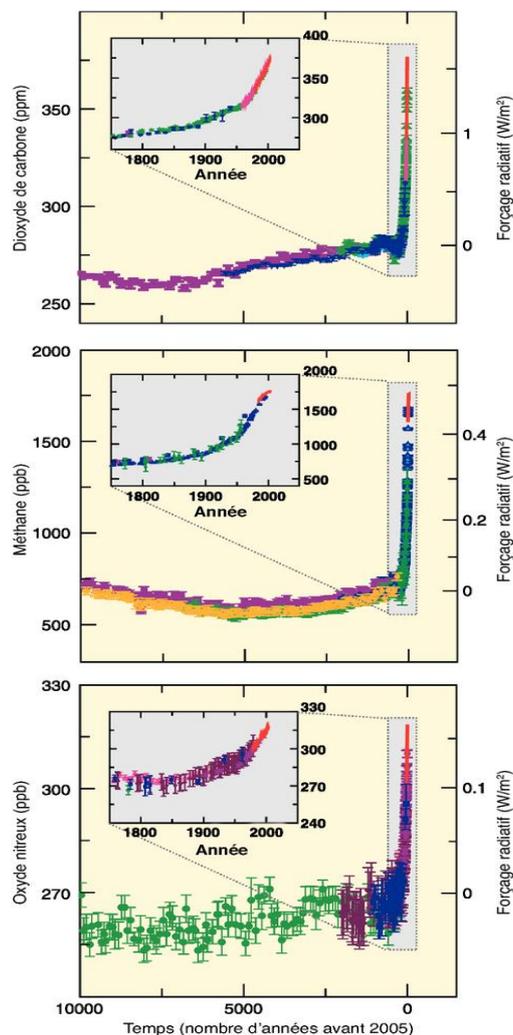


Figure 1: Schéma de la thèse illustrant l'agencement des parties et chapitres traités

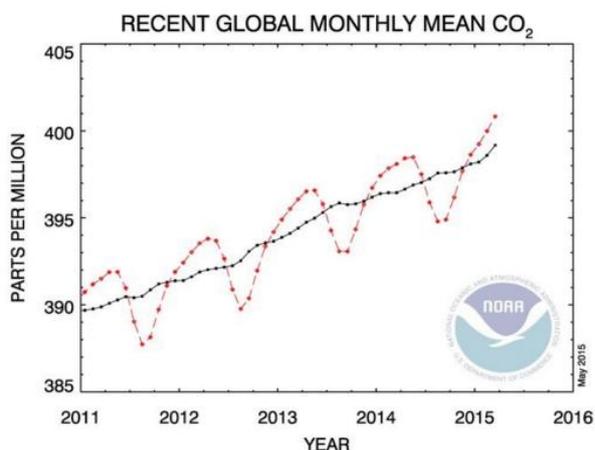
## 1 Contexte scientifique de l'étude

Depuis la Révolution Industrielle de la deuxième moitié du 18<sup>e</sup> siècle, les concentrations de gaz à effet de serre (GES) tels le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère ont connu une augmentation considérable. Sous l'effet des activités humaines, les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O se sont fortement accrues depuis 1750. Elles sont aujourd'hui bien supérieures aux valeurs historiques déterminées par l'analyse de carottes de glace couvrant de nombreux millénaires (Figure 2) (GIEC, 2007). La concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère a atteint un niveau record au mois de mars 2015, ce qui est un signe évident du réchauffement climatique avec une concentration mondiale moyenne mensuelle qui a dépassé pour la première fois le seuil des 400 parties par million (ppm) (Figure 3) (NOAA, 2015).



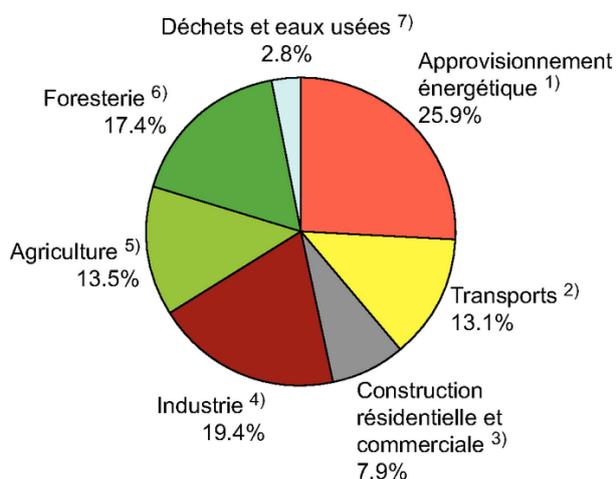
**Figure 2: Concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O durant les 10 000 dernières années (grands graphiques) et depuis 1750 (médaillons). Les mesures proviennent des carottes de glace (symboles de couleurs différentes correspondant aux diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges). Les forçages radiatifs correspondants par rapport à 1750 sont indiqués sur les axes à droite des grands graphiques.**

Une quantité plus importante du rayonnement solaire se trouve prisonnière dans l'atmosphère provoquant l'augmentation de la température à la surface de la Terre. Si au 20<sup>e</sup> siècle, une hausse de 0,7°C de la température a été notée, avec la tendance observée actuellement, elle pourrait encore s'accroître de 1,6 à 6,4°C dans les cent ans à venir (GIEC, 2007). Ce réchauffement planétaire est connu plus couramment sous le terme de « changement climatique ».



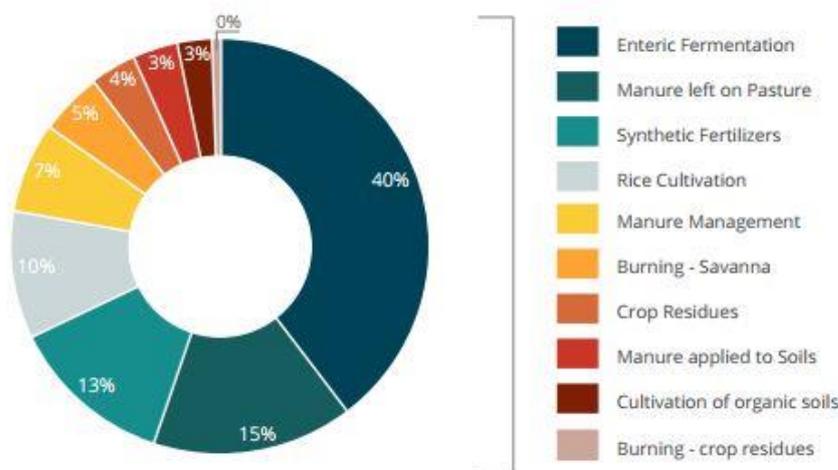
**Figure 3: Augmentation de la concentration mondiale moyenne mensuelle de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère entre 2011 et mars 2015 (NOAA)**

Nombreux sont les facteurs à l'origine du changement climatique mais les émissions mondiales de GES imputables aux activités humaines sont les plus importantes notamment depuis l'époque préindustrielle. Ces émissions anthropiques sont l'approvisionnement énergétique (25,9%), l'industrie (19,4%), la foresterie (17,4%), l'agriculture (13,5%), les transports (13,1%), les bâtiments résidentiels et commerciaux (7,9%) ainsi que la gestion des déchets et des eaux usées (2,8%) (Figure 4) (GIEC, 2007).



**Figure 4: Émissions de GES par secteur en 2004**

Les émissions de GES issues de l'agriculture ont augmenté de 4.6 à 5.0 Gt CO<sub>2</sub>eq.an<sup>-1</sup> dans les années 1990 à 2000 et de 5.3 Gt CO<sub>2</sub>eq.an<sup>-1</sup> entre 2000 à 2011. Dans le même temps, les données montrent que l'intensité des émissions de GES des produits (à savoir, les émissions de GES par unité de marchandise produite) a diminué au cours de 1990-2010, mais que si aucune autre mesure d'atténuation et d'amélioration de l'efficacité technique n'est mise en œuvre, les émissions futures peuvent encore augmenter jusqu'à 30% en 2050 (Tubiello et al., 2014). Dans le secteur de l'agriculture, au niveau mondial, la fermentation entérique constitue la plus grande source de GES (40%) suivie de la mise en tas du fumier sur les aires de pâturage (16%), de l'utilisation des fertilisants chimiques (13%), de la culture inondée du riz (10%), de la gestion des effluents d'élevage (7%) et le brûlage de biomasse (5%) (Figure 5).



**Figure 5: Emissions de GES de l'agriculture (Tubiello et al., 2014)**

Quoique l'agriculture soit une source importante de GES, c'est également le secteur qui présente un fort potentiel d'atténuation au changement climatique suivant trois mécanismes, à savoir, la réduction des émissions de GES par une gestion plus efficacement les flux de carbone et d'azote dans les écosystèmes agricoles ; l'augmentation de la séquestration de carbone ou la capture du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans les puits de carbone (sols et bois) et par l'évitement des émissions comme par l'utilisation de bioénergie (Smith et al., 2008). Ainsi, nombreuses sont les pratiques et techniques agricoles qui peuvent constituer des opportunités d'atténuation aux émissions de GES.

Au niveau international, nombreuses ont été les mesures prises pour faire face au changement climatique. De la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) établie en 1992 durant le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, en passant par le Protocole de Kyoto (1997) jusqu'à la Conférence des Parties, édition 21 (COP 21) ou Accord de Paris 2015, plus de 160 pays ont signé un accord international destiné à ralentir le réchauffement de la planète. Quoique ce dernier n'étant pas encore ratifié à ce jour, les réglementations et différents rapports du Groupe

d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) portant sur les données scientifiques, techniques et socio-économiques relevant du changement climatique et des activités humaines constituent toujours des documents de référence internationale aux études relatives au changement climatique.

C'est dans le cadre de ce contexte que cette étude vise à évaluer l'impact des pratiques agricoles et agroécologiques sur le bilan de GES des exploitations agricoles de la région Itasy à Madagascar et sur la capture de carbone dans les puits de carbone comme le sol.

## **2 Cadrage de la thèse dans le projet Mahavotra**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Mahavotra ou « *Agroécologie et foresterie paysanne en Itasy* », un projet pilote d'évaluation carbone du changement des pratiques agricoles. Le projet ayant débuté en 2011 et d'une durée de 5 ans est financé par l'Agence Française de Développement (AFD), le Groupe Star's Service et la Région Aquitaine.

Le projet Mahavotra œuvre à la diffusion de pratiques agroécologiques afin d'améliorer et de diversifier le revenu agricole des agriculteurs. Ces pratiques agroécologiques englobent diverses pratiques, dont le Système de Riziculture Intensif (SRI), l'utilisation du compost à base de matériaux organiques, la plantation d'espèces ligneuses, la lutte contre l'érosion des sols agricoles par l'aménagement des bassins versant et la mise en place de terrasses en courbe de niveau.

Un des objectifs du projet consiste à contribuer à la lutte contre le changement climatique, il s'inscrit dans son volet 3, le développement de méthodes d'analyse et de suivi de l'impact carbone du projet avec l'appui d'instituts de recherche dont le Laboratoire des Radioisotopes (LRI) et l'Institut de Recherche pour le développement (IRD). C'est dans le cadre de cet axe du projet que s'inscrit la présente thèse de doctorat.

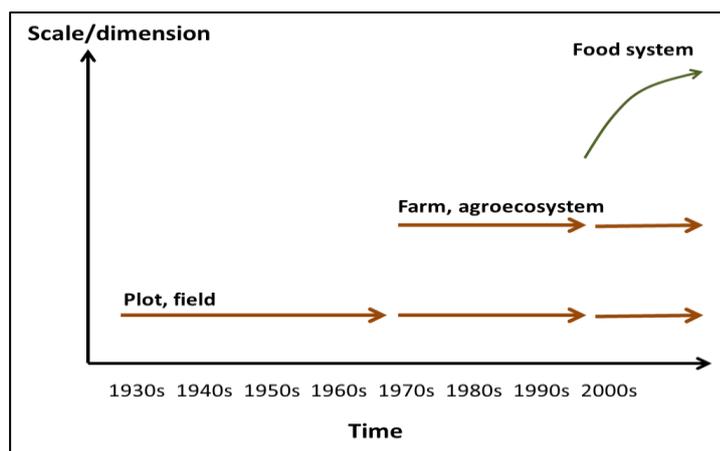
## **3 L'Agroécologie**

### **3.1 Le concept et définition**

Le mot "agroécologie" a émergé au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Au départ, le concept d'agroécologie se rapportait à la conciliation de deux disciplines qui sont l'agronomie et l'écologie. L'évolution du terme s'est ensuite élargie vers d'autres disciplines telles que la zoologie, la botanique et la physiologie des plantes. Son domaine d'application s'est également diversifié dont l'agriculture et l'environnement. L'évolution de sa définition durant ces 80 dernières années a par ailleurs montré que l'agroécologie n'a cessé d'évoluer d'échelle d'application. Partant de l'échelle de la parcelle (années 1930 à 1960), puis de la ferme, de l'agroécosystème et du paysage (1970 à 2000), et finalement pour

atteindre l'échelle des systèmes alimentaires mondiaux à partir des années 2000 (Figure 6) (Wezel et al., 2009).

Wezel et al. (2009) a défini l'agroécologie comme étant à la fois une science, un mouvement social et un ensemble de pratiques. Elle combine non seulement des réponses d'ordre technique permettant à l'Homme de concilier productivité avec faible pression sur l'environnement et gestion durable des ressources naturelles mais également des pratiques pertinentes, accessibles et adaptées/adaptables visant à maintenir les équilibres entre une activité et son milieu (Agrisud International, 2010).



**Figure 6: Evolution temporelle de l'échelle et de la dimension d'application de l'agroécologie (Wezel et al., 2009)**

Actuellement, dans un contexte de préoccupation pour des systèmes alimentaires plus sains et des effets du réchauffement global, l'agroécologie gagne de plus en plus de terrain en tant qu'agriculture durable du fait de ses avantages multiples que ce soit en termes de productivité agricole ou en termes de résilience face aux effets négatifs du changement climatique. Néanmoins, sa promotion dans le cadre des politiques publiques agricoles, de la recherche et de la vulgarisation reste actuellement encore limitée (Silici, 2014).

### **3.2 Les pratiques agroécologiques**

Selon Allaverdian et al. (2014), l'agroécologie se fixe comme unité d'analyse de base l'« agroécosystème ». Il s'agit de prendre comme référence à toute activité de production l'équilibre naturel de la nature. De là, découlent cinq grands principes des pratiques dites agroécologiques : (i) le recyclage de la biomasse et l'équilibre du flux et de la disponibilité de nutriments ; (ii) la sauvegarde de conditions du sol favorables pour la croissance des plantes ; (iii) la minimisation des pertes de radiation solaire, air, eau et nutriments ; (iv) le renforcement de la diversification génétique et des espèces de l'agroécosystème dans le temps et dans l'espace ; et (v) le renforcement des interactions biologiques parmi les composants de l'agro-biodiversité.

Dans la région Itasy, nombreuses sont les pratiques agroécologiques qui ont été diffusées et vulgarisées auprès des agriculteurs par l'ONG internationale Agrisud International. Le principal objectif étant d'assurer la durabilité des agroécosystèmes des agriculteurs afin qu'ils puissent maintenir une production agricole optimale durable. Quatre principales pratiques agroécologiques ont été diffusées, à savoir la foresterie paysanne, l'agroforesterie, le compostage de matières organiques issues de l'élevage et de l'agriculture et enfin le Système de Riziculture Intensif (SRI) (Photo 1).

- La foresterie paysanne consiste en la plantation d'arbres d'une part d'espèces forestières à vocation énergétique et bois de construction (exemple : *Eucalyptus sp.*, *Pinus sp.*, *Acacia sp.*) et d'autre part d'espèces fruitières destinées à la consommation et au marché local (exemple : *Coffea arabica*, *Citrus sp.*, *Litchi chinensis*, *Mangifera indica* et *Persea americana*). Comme il s'agit de plantation à l'échelle paysanne, les superficies considérées sont assez variables.
- L'agroforesterie est un système de gestion des ressources dynamique, écologique et naturel et qui, par l'intégration des arbres dans le paysage, permet une production durable et diversifiée, procurant au paysan des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux accrus. En Itasy, il s'agit d'association de cultures annuelles à des espèces ligneuses pouvant être d'espèces forestières ou fruitières.
- Le compostage est défini comme un procédé biologique contrôlé de conversion et de valorisation des substrats organiques (sous-produit de biomasse, déchets organiques d'origine animale ou végétale) en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau et riche en composés humiques. Dans la région Itasy, les matières premières à la fabrication du compost varient d'une ferme à une autre selon la disponibilité des substrats organiques. Néanmoins, la grande majorité des composts produits sont faits à partir de fumier de parc, de paille de riz, de feuilles de banane ou feuilles vertes, de balles de riz ou de déchets ménagers.
- Le système de riziculture intensif ou SRI est un système de culture rizicole découvert en 1983-1984 par Henri de Laulanie de Sainte Croix, un prêtre jésuite ingénieur agronome. Le SRI est principalement caractérisé par le repiquage de jeunes plants, le désherbage fréquent et l'assèchement fréquent des parcelles rizicoles. Ce système est particulièrement productif par une gestion optimale des ressources plantes, sol, eau et nutriments (<http://sri.cals.cornell.edu/>). Dans la région Itasy, le SRI enregistre un rendement moyen de 5t de paddy à l'hectare.



**Foresterie paysanne à espèce forestière d'eucalyptus**



**Agroforesterie avec association de culture annuelle et de caféier**



**Compostage de matières organique composées de fumier de ferme, de paille de riz et de feuilles vertes**



**Système de Riziculture Intensif**

**Photo 1: Photos des différentes pratiques agroécologiques diffusées dans la Région Itasy**

## **4 L’empreinte carbone**

### **4.1 Concept et définitions**

Une “Empreinte” ou « *Footprint* » est définie comme la mesure quantitative de l’appropriation des ressources naturelles par l’être humain (Hoekstra, 2008). Autrement dit c’est la mesure des indicateurs du développement durable puisqu’elle tient compte à la fois des aspects environnemental, économique et social (Cucek et al., 2012). Nous pouvons citer comme exemple: *carbon footprint*, *water footprint*, *energy footprint*, *chemical footprint*, *emission footprint*, *nitrogen footprint*, *land footprint*, *biodiversity footprint*, *social footprint* and *financial/economic footprint*.

L’empreinte carbone ou « *carbon footprint* » est une composante de la mesure des empreintes environnementales des activités humaines. En effet, durant ces dernières décennies, la mesure de l’empreinte carbone est devenue un fort indicateur de la protection de l’environnement (Wiedmann and Minx, 2008; Galli et al., 2012). L’intérêt grandissant sur la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre pour atténuer le phénomène du changement climatique a inspiré de nombreuses études sur l’empreinte carbone des activités humaines.

Nombreuses sont les définitions de l’empreinte carbone proposées dans la littérature, néanmoins ce concept est communément défini comme étant la quantité totale de gaz à effet de serre émise dans l’atmosphère par une organisation, un événement, un produit ou groupe de personnes (IPCC, 2006). Cette quantité de gaz à effet de serre étant exprimée en CO<sub>2</sub> équivalent (Wiedmann and Minx, 2008).

#### **4.2 Méthodes d’évaluation dans le secteur de l’Agriculture**

Au niveau international, du fait de l’urgence de produire des travaux d’évaluation des impacts des différentes activités humaines sur le climat, les méthodes de calcul de l’empreinte carbone sont diversifiées et non uniformes. Actuellement, de nombreux Standards et règles de comptabilité carbone ont été mis en place et sont actuellement disponibles pour usage. Un des plus utilisé étant :

Les Lignes Directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (ou “*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006*”) qui catégorise toutes les sources de gaz à effet de serre d’origine anthropique en quatre secteurs à savoir : l’énergie, les procédés industriels, l’agriculture, foresterie et autres affectations des terres, ainsi que la gestion des déchets.

Dans le cadre de cette thèse, l’évaluation de l’empreinte carbone des exploitations agricole a suivi le premier standard énuméré correspondant aux lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. La méthode d’évaluation de l’empreinte carbone des exploitations agricoles tient ainsi compte des différents processus d’émission et d’absorption de GES appelés également flux de gaz à effet de serre au niveau des fermes agricoles. En effet toutes les activités associées au fonctionnement de l’exploitation agricole doivent être identifiées et considérées (Figure 7).

Suivant ces standards, Pandey et Agrawal (2014) résument les étapes de l’évaluation de l’empreinte carbone comme suit :

- a) Sélection des gaz à effet de serre à considérer (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O pour le secteur de l’agriculture)
- b) Définitions des limites du calcul ou « *system boundary* ». Il s’agit de définir les limites de chaque système étudié. Dans le cadre de cette étude, il s’agit de l’élaboration des cartes des flux de ressources de chaque exploitation agricole qui permet de prendre en compte tous les éléments de la ferme considérés dans les calculs.
- c) La collecte des données d’activités et des facteurs d’émission/absorption
- d) Le calcul de l’empreinte carbone

Dans le domaine de l’agriculture, l’empreinte carbone offre ainsi un outil à fort potentiel de comparaison de performance des différents systèmes, pratiques et techniques agricoles adoptés par les

agriculteurs (Pandey et Agrawal, 2014), ce qui est indispensable pour mettre en place une stratégie efficace en vue de maîtriser les émissions de GES à l'échelle de l'exploitation agricole.

A l'échelle de l'exploitation agricole, l'approche empreinte carbone offre la possibilité de quantifier non seulement les émissions réelles occasionnées par les différentes activités agricoles sources de GES mais également les potentialités de stockage de GES par les différents puits.

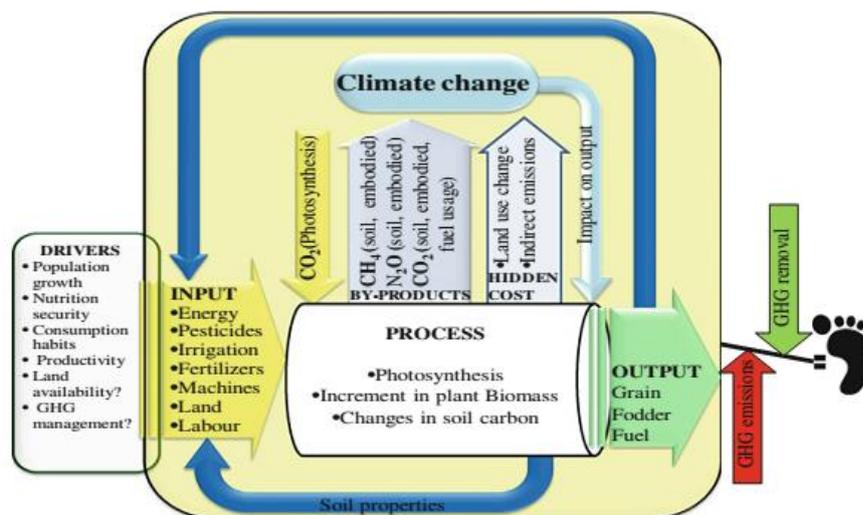


Figure 7: Illustration des activités et processus associés aux activités agricoles à considérer dans l'évaluation de l'empreinte carbone (Pandey et Agrawal, 2014)

## 5 Le stockage de carbone dans le sol

### 5.1 Enjeux agronomiques

Le sol tient une place importante dans le domaine de l'agronomie comme étant à la base de toute production agricole. La qualité des propriétés physiques du sol est en relation avec la teneur en matière organique. Cette dernière est à la base de la stabilité structurale des sols (Bissonnais et Arrouays, 1997) favorisant la résistance à l'érosion, la rétention en eau et des éléments minéraux utiles à la plante. Favoriser le stockage de carbone dans le sol par l'apport de matière organique et la bonne gestion des terres agricoles constitue un facteur important du point de vue agronomique pour l'augmentation et le maintien de la fertilité des sols et donc du rendement agricole.

Nombreuses sont les études déjà entreprises pour évaluer l'effet des techniques culturales sur le stockage de carbone dans les sols. La plupart des comparaisons entre les systèmes de travail du sol montrent des teneurs en carbone significativement plus élevées sous les systèmes sans labour (SCV) par rapport à aux systèmes conventionnels avec labour au niveau des couches superficielles du sol (0-10 cm de profondeur) (Arrouays et al., 2002 ; Razafimbelo, 2005).

La gestion de la fertilité par l'apport régulier de matières organiques telles que fumier et compost constitue également une technique qui permet d'augmenter le stock de carbone dans le sol (Gilley and Risse, 2000 ; Gregorich et al., 2001, Sommerfeldt et al., 1988).

Du point de vue système de culture, différentes études ont mis en évidence le rôle de l'agroforesterie tropicale comme étant une des principales méthodes permettant la plus importante séquestration de carbone dans le système sol-plante et notamment le compartiment sol (Albrecht and Kandji, 2003; Hutchinson et al., 2007).

## 5.2 Enjeux environnementaux

Le sol est également reconnu pour sa fonction puits de carbone qui lui confère un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre des flux de gaz à effet de serre vers l'atmosphère à l'origine du changement climatique. Au niveau du cycle du carbone terrestre, le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère estimé entre 1500 et 2000 Gt à 1 m de profondeur (Figure 8). Ce carbone organique est essentiellement apporté au sol par la matière organique. Les différents rapports du GIEC ont mis en exergue les rôles de l'agriculture et de la foresterie dans les flux de gaz à effet de serre entre le système « sol-végétation-atmosphère ». Une des options identifiées par le GIEC pour atténuer le changement climatique est la séquestration du carbone dans le compartiment sol. En effet, il a été estimé que l'adoption des bonnes pratiques de gestion des sols agricoles peut réduire la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère par la séquestration de carbone dans le sol à hauteur de 50 à 1000 kg/ha/an. Cela correspond à un potentiel de séquestration globale de 0.9 (± 0.3) Gt C/an, réduisant d'un quart à un tiers l'augmentation annuelle de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère estimée à 3.3 Gt C/an (R. Lal, 2004).

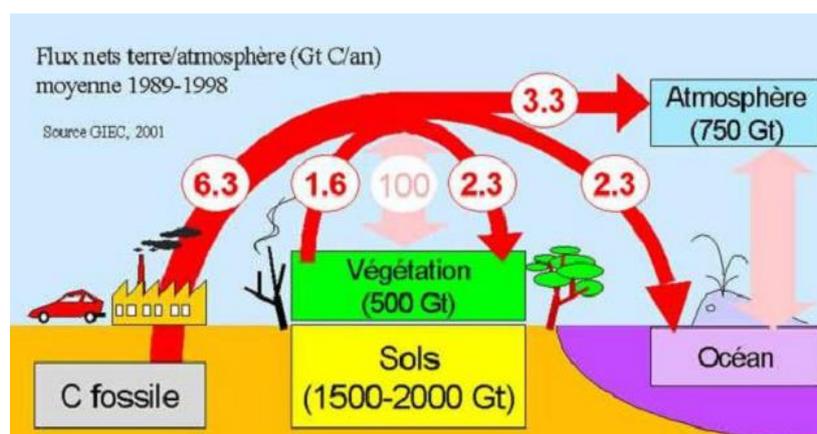


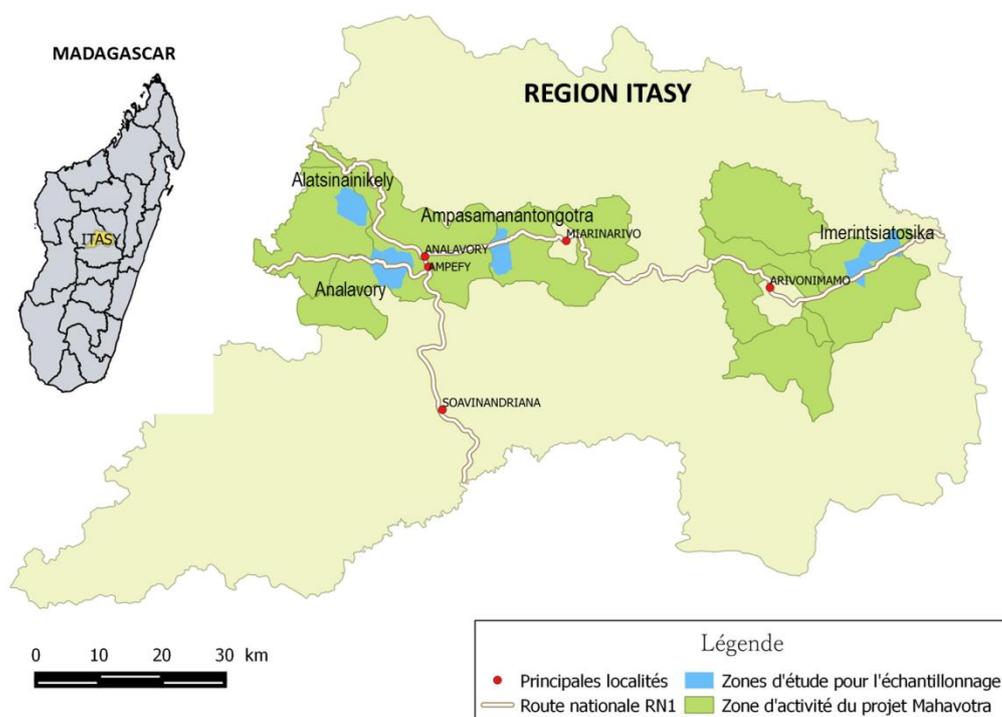
Figure 8 : Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP,1998) et (IPCC, 2000)

## 6 Présentation du milieu d'étude

### 6.1 Situation géographique

L'étude a été réalisée dans la Région Itasy, sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar. Etant la plus petite région administrative de Madagascar, elle couvre une superficie de 6727 km<sup>2</sup> (Région Itasy, 2005). La Région Itasy est composée de 3 districts, à savoir d'Est à l'Ouest, Arivonimamo, Miarinarivo et Soavinandriana. La région comptabilise au total 51 communes et sa capitale administrative ; Miarinarivo (46°54'22.66"E, 18°57'25.85"S) est située à 88 km d'Antananarivo sur la route nationale n°1 (Carte 1).

La présente thèse ayant été effectuée dans le cadre du projet Mahavotra, les travaux ont été réalisés au niveau de quatre communes de la région où les activités du projet sont les plus concentrées, à savoir, Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely.



**Carte 1 : Carte de localisation de la Région Itasy et des zones d'activités du projet Mahavotra**

### 6.2 Relief

La région Itasy fait partie intégrante des Hautes Terres Centrales de Madagascar. A l'Est, le relief est généralement constitué de collines aux versants convexes surplombant des bas-fonds de largeur variable. Dans la partie Sud-Est, la ligne de crête du massif de l'Ankaratra s'abaisse progressivement vers le Nord en une longue croupe d'orientation subméridienne, suivie par les cours d'eau qui dissèquent la terminaison des plateaux basaltiques du district d'Arivonimamo. Au centre, on a un

relief très accidenté aux pentes fortes encaissant fortement les vallées. Plus on va vers l'Ouest, les épanouissements de bas-fonds propres à la riziculture deviennent de plus en plus fréquents (Bastian, 1967).

### 6.3 Climat

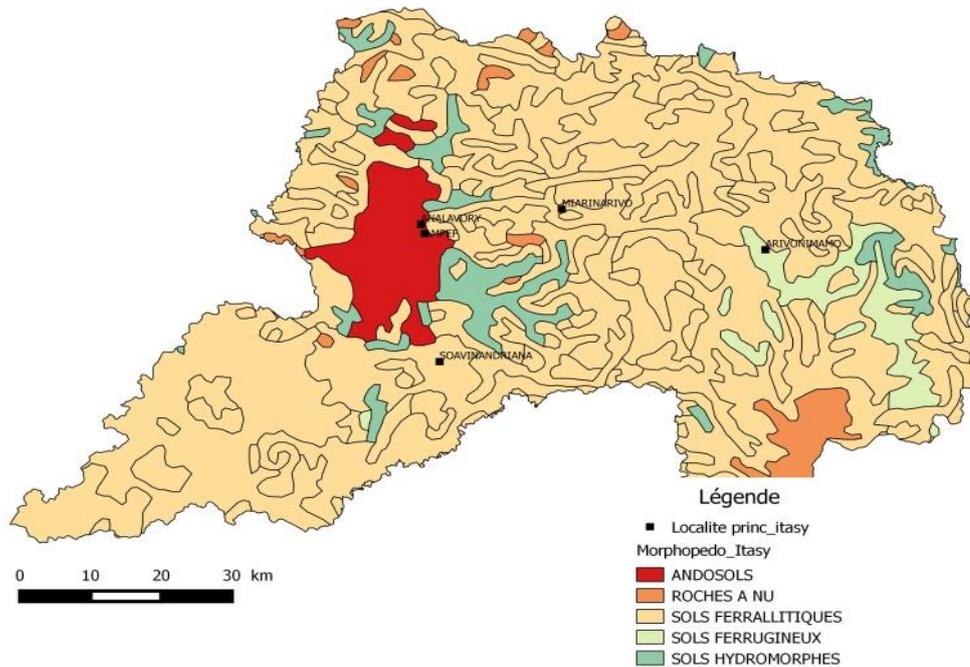
La Région Itasy est caractérisée par deux zones climatiques bien distinctes à savoir :

- La zone Imerintsiatosika correspondant à la partie Est de la région où le climat est de type tropical d'altitude à rythme pluviométrique. Les précipitations sont plus importantes en été qu'en hiver. Le mois de juillet est le plus sec de l'année avec 6mm de précipitation tandis que le mois de janvier est le plus arrosé affichant une précipitation moyenne de 304 mm. En termes de température, le mois de février est le mois le plus chaud de l'année avec une température moyenne de 21.0 °C tandis que le mois de Juillet est le plus frais affichant une température moyenne de 14.7 °C.
- La zone Alanavory correspondant à la partie Ouest de la région est caractérisée par un climat de type tropical d'altitude de versant sous le vent. Octobre est le mois le plus sec avec 78 mm de précipitation, tandis que le mois de mars affiche les précipitations moyennes les plus élevée à hauteur de 404 mm. En termes de température, janvier est le plus chaud avec une température moyenne de 26.1 °C et le mois de juillet est le plus frais avec une température moyenne de 19.7 °C.

### 6.4 Type de sol

La Région Itasy est caractérisée par trois principaux types de sol (Carte 2):

- les sols ferrallitiques et ferrugineux qui couvrent une grande partie de la région, environ 57 1089 Ha. On y distingue les sols ferrallitiques rouges, les sols ferrallitiques jaune sur rouge et les associations sols ferrallitiques rouge + jaune sur rouge. Généralement, l'aptitude culturale de ces sols ferrallitiques est médiocre ;
- les andosols formés sur roches volcaniques qui occupent 48 420 Ha. Ils sont surtout localisés dans la partie Est du district de Soavinandriana et dans la zone Ouest et Sud-ouest du district de Miarinarivo. Ces sols volcaniques sont généralement plus fertiles.
- les sols hydromorphes à engorgement temporaire ou permanent occupent les bas-fonds de toute la région.



**Carte 2: Carte pédologique de la région Itasy (FTM, BD 200)**

## 7 Objectifs et Hypothèses de l'étude

L'objectif de la présente thèse consiste à évaluer les impacts environnementaux de l'adoption des pratiques agroécologiques sur l'empreinte carbone des exploitations agricoles et sur le stockage de carbone dans le sol.

Les hypothèses de travail à tester tout au long de l'étude sont les suivantes :

**H<sub>1</sub>** : L'adoption des pratiques agroécologiques permet d'améliorer l'empreinte carbone des exploitations agricoles.

Afin de tester cette première hypothèse, les objectifs spécifiques suivants ont été fixés : (i) caractériser les exploitations agricoles échantillonnées pour la réalisation de cette étude ; (ii) évaluer les niveaux d'adoption des pratiques agroécologiques par les exploitations agricoles et (iii) élaborer un outil de calcul permettant d'évaluer l'empreinte carbone des exploitations agricoles.

La première partie de cette thèse est consacrée à répondre à cette première hypothèse.

**H<sub>2</sub>**: Les pratiques agroécologiques permettent d'améliorer les stocks de carbone du sol.

Les objectifs spécifiques fixés pour pouvoir répondre à cette deuxième hypothèse consistent à (i) mettre en place une approche méthodologique permettant de prédire la teneur en carbone organique

des sols via la spectrométrie en moyen infrarouge (MIRS) ; (ii) quantifier et analyser le stock de carbone du sol suivant la diversité des contextes pédologiques et agronomiques rencontrés dans la région Itasy ; (iii) Cartographier le stock de carbone du sol pour pouvoir évaluer et comprendre leur distribution et variabilité spatiale.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à répondre à cette deuxième hypothèse.

## **Partie 1 : EMPREINTE CARBONE D'EXPLOITATION AGRICOLE**

Le premier chapitre consiste à la caractérisation des exploitations agricoles et à l'étude des flux de gaz à effet de serre par l'approche empreinte carbone. Il est subdivisé en trois parties.

**Chapitre 1 :** Caractérisation des exploitations agricoles et carte des flux de ressource

**Chapitre 2 :** Elaboration d'un outil de calcul de l'empreinte carbone d'exploitation agricole - TropiC Farm Tool

**Chapitre 3:** Empreinte carbone d'exploitations agricoles suivant l'adoption des pratiques agroécologiques

*Les annexes 1 à 5 de ce livre présentent les résumés des communications internationales sous forme de poster ou de présentation orale se rapportant à cette première partie de la thèse.*

# **Chapitre 1 : Caractérisation des exploitations agricoles et carte des flux de ressources**

## **1 Introduction**

Analyser l'impact environnemental en termes de bilan carbone des pratiques agricoles requiert avant tout la compréhension des systèmes de production des exploitations agricoles. L'exploitation agricole étant l'unité fondamentale de la production agricole interagit avec son environnement pour maintenir un niveau de production pouvant satisfaire durablement ses besoins.

Ce chapitre a pour objet (i) de caractériser les exploitations agricoles de la Région Itasy à travers la mise en place d'une base de données des exploitations agricoles échantillonnées et (ii) d'élaborer des cartes des flux de ressources facilitant la compréhension du fonctionnement de l'ensemble de chaque exploitation par la détermination des flux de matières entre les différents compartiments de chaque exploitation agricole.

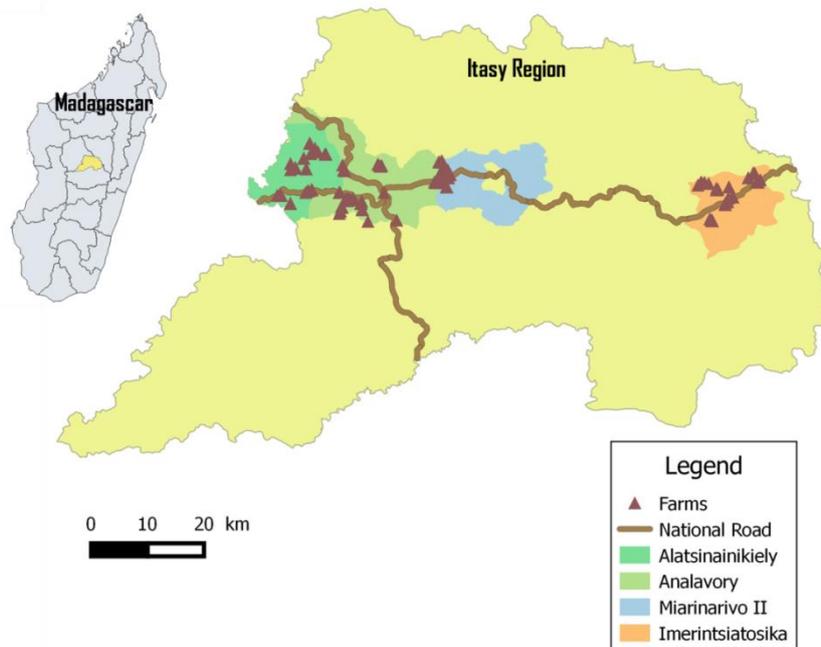
## **2 Matériels et méthodes**

### **2.1 Echantillonnage des exploitations agricoles**

L'échantillonnage des exploitations agricoles a tenu compte d'une typologie des exploitations agricoles de la région Itasy préalablement établie par l'ONG Agrisud International afin de tenir compte de la représentativité de la zone d'étude (Annexe 6). Cette typologie a été établie selon différents critères permettant de caractériser l'ensemble des situations et contextes des ménages agricoles dans la région, tels que :

- Les caractéristiques physiques du milieu
- Le niveau d'étude des chefs de ménage
- Le nombre d'actifs agricoles permanents
- La surface agricole utile (SAU)
- La destination des produits agricoles
- La pratique ou non de l'arboriculture fruitière et nombre de pieds d'arbre
- Le type d'élevage
- La mécanisation agricole

En se basant sur cette typologie, 200 exploitations agricoles ont été sélectionnées dans le cadre de cette étude (Annexe 7). Ces exploitations agricoles étant réparties sur quatre zones d'étude correspondant à quatre communes de la région à savoir Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely où les actions du projet Mahavotra sont les plus concentrées (Carte 3).



**Carte 3 : Carte de localisation des 200 exploitations agricoles objet de l'étude**

## 2.2 Acquisition de données

### 2.2.1 Enquêtes des exploitations agricoles

Des travaux d'enquêtes ont été réalisés pour rassembler les données nécessaires à la caractérisation et au calcul de l'empreinte carbone de chaque exploitation agricole. Un questionnaire préétabli par Rakotovao (2011) lors d'une étude préliminaire sur l'empreinte carbone de 12 exploitations agricoles a été adapté et utilisé afin de standardiser la saisie des informations recueillies (Annexe 8).

En tenant compte de la nature des données à collecter, le questionnaire d'enquête a comporté quatre principales parties :

- Identification de l'exploitation : il s'agit de collecter les informations permettant d'identifier et de localiser l'exploitation (codification, nom du chef de ménage, nom du village et les coordonnées géographiques de l'habitation).
- Informations sur l'agriculture : il s'agit d'identifier tous les systèmes de cultures existantes et pratiqués par chaque exploitant et de se renseigner sur la conduite de chaque système (types d'intrants, fertilisants organiques et chimiques, l'usage de pesticide,...).
- Informations sur l'élevage : les informations relatives au système d'élevage telles que les espèces d'animaux ainsi que leurs nombres ; l'alimentation animale et le devenir des effluents d'élevage ont été également collectés.
- Informations sur la consommation d'énergie : la consommation annuelle de chaque type d'énergie que ce soit renouvelable ou fossile a été prise en compte.

Les enquêtes ont été réalisées sous forme de discussion avec chaque chef de ménage, suivies d'un recoupement visuel sur le terrain.

L'adoption des pratiques agroécologiques a été évaluée à partir de ces travaux d'enquête notamment par le type de pratique adopté et le degré d'avancement de l'adoption (Plus de détail en Partie C).

### **2.2.2 Positionnement et mesure de surface des parcelles**

Les descentes sur le terrain ont permis de localiser géographiquement les parcelles de culture de chaque exploitation agricole à l'aide d'un GPS (Global Positioning System). Les coordonnées géographiques ainsi recueillies ont permis de spatialiser la distribution des parcelles dans le paysage et de délimiter leurs contours. Par ailleurs, l'utilisation des GPS ont également permis d'avoir les surfaces des parcelles de culture de chaque exploitation.

### **2.2.3 Inventaire des espèces ligneuses**

Sur les parcelles d'agroforesterie et de foresterie, des inventaires d'espèces ligneuses ont été réalisées. Comme les arbres constituent un puits important de carbone, un inventaire de toutes les espèces a été effectué pour chaque exploitation. Pour cela, les informations collectées ont été :

- Les noms vernaculaires et l'âge des espèces plantées ;
- Le nombre de pieds et la densité de plantation ont été obtenus soit par le biais des enquêtes auprès des paysans soit par comptage direct ;
- La mesure du DHP ou Diamètre à Hauteur de Poitrine a été faite à 1,30 m du sol ou juste au-dessus de contrefort si celui-ci est supérieur à 1,30m.

## **2.3 Carte des flux de ressource**

Dans la présente étude, la carte des flux de ressource inspirée des travaux d'Esilaba et al. (2005) et de Tittonell et al. (2006) a été utilisée pour caractériser et représenter schématiquement l'ensemble de la structure et du fonctionnement de chaque exploitation agricole. Les données collectées lors des enquêtes ont ainsi permis d'élaborer ces cartes des flux de ressource.

Pour l'élaboration des cartes des flux de ressource, chaque exploitation a été considérée comme un système composé de différents compartiments tels que l'habitat du ménage, les parcelles de cultures et le compartiment élevage. Les flux annuels de ressource ou de matières entre les compartiments ont été ensuite identifiés et quantifiés. Des petites figures et icônes ont été utilisés pour matérialiser la carte des flux de ressource.

### **2.3.1 Les compartiments de l'exploitation agricole**

Chaque exploitation a été subdivisée en trois principaux compartiments, à savoir :

- L'habitat, qui a été caractérisé par la consommation annuelle d'énergies renouvelables et fossiles par le ménage.
- Les parcelles de cultures présentant différents systèmes tels que les cultures vivrières ou maraichères, la riziculture, l'agroforesterie et la foresterie. Chaque système a été caractérisé par sa superficie (hectare), les rotations culturales, les apports annuels en fertilisants organiques et chimiques, l'usage de pesticides et la production annuelle.
- L'élevage a été caractérisé par l'espèce et le nombre d'animaux. La quantité et le devenir des effluents ont été également définis.

### **2.3.2 Les flux de ressource entre les compartiments**

Les flux de ressource correspondent aux transferts de matières (biomasse ou non biomasse) entre les compartiments de l'exploitation agricole. Par exemple, soit le fumier provenant de l'élevage est transféré directement vers les différents systèmes de culture soit vendu directement en dehors de l'exploitation. Un autre exemple est le devenir des résidus de culture comme la paille qui est, soit transférée vers le compartiment élevage pour alimentation animale, soit enfouie directement sur la parcelle, soit utilisée comme matière première à la fabrication de compost.

Les flux de ressource représentent ainsi les flux de matières « entrant » et « sortant » depuis et vers chaque compartiment de la ferme.

## **3 Résultats**

### **3.1 Description des exploitations agricoles**

La synthèse des données issues des travaux d'enquête a permis de faire sortir les caractéristiques des ménages agricoles. Les principales informations collectées étant relatives aux systèmes de culture, aux systèmes d'élevage et à la consommation d'énergie de chaque ménage (Tableau 2).

La taille moyenne des exploitations, correspondant à la surface agricole utile (SAU) a été estimée à 1.64 ha. Quatre principaux systèmes de culture ont été identifiés à savoir les systèmes en culture annuelle vivrière qui représentent environ 37% de la SAU ; les systèmes en agroforesterie (32%) ; les systèmes en foresterie (8%) et les systèmes en riziculture (23%).

Les systèmes en cultures vivrières sont caractérisés par des cultures diverses, que ce soit en culture simple ou en cultures associées. Ils représentent en moyenne 0.61ha par exploitation. Les principales cultures identifiées et les plus pratiquées ont été le maïs, le manioc, le haricot et la tomate. Les produits étant destinés principalement à l'autoconsommation.

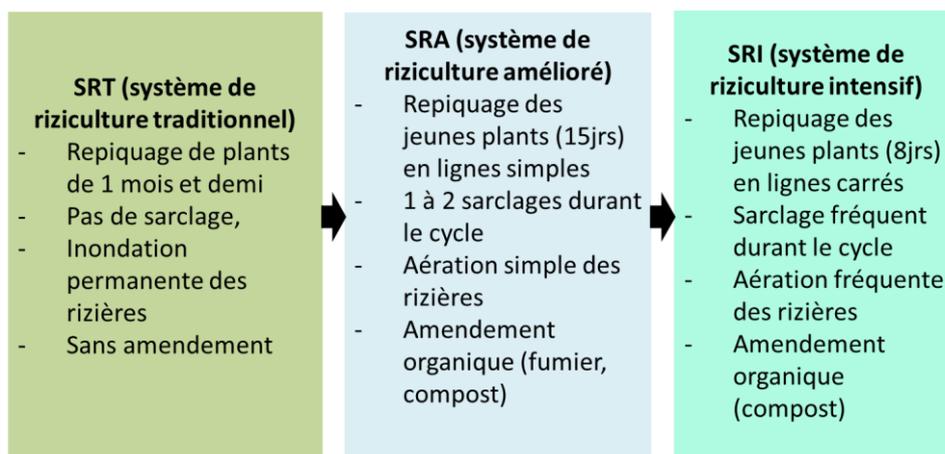
Les systèmes en agroforesterie qui associent cultures annuelles et espèces ligneuses représentent en moyenne 0.54ha par exploitation. Les espèces ligneuses plantées en agroforesterie sont généralement dominées par des arbres fruitiers tels que les agrumes.

Les systèmes en foresterie représentent une faible surface des terres agricoles avec en moyenne 0.14ha par exploitation. Ils sont dominés par des espèces forestières telles que *Eucalyptus sp.*, *Acacia sp* et *Pinus sp*. Ces espèces sont généralement destinées pour l'énergie (bois de chauffe et fabrication de charbon de bois) et pour avoir de bois d'œuvre.

Les systèmes rizicoles irrigués qui sont pratiqués en grande partie sur les bas-fonds mais aussi sur les versants des collines, représentent en moyenne 0.36ha des terres agricoles par exploitation. Trois principaux systèmes de riziculture ont été identifiés parmi les situations rencontrées dans la région Itasy. En termes de surface, le système le plus pratiqué est le système de riziculture amélioré ou SRA, suivi du système de riziculture intensif ou SRI et enfin du système de riziculture traditionnel ou SRT (Figure 9).

En moyenne la production annuelle de riz pluvial est de l'ordre de 2.5t/ha contre 4t/ha pour les riz irrigués de bas fond.

L'élevage est essentiellement dominé par l'élevage de bovin, de porc et de volaille. Si l'élevage de porcs et l'élevage de volaille sont principalement destinés au marché, l'élevage de bovin est principalement destiné à la traction animale, au travail des champs et comme source de fertilisants organiques.



**Figure 9 : Caractéristique des systèmes rizicoles irrigués rencontrés en Région Itasy**

La fertilisation organique des parcelles de culture est largement dominée par les apports en fumier de bovins issus de l'élevage ou acheté au niveau des fermes voisines. Néanmoins d'autres types d'apports tels que le fumier de porc et de volaille et l'apport de compost ont été également constaté. La quantité

de l'apport en matières organiques diffère suivant les positions des parcelles dans le paysage et les systèmes de culture. Sur les bas-fonds et bas versants correspondant généralement aux systèmes en riziculture et en agroforesterie fruitière l'apport moyen est de l'ordre de 9t/ha. Sur les versants et sommets des collines, là où généralement sont pratiqués les systèmes de cultures vivrières, l'apport moyen de matières organiques est de l'ordre de 4t/ha. Ce qui indique une fertilisation raisonnée en fonction de la valeur marchande des produits agricoles.

L'usage d'intrants agricoles tels que les pesticides et fertilisants chimiques reste faible, ils sont surtout orientés vers les cultures à haute valeur marchande telles que les cultures de tomate.

La consommation d'énergie domestique est dominée par l'utilisation de bois de chauffe suivie de l'utilisation de pétrole lampant. La consommation d'énergie fossile reste très faible.

### **3.2 Caractérisation des exploitations suivant les zones d'étude**

Quoique les 200 exploitations agricoles aient été choisies sur les zones où les activités du projet Mahavotra sont les plus concentrées, il en ressort des résultats une importante diversité des exploitations agricoles suivant chaque zone d'étude. Rappelons que chaque zone d'étude correspond à une commune de la région, à savoir Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely.

La compilation et la synthèse des données collectées lors des travaux d'enquête ont permis de dessiner les dites « carte des flux de ressource » pour chaque exploitation agricole. Ils représentent l'ensemble de la structure et du fonctionnement des exploitations agricoles. Les différents compartiments de l'exploitation tels que l'habitation, les parcelles de culture et le système d'élevage y sont représentés. Chaque compartiment étant décrit suivant leur caractéristiques, tels que la surface des parcelles, les différents cultures avec la production annuelle moyenne, le nombre de tête d'animaux et la quantité d'effluent d'élevage produite par an, les différents types et quantité d'intrants agricoles utilisés à l'échelle de la ferme et la quantité de fertilisants organique produite. Des flèches représentent les flux de matières entre les compartiments de la ferme (Figure 10, Figure 11, Figure 12, Figure 13). Cette étape a permis caractériser et de délimiter les systèmes étudiés dans l'évaluation de l'empreinte carbone des exploitations agricoles.

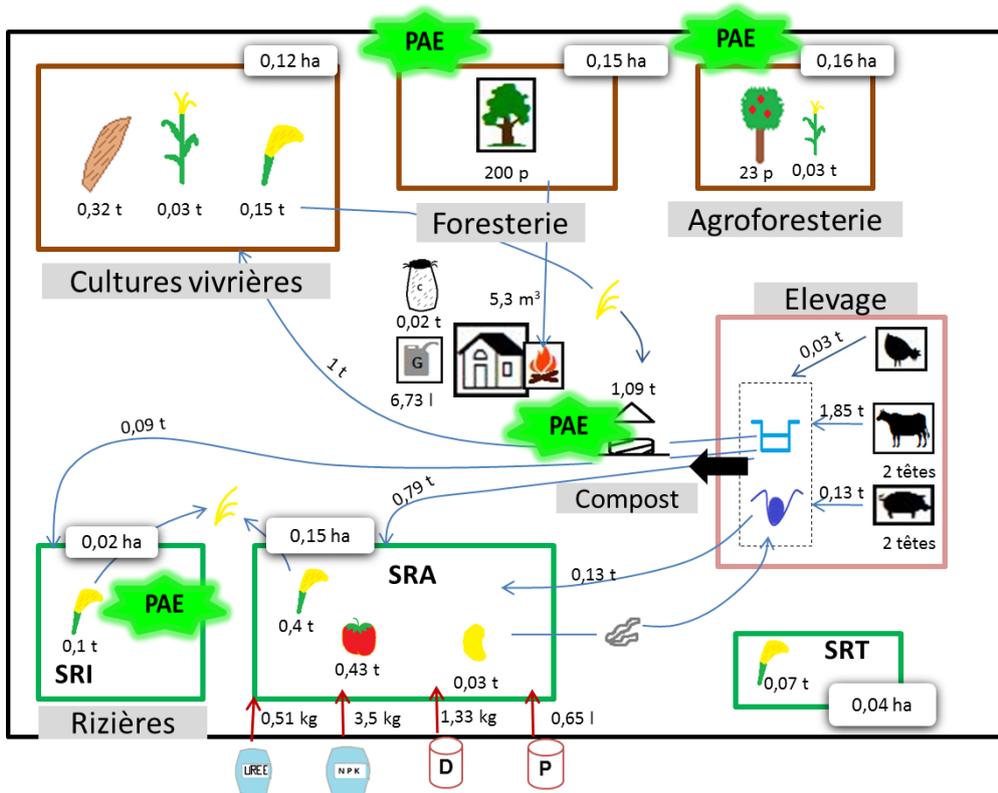


Figure 10 : Carte des flux de ressource zone Imerintsiatosika

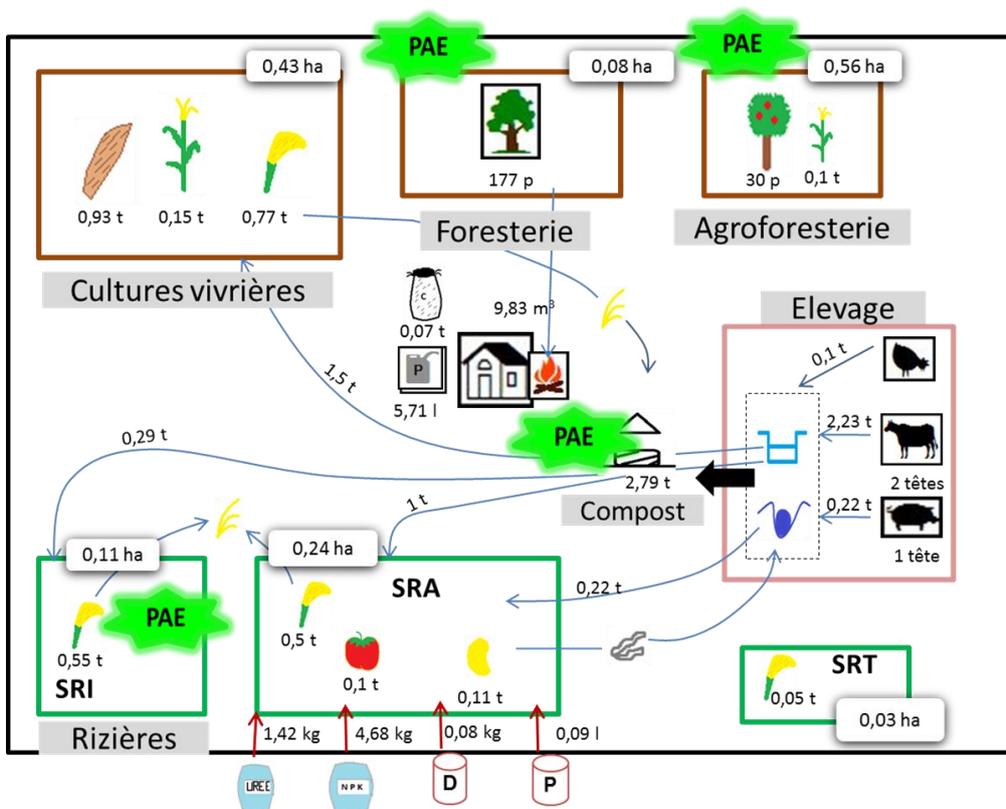


Figure 11 : Carte des flux de ressource zone Miarinarivo II

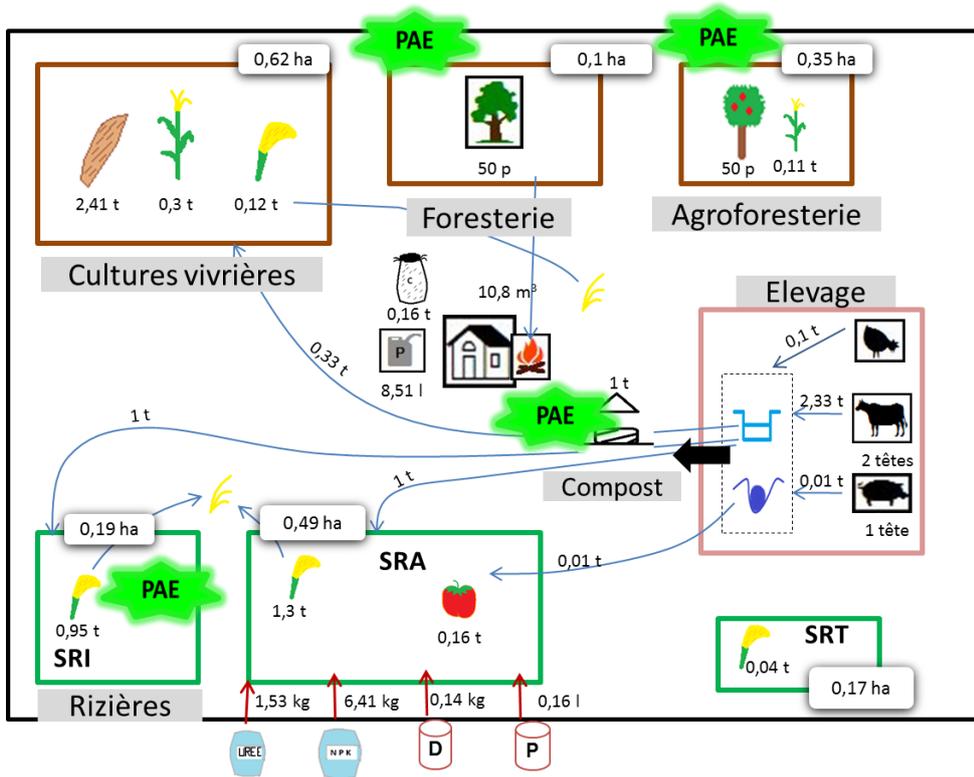


Figure 12 : Carte des flux de ressource zone Alatsinainikely

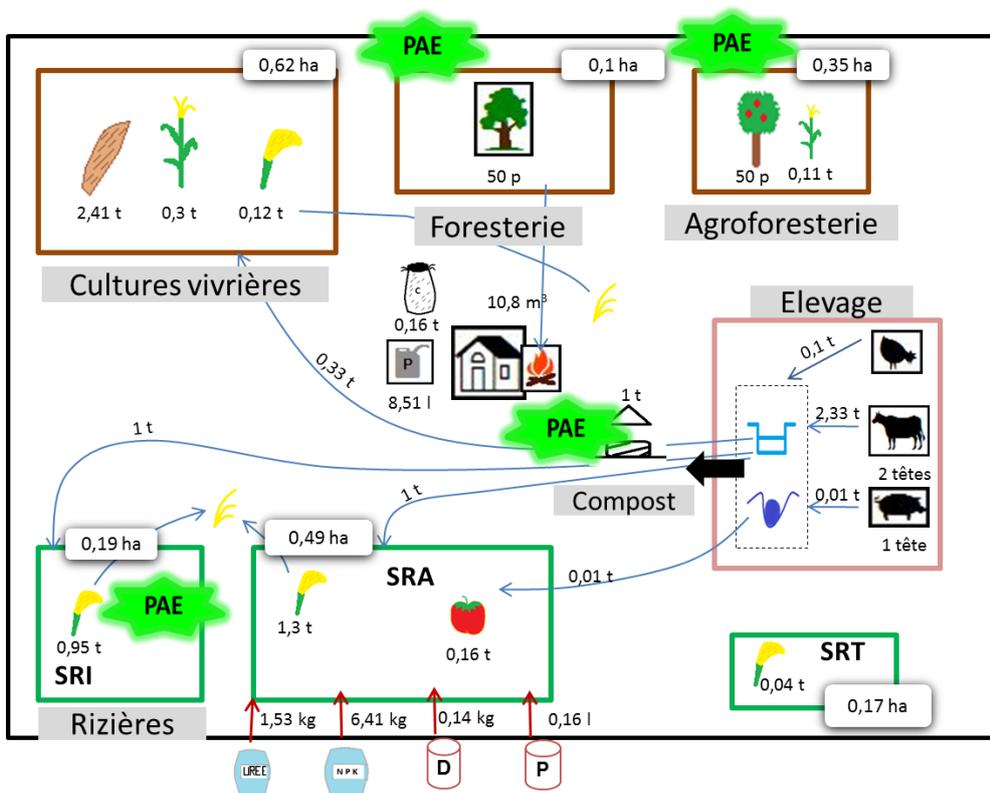


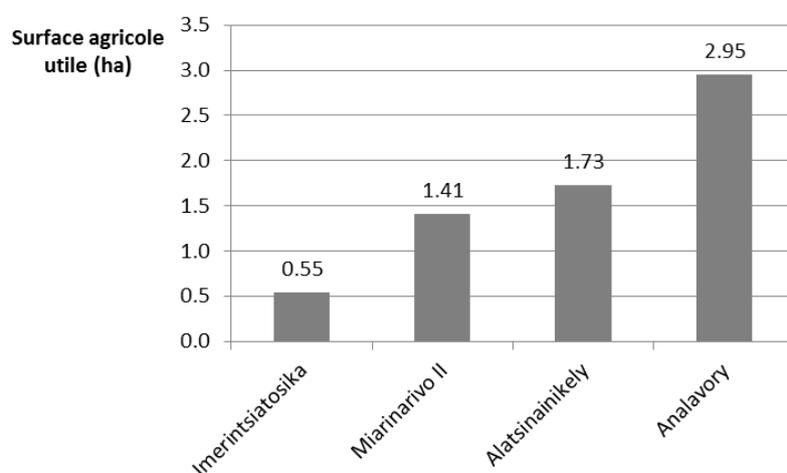
Figure 13 : Carte des flux de ressource zone Analavory

**Tableau 1 : Signification des figures et icônes utilisés pour l'élaboration des cartes des flux de ressource**

Riz		Haricot		Manioc	
Maïs		Tomate		Arbre forestier	
Arbre fruitier		Bois de chauffe		Pétrole	
Charbon		Compost solide		Fumier	
Bovins		Gallinacées		Lisier	
Porcins		Urée		NPK	
Dithane		Polytrine			

### 3.2.1 Taille des exploitations

En termes de superficie, les résultats ont montré une importante variabilité de la taille des exploitations agricoles suivant les zones d'étude. En effet, il en ressort que les exploitations agricoles de zone Analavory représentent les plus grandes exploitations avec une surface agricole utile (SAU) moyenne de l'ordre de 2.95 ha contre 0.55 ha seulement dans la zone Imerintsiatosika. Les zones Miarinarivo II et Alatsinainikely représentent en moyenne les exploitations agricoles de taille moyenne, respectivement de 1.41 ha et 1.73 ha (Tableau 2) (Figure 14).



**Figure 14 : Superficie moyenne des terres suivant les zones d'étude**

**Tableau 2: Caractéristiques générales des 200 exploitations agricoles étudiées dans les communes Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely**

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
Informations sur les systèmes agricoles	Surface agricole utile (ha)	1.64	0.03	29.49	1.03
	Systèmes en culture vivrière (ha)	0.61	0.00	6.46	0.37
	Systèmes en agroforesterie (ha)	0.54	0.00	26.84	0.06
	Systèmes en foresterie (ha)	0.14	0.00	3.42	0.00
	Système en Riziculture Intensif (ha)	0.10	0.00	1.88	0.00
	Système en Riziculture Amélioré (ha)	0.30	0.00	3.93	0.12
	Système en Riziculture Traditionnel (ha)	0.06	0.00	1.64	0.00
	nombre de parcelles	5	1	14	4
	Production annuelle de riz paddy (t/an)	2.24	0.00	20.16	1.43
	Production annuelle de riz pluvial (t/an)	0.80	0.00	10.50	0.34
	Production annuelle de riz irrigué (t/an)	1.42	0.00	15.80	0.72
	Production annuelle de maïs (t/an)	0.38	0.00	7.65	0.10
	Production annuelle de manioc (t/an)	1.23	0.00	22.50	0.50
	Production annuelle de tomate (t/an)	0.69	0.00	14.50	0.00
	Production annuelle de haricot (t/an)	0.10	0.00	2.15	0.00
	Urée (kg/an)	1.13	0.00	50.00	0.00
	NPK (kg/an)	5.85	0.00	90.00	0.00
Fongicide (Dithane) (kg/an)	0.68	0.00	9.65	0.00	
Insecticide (Polytrine/nuvan) (l/an)	0.49	0.00	6.89	0.01	
informations sur les systèmes d'élevage	Nombre de bovins	2	0	16	2
	Nombre de porcs	1	0	28	1
	Nombre de volaille	50	0	5500	12

	Fumier de bovin (t/an)	2.79	0.00	28.80	1.80
	Fumier de porc (t/an)	1.44	0.00	250.00	0.00
	Fumier de volaille (t/an)	0.08	0.00	1.00	0.00
	Compost (t/an)	2.17	0.00	39.00	0.50
informations sur la consommation d'énergie	Consommation en bois de chauffe (m <sup>3</sup> )	8	0	24	6
	Consommation en charbon de bois (t/an)	0	0	3	0
	Consommation de pétrole (l/an)	7	0	26	6

### 3.2.2 Systèmes agricoles

Les résultats ont montré que les surfaces attribuées aux cultures vivrières et à l'agroforesterie suivent une même tendance que la taille des exploitations par zone, c'est-à-dire que la zone Analavory représente la plus grande superficie tandis que Imerintsiatosika la plus petite. Cependant en termes de riziculture, il a été constaté que la zone Alatsinainikely représente la plus grande superficie moyenne attribuée à la riziculture. Sur les quatre zones étudiées, la superficie attribuée à la foresterie paysanne reste faible (Figure 15). En termes de production rizicole, la zone Analavory montre les valeurs les plus élevées avec un rendement moyen de 6t/ha. Les zones Imerintsiatosika, Miarinarivo II et Alatsinainikely affichent respectivement un rendement moyen de 3.7t/ha, 3.2t/ha et 3.5t/ha (Figure 16).

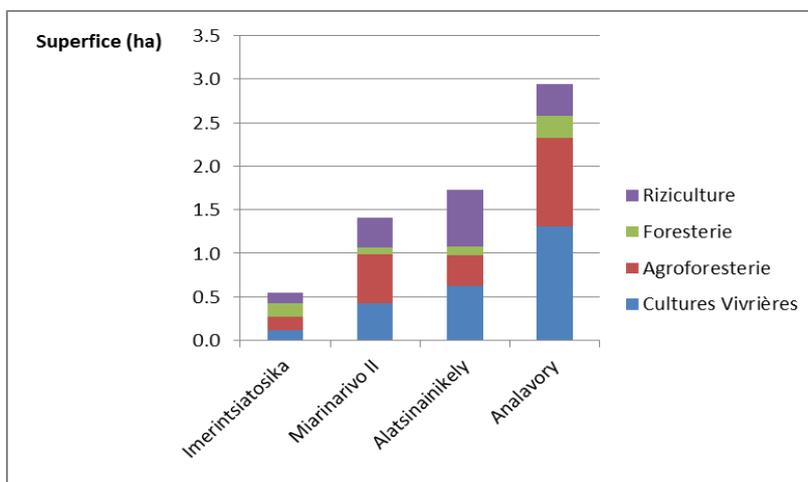


Figure 15: Superficie moyenne des systèmes de culture rencontrés par zone d'étude

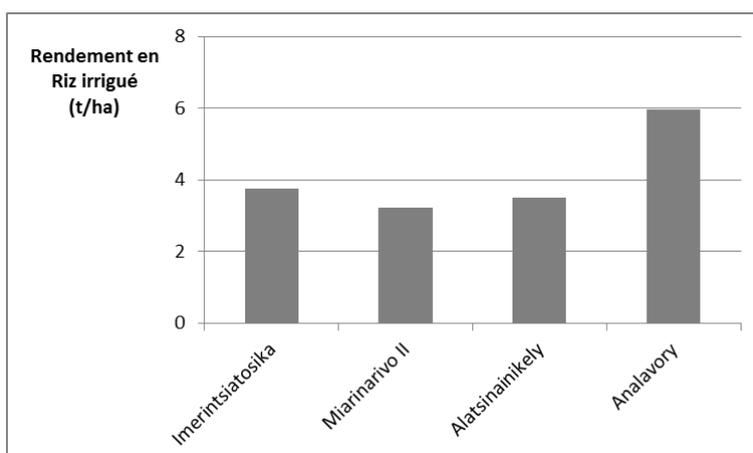


Figure 16 : Rendement moyen du riz irrigué par zone étudiée

### 3.2.3 Systèmes d'élevage

Le nombre de tête de bœufs et de porcs moyen par exploitation pour la zone Analavory est légèrement supérieur aux trois autres zones d'étude. Ce qui explique une plus importante production et disponibilité du fumier au niveau des exploitations agricole de la zone Analavory (5t de fumier produit/an) par rapport aux autres zones Alantsinainikely et Miarinarivo II (plus de 2t/an) et Imerintsiatosika (moins de 2t/an). L'élevage de porc est surtout rencontré dans la zone Analavory et Imerintsiatosika. En effet l'élevage porcin est surtout destiné à la production de viande et à la reproduction (Figure 17).

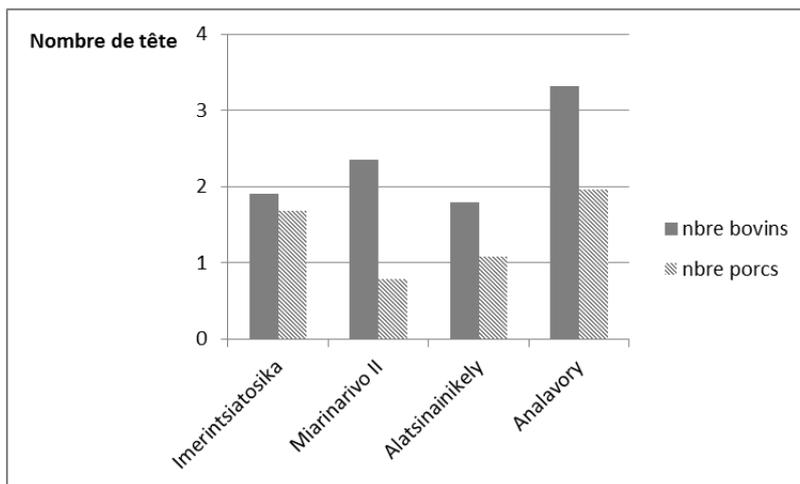
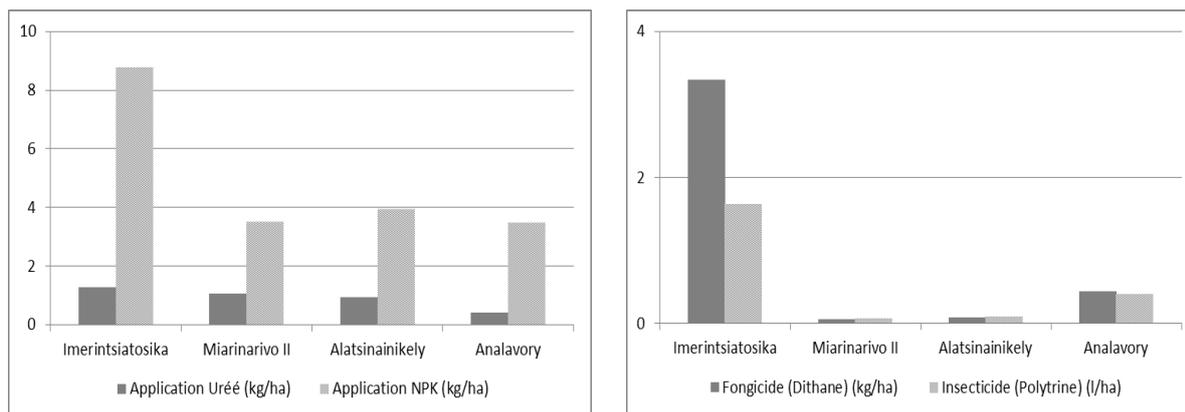


Figure 17 : Nombre moyen de tête de bœufs et de porcs par exploitation

### 3.2.4 Utilisations d'intrants agricoles

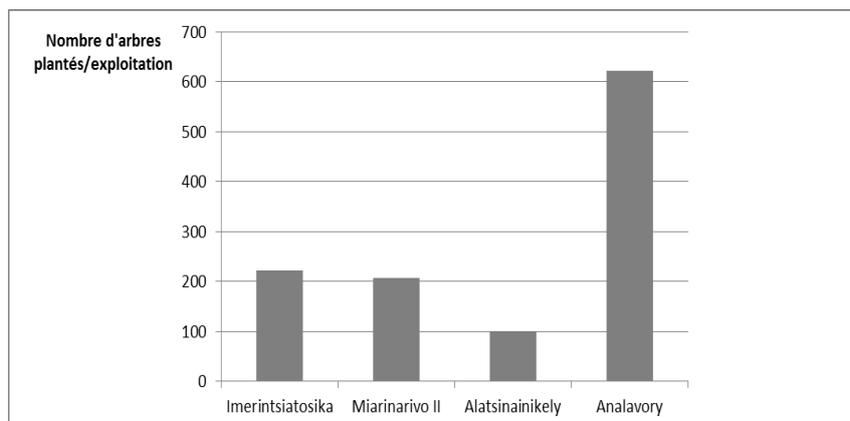
L'utilisation d'intrants tels que engrais et pesticides est essentiellement destinée aux cultures à haute valeur marchande telles que les fruitiers (agrumes), les cultures maraichères et les cultures de contre saison sur bas fond (tomate, haricot, pomme de terre). Les engrais NPK et urée sont les plus utilisés par les exploitants. L'utilisation d'urée est assez faible par rapport à l'utilisation de l'engrais composé tel que NPK. Les résultats d'enquête ont montré que la zone Imerintsiatosika présente la plus forte utilisation d'intrants que ce soit en engrais chimiques ou en pesticides. Cela s'explique par une plus importante intensification des cultures maraichères sur de plus faible superficie de terre par rapport aux autres zones étudiées (Figure 18).



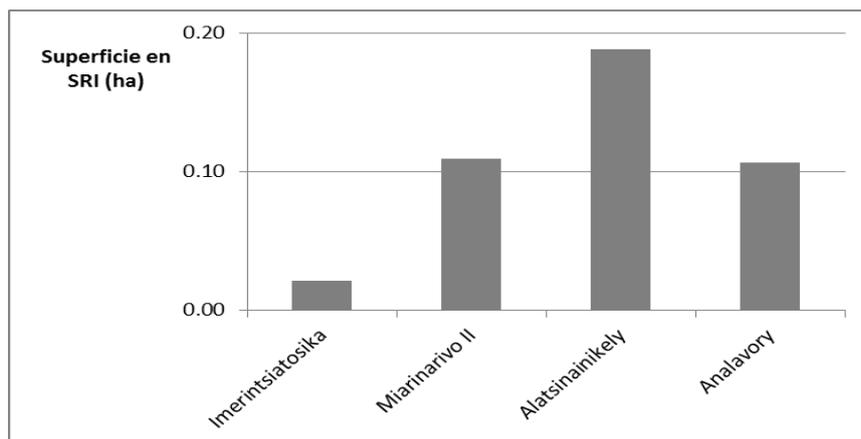
**Figure 18 : Application moyenne d'intrants agricoles par exploitation**

### 3.3 Adoption des pratiques agroécologiques

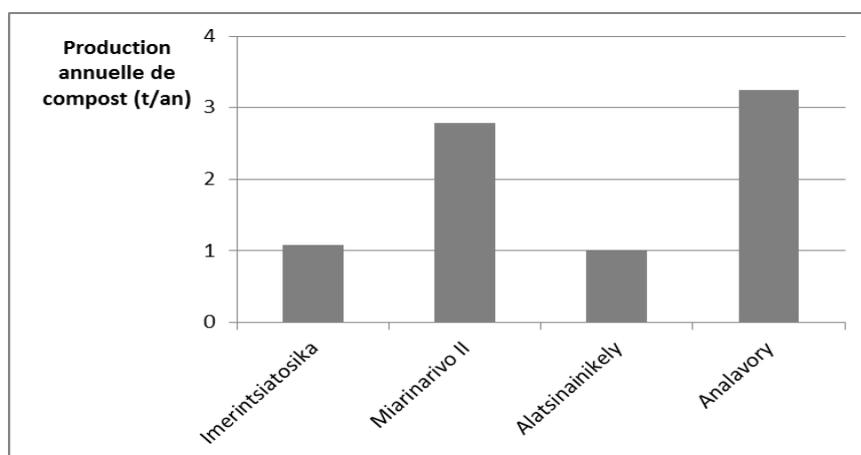
Les principales pratiques agroécologiques diffusées dans le cadre du projet Mahavotra sont la plantation d'arbre en système d'agroforesterie ou foresterie paysanne, la pratique du Système de Riziculture Intensif (SRI) et le compostage de matières organiques. En effet l'adoption de ces pratiques est très variable d'une région à une autre. Il a été constaté que la plantation d'arbres est largement plus importante au niveau des exploitations agricole de la zone Analavory par rapport aux autres zones d'étudiées. En effet dans la zone Analavory, le nombre moyen d'arbres plantés par exploitation est estimé à plus de 600 pieds d'arbre/exploitation, alors que les zones Imerintsiatosika, Miarinarivo II et Alatsinainikely n'affichent en moyenne que 223, 207 et 100 pieds d'arbre/exploitation (Figure 19). La conversion des systèmes rizicoles en SRI reste en général assez faible sur l'ensemble des situations rencontrées en Itasy, néanmoins, il a été constaté que la zone Alatsinainikely affiche la surface la plus élevée avec une surface convertie en SRI atteignant 0.2ha/exploitation (Figure 20).



**Figure 19: Nombre d'arbres plantés en moyenne par exploitation**



**Figure 20 : Superficie moyenne convertie en Système de Riziculture Intensif par exploitation**



**Figure 21 : Production annuelle moyenne de compost par exploitation**

La fabrication de compost est généralement en fonction du nombre de bœufs produisant du fumier et la disponibilité des plantes vertes. Ce qui explique une plus importante production de compost dans les zones Analavory (3.3t/an) et Miarinarivo II (2.8t/an) par rapport aux zones Imerintsiatosika (1t/ha) et Alatsinainikely (1t/ha) (Figure 21).

## **Bibliographie**

- Esilaba A. O., Nyende P., Nalukenge G., Byalebeka J.B., Delve R.J., Ssali H., 2005. Resource flows and nutrient balances for crop and animal production in smallholder farming systems in eastern Uganda, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109: 192–201.
- Rakotovao H. N. 2011. Empreinte carbone d'exploitations agricoles basées sur des pratiques agroécologiques. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
- Tittonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agric. Syst.* 91, 71–101. doi:10.1016/j.agsy.2006.01.010.

## **Chapitre 2 : Elaboration d'un outil de calcul de l'empreinte carbone d'exploitation agricole : TropiC Farm Tool**

L'évaluation de l'empreinte carbone des petites exploitations agricoles des pays en développement comme Madagascar permet d'apprécier le rôle qu'elles jouent dans le contexte du changement climatique. L'empreinte carbone étant le bilan des émissions et des séquestrations de gaz à effet de serre à l'échelle de la ferme, offre un moyen d'évaluation et de suivi des impacts carbone des activités agricoles des exploitations agricoles.

Dans le cadre de cette évaluation de l'empreinte carbone, différentes méthodes, modèles et outils existent actuellement au niveau international. En effet, à chaque objectif et échelle d'étude doit correspondre à un outil de calcul adapté. Cette grande diversité de contextes rend le choix des utilisateurs difficile du fait de l'absence de règle générale acceptée et reconnue par tous de la définition exacte du concept empreinte carbone. C'est dans le cadre de cette constatation que la présente thèse s'est proposée d'élaborer et de développer un outil de calcul de l'empreinte carbone d'exploitation agricole adapté au contexte agricole malgache.

### **1 Présentation générale de TropiC Farm Tool**

TropiC Farm Tool est un outil de calcul qui a été élaboré sur Excel et qui vise à calculer le bilan carbone ou empreinte carbone d'une ferme agricole ou d'une activité agricole donnée.

L'outil prend en compte les différentes activités rencontrées à l'échelle de la ferme à savoir l'agriculture et le mode d'utilisation des terres, l'élevage, la plantation forestière et la consommation d'énergie.

TropiC Farm Tool calcule le bilan carbone d'une ferme en considérant toutes les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de la ferme ainsi que les stockages de carbone dans les différents compartiments puits de carbone comme le sol et la biomasse ligneuse des arbres. Les trois principaux gaz à effet de serre du secteur agricole à savoir le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O sont considérés et sont convertis en CO<sub>2</sub> équivalent pour exprimer le bilan carbone ou l'empreinte carbone de la ferme.

TropiC Farm Tool exprime le bilan carbone des fermes ou des activités agricoles à la fois en bilan net annuel (tCO<sub>2</sub>équivalent), en bilan annuel par unité de surface (tCO<sub>2</sub>équivalent/ha) et en bilan annuel par unité de production agricole (tCO<sub>2</sub>équivalent/tonne de produit).

TropiC Farm Tool a été conçu à Madagascar et est adapté pour une utilisation en zone tropicale.

## **2 Spécificité de TropiC Farm Tool**

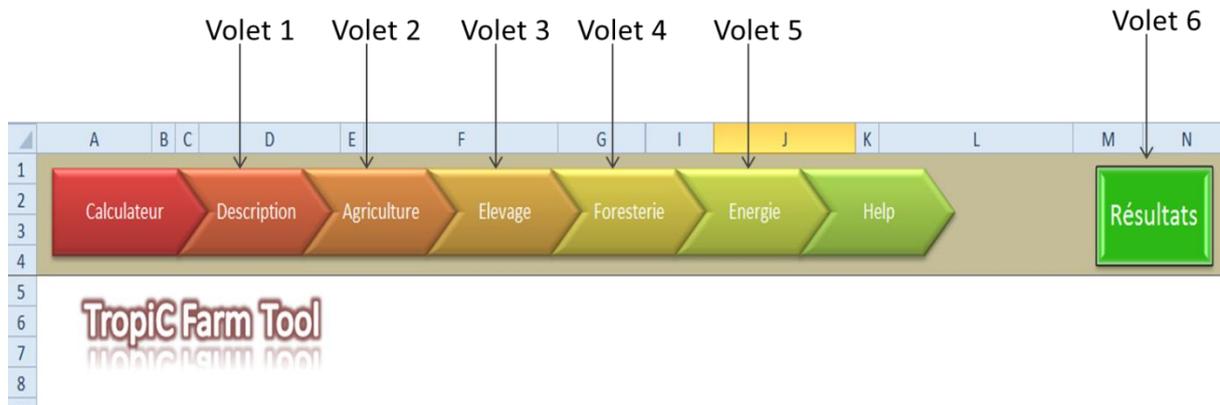
TropiC Farm Tool est un calculateur conçu pour estimer l’empreinte carbone d’une ferme agricole. Il s’agit de calculer les flux annuels des trois principaux gaz à effet de serre (GES) du secteur agricole à savoir le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l’oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) au niveau d’une exploitation agricole donnée et exprimé en tonnes de CO<sub>2</sub>-équivalent. TropiC Farm Tool a été créée pour être adapté à une application à l’échelle de la ferme mais peut également être adapté à une échelle plus grande en agrégeant les données sur les activités. De même, comme l’outil considère les différentes activités agricoles et d’élevage de la ferme, l’outil peut être également utilisé pour évaluer le bilan carbone d’une activité agricole donnée ou filière d’activité spécifique rencontrée.

Le bilan carbone peut être soit positif, soit négatif en fonction que la ferme soit potentiellement une source ou un puits de gaz à effet de serre. Ainsi, TropiC Farm Tool permet d’évaluer le niveau d’émission et de stockage de gaz à effet de serre d’une ferme ou d’une activité agricole donnée. Ce qui est une indication chiffrée nécessaire à l’évaluation des niveaux de contribution des différents acteurs agricoles au changement climatique.

Le calculateur permet d’estimer l’empreinte carbone de la ferme à un temps donné en fonction de sa taille (superficie des terres), de l’affectation et mode d’usage des terres (foresterie, agroforesterie, cultures annuelles et riziculture inondée), de la production agricole et des différentes activités rencontrées au sein de la ferme. L’outil permet ainsi de calculer l’impact carbone des changements de pratiques ou l’effet de l’adoption d’innovations agricoles/techniques au niveau d’une ferme, d’un bassin versant ou d’une région suivant l’échelle des données considérées. TropiC Farm Tool est alors un outil d’aide à la décision notamment pour les différents acteurs œuvrant au niveau des projets et programmes agricoles pour d’évaluer l’impact carbone de leurs interventions.

## **3 Structure générale de l’outil**

TropiC Farm Tool est un outil de calcul sous format Excel facile d’utilisation. Il est composé de 5 volets à savoir les volets Description, Agriculture, Elevage, Foresterie et Energie. Chaque volet correspond à une feuille Excel (Figure 22). Chaque volet est encore divisé en rubriques suivant l’existence de différents sources et puits de gaz à effet de serre.



**Figure 22: Les différents volets du calculateur**

Volet « Description »

Renseignement sur l'identification et la localisation de l'exploitation, la superficie des terres suivant les modes d'usage et la production annuelle des principales cultures de la ferme.

Volet « Agriculture »

Estimation des flux de GES au niveau de l'exploitation agricole induits par ses activités agricoles. Il s'agit des émissions de CH<sub>4</sub> dues à la riziculture inondée, des émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O, des émissions de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et aux engrais à l'urée, des émissions de GES dues à l'utilisation de pesticides, des émissions de GES sans CO<sub>2</sub> dues au brulage de la biomasse et de la restitution de carbone au sol par humification.

Volet « Elevage »

Le volet élevage estime les émissions de GES produites par la fermentation entérique des animaux et de la gestion des effluents d'élevage.

Volet « Foresterie »

Estimation de la séquestration annuelle de carbone dans la biomasse ligneuse tant dans la partie aérienne que souterraine des arbres.

Volet « Energie »

Le volet énergie permet d'estimer les émissions annuelles de GES de l'exploitation agricole dues à sa consommation d'énergie tant pour les activités agricoles que pour usage domestique.

A part les 5 volets cités ci-dessus qui estiment le flux de GES de l'exploitation agricole produit par ses activités, le calculateur comprend également d'autres onglets intitulés « Calculateur », « Help » et « Résultats » :

**L'onglet « Calculateur »** contient une brève présentation du calculateur TropiC Farm Tool, son objectif et son cadre d'utilisation.

**L'onglet « Help »** permet de déterminer les facteurs par défaut de l'estimation de la quantité d'azote ajoutée aux sols par les résidus de récolte.

**L'onglet « Résultats »** présente les résultats du bilan carbone pour l'exploitation étudiée. Y sont présentées les émissions et séquestration de GES par volet et par rubrique de chaque volet ainsi que les différents graphes qui illustrent les différents résultats.

#### **4 Méthodologie générale**

TropiC Farm Tool est basé sur la compilation de données relatives aux facteurs d'émission et de stockage de GES du secteur agricole adaptés en région tropicale comme Madagascar. Il suffit alors pour l'utilisateur d'introduire les données sur les activités de la ferme pour que l'outil puisse faire les calculs.

$$\text{Emissions (CO}_2\text{eq)} = \text{Facteur d'Emission} * \text{Données sur les Activités}$$

$$\text{Stockage (CO}_2\text{eq)} = \text{Facteur de Stockage} * \text{Données sur les Activités}$$

Les facteurs d'émission et de stockage de GES les plus adaptés au contexte de la zone d'étude ont été sélectionnés à partir de la littérature. Suivant les recommandations du GIEC (2006), différents facteurs d'émission et de stockage de GES sont disponibles suivant leur niveau de précision et de de détails. Les facteurs en Tier 1 représentent les facteurs par défaut qui sont les plus simples à utiliser et englobant des grandes zones géographiques et climatiques tandis que les facteurs en Tier 3 sont les plus spécifiques à un contexte régional voire même local. Ainsi, des facteurs d'émission et de stockage de GES en Tier 1 et Tier 3 ont été sélectionnés et intégrés dans l'outil TropiC Farm Tool (Partie 1, chapitre 3).

Le calcul du bilan carbone ou empreinte carbone de la ferme suit la formule suivante :

$$\text{Bilan carbone (tCO}_2\text{ eq)} = \sum \text{GES Emissions (tCO}_2\text{ eq)} - \sum \text{GHG Stockage (tCO}_2\text{ eq)}$$

Les résultats présentés par TropiC Farm Tool sont constitués de tableaux et de graphes détaillant les émissions et séquestration de GES par volet Agriculture, Elevage, Foresterie et Energie. Le bilan carbone ou empreinte carbone de la ferme est exprimé en émission nette exprimée en tonne de CO<sub>2</sub>

équivalent par ferme mais également par unité de surface (tCO<sub>2</sub> eq/ha) et par unité de production (tCO<sub>2</sub> eq/t de produits).

## 5 Guide à la saisie de données

La barre de navigation permet facilement à l'utilisateur de passer d'un volet à un autre ainsi que de visualiser directement les résultats. La saisie des données est facilitée par les codes couleurs. Les cases en gris claires correspondent aux cases à compléter par les utilisateurs. Les cases à compléter peuvent être soit des cases vides pour la saisie de données soit une liste déroulante où l'utilisateur choisit une option. Les résultats des calculs sont affichés dans les cases en bleu.

### 5.1 Volet Description

Le volet description comprend 3 rubriques permettant de saisir les données relatives aux caractéristiques générales de la ferme. La première rubrique concerne l'identification et la localisation de la ferme. Si un nombre important de ferme est considéré dans l'étude, une case est réservée pour mettre un code exploitation. La deuxième rubrique concerne la taille de la ferme et notamment la superficie des terres affectée aux différents modes d'usage tel que les systèmes en culture vivrière annuelle, l'agroforesterie, la foresterie et les rizières inondées. La troisième rubrique permet d'ajouter les données concernant les principales cultures et produits agricoles annuellement produits au niveau de la ferme (Figure 23).

1.1. IDENTIFICATION DE L'EXPLOITATION		1.2. MODE D'USAGE ET SUPERFICIE DES TERRES	
Code	F_01		Superficie (ha)
Nom de l'exploitant	Jacques	SC_cultures annuelles	1
Region	Itasy	SC_agroforesterie	0.3
District	Arivonimamo	SC_foresterie	1.5
Village	Ambodimanga	SC_riziculture	0.5
		Superficie totale (ha)	3.3

1.3. PRODUCTION ANNUELLE	
Cultures principales	Production annuelle (t)
Riz paddy	2
Maïs	2
Manioc	3
Tomate	
Haricot	

Figure 23: Volet Description

## 5.2 Volet Agriculture

Le volet agriculture est composé de 8 rubriques correspondant aux différents types d'émission et de stockage de GES qu'on peut rencontrer dans le secteur agricole. Les émissions à la fois directes et indirectes de GES sont considérées. La rubrique 1 concerne les émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) due à la riziculture inondée. Pour calculer les émissions de CH<sub>4</sub> dues au riz, l'utilisateur doit avoir les différentes données caractérisant la culture du riz de la ferme étudiée. Ces données se rapportent principalement au type d'écosystème étudié (pluvial en eau profonde ou irrigué), au type d'inondation avant et pendant la culture (inondation en permanence, aération simple ou multiple), au type et quantité d'amendement apporté (paille incorporé, fumier de ferme, compost frais ou engrais vert), à la durée du cycle de culture (court ou long cycle) et à la superficie considérée. Les émissions de méthane sont ainsi calculées et converties en CO<sub>2</sub> équivalent (Figure 24).

2.1. EMISSIONS DE METHANE DUES AU RIZ											
Système rizicole	Régime hydrique			Amendement					Total Emissions		
	Type d'écosystème	Type d'inondation		Présence	Type	Application (t/ha)	t(jours)	Surface (ha)	CH <sub>4</sub> (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
1	Irrigué	on inondé>180	aération simple		avec	30jr avant la culture pds se	1		120	1	245.72
				Fumier de ferme pds frais		1					
				Amendement organique?		0					
				Amendement organique?		0					
2	Type d'écosystème?	avant culture?	pendant culture?	Présence?	Incorporation paille?	0	0	0	0.00	0.00	0.00
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
3	Type d'écosystème?	avant culture?	pendant culture?	Présence?	Incorporation paille?	0	0	0	0.00	0.00	0.00
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
4	Type d'écosystème?	avant culture?	pendant culture?	Présence?	Incorporation paille?	0	0	0	0.00	0.00	0.00
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
					Amendement organique?	0					
									245.72	6142.88	6.14

**Figure 24: Emissions de méthane dues au riz du volet agriculture**

La deuxième rubrique du volet agriculture concerne les émissions directes de N<sub>2</sub>O dues à la gestion des terres cultivées. Ces émissions peuvent se passer à la fois sur parcelle inondées et sur parcelles non inondées. Dans cette rubrique l'utilisateur doit compléter les données concernant les quantités annuelles d'apport d'azote sur les parcelles (Figure 25). Les sources d'azote pouvant être d'origine organique (fumier, compost, résidus de culture) ou d'engrais synthétiques. La quantité d'azote contenu dans les résidus de récolte peut être calculée dans TropiC Farm Tool en utilisant les données par défaut de l'IPCC 2006 qui se trouve dans l'onglet « help » du calculateur (Figure 26).

2.2.1. N <sub>2</sub> O-N entrées sur l'ensemble des parcelles en riz inondé						
Quantité annuelle de N apportée aux sols par					Total Emissions	
Engrais synthétiques	Amendements organiques	Résidus de récolte*	N <sub>2</sub> O-N (kg/an)	N <sub>2</sub> O DIRECTES (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> (Eq t/an)
F <sub>SN</sub> (kgN/an)	F <sub>ON</sub> (kgN/an)	F <sub>RR</sub> (kgN/an)				
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
* la valeur de F <sub>RR</sub> peut être calculée à partir des valeurs par défaut de l'IPCC <a href="#">Cliquer ici</a>					0.00	0.00

2.2.2. N <sub>2</sub> O-N entrées sur l'ensemble des parcelles non riz inondé						
Quantité annuelle de N apportée aux sols par					Total Emissions	
Engrais synthétiques	Amendements organiques	Résidus de récolte*	N <sub>2</sub> O-N (kg/an)	N <sub>2</sub> O DIRECTES (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> (Eq t/an)
F <sub>SN</sub> (kgN/an)	F <sub>ON</sub> (kgN/an)	F <sub>RR</sub> (kgN/an)				
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
* la valeur de F <sub>RR</sub> peut être calculée à partir des valeurs par défaut de l'IPCC <a href="#">Cliquer ici</a>					0.00	0.00

Figure 25: Emissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O dues à la gestion des parcelles de culture

6. FACTEURS PAR DÉFAUT DE L'ESTIMATION DE L'AZOTE AJOUTÉ AUX SOLS PAR LES RÉSIDUS DE RÉCOLTES (F <sub>RR</sub> ) DE L'IPCC												
Principaux types de récoltes	Rendement frais (t/ha)	Fraction MS	Récolte (t/ha)	RÉSIDUS AÉRIENS			RÉSIDUS SOUTERRAINS			F <sub>RR</sub> *** (t/ha)		
				AÉMS* (t/ha)	Teneur en N des résidus aériens	N total résidus aériens(t/ha)	Rapport résidus souterrains/a	STMS** (t/ha)	Teneur en N des résidus souterrains		N total résidus souterrains (t/ha)	
céréales	0	0.88	0.00	0.88	0.01	0.01	0.22	0.19	0.01	0.00	0.00	
haricots et légumineuses	0	0.91	0.00	0.85	0.01	0.01	0.19	0.16	0.01	0.00	0.00	
tubercules	0	0.22	0.00	1.06	0.02	0.02	0.20	0.21	0.01	0.00	0.00	
racines et autres	0	0.94	0.00	1.54	0.02	0.02	0.20	0.31	0.01	0.00	0.00	
Fourrages fixateurs d'azote	0	0.90	0.00	0.00	0.03	0.00	0.40	0.00	0.02	0.00	0.00	
Fourrages non fixateurs d'azo	0	0.90	0.00	0.00	0.02	0.00	0.54	0.00	0.01	0.00	0.00	
Herbacées vivaces	0	0.90	0.00	0.00	0.02	0.00	0.80	0.00	0.01	0.00	0.00	
Mélange herbes-trèfles	0	0.90	0.00	0.00	0.03	0.00	0.80	0.00	0.02	0.00	0.00	
<b>Récoltes individuelles</b>												
maïs	0	0.87	0.00	0.61	0.01	0.00	0.22	0.13	0.01	0.00	0.00	
Riz	0	0.89	0.00	2.46	0.01	0.02	0.16	0.39	SO		0.00	
soja	0	0.91	0.00	1.35	0.01	0.01	0.19	0.26	0.01	0.00	0.00	
pois sec	0	0.90	0.00	0.68	0.01	0.01	so		0.01	0.00	0.00	
pomme de terre	0	0.22	0.00	1.06	0.02	0.02	0.20	0.21	0.01	0.00	0.00	
arachide avec gousse	0	0.94	0.00	1.54	0.02	0.02	so		SO		0.00	
foin sans légumineuse	0	0.90	0.00	0.00	0.15	0.00	0.54	0.00	0.01	0.00	0.00	

\*Matière sèche des résidus aériens (AÉMS)  
\*\*Matière sèche des résidus souterrains (STMS)

Figure 26: Estimation de l'azote ajouté aux sols par les résidus de récolte de l'onglet "help"

La troisième rubrique du volet agriculture concerne les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O dues à la volatilisation de l'azote. Comme pour les émissions directes de N<sub>2</sub>O, l'utilisateur devra compléter les quantités annuelles d'azote apportées aux parcelles.

La quatrième et la cinquième rubrique permettent de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et à l'engrais urée. La saisie de données consiste à ajouter les quantités annuelles de produits tels que dolomie, urée ou calcaire apportées par l'exploitant au niveau de ses parcelles (Figure 27).

#### 2.4. EMISSIONS DE CO<sub>2</sub> DUES AU CHAULAGE

Quantité annuelle de:			Total Emissions	
M <sub>calcaire</sub> (t/an)	M <sub>solonch</sub> (t/an)	CO <sub>2</sub> -C (t/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
0	0	0.00	0.00	0.00
			0.00	0.00

#### 2.5. EMISSIONS DE CO<sub>2</sub> DUES AUX ENGRAIS A L'UREE

		Total Emissions	
Urée (t/an)	CO <sub>2</sub> -C (t/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
0	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00

**Figure 27: Emissions de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et à l'urée du volet agriculture**

La sixième rubrique concerne le calcul des émissions de GES dues à l'utilisation de pesticides (insecticides, fongicides et herbicides). L'utilisateur devra ainsi saisir comme donnée, la quantité annuelle de matière active appliquée aux cultures (Figure 28).

#### 2.6. EMISSIONS DE GES DUES AUX PESTICIDES

		Total Emissions	
Type	Matière active (t/an)	CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Insecticides	0	0.00	0.00
Fongicides	0	0.00	0.00
Herbicides	0	0.00	0.00
		0.00	0.00

**Figure 28: Emissions de GES dues à l'utilisation de pesticides du volet agriculture**

La septième rubrique du volet agriculture calcule les émissions de GES sans CO<sub>2</sub> dues au brûlage de biomasse. L'utilisateur devra choisir s'il s'agit de feu de pâturage ou de feu de mi ou fin de saison ensuite de saisir les données sur la superficie brûlée et la quantité de combustible disponible à la combustion (t/ha) (Figure 29). Cette dernière peut être estimée à partir de l'onglet « help » du calculateur en choisissant le type de culture.

## 2.7. EMISSIONS DE GES SANS CO<sub>2</sub> DUES AU BRULAGE DE LA BIOMASSE

Catégorie	Culture	S (ha)	Combustible disponible à la combustion (t/ha)*	Total Emissions	
				CO <sub>2</sub> Eq (Kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Toutes les savanes prairies	Pâturage tropical	0	0	0.00	0.00
Feux de mi ou fin de saison		0	0	0.00	0.00
Feux de mi ou fin de saison		0	0	0.00	0.00
* Peut être estimée à partir de la matière sèche des résidus de récoltes (AÉMS et STMS) <a href="#">Cliquer ici</a>				0.00	0.00

Figure 29: Emissions de GES dues au brulage de biomasse

La huitième rubrique du volet agriculture permet de calculer la quantité de carbone stocké dans les sols due à l'humification des matières organiques apportées aux cultures. Le stockage de carbone dans les sols comme étant un puits de carbone est compté négativement dans le calcul du bilan carbone ou empreinte carbone des fermes. Ainsi, l'utilisateur aura à saisir la quantité annuelle par type de matière organique apportée sur les parcelles de culture (Figure 30).

2.8. RESTITUTION AU SOL PAR HUMIFICATION		Tier 2	
Type d'amendement	Quantité (t)	Total Emissions	
		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
résidus cultures	0	0.00	0.00
fumier	0	0.00	0.00
lisier	0	0.00	0.00
fiente	0	0.00	0.00
compost	0	0.00	0.00
		0.00	0.00

Figure 30: Calcul du stockage annuel de carbone dans les sols du volet agriculture

### 5.3 Volet Elevage

Le volet élevage est constitué de deux rubriques dont les émissions de GES dues à la fermentation entérique des animaux et les émissions de GES dues à la gestion des effluents d'élevage. Pour la fermentation entérique, l'utilisateur aura à compléter le nombre de tête par type d'animal existant au niveau de la ferme étudiée (bovins, bovins laitiers, porcs). Pour les émissions de GES due à la gestion des effluents d'élevage, il s'agit de mettre la quantité d'effluent d'élevage produit annuellement pour chaque type d'animal (bovins, porcins, volaille). Les émissions de GES dues à la fabrication de compost sont également calculées dans TropiC Farm Tool (Figure 31).

## 5.4 Volet Foresterie

Le volet foresterie calcule le stockage annuel de carbone dans les arbres. TropiC Farm Tool considère à la fois le stockage de carbone dans le compartiment aérien et souterrain des arbres. Des études réalisées à Madagascar ont permis de calculer avec précision le stockage annuel de carbone dans la biomasse ligneuse de 12 espèces ligneuses, ce qui est présenté dans la première rubrique du volet foresterie. Ainsi, si l'espèce d'arbre rencontrée dans la ferme étudiée correspond à l'une des espèces répertoriées dans la première rubrique du volet foresterie, l'utilisateur aura juste à compléter le nombre de pied d'arbre par type d'espèce et selon l'âge des arbres (<5ans, entre 5 et 10 ans et >10 ans) (Figure 32).

Pour les autres espèces non citées dans la première rubrique, l'utilisateur aura à passer au niveau de la deuxième rubrique du volet, à y saisir le nom de l'espèce d'arbre étudiée, le nombre de pieds selon l'âge des arbres ainsi qu'une information complémentaire qui est la densité du bois de l'espèce (Figure 33).

3.1. FERMENTATION ENTERIQUE			
Catégorie	Nombre de tête	Total Emissions	
		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
bovins	0	0.00	0.00
bovins laitiers	0	0.00	0.00
porcs	0	0.00	0.00
lapins	0	0.00	0.00
		0.00	0.00

3.2. GESTION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE			
Type de fumier	Quantité	Total Emissions	
		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Bovin (t/an)	0	0.00	0.00
Porcs (m <sup>3</sup> /an)	0	0.00	0.00
Volaille (nbre de tête)	0	0.00	0.00
Compost (kg/an)	0	0.00	0.00
		0.00	0.00

Figure 31: Emissions de GES du volet Elevage

Espèces	Densité du bois	Nombre de pieds			Biomasse aérienne			Biomasse souterraine			Séquestration C (kg/an)	Total Séquestration	
		< 5ans	5 à 10	> 10 ans	< 5ans	5 à 10	> 10 ans	< 5ans	5 à 10	> 10 ans		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Pinus kesiya	0,40	100	0	0	141.00	0.00	0.00	28.00	0.00	0.00	169.00	619.67	0.62
Melia azadiracht	0,42	100	0	0	141.00	0.00	0.00	28.00	0.00	0.00	169.00	619.67	0.62
Acacia mangium	0,45	100	0	0	141.00	0.00	0.00	28.00	0.00	0.00	169.00	619.67	0.62
Mangifera indica	0,55	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Persea americana	0,55	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Coffea arabica	0,62	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Eucalyptus citriodora	0,64	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Acacia auriculiformis	0,68	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Eucalyptus robusta	0,69	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Citrus sp	0,74	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Eucalyptus camaldulensis	0,75	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Litchi Chinensis	0,88	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure 32: Stockage de carbone dans la biomasse des arbres si espèces répertoriées

Autres espèces*	Densité du bois	Nombre de pieds			Biomasse aérienne			Biomasse souterraine			Séquestration C (kg/an)	Total Séquestration	
		< 5ans	5 à 10	> 10 ans	< 5ans	5 à 10	> 10 ans	< 5ans	5 à 10	> 10 ans		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Tamarindus indica	0.75	0	20	0	0.00	98.00	0.00	0.00	19.60	0.00	117.60	431.20	0.43
Syzygium cumini	0.76	10	0	0	2.40	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	2.90	10.63	0.01
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

\* à compléter

Figure 33: Stockage de carbone dans la biomasse des arbres si espèces non répertoriées

## 5.5 Volet Energie

Le volet énergie calcule les émissions de GES dues à la consommation d'énergie fossile et d'énergie renouvelable au niveau de la ferme. L'utilisateur aura à saisir la quantité du type d'énergie annuellement consommée par la ferme (Figure 34).

## 5.6 Volet Résultat

Les résultats présentés dans TropiC Farm Tool sont à la fois sous forme de tableaux et de graphes. Un premier tableau et un graphique présentent les émissions et séquestrations de GES au niveau de chaque volet et rubrique de l'outil. Les émissions étant comptées positivement tandis que les séquestrations négativement. L'empreinte carbone de l'exploitation est tout d'abord exprimée en bilan global en tCO<sub>2</sub> Eq/an. Un bilan positif traduit une exploitation émettrice de GES tandis qu'un bilan négatif exprime une exploitation séquestrante (Figure 35 et Figure 36).

## 5. CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Type	Quantité	Total Emissions	
		CO <sub>2</sub> Eq (kg/an)	CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
charbon de bois (t/an)	0.5	82.21	0.08
bois de chauffe (m <sup>3</sup> /an)	2	20.00	0.02
biocarburant (l/an)	0	0.00	0.00
pétrole (l/an)	20	59.88	0.06
butane (kg/an)	0	0.00	0.00
gasoil (m <sup>3</sup> /an)	10	26000.00	26.00
essence (m <sup>3</sup> /an)	0	0.00	0.00
		26162.10	26.16

	Emissions CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Energie renouvelable	0.10
Energie fossile	26.06

Figure 34: Emissions de GES dues à la consommation d'énergie

## 7.1 Emissions et séquestrations de GES par module et par rubrique

		Emission CO <sub>2</sub> Eq (t/an)	Séquestration CO <sub>2</sub> Eq (t/an)
Agriculture	Emissions CH <sub>4</sub> dues au riz	0.29	
	Emissions directes de N <sub>2</sub> O	2.43	
	Emissions indirectes de N <sub>2</sub> O	0.04	
	Chaulage	0.00	
	Utilisation d'urée	1.35	
	Utilisation de pesticide	0.04	
	Brûlage de biomasse	0.00	
	Restitution au sol		-6.38
Elevage	Fermentation entérique	3.18	
	Gestion des effluents	4.10	
Foresterie	Biomasse ligneuse		-8.74
Energie	Energie renouvelable	0.08	
	Energie fossile	0.72	
		12.23	-15.13
Empreinte carbone CO <sub>2</sub> Eq (t/an)		-2.89	

Figure 35 : Tableau montrant les émissions et séquestrations de GES par volet et par rubrique

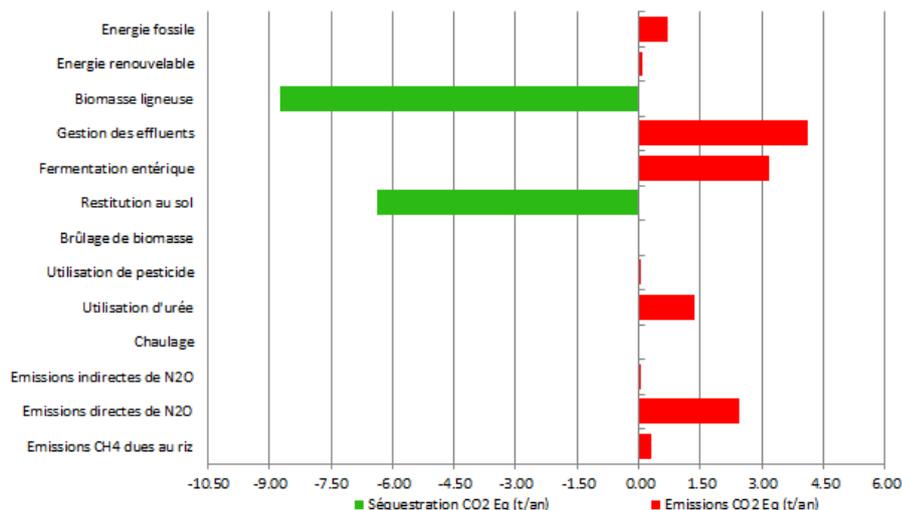


Figure 36 : Présentation graphique des émissions et séquestrations de GES par volet et par rubrique

Le deuxième tableau et le graphe du volet résultat présentent l’empreinte carbone de l’exploitation agricole rapportée à l’unité de surface et à l’unité de production (Figure 37).

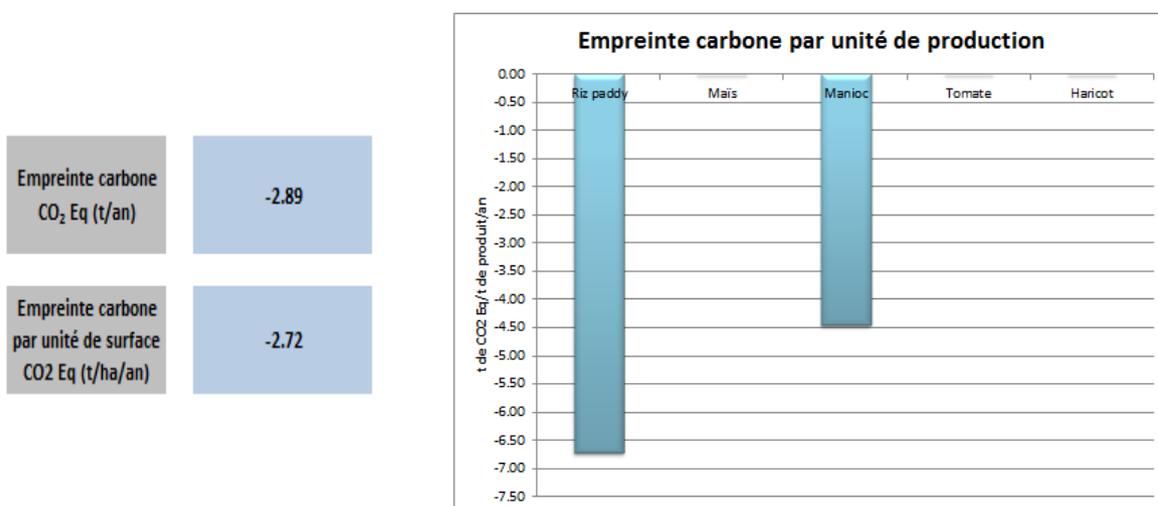


Figure 37 : Présentation de l’empreinte carbone d’exploitation agricole rapportée en unité de surface et en unité de production

### **Chapitre 3: Empreinte carbone d'exploitations agricoles suite à l'adoption des pratiques agroécologiques**

Narindra H. Rakotovao<sup>a\*</sup>, Tantely M. Razafimbelo<sup>b</sup>, Stephan Rakotosamimanana<sup>c</sup>, Zafyson Randrianasolo<sup>d</sup>, Josoa R. Randriamalala<sup>e</sup>, Alain Albrecht<sup>f</sup>

<sup>a\*</sup>University of Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>b</sup>University of Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>c</sup>Agrisud International, Villa Ambinintsoa, lot VB7 Ambatoroka, BP 6028, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>d</sup>Etc terra, Lot VE 26 L Ambanidia, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>e</sup>Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, BP 175, Ankatso, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>f</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, Ecologie fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agrosystèmes, 2 place Viala (Bt 12) F-34060 Montpellier cedex 2, France

Ce chapitre est un article publié dans la revue internationale *Journal of Cleaner Production*

Narindra H. Rakotovao, Tantely M. Razafimbelo, Stephan Rakotosamimanana, Zafyson Randrianasolo, Josoa R. Randriamalala, Alain Albrecht, 2016. Carbon footprint of smallholder farms in Central Madagascar: the integration of agroecological practices. *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 1165-1175.

# **Carbon footprint of smallholder farms in Central Madagascar: the integration of agroecological practices**

## **Abstract**

The carbon footprint (CFP) assessment of smallholders offers key information on the capacities and challenges for greenhouse gas (GHG) mitigation at farm scale. This allows prioritizing the practices that ensure both the food security of farmers and the low carbon impact associated to climate change. To tackle food security challenges and to maintain sustainable environment production, agroecological practices were planned for farmers in the Itasy region, Central Highlands of Madagascar. The project consisted of agroforestry and forestry systems, composting of organic matters, and system of rice intensification. The goals of this study were (i) to assess the CFP of farms in the Itasy region central Madagascar, (ii) to assess the impact of agroecological practices adopted by farmers on farms CFP, and (iii) to compare the impact of Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and in cropland soils on farms CFP. For these purposes, a survey of 192 representative farms was realized during the years 2012-2013. Agroecological practices integrated at farm scale reduced significantly farms CFP up to 364% in terms of land surface and up to 578% in terms of food production, suggesting an important GHG sequestration at farm scale. Main sources of GHG at farms scale were: nitrous oxide from soil management (25%), methane from rice cultivation (24%), livestock manure management (24%), and enteric fermentation (23%). Trees planted in agroforestry and forestry systems offered the highest GHG mitigation benefits. Tier 1 factors overestimated up to 7 times higher the farms CFP compared to Tier 3 factors. This study highlights that the integration of agro-ecological practices at farm scale offers significant GHG mitigation and carbon sequestration in Malagasy context, thus giving an alternative for climate change mitigation.

## **1 Introduction**

Agricultural lands occupy 37% of the earth's land surface. An important amount of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is however released by related activities including food production, livestock, fertilizers, pesticides, soil management, machinery and transport (IPCC, 2006). Moreover, modern agriculture increase and irrigation systems pollute more the environment (Mahdizadeh Khasraghi et al., 2015; Valipour, 2012a, 2012b; Valipour et al., 2015; Yannopoulos et al., 2015). The agricultural sector accounts up to 52% and 84% of the global anthropogenic CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions (Smith et al., 2008); yet, it is also recognized as a considerable sink of GHG by sequestering carbon in soils and in woody

biomass (Hillier et al., 2009; Lal, 2004; IPCC, 2006). During the last decade, emissions of GHG from crops and livestock production have significantly increased in developing countries, due to an increase of the total agricultural outputs (Tubiello et al., 2014).

The huge interest in GHG emissions and their impact on the Global climate have inspired the carbon footprint (CFP) assessment; which is defined as the total sets of GHG emissions caused by an organization, event, product or person (IPCC, 2006). Thus, the CFP is the quantity of GHG expressed in units of CO<sub>2</sub> equivalent (Wiedmann and Minx, 2008) and remains as a strong indicator of GHG intensity of activity or organization (Pandey and Agrawal, 2014) while the life cycle analysis (LCA) method aims to estimate the environmental impact of the production, the use and the disposal of a product (Payraudeau and van der Werf, 2005). Household, companies, cities, region and country make use of CFP assessment (Peters, 2010) as well as livestock and animal production areas (Luo et al., 2015; Rotz et al., 2010; Ruviaro et al., 2015; Topp and Rees, 2008), energy consumption sectors (Kenny and Gray, 2009), food production (Coley et al., 2009; Jianyi et al., 2015; Kristensen et al., 2015; Pathak et al., 2010; Yan et al., 2015), and agricultural practices (Hillier et al., 2009; Knudsen et al., 2014; Yuttitham et al., 2011).

In Madagascar, the economy stands on agriculture and 80% of the population live from agriculture and livestock products in rural areas (INSTAT, 2011). Best part of farmers still practice traditional agriculture and are accordingly strongly liable to natural resources and climate variability. Hence any climatic disturbance possibly will threaten food security and livelihood of Malagasy farmers (INSTAT, 2011): in fact, when they produce less, their income goes down whereas their costs go up (Lobell et al., 2011) and this problem occurs in other developing countries (Brown and Funk, 2008; Parry, 2007).

Agroecological practices (AP) seek sustainable farming systems that optimize and stabilize yields (Silici, 2014). In the Itasy region, the agroecology concept was primarily proposed to farmers to cope with the food security by improving crop productivity, diversifying agricultural products, and by preserving the natural resources like soils and water.

In order to improve the incomes and the benefits of farmers, trees within agroforestry and forestry systems were planted and composting of organic matters was promoted in the region. Thus, a wider range of products were sold in local markets (woods and fruits) and crop production was improved with fertilized soil.

The System of rice intensification (SRI) is mainly characterized by the young seedlings transplantations and the alternation of drought and wet period of rice field (Stoop et al., 2002). The SRI increases the productivity of irrigated rice by changing the management of plants, soil,

water and nutrients (<http://sri.cals.cornell.edu/>) and was first used in Madagascar in the 1980s. In the Itasy region, SRI particularly increases the rice yield from 2t/ha to 5t/ha.

In Madagascar, former works carried out on the environmental impact of AP adoption; including GHG fluxes and carbon sequestration were mainly done at plot scale (Chapuis-Lardy, 2009; Fanjaniaina, 2012; Razafimbelo, 2005). Therefore, this paper aimed to study the contribution of these AP to climate change and their potential of mitigation at farm scale.

Furthermore, the Tier 3 method using country specific factors (IPCC, 2006) was used in this study to estimate carbon removal in woody biomass and in cropland soils instead of the Tier 1 method which uses the default factors provided by the IPCC (2006).

Therefore, the objectives of this article were: firstly, to assess the CFP of farms in the Itasy region; and secondly, to assess the impact of different levels of AP adoption on farms CFP; and thirdly, to compare the impact of Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and in cropland soils on farms CFP. This will enable the future analysis of the potential climate mitigation of smallholders and the promotion of the best mitigating practices.

## **2 Materials and methods**

### **2.1 Description of case study**

The study was conducted in the Itasy region, Central Highlands of Madagascar (46°54'22.66"E, 18°57'25.85"S). The region is 900-1500m above sea level and has a tropical climate of altitude.

Agriculture and livestock provide income for farmers and production is mainly set for family consumption.

Lands are 20% irrigated, and the 80% are used for rain fed rice, agroforestry, forestry and for annual crops such as cassava, maize and bean. Agroforestry is the association of annual crops and trees which were mainly fruit species sold on local market. Forestry is chiefly dominated by *Eucalyptus sp.* and *Pinus. sp* that are utilized for household energy and for timber.

Cattles are exploited for animal traction and as source of manure.

As chemical fertilizers (urea, NPK) and pesticides are expensive for farmers, they are only applied on cash crops like vegetables and fruits like oranges.

In this case study, 192 farms were selected in order to represent the studied region in terms of size, means of production, crop system diversification, and education level of the household head. The 192 farms were classified in four clusters according to their level of AP adoption. Cluster 1 (n=120) and cluster 2 (n=44) grouped farms with very low and low AP adoption levels whereas cluster 3 (n=10) and cluster 4 (n=18) grouped the farms with medium and high AP adoption level (Tableau 3). Planting trees was the most adopted practice followed by composting organic matter

and SRI. Cluster 4 had the most important number of trees in agroforestry and forestry systems (>1000 trees). Cluster 3 (n=10) differed from all clusters by the importance of compost produced annually on the farms (>10t.yr<sup>-1</sup>). Cluster 1 (n=120) and cluster 2 (n=44) were characterized by small piece of land (1 to 1.5 ha) and a few number of cattle (an average of 2 heads per farm). Cluster 3 and cluster 4 gathered the relatively wealthy farms with an average cropland surface estimated around 3.2 ha.

## **2.2 Farm survey and resource flow mapping**

Surveys of 192 farms were conducted during the years 2013-2014 through interviews of household heads, and were completed by fieldwork observations and measurements. A questionnaire was elaborated in order to collect complete information dealing with the structure of and activities within each farm.

Data collected included (i) Farm description such as location, land surface and production; (ii) Agriculture activities such as main crops, adoption of irrigated rice system, use of manure, pesticides and chemical fertilizers, burning of biomass, and organic matter added to soils; (iii) Livestock, including the type and number of animal heads; (iv) Forestry and agroforestry data such as number, age and species of trees; (v) Energy consumption, in particular fossil and renewable energy.

To assess the degree of AP adoption by farmers, data regarding trees planting, composting of organic matters and adoption of SRI were particularly evaluated for each farm.

Each farm was considered as a whole system with different compartments: household's habitation, annual crop fields, paddy rice fields, agroforestry and forestry fields, and livestock. Each compartment was characterized considering surface (ha), cropping techniques, main productions and inputs. Resource flows between compartments were assessed; for instance, the quantity of manure from livestock to crop field. Then, the resource flow map of each farm was drawn using the approach suggested by Tittonell et al. (2006). This map shows the flows of inputs and outputs to and from the different compartments of a farm. It also provides an overview of the structure and the functioning of each farm. Then, the system boundary was defined by the perimeter of each farm and integrated the inputs and outputs (Figure 38).

## **2.3 Carbon footprint calculation**

To assess farm CFP, especially GHG mitigation and GHG removal strategies, we adopted a whole farm system modeling approach (Schils et al., 2007) so that we could take into account all changes in GHG emission and in carbon removal arising from alternative mitigation practices adopted in another sector of the farming system.

Many GHG emission protocols and standards are available at international level, such as, the GHG protocol of World Resource Institute (WRI), the ISO 14064, the Product Life Cycle Standard and the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Pandey et al., 2011; Rugani et al., 2013). The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,

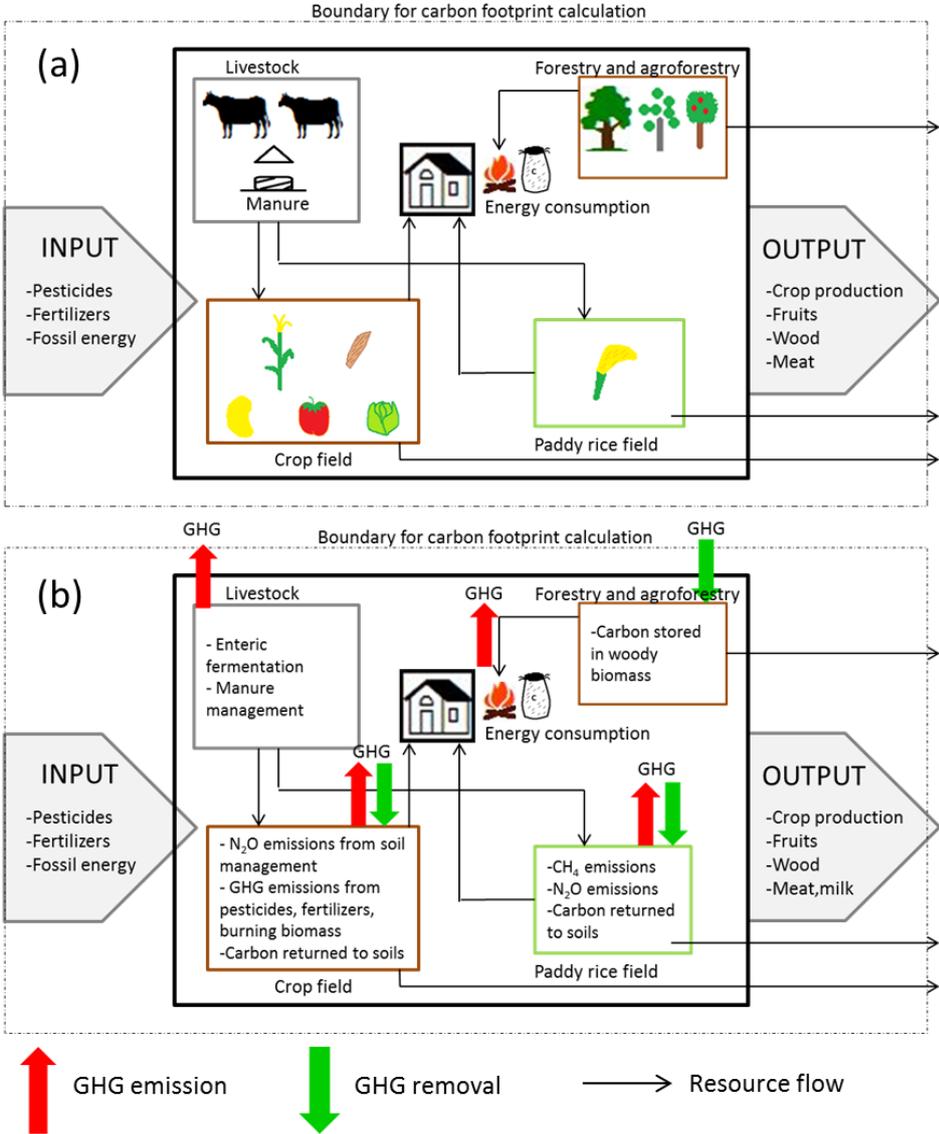


Figure 38: Farming system compartments and GHG inventory

**Tableau 3: Description of each cluster of farms**

	Cluster 1				Cluster 2				Cluster 3				Cluster 4			
<i>Number of farms</i>	120				44				10				18			
<i>Agroecological practices adoption</i>	Very Low adoption				Low adoption				Medium adoption				High adoption			
	Mean	Min	Max	Median	Mean	Min	Max	Median	Mean	Min	Max	Median	Mean	Min	Max	Median
Trees (number)	55	0	356	18	138	0	660	92	<b>783</b>	6	2513	724	<b>1192</b>	592	2040	1167
Compost (t.yr <sup>-1</sup> )	0.4	0.0	2.4	0.0	3.7	0.0	8.5	3.7	<b>11.4</b>	7.5	18.4	10.5	2.4	0.0	5.3	2.2
SRI (ha)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	1.0	0.1	0.2	0.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.0
<i>Land surface (ha)</i>	1.0	0.0	6.6	0.8	1.5	0.2	6.0	1.1	3.2	1.4	6.8	2.7	3.2	0.6	11.8	2.6
<i>Main productions (t.yr<sup>-1</sup>)</i>																
Rice	1.5	0.0	17.0	1.0	2.6	0.4	9.4	2.2	5.9	1.0	20.2	4.1	3.6	0.4	9.6	3.6
Maize	0.2	0.0	2.0	0.1	0.5	0.0	4.6	0.2	0.8	0.0	4.9	0.1	0.9	0.0	7.7	0.3
Cassava	1.0	0.0	22.5	0.5	1.3	0.0	6.6	0.5	2.5	0.0	6.1	1.8	2.0	0.0	13.0	0.4
Bean	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	1.3	0.0	0.6	0.0	2.2	0.3	0.2	0.0	1.3	0.1
Tomato	0.3	0.0	5.0	0.0	0.7	0.0	7.5	0.0	1.4	0.0	5.0	0.5	2.9	0.0	14.5	0.7
<i>Organic fertilizer (t.yr<sup>-1</sup>)</i>																
Cattle manure	<b>1.9</b>	0.0	10.0	1.6	<b>2.5</b>	0.0	15.0	0.9	<b>6.8</b>	0.0	28.8	4.2	<b>4.9</b>	0.0	16.0	3.8
Pig manure	0.2	0.0	2.5	0.0	0.1	0.0	0.8	0.0	1.0	0.0	4.0	0.3	0.3	0.0	2.2	0.0
<i>Chemical fertilizer (kg.yr<sup>-1</sup>)</i>																
Urea	0.9	0.0	50.0	0.0	0.7	0.0	10.0	0.0	5.0	0.0	50.0	0.0	1.6	0.0	20.0	0.0
NPK	5.1	0.0	80.0	0.0	5.6	0.0	90.0	0.0	7.2	0.0	20.0	3.3	12.2	0.0	75.0	0.0
<i>Livestok (head)</i>																
Cattle	<b>2</b>	0	16	2	<b>2</b>	0	14	1	<b>5</b>	0	14	4	<b>4</b>	0	11	3
Pig	1	0	12	1	1	0	8	0	5	0	28	1	2	0	10	1

SRI: System of Rice Intensification; NPK: Nitrogen Phosphorus and Potassium

was relevant for this study for its detailed methodological approach on GHG emissions and removals quantification in the agricultural sector.

The volume 4 of the IPCC particularly provides guidance for GHG inventories in Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector.

Inventories of GHG emissions and carbon removal in each compartment were carried out to estimate the total annual flux of GHG associated to each of the farm compartments previously identified (Figure 1b). The three main GHG of the AFOLU sector including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) were considered in the inventories; then expressed in terms of CO<sub>2</sub> equivalent by using the Global Warming Potentials provided by IPCC (2006) (CH<sub>4</sub> = 25; N<sub>2</sub>O = 298; CO<sub>2</sub> = 1).

CFP of each farm was calculated using the equation bellow:

$$\text{Carbon Footprint (tCO}_2 \text{ eq.)} = \sum \text{GHG Emissions (tCO}_2 \text{ eq.)} - \sum \text{GHG Removal (tCO}_2 \text{ eq.)} \quad (1)$$

GHG emissions were accounted as positive value whereas GHG removal as negative (Pandey and Agrawal, 2014), so CFP value could has a positive or negative value.

The farm CFP was expressed in terms of cropland area in tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> and in terms of crop production in tCO<sub>2</sub>eq.t<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>.

Furthermore, the 2006 IPCC guidelines propose methods at three levels of detail, from Tier 1 (the default method) to Tier 3 (the most detailed method) to estimate GHG emissions and removals from agricultural sector. The Tier 1 methods are designed to be the simplest to use, for which equations and default parameter values (e.g., emission and stock change factors) are provided by the IPCC (2006). The most detailed Tier 3 method used data adapted to a specific country and obtained from models and inventory measurements tailored to address national circumstances. These higher order methods provide estimates of greater certainty than lower tiers. In this case study, Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and cropland soils were available at national and regional scale, therefore we carried out a comparison between farms CFP by using these Tier 1 and Tier 3 factors.

### 2.3.1 Estimation of GHG emissions at farm scale

Greenhouse gas emissions from farm activities were calculated using the equation 2 (IPCC, 2006).

$$\text{GHG Emission} = \text{Data on activity} \times \text{Emission factor} \quad (2)$$

Data on activities were collected from farm survey (for example land surface, quantity of fertilizers...) and emission factors were selected from IPCC (2006) and from other literatures adapted to Malagasy conditions.

According to the IPCC (2006) guidelines for GHG inventories, 11 GHG sources were identified: CH<sub>4</sub> emission from rice cultivation, direct and indirect N<sub>2</sub>O emission from managed soils, CO<sub>2</sub> emission from liming and urea fertilization, GHG emission from pesticide, biomass burning, livestock enteric fermentation, livestock manure management, renewable and fossil energy consumption (Tableau 4).

**Tableau 4 : GHG emissions from farm activities**

Farm activities	GHG	Parameters considered	Emission factor references
Irrigated rice cultivation	CH <sub>4</sub>	Type of ecosystem Water regime Type and amount of organic amendments Cultivation period of rice Annual harvested area of rice	IPCC, 2006
Adding nitrogen (N) source in managed soils	N <sub>2</sub> O	Direct and indirect emissions Synthetic N fertilizers Organic N applied as fertilizer N in crop residues (above and below ground)	IPCC, 2006
Adding lime	CO <sub>2</sub>	Annual quantity of calcic limestone or dolomite	IPCC, 2006
Use of urea fertilization	CO <sub>2</sub>	Annual quantity of urea fertilization	IPCC, 2006
Use of pesticide	CO <sub>2</sub>	Annual quantity of insecticides, fungicides and herbicides	Lal, 2004a
Biomass burning	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Pasture and agricultural residues Area burnt Mass of biomass available for combustion	IPCC, 2006
Livestock enteric emission	CH <sub>4</sub>	Number of livestock head species	IPCC, 2006
Manure management	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O,	Stockpiling manure and composting Annual quantity of manure	Pattey et al., 2005
Energy consumption	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O,	Renewable energy (firewood and charcoal) Fossil energy	(R Lal, 2004)a IPCC, 2006

### 2.3.2 Estimation of carbon removals at farm scale

In the agriculture sector, adding organic matter such as compost into the soils and the tree planting are the main practices contributing to carbon removals.

Soil carbon sequestration was one of the processes recognized by the IPCC to remove CO<sub>2</sub> from the atmosphere (IPCC, 2006). It can be improved by some agricultural management practices which were already considered as significant climate change mitigation options (Hutchinson et

al., 2007). The use of compost, organic manure, and crop residues were identified as one of the strategies to increase soil carbon sequestration (R. Lal, 2004).

The mineralization rate of each type of organic matter applied by farmers (crop residues biomass, cattle manure and compost) was available from previous studies conducted in Madagascar allowing the calculation of the Tier 3 factors corresponding to the annual amount of carbon returned in the cropland soils (Falinirina, 2010; Rabetokotany, 2013; Razafimbelo, 2005).

The mineralized carbon from the total carbon found in the dry matter was subtracted to get the carbon returned in cropland soils (Tableau 5). These Tier 3 factors were used for farms CFP calculation in this study.

In this study, both Tier 1 and Tier 3 factors were used to respectively calculate the carbon removal in cropland soils and the farm CFP.

The estimation of Tier 1 factors for carbon removal in cropland soils followed the IPCC guidelines in order to make the difference between the use of Tier 1 and Tier 3 factors.

Therefore, the Tier 1 factor was calculated using the equation 3, from IPCC (2006) guidelines.

$$\Delta C = (SOC_0 - SOC_{(0-T)})/D \quad (3)$$

Where  $\Delta C$  = annual change in carbon stocks in mineral soils ( $tC.yr^{-1}$ ),

$SOC_0$  = soil organic carbon stock in the last year of an inventory time period (tC)

$SOC_{(0-T)}$  = soil organic carbon stock at the beginning of the inventory time period (tC)

D = Time dependence of stock change factors (20 years)

$SOC_0$  and  $SOC_{(0-T)}$  were calculated using the equation (4), where the reference carbon stocks and stock change factors are assigned according to the land-use and management activities and corresponding areas at each point of the inventory time.

$$SOC = \sum (SOC_{REF} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I \times A) \quad (4)$$

$SOC_{REF}$  = the reference carbon stock,  $t C ha^{-1}$  ( $47tC.ha^{-1}$  for Malagasy conditions)

$F_{LU}$  = stock change factor for land-use systems

$F_{MG}$  = stock change factor for management regime

$F_I$  = stock change factor for input of organic matter

All these stock change factors were provided by the IPCC (2006).

**Tableau 5: Tier 3 factors of carbon returned in soils according to the type of organic matter**

Organic matter	Carbon returned in soils (% of carbon in organic matter)	Reference
Crop residues	11	Razafimbelo, 2005
Cattle manure	57	Rabetokotany, 2013
Pig manure	83	Rabetokotany, 2013
Poultry manure	36	Rabetokotany, 2013
Compost	85	Falinirina, 2010

Planting trees offers environmental benefits such as carbon sequestration in woody biomass (Jose, 2009). Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass were obtained from previous studies conducted as part of the project “Agroecology and forestry farming in the Itasy region” (<http://www.etcterra.org/en/projects/mahavotra>).

Biomass measurement was performed from dendrometric inventories: measure of the Diameter at Breast Height (DBH), 1.30m above the ground, and the height of the tree. Allometric equations adapted to climatic characteristics of the region were used to estimate the weight of trees from these measurable parameters in the field. Biomass was measured for the 12 tree species most planted by farmers: *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus kesiya*, *Acacia mangium*, *Acacia auriculiformis*, *Melia azadiracht*, *Coffea arabica*, *Litchi chinensis*, *Mangifera indica*, *Persea Americana*, and *Citrus sp.*

In order to integrate the evolution of the tree growth, three age groups were defined in the sampling design: plantations less than 5 years old, between 5 and 10 years old and more than 10 years old. Because the biomass growth patterns showed relationship with plantation age and wood density, carbon removal annually in woody biomass was calculated for each species considering its age and wood density (Tableau 6). The equation of Brown (1997) was used to estimate carbon sequestration in woody biomass, as seen in equation 5:

$$Carbon = Biomass \times 0.5 \quad (5)$$

Additionally, farms CFP using Tier 3 and Tier 1 factors for carbon removal in woody biomass were compared in this study.

For Tier 1 factors, in order to obtain the carbon annual sequestration in woody biomass, the generic allometric equation of Chave (2005) for biomass measurement in moist forests measurement was used, as provided in equation 6:

$$Biomass \text{ (kg)} = d \times \exp(-0.667 + 1.784 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281(\ln(D))^3) \quad (6)$$

where d=wood density (g.cm<sup>-3</sup>) and D= diameter of trees at 1.30m from soil surface (cm)

Finally, biomass was converted into carbon using the equation of Brown (Equation 5) and divided by tree age.

**Tableau 6: Tier 3 factors of annual carbon sequestration in woody biomass**

Wood density	AGB (kgC.tree <sup>-1</sup> .yr <sup>-1</sup> )			BGB (kgC.tree <sup>-1</sup> .yr <sup>-1</sup> )			AGB+BGB (kgC.tree <sup>-1</sup> .yr <sup>-1</sup> )		
	< 5 yr	5-10 yr	> 10 yr	< 5yr	5-10 yr	> 10 yr	< 5yr	5-10 yr	> 10 yr
Inferior to 0.5	1.41	15.7	16.49	0.28	3.14	3.3	1.69	18.84	19.79
Between 0.5 -0.7	1.24	7.93	22.26	0.25	1.59	4.45	1.49	9.52	26.71
Superior to 0.7	0.24	4.9	10.66	0.05	0.98	2.13	0.29	5.88	12.79

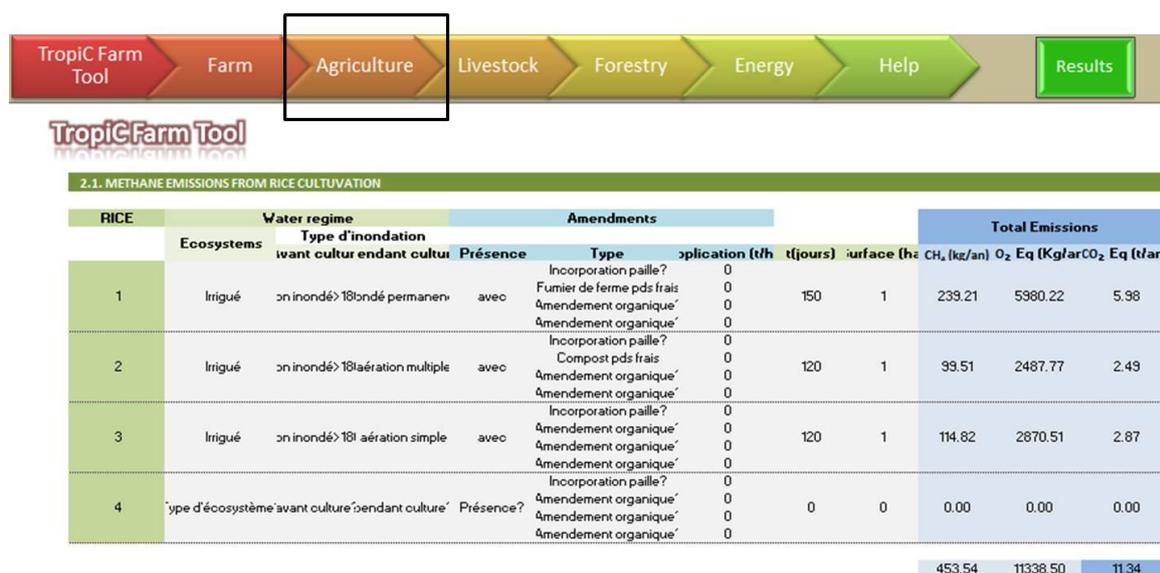
AGB: above ground biomass, BGB: below ground biomass

## 2.4 Development of a dedicated farm carbon footprint calculator

Although many CFP calculators are available online, these tools are usually designed for a specific activity or for a given country. Moreover, the emission and removal factors are typically already incorporated in these tools (Padgett et al., 2008) which are not necessarily adapted to the current study conditions. The TropiC Farm Tool, developed in Microsoft Excel, is an appropriate calculator for the Malagasy conditions, as it integrated all suitable GHG emission and GHG removal factors.

TropiC Farm Tool was elaborated to facilitate and to standardize the calculation of all farms CFP. TropiC Farm Tool facilitates and standardizes the calculation of all farms CFP. This tool was suitable for farm level application as well as for large scale studies by aggregating activity data. It was made of 6 Excel sheets corresponding to “farm description”, “agriculture”, “livestock”, “forestry”, “energy consumption” and “results” (Figure 39) in a way that users can visualize directly GHG emission and removal for each section of the farm and for the whole farming system (TropiC Farm Tool, 2013).

Once, GHG emission and removal factors were integrated in the calculator, only the data from each farm activities remained to be entered for the CFP calculation following equation 1.



RICE	Water regime		Amendments				Total Emissions			
	Ecosystems	Type d'inondation avant culture / pendant culture	Présence	Type	Application (t/ha)	Surface (ha)	CH <sub>4</sub> (kg/an)	O <sub>2</sub> Eq (KgfarcO <sub>2</sub> Eq (t/an)		
1	Irrigué	in inondé / inondé permanent	avec	Incorporation paille? Fumier de ferme pds frais Amendement organique Amendement organique	0 0 0 0	150	1	239.21	5380.22	5.98
2	Irrigué	in inondé / aération multiple	avec	Incorporation paille? Compost pds frais Amendement organique Amendement organique	0 0 0 0	120	1	99.51	2487.77	2.49
3	Irrigué	in inondé / aération simple	avec	Incorporation paille? Amendement organique Amendement organique Amendement organique	0 0 0 0	120	1	114.82	2870.51	2.87
4	Type d'écosystème	avant culture / pendant culture	Présence?	Incorporation paille? Amendement organique Amendement organique Amendement organique	0 0 0 0	0	0	0.00	0.00	0.00
							453.54	11338.50	11.34	

Figure 39: TropiC Farm Tool

## 2.5 Data analysis

Statistical analyses were performed both on data from farm interviews and from results of CFP calculation. Ascending hierarchical classification using Ward aggregation method and considering Euclidean distance was performed to classify the 192 farms in different clusters (Marcotorchino and Michaud, 1982). For this, XLstat 2008 was used.

The variables considered for this classification were: the number of tree planted including all forestry and agroforestry species, the annual quantity of compost produced by each farmer, and

the surface of land converted to SRI. Variation of farms CFP between clusters was compared using Kruskal-Wallis test once data was transformed to obtain positive value of CFP.

Data transformations are presented in the equations bellow:

$$\text{CFP expressed in tCO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}: Y = X + 17.48 \text{ (7)}$$

$$\text{CFP expressed in tCO}_2 \text{ eq.t}^{-1}.\text{yr}^{-1}: Y = X + 11.6 \text{ (8)}$$

Where  $X$  is the original value of CFP which could be positive or negative;  $Y$  corresponds to the CFP in positive value after adding a coefficient to the original value.

### 3 Results

#### 3.1 Carbon footprint of farms

The average CFP of the 192 farms reached  $0.8\text{tCO}_2\text{eq.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  in terms of land surface and  $0.1\text{tCO}_2\text{eq.t}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  in terms of crop production. Farms CFP decreased significantly when agroecological practices adoption increased. Agroecological practices integrated at farm scale reduced significantly farms CFP up to 364% in terms of land surface and up to 578% in terms of food production (Figure 40;  $p < 0.0001$ ). The highest CFP value occurred in cluster 1 which represented the most GHG emitting farms ( $1.9 \text{ tCO}_2\text{eq.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  and  $0.5 \text{ tCO}_2\text{eq.t}^{-1}.\text{yr}^{-1}$ ) whilst the lowest average farms CFP were in cluster 4; this last group represented the most GHG sequestering farms ( $-4.9 \text{ tCO}_2\text{eq.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  and  $-2.2 \text{ tCO}_2\text{eq.t}^{-1}.\text{yr}^{-1}$ ). Actually when farms adopted more agroecological practices, their CFP decreased and might even have a negative value.

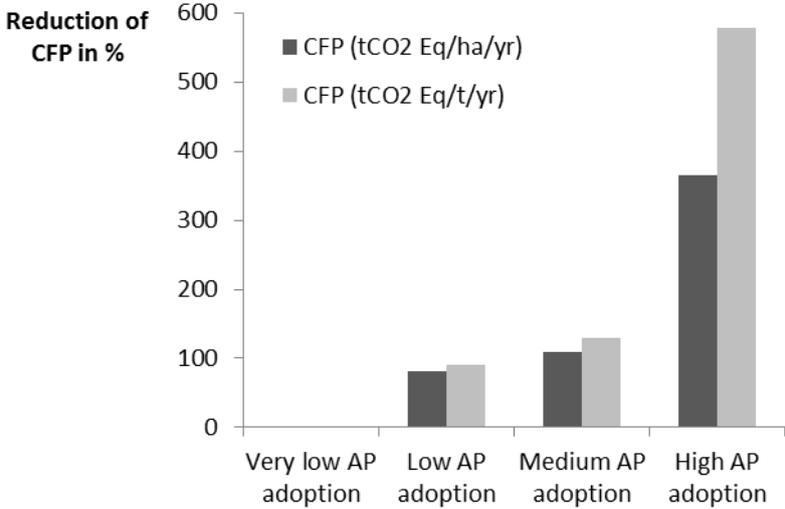


Figure 40: Contribution of AP adoption to farms CFP reduction

#### 3.2 GHG sources and sinks at farm scale

The results showed that livestock, soil management and irrigated rice cultivation were the main source of GHG at farm scale.  $\text{N}_2\text{O}$  emission from soil management represented about 25% of the total emissions while:  $\text{CH}_4$  emission from irrigated rice, GHG emission from manure

management and CH<sub>4</sub> emission from animal enteric fermentation counted respectively 24%, 24% and 23%. The energy consumption (fossil and renewable), the use of pesticides and chemical fertilizers produced a significantly lower emissions. In terms of sequestration, woody biomass and cropland soil were the main sinks of GHG at farm scale. Carbon removal in woody biomass accounted about 56% of total GHG removal at farm scale while carbon removal in cropland soil accounted about 44% (Figure 41).

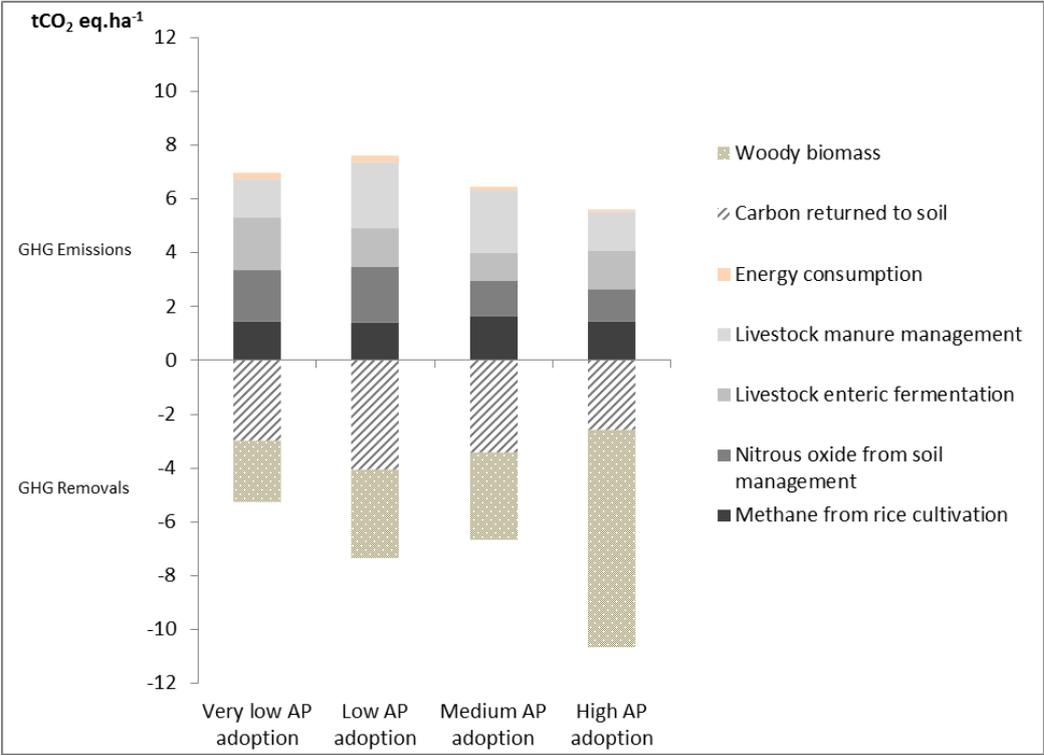


Figure 41: Contribution of practices to farms CFP

### 3.3 Comparison between farms CFP using Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and in cropland soil

The results showed that for the overall 192 farms studied, the use of Tier 3 factors reduced significantly farms CFP compared to the use of Tier 1 factors (Tableau 7, p < 0.0001).

This study allowed us to say that Tier 1 factors for carbon removal in woody biomass and cropland soil underestimated the GHG removals into sinks. It demonstrated the crucial need of Tier 3 factors for a more accurate CFP calculation. Later on, if the deal about carbon cost under the carbon market involves Malagasy farmers, it will be better to consider Tier 3 factors than Tier 1 for carbon removal in woody biomass and cropland soil.

**Tableau 7: Comparison of farms CFP using Tier 1 and Tier 3 factors for carbon removal in woody biomass and cropland soils**

	Tier1 CFP (tCO <sub>2</sub> eq.yr <sup>-1</sup> )	Tier3 CFP (tCO <sub>2</sub> eq.yr <sup>-1</sup> )
Mean	2.77	0.37
Min	-27.71	-22.38
Max	26.03	16.45
Mediane	2.14	0.44

## 4 Discussion

### 4.1 Comparison with similar studies in different contexts

In terms of land surface and total crop production, farms CFP was estimated in average to be 0.8tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> and 0.1 tCO<sub>2</sub>eq.t<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>.

These results showed that farms CFP in Itasy region were 80% lower than farms CFP in other developing countries. For instance, in Kenya, farms CFP were reported to range between 4 to 6.5 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> (Seebauer, 2014). Two reasons might explain these differences: the importance of GHG removals in woody biomass (2.24 to 8.07 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) and in cropland soils (2.56 to 4.07 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) in Itasy region farms and the high amount of GHG emissions from livestock enteric fermentation in Kenyan farms (8.2 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) compared to Malagasy farms (1.06 to 1.95 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>).

In emerging countries like China, CFP of crop production was estimated to be 2.86 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> (0.78 tCE.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) and 0.40 tCO<sub>2</sub>eq.t<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> (0.11 tCE.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) (Cheng et al., 2011). This value is 3.5 times higher than Malagasy farms CFP. In fact, it was stated that China crop production depended more on N fertilizer compared to Malagasy context.

In developed countries like Scotland, the average CFP for farms was estimated to be around 1.29 tCO<sub>2</sub>eq. ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> (351.7 kg CE ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>) (Hillier et al., 2009). Although this value is 1.61 times higher than Malagasy farms CFP, it is closer to organic farms CFP in the East of Scotland (Hillier et al., 2009). The reason may be that Malagasy farmers use only a low level of chemical and N fertilizers (4.9 kg.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>).

These results indicate the low contribution of Malagasy smallholders to climate change compared to other farmers in other countries.

However, the diversity of methodologies and definitions of CFP in the literature constraints the comparison of results between published studies.

## 4.2 Contribution of practices to farms CFP

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from soil management represented up to 25% of all GHG emissions at farm scale (Figure 41). This includes firstly the direct emissions from the process of nitrification and denitrification and secondly the indirect emissions through the process of volatilization, leaching and runoff of nitrogen (N). The increase of N added to soils from different sources such as synthetic N fertilizers, organic fertilizer (manure, compost) and crop residues induces an important amount of N<sub>2</sub>O emissions from managed soils (IPCC, 2006). In the studied context, the high exploitation of lowlands for rice cultivation and vegetable crops which are the most fertilized crops, mainly by farmyard manure (more than 10t.ha<sup>-1</sup>) explains the important N<sub>2</sub>O emissions from soils at farm scale.

By using the IPCC (2006) emission factors, we found that the average N<sub>2</sub>O emissions from soil management were estimated to be around 1.24tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>. This value is well above the measured annual N<sub>2</sub>O emissions from Malagasy agricultural soils estimated to be 0.12tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> (0.26 kg N ha<sup>-1</sup>) (Chapuis-Lardy et al., 2009). This indicates the need to undertake more measurements on GHG fluxes in different agro systems to get CFP values closer to the field reality.

Methane emissions from irrigated rice cultivation represented up to 24% of total GHG emissions at farm scale. This is due to the anaerobic decomposition of organic matter in flooded rice (IPCC, 2006). The amount of CH<sub>4</sub> emitted depends on different parameters such as the grown crops duration, the water regimes before and during cultivation period, and the organic soil amendments (IPCC, 2006).

Different mitigation technologies were proposed to reduce the CH<sub>4</sub> emissions from irrigated rice (Smith et al., 2008); those include alternating flooding/drying once or several times during the growing season (Wang et al., 2000; Yan et al., 2003). In Itasy region, the system of rice intensification (SRI), allowing water regime control, reduced CH<sub>4</sub> emissions up to 50%, while in China, the local irrigation practice of drying at midseason reduced CH<sub>4</sub> emission rates by 23% compared to continuous flooding (Wang et al., 2000). Due to this great potential of CH<sub>4</sub> emission reduction and taking into account the benefits it provides in terms of crop yield, the SRI is recommended as a suitable mitigation practice to be adopted by farmers.

Livestock is the third important source of GHG at farm scale due to the manure management (24%) and the enteric fermentation (23%). In Malagasy context, cattle management follows traditional ways. The local breed, characterized by a low productivity does not offer many options of improved feeding practices to reduce CH<sub>4</sub> emission. Adding more concentrates to cattle feeds in order to reduce CH<sub>4</sub> emissions (Lovett et al., 2003) would not be suitable for farmers because of financial cost. However, manure management can be improved by replacing stockpiling to composting. In terms of GHG flux, composting rather than stockpiling manure allows GHG

emissions reduction (Pattey et al., 2005b). In Itasy region, composting manure and organic matter is one the AP proposed to farmers in order to improve their soil fertility. Even if the majority of farmers adopt the traditional stockpiling manure, the composting adoption rate progressively increases in the studied region during the last 5 years.

GHG emissions from other farm activities such as use of pesticides, chemical fertilizers and energy consumption remain very low because Malagasy farming systems are characterized by a very low use of inputs (Randrianarisoa and Minten, 2003).

### **4.3 Influence of agroecological practices on CFP reduction**

Results showed that farms CFP did not depend on farm size (total land surface) but on farm activities and practices. Small and large farms could be both GHG emitting or GHG sequestering (Figure 42). The diversity of practices and activities between farms were the main cause of CFP variability.

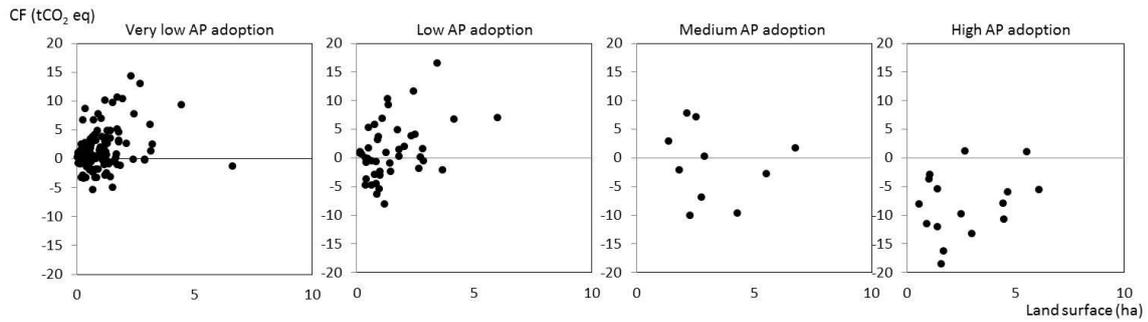
Trees planting whether in agroforestry or in forestry system was significantly the most influencing agricultural practice causing CFP variability between different clusters ( $p < 0.000000$ ).

Agroforestry and forestry represented 38% of farms land surface, sequestering  $1.3 \text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , and corresponding to  $4.7 \text{tCO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . After 20 years of trees plantation, carbon sequestration in woody biomass was estimated to be  $26 \text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ . This value is between 12 and  $228 \text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$  which was the estimated carbon sequestration potential in tropical agroforestry systems (Albrecht and Kandji, 2003). These results showed the importance of AP adoption like agroforestry and forestry in reducing farms CFP.

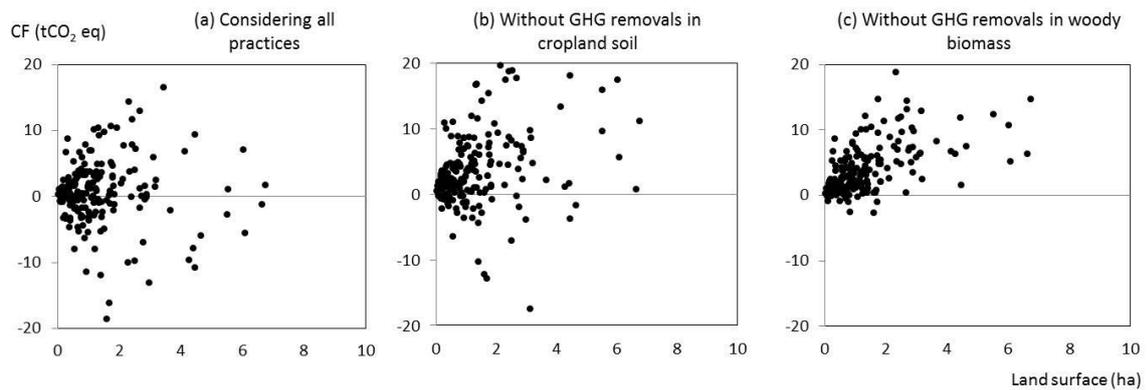
In cluster 1 and cluster 2, where farm had respectively very low and low levels of AP adoption, farms CFP indicated in average GHG emitting farms. In cluster 4 (high level of AP adoption) results showed GHG sequestering farms because of the significant carbon sequestration through tree plantation (Figure 42 and Figure 43). Results showed that, the GHG removals in woody biomass reduced significantly ( $p < 0.0001$ ) farms CFP compared to GHG removals in soils. Thus, without agroforestry and forestry systems, farms would be almost GHG emitting (Figure 43b, Figure 43c).

Farms CFP variation were firstly caused by GHG removals in woody biomass, and then by GHG emission from livestock enteric fermentation and manure management. The impact of composting organic matters and SRI on farms CFP reduction was less significant because of its low level of adoption.

Given the important contribution of these AP to CFP reduction, the implementation of these mitigation practices should be strengthened to assist farmers.



**Figure 42: Distribution of farms CFP according to various levels of AP adoption and farm land surface**



**Figure 43: Farms CFP according to various scenarii of sequestration practices and farm land surface**

In the studied context, the agroecological practices were progressively adopted by farmers; the cluster 3 and cluster 4, representing the richest farms, adopted the most these concepts. This is mainly explained by the fact that richest farmers own more land for tree plantations and agricultural labour mean required for the SRI and composting implementation. Therefore, more technical and financial support should be provided to poorest farmers.

This study is innovative and differs from previous ones by its “farm scale” approach which considers the whole farm as a unit. This approach encourages more the farmers to adopt cleaner practices as results directly reflect the carbon impact of their activities.

Tropical Farm Tool, the calculator developed in the current work can also be used in other studies with similar climate conditions to Madagascar.

Furthermore, the comparison between the use of Tier 1 and Tier 3 methods showed a considerable gap between farms CFP values. The use of Tier 1 method overestimated up to 7 times higher the farms CFP compared to the use of Tier 3 method. This indicates the areas of uncertainty of the IPCC estimates which confirms the need of further field measurements of GHG emission/removal according to each context. Other studies focused on GHG fluxes quantification have proved it (Chapuis-Lardy *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2003).

According to previous results and considering the studied context, two main areas of strategic development are proposed. The first one consists to strengthen the support to farmers in the implementation of AP (planting trees, adoption of compost and SRI). More technical and financial support should be provided to the poorest farms with low means of production. This implies the continuity of the different actions and development projects of local NGOs. The second area involves the development of further scientific research focusing on the GHG flux measurement in the tropical and Malagasy agricultural context. Indeed, the scarcity of GHG emission factors appropriate to tropical contexts constrained to systematically use the default values (Tier 1) that reduced significantly the precision of CFP calculation (Plassmann et al., 2010).

## **5 Conclusion**

The smallholder farms in Itasy region showed lower CFP compared to CFP of crop productions and farmers in developed, emerging and some developing countries. This was mainly due to the importance of GHG removals in woody biomass and to the very low use of N fertilizers in Malagasy farming systems. The integration of agroecological practices at farm scale such as agroforestry and forestry systems allowed a significant reduction of farms CFP up to 364% in terms of land surface and up to 578% in terms of food production which mean an important GHG sequestration at farm scale. The use of Tier3 method compared to Tier 1 method reduced significantly farms CFP. That indicates the need of more GHG fluxes measurements adapted to each context to reduce the area of uncertainty of the IPCC default values.

This study highlighted the low contribution of Malagasy smallholder farms to climate change and the GHG mitigation potential of AP integrated at farm scale.

### **Acknowledgement:**

This work was funded by the Agence Française pour le développement (AFD), The Aquitaine Region, and the Star's Service group under the project MAHAVOTRA “agroecology and forestry in Itasy Region, Madagascar”. We acknowledge the International Foundation for Science (IFS) which provided materials and financial support to conduct the field work (Grant N° C/5594-1).

We are grateful to Razafisoazara Mihajasoa Georgine, Rabarison Felahasina, Arimamy Mahefa for their help on data collection and farm surveys. We also thank Vanessa Aliniaina Rasoamampianina (CSFR) for her help on the manuscript review.

## References

- Albrecht, A., Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99, 15–27. doi:10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- Brown S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. In *FAO Forestry Papers 134*, 134, 55 pp. Rome, Italy.
- Brown, M.E., Funk, C.C., 2008. Food security under climate change.
- Chapuis-Lardy, L., Metay, A., Martinet, M., Rabenarivo, M., Toucet, J., Douzet, J.M., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Rakotoarisoa, J., 2009. Nitrous oxide fluxes from Malagasy agricultural soils. *Geoderma* 148, 421–427. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.015
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Folster, H., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*. 145, 87–99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yan, M., 2011. Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993–2007. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 231–237. doi:10.1016/j.agee.2011.05.012
- Coley, D., Howard, M., Winter, M., 2009. Local food, food miles and carbon emissions: A comparison of farm shop and mass distribution approaches. *Food Policy* 34, 150–155.
- Falinirina M. V., 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et services écosystémiques. Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Fanjaniaina, M. L., 2012. Evaluation des stocks de carbone sous rizières : Comparaison des divers modes de gestion en différents contextes pédologiques-cas de la région d'Itasy, Madagascar. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Hillier, J., Hawes, C., Squire, G., Hilton, A., Wale, S., Smith, P., 2009. The carbon footprints of food crop production. *Int. J. Agric. Sustain.* 7, 107–118. doi:10.3763/ijas.2009.0419
- Hutchinson, J.J., Campbell, C.A., Desjardins, R.L., 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 142, 288–302. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.030
- INSTAT, 2011. Enquête périodique auprès des ménages 2010, Rapport principal. Ministère d'Etat chargé de l'Economie et de l'Industrie.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), IGES, Tokyo, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

- Jianyi, L., Yuanchao, H., Shenghui, C., Jiefeng, K., Lilai, X., 2015. Carbon footprints of food production in China (1979–2009). *J. Clean. Prod.* 90, 97–103. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.072
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10.
- Kenny, T., Gray, N.F., 2009. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland. *Environ. Impact Assess. Rev.* 29, 1–6. doi:10.1016/j.eiar.2008.06.001
- Knudsen, M.T., Meyer-Aurich, A., Olesen, J.E., Chirinda, N., Hermansen, J.E., 2014. Carbon footprints of crops from organic and conventional arable crop rotations – using a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 64, 609–618. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.009
- Kristensen, T., Sørengaard, K., Eriksen, J., Mogensen, L., 2015. Carbon footprint of cheese produced on milk from Holstein and Jersey cows fed hay differing in herb content. *J. Clean. Prod.* 101, 229–237. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.087
- Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30, 981–990. doi:10.1016/j.envint.2004.03.005
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333, 616–620.
- Lovett, D., Lovell, S., Stack, L., Callan, J., Finlay, M., Connolly, J., O'Mara, F.P., 2003. Effect of forage/concentrate ratio and dietary coconut oil level on methane output and performance of finishing beef heifers. *Livest. Prod. Sci.* 84, 135–146. doi:10.1016/j.livprodsci.2003.09.010
- Lovett, D., Lovell, S., Stack, L., Callan, J., Finlay, M., Connolly, J., O'Mara, F. P., 2003. Effect of forage/concentrate ratio and dietary coconut oil level on methane output and performance of finishing beef heifers. *Livest. Prod. Sci.* 84, 135–146. doi:10.1016/j.livprodsci.2003.09.010
- Luo, T., Yue, Q., Yan, M., Cheng, K., Pan, G., 2015. Carbon footprint of China's livestock system – a case study of farm survey in Sichuan province, China. *J. Clean. Prod.* doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.077
- Mahdizadeh Khasraghi, M., Gholami Sefidkouhi, M.A., Valipour, M., 2015. Simulation of open- and closed-end border irrigation systems using SIRMOD. *Arch. Agron. Soil Sci.* 61, 929–941. doi:10.1080/03650340.2014.981163
- Marcotorchino, F., Michaud, P., 1982. Agrégation de similarités en classification automatique. *Revue de statistique appliquée*, tome 30, n°2, France, pp 21-24.

- Padgett, J.P., Steinemann, A.C., Clarke, J.H., Vandenbergh, M.P., 2008. A comparison of carbon calculators. *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 106–115. doi:10.1016/j.eiar.2007.08.001
- Pandey, D., Agrawal, M., 2014. Carbon Footprint Estimation in the Agriculture Sector, in: Muthu, S.S. (Ed.), *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, Volume 1. Springer Singapore, Singapore, pp. 25–47.
- Pandey, D., Agrawal, M., Pandey, J.S., 2011. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ. Monit. Assess.* 178, 135–160. doi:10.1007/s10661-010-1678-y
- Parry, M.L., 2007. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Pathak, H., Jain, N., Bhatia, A., Patel, J., Aggarwal, P.K., 2010. Carbon footprints of Indian food items. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 66–73.
- Pattey, E., Trzcinski, M.K., Desjardins, R.L., 2005a. Quantifying the Reduction of Greenhouse Gas Emissions as a Result of Composting Dairy and Beef Cattle Manure. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 72, 173–187. doi:10.1007/s10705-005-1268-5
- Pattey, E., Trzcinski, M.K., Desjardins, R.L., 2005b. Quantifying the Reduction of Greenhouse Gas Emissions as a Result of Composting Dairy and Beef Cattle Manure. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 72, 173–187. doi:10.1007/s10705-005-1268-5
- Payraudeau, S., van der Werf, H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107, 1–19. doi:10.1016/j.agee.2004.12.012
- Peters, G.P., 2010. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 245–250. doi:10.1016/j.cosust.2010.05.004
- Plassmann, K., Norton, A., Attarzadeh, N., Jensen, M.P., Brenton, P., Edwards-Jones, G., 2010. Methodological complexities of product carbon footprinting: a sensitivity analysis of key variables in a developing country context. *Environ. Sci. Policy* 13, 393–404. doi:10.1016/j.envsci.2010.03.013
- Rabetokotany Rarivoson, N. V., 2013. *Matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical : apport de la spectrométrie proche infrarouge pour leur orientation d'usage agronomique et/ou énergétique*. Thèse de Doctorat en Sciences. Université De La Réunion, France et Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Randrianarisoa, J.-C., Minten, B., 2003. Accessibilité et utilisation des engrais chimiques à Madagascar, in: *Conférence Agriculture et Pauvreté, Projet ILO, FOFIFACORNELL*.
- Razafimbelo, T., 2005. *Stockage et protection du carbone dans un sol Ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches*. Thèse de Doctorat en Science du Sol. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. France.

- Rotz, C.A., Montes, F., Chianese, D.S., 2010. The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. *J. Dairy Sci.* 93, 1266–1282.
- Rugani, B., Vázquez-Rowe, I., Benedetto, G., Benetto, E., 2013. A comprehensive review of carbon footprint analysis as an extended environmental indicator in the wine sector. *J. Clean. Prod.* 54, 61–77. doi:10.1016/j.jclepro.2013.04.036
- Ruviaro, C.F., de Léis, C.M., Lampert, V. do N., Barcellos, J.O.J., Dewes, H., 2015. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *J. Clean. Prod.* 96, 435–443. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.037
- Schils, R.L.M., Olesen, J.E., del Prado, A., Soussana, J.F., 2007. A review of farm level modelling approaches for mitigating greenhouse gas emissions from ruminant livestock systems. *Livest. Sci.* 112, 240–251. doi:10.1016/j.livsci.2007.09.005
- Seebauer, M., 2014. Whole farm quantification of GHG emissions within smallholder farms in developing countries. *Environ. Res. Lett.* 9, 35006.
- Silici, L., 2014. Agroecology What it is and what it has to offer, IIED Issue Paper. IIED.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 789–813. doi:10.1098/rstb.2007.2184
- Stoop, W.A., Uphoff, N., Kassam, A., 2002. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. *Agric. Syst.* 71, 249–274.
- Tittonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agric. Syst.* 91, 71–101. doi:10.1016/j.agsy.2006.01.010
- Topp, K., Rees, B., 2008. Carbon footprint reporting for a Scottish livestock farm. Rural Policy Centre.
- Tubiello, F.N., Salvatore, M., Córdor Golec, R.D., Ferrara, A.F., Rossi, S., Biancalani, R., Federici, S., Jacobs, H., Flammini, A., 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. *Stat. Div. Food Agric. Organ. Rome.*
- Valipour, M., 2012a. Sprinkle and Trickle Irrigation System Design Using Tapered Pipes for Pressure Loss Adjusting. *J. Agric. Sci.* 4. doi:10.5539/jas.v4n12p125
- Valipour, M., 2012b. Comparison of Surface Irrigation Simulation Models: Full Hydrodynamic, Zero Inertia, Kinematic Wave. *J. Agric. Sci.* 4. doi:10.5539/jas.v4n12p68

- Valipour, M., Sefidkouhi, M.A.G., Eslamian, S., 2015. Surface irrigation simulation models: a review. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.* 5, 51–70.
- Wang, Z.Y., Xu, Y.C., Li, Z., Guo, Y.X., Wassmann, R., Neue, H.U., Lantin, R.S., Buendia, L.V., Ding, Y.P., Wang, Z.Z., 2000. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 58, 55–63.
- Wiedmann, T., Minx, J., 2008. A definition of “carbon footprint.” *Ecol. Econ. Res. Trends* 1, 1–11.
- Yan, M., Cheng, K., Luo, T., Yan, Y., Pan, G., Rees, R.M., 2015. Carbon footprint of grain crop production in China – based on farm survey data. *J. Clean. Prod.* 104, 130–138. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.058
- Yan, X., Ohara, T., Akimoto, H., 2003. Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice fields in the East, Southeast and South Asian countries. *Global Change Biology*. 9, 237-254.
- Yannopoulos, S., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A., Angelakis, A., 2015. Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide. *Water* 7, 5031–5060. doi:10.3390/w7095031
- Yuttitham, M., Gheewala, S.H., Chidthaisong, A., 2011. Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand. *J. Clean. Prod.* 19, 2119–2127. doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.017
- <http://www.ecterra.org/en/projects/mahavotra>
- TropiC Farm Tool: <http://reseau-carbone-sol-afrique.org/en/news/tropic-farm-tool-innovative-tool-calculate-carbon-footprint-farms>.
- <http://sri.cals.cornell.edu/>

## **Partie 2 : STOCKS DE CARBONE DES SOLS**

La deuxième partie de la présente thèse est consacrée à l'étude des stocks de carbone des sols. Elle est subdivisée en quatre chapitres :

**Chapitre 1 :** Recherche méthodologique pour simplifier le processus de préparation d'échantillons de sol en vue de la prédiction de la teneur en carbone organique des sols par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)

**Chapitre 2:** Prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sols de la région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)

**Chapitre 3 :** Etude des stocks de carbone des sols et influence des pratiques agroécologiques

**Chapitre 4 :** Cartographie des stocks de carbone du sol

# **Chapitre 1 : Recherche méthodologique pour simplifier le processus de préparation d'échantillons de sol en vue de la prédiction de la teneur en carbone organique des sols par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)**

Ce chapitre a été rédigé en anglais en vue d'une prochaine soumission sous forme de short communication à une revue internationale.

Narindra H. Rakotovao<sup>a\*</sup>, Tantely M. Razafimbelo<sup>a</sup>, Alain Albrecht<sup>b</sup>

<sup>a\*</sup>University of Antananarivo, Laboratoire des Radio Isotopes, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>b</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, Ecologie fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agrosystèmes, 2 place Viala (Bt 12) F-34060 Montpellier cedex 2, France

# **Comparison of different sample preparation for soil organic carbon prediction with mid-infrared spectrometry (MIRS)**

## **Abstract**

This study aimed to assess the effect of soil sample preparation such as grinding (<0.2mm), sieving (2mm) and non-prepared on the soil spectra response for qualitative analysis and on SOC modeling for predicting the soil organic carbon (SOC) with mid-infrared spectrometry (MIRS). To study the impact of sample preparation, soil spectra were subjected to principal component analyses (PCA) and partial least square regression (PLSR) analysis. Results showed that qualitative analysis can be performed with the three types of sample preparation. Only the grinding soil samples (<2 mm) showed accuracy model to predict the SOC ( $R^2 = 0.92$  and RPD = 3.24).

## **1 Introduction**

Mid infrared spectrometry (MIRS) offers many advantages in terms of rapidity, effort and cost to predict soil organic carbon (SOC) compared to laboratory analysis (McBratney et al., 2006; Viscarra Rossel et al., 2006). In the mid-infrared, both quantitative and qualitative soil analysis can be performed (Nguyen et al., 1991). The long process of sample preparation at the laboratory from air drying, sieving and grinding could be simplified in order to save time and money. Therefore, this study aimed to assess the effect of the soil sample preparation such as grinding (<0.2mm), sieving (2mm) and non-prepared (i) on the soil spectra for qualitative analysis and (ii) on quantitative analysis for predicting the SOC.

## **2 Material and methods**

### **2.1 Soil samples**

The total 181 soil samples used in this study were collected from different parts of the Itasy region, Central Highlands of Madagascar. 94 soil samples were collected on Andosols whereas 87 on Ferralsols, the two main dominant soil types encountered in the region. Soil samples were selected in order to be representative of the region land use which was forestry, agroforestry, annual crops, and paddy rice field. Soil samples were collected by auger from topsoil to 30 cm depth (0-10cm, 10- 20 cm, 20 - 30 cm).

### **2.2 Sample preparation**

SOC prediction models of different ways of soil sample preparation were compared in this work. According to the process of sample preparation in laboratory, we considered three types of preparation. The first one consisted to air-dry samples directly after the sampling work during 2 or 3

weeks under greenhouse. The second one consisted to air-dry then to sieve samples at 2 mm. The last one consisted to air-dry, to sieve at 2 mm and finally to grind samples under 0.2 mm.

### **2.3 Soil organic carbon references analysis**

To perform models, SOC reference values were obtained from conventional analysis. The 181 air-dried, sieved (2 mm) and ground (<0.2 mm) samples were analyzed in laboratory using the conventional Walkley&Black (1934) method. This method aims to oxidize the amount of organic carbon contained in the soil with a specified volume of acidic dichromate solution. The excess of dichromate solution is then titrated with ferrous sulfate. The SOC is calculated using the difference between the total volume of dichromate added and the volume titrated after reaction.

### **2.4 Spectrum acquisition and pre-processing**

The overall 543 samples (181 soil samples  $\times$  3 preparations) were scanned in the mid-infrared using “The Agilent 4100 Exoscan FTIR”. Spectra from 4000 to 600  $\text{cm}^{-1}$  were collected in 64 scans and at a resolution of 8  $\text{cm}^{-1}$ .

Spectra pre-processing was performed using The Unscrambler X software version 10.3 from CAMO. Standard normal variate (SNV) transform was applied to all spectra in order to improve models and predictions.

### **2.5 Statistical analysis**

To study the impact of sample preparation, soil spectra were subjected to principal component analyses (PCA) and partial least square (PLS) analysis (Stumpe et al., 2011). Statistical analysis was performed with The Unscrambler X software version 10.3 from CAMO.

PCA was performed in order to analyze the effect of soil preparation on soil spectra and therefore to evaluate the difference and similarity between each dataset. The mean of spectra for each dataset was also calculated to identify the main peaks corresponding to soil mineral components.

### **2.6 Regression analysis**

Partial least square regression (PLSR) combined with spectrometry was initiated by Haaland and Thomas (1988) for the construction of prediction models. It consists in modeling the relationships between measured variables such as soil organic carbon and prediction variables such as infrared absorbance values. Model validation was performed with the same dataset using cross-validation. Model performance was assessed using the root mean squared error of cross-validation (RMSECV), the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the ratio of standard deviation of prediction (RPD).

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Reference carbon data

Reference SOC values were obtained from conventional analysis in laboratory. SOC ranged from  $3.1\text{g.kg}^{-1}$  to  $81.3\text{g.kg}^{-1}$  and averaged  $22.7\text{g.kg}^{-1}$ . Soil samples collected in the present study were collected from different part of the Itasy region in order to be representative of the main soil type and land use encountered in the region. That explains the huge variability of the SOC with a standard deviation equal to 16.1 (Tableau 8).

**Tableau 8 : Statistic descriptive of organic carbon reference values**

	Samples	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation
SOC ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	181	22.7	3.1	81.3	16.1

#### 3.2 Effect of sample preparation on soil spectra

The PCA scoreplot presented in Figure 44 showed the repartition and the variance of the overall soil samples with different soil preparations (ground  $<0.2$  mm; sieved 2 mm and non-prepared soil) (181 samples  $\times$  3 preparations). Results showed that ground soils samples were more homogenous than sieved and non-prepared soils. Sieved and no-prepared soils were more heterogeneous and therefore had important variance.

Craswell & Waring (1972) stated that grinding procedure destroyed increasingly soil aggregates and released organic and mineral compounds previously not accessible to MIRS. Spectra of ground soil samples represented a homogenous mixture of soil constituents (Stumpe et al., 2011). Grinding soil therefore increased the homogeneity of sample spectra and reduced the variance between different soil spectra (Stumpe et al., 2011).

The average soil spectra of each soil preparation (ground, sieved, non-prepared) was also analyzed in order to evaluate the possibility of performing qualitative analysis. The Figure 45 showed the average spectra of the different sample preparations and highlighted the peaks corresponding to the mineral components of the soils. We observed that the average spectra of each soil preparation were highly similar. So that sieving and grinding procedures did not significantly affect clay minerals, gibbsite and quartz responses. Even in other studies, quartz and organic component responses to MIRS were modified by sieving and grinding, the present result showed that sieving and grinding did not change clay mineralogy as Edwardset al. (1967) and Stumpe et al., 2011 stated.

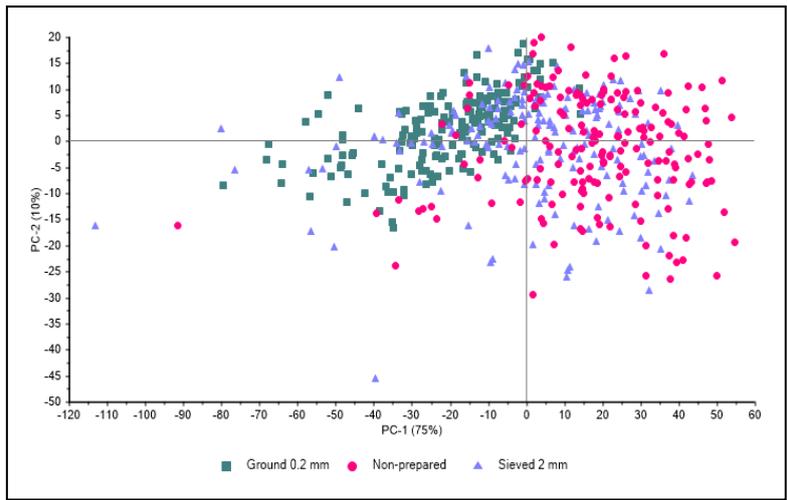


Figure 44 : Principal component analysis (PCA) of spectra of all soil samples ground (0.2mm), sieved (2 mm) and non-prepared - PC1-PC2-Scoreplot

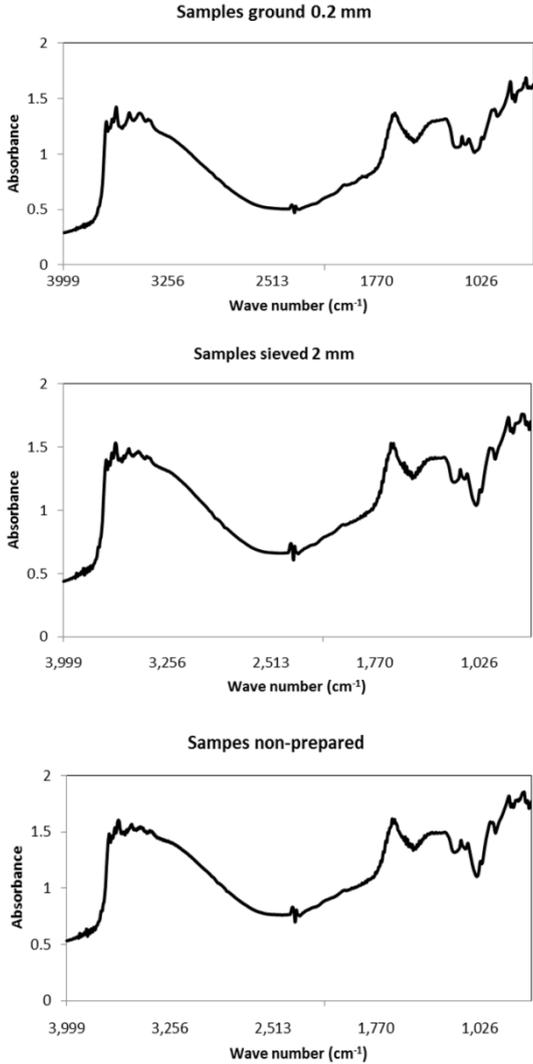
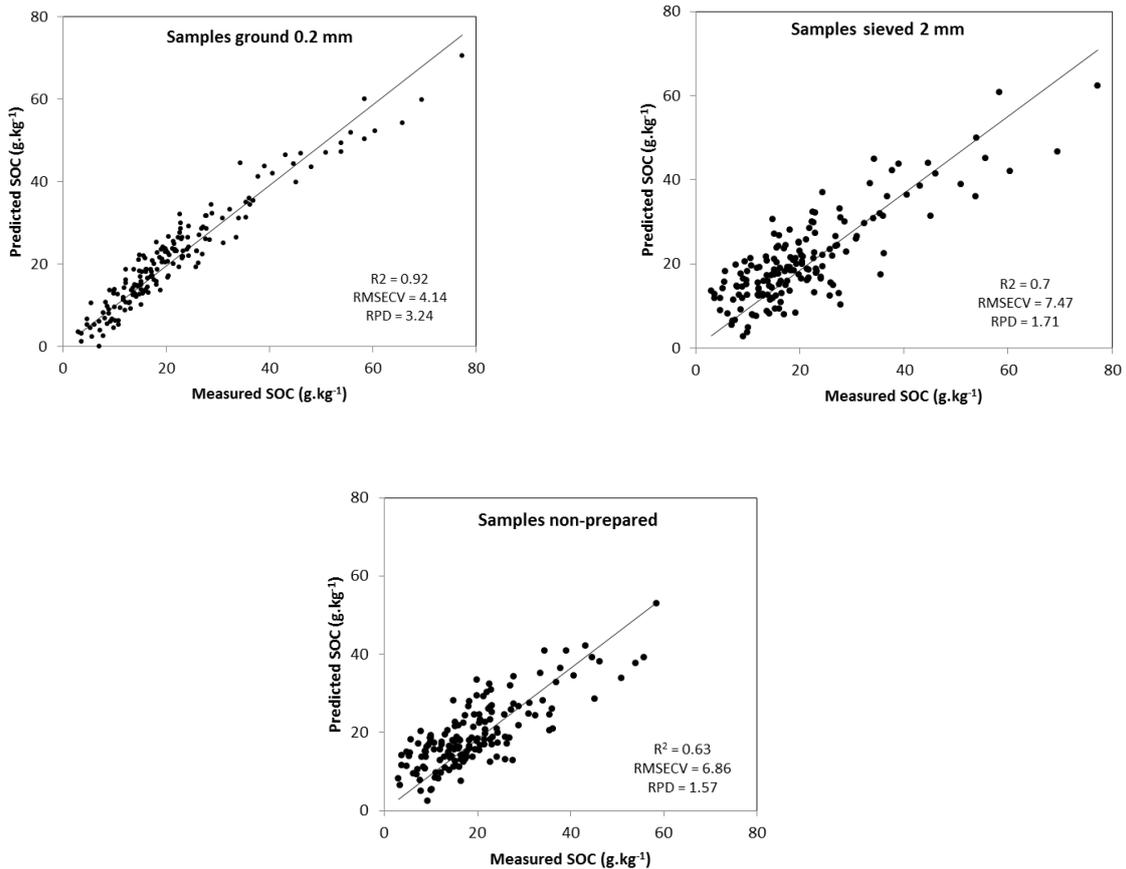


Figure 45: Average spectra of soil samples ground (0.2mm), sieved (2 mm) and non-prepared

**Tableau 9 : SOC models according to soil sample preparations**

Sample preparation	SOC unit	n	Outliers	SD	RMSECV	R <sup>2</sup>	RPD
Ground 0.2 mm	g.kg <sup>-1</sup>	181	5	13.40	4.14	0.92	3.24
Sieved 2 mm	g.kg <sup>-1</sup>	181	10	12.68	7.41	0.7	1.71
Non-prepared	g.kg <sup>-1</sup>	181	16	10.79	6.86	0.63	1.57



**Figure 46 : Comparisons between reference measurements and MIRS predictions of soil organic carbon over the cross-validation for different sample preparations: ground < 0.2 mm, sieved at 2 mm and non-prepared soils**

### 3.3 Model performances of different soil sample preparations

PLS regression using cross-validation was used to perform a model for each sample preparation (non-prepared, sieved at 2 mm, ground < 0.2 mm). We found that models were successful for ground soil samples (R<sup>2</sup> = 0.92 and RPD = 3.24) but not for sieved soil samples (R<sup>2</sup> = 0.7 and RPD = 1.71) and non-prepared soil samples (R<sup>2</sup> = 0.63 and RPD = 1.57) (Tableau 9, Figure 46). These results confirmed the advantage of grinding process which improved calibration accuracy in predicting the SOC content by reducing particle size (Reeves et al., 2002). Stumpe et al. (2011) also stated that

unground soil spectra may represent aggregate surfaces but not a homogenous mixture of soil constituents, and therefore, may cause less accurate calibration results.

#### **4 Conclusion**

Results from this study showed that soil qualitative analysis can be performed with all the three sample preparations. So that sample preparation did not automatically impact soil spectral information. However for quantitative analysis, grinding soil samples at 0.2 mm only provided accuracy SOC predicting model.

#### **References**

- Craswell, E.T. & Waring, S.A. 1972. Effect of grinding on the decomposition of soil organic matter; part 1, the mineralization of organic nitrogen in relation to soil type. *Soil Biology & Biochemistry*, 4, 427–433.
- Edwards, A.P. & Bremner, J.M. 1967. Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 18, 64–70.
- Haaland D. M and Thomas V. T., 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. I. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. *Analytical Chemistry* 60: 1193-1202.
- McBratney, A.B., Minasny, B., Viscarra Rossel, R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma* 136, 272–278. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.051.
- Nguyen T., Janik L.J., Raupach M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 49-67.
- Reeves J.B., 2012. Mid-infrared spectral interpretation of soils: Is it practical or accurate? *Geoderma* 189-190, 508-513.
- Stumpe, B., Weihermüller, L., Marschner, B., 2011. Sample preparation and selection for qualitative and quantitative analyses of soil organic carbon with mid-infrared reflectance spectroscopy. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 849–862. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01401.x.
- Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59-75.
- Walkley, A.; Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjaredd method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.

## **Chapitre 2 : Prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sols de la région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)**

Narindra H. Rakotovoao<sup>1\*</sup>, Tantely Razafimbelo<sup>1</sup>, Stephan Rakotosamimanana<sup>2</sup>, Alain Albrecht<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire des Radio Isotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar*

<sup>2</sup>*Agrisud International, Lot VL32M Androntra, 101 Antananarivo, Madagascar*

<sup>3</sup>*Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 34060 Montpellier, France.*

Cette partie est un article publié dans le Journal à comité de lecture malgache *Akon 'ny Ala*.

## **Résumé**

Les techniques d'analyse du sol s'orientent de plus en plus vers les techniques les moins coûteuses et plus rapides comme la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR). La présente étude a pour objectif d'élaborer des modèles statistiques de prédiction du carbone organique du sol (COS) et de la texture des sols agricoles de la région Itasy par la SMIR. L'échantillonnage a été réalisé sur 761 parcelles de culture réparties sur quatre communes de la région. Un spectromètre portable « The Agilent 4100 Exoscan FTIR » scannant dans le moyen infrarouge a été utilisé. La modélisation a été réalisée en utilisant la régression linéaire du moindre carré partiel ou PLSR. Les résultats ont montré une bonne performance des modèles de prédiction que ce soit pour le COS ou pour la texture. Le modèle de prédiction du COS sur sol volcanique a été le plus performant avec un  $R^2=0,95$  et un « residual of prediction deviation » ou RPD=4,31 en calibration tandis qu'un  $R^2=0,93$  et un RPD=3,79 en validation. Pour les sols ferrallitiques, on a obtenu un  $R^2=0,9$  et un RPD=3,15 en calibration tandis qu'un  $R^2=0,85$  et RPD=2,56 en validation. Les modèles sur la texture ont également montré de bonnes performances en calibration avec un  $R^2=0,98$  et des RPD tous supérieurs à 2.

**Mots clés :** analyse spectrale, prédiction, sols ferrallitiques, sols volcaniques

## **Abstract**

Soil analysis techniques are moving towards less expensive and faster techniques such as mid-infrared spectrometry (MIRS). This study aimed to develop statistical models for soil organic carbon (SOC) and texture quantification in agricultural land in Itasy region. Sampling work was carried out on 761 plots. A portable spectrometer "The Agilent 4100 Exoscan FTIR" scanning in the mid-infrared was used. Modeling was performed using partial least squares regression (PLSR). The results showed good performance of predictive models both for SOC and texture. The SOC model performed for Andosols showed the best performance with  $R^2=0.95$  and RPD=4.31 in calibration while  $R^2=0.93$  and the residual of prediction deviation or RPD=3.79 in validation. In ferralsols, the model showed  $R^2=0.9$  and RPD= 3.15 in calibration while  $R^2= 0.85$  and RPD=2.56 in validation. The models performed for texture showed also good performance in calibration with all  $R^2 = 0.98$  and all RPD higher than 2.

**Keywords:** andosols, carbon prediction, ferralsols, spectral analysis

## 1 Introduction

Les préoccupations sur le changement climatique et l'augmentation croissante de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont renforcé la prise de conscience sur la nécessité de multiplier les actions visant à atténuer ce phénomène. Les mesures d'atténuation visent à stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère soit par la réduction des émissions, soit par le stockage du carbone atmosphérique dans les puits de carbone comme le sol (GIEC, 2007). Au niveau planétaire, le sol contient environ 1500 Gt de carbone organique ; l'atmosphère contient environ la moitié de cette valeur sous forme de CO<sub>2</sub> (720 Gt) et il y a à peu près 600 Gt dans la végétation (Jenkinson et Adams, 1991). Ainsi, une légère variation du flux de carbone séquestré ou émis par le compartiment sol pourrait être significative à l'échelle globale d'où l'intérêt croissant porté sur les études axées sur la teneur, le stockage, la séquestration et la dynamique du carbone organique dans les sols.

Nombreuses sont les techniques de quantification et de caractérisation des propriétés physico-chimiques du sol. Parmi ces techniques figure la spectrométrie infrarouge qui est actuellement une technique assez répandue et pouvant être considérée comme une alternative à l'analyse conventionnelle des sols (McBratney *et al.*, 2006; Viscarra Rossel *et al.*, 2006). Etant parmi les méthodes alternatives dites moins coûteuses et non destructives, la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR) a suscité beaucoup d'intérêts en particulier pour la mesure du carbone du sol (Bellon-Maurel et McBratney, 2011 ; Brunet *et al.*, 2007) et la caractérisation de la fraction minérale du sol qui est généralement dominante dans le spectre du moyen infrarouge (Reeves, 2012).

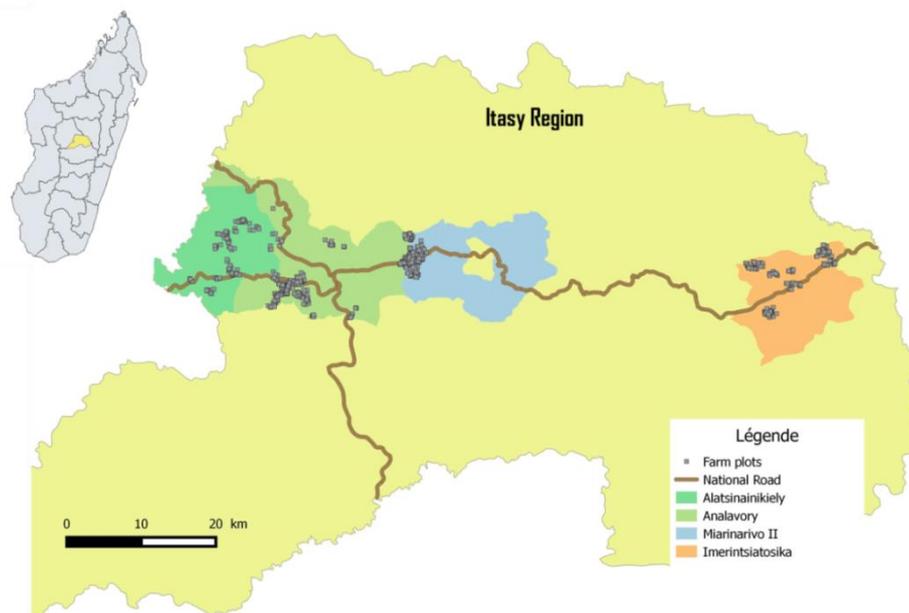
Cet article s'insère dans le cadre méthodologique d'une étude plus large sur l'évaluation de l'impact de l'adoption des pratiques agroécologiques sur l'empreinte carbone d'exploitations agricoles et la séquestration de carbone dans le sol de la région Itasy. Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de mettre en place une méthodologie de quantification du carbone organique (COS) et de la texture du sol par la SMIR, ce qui consiste à élaborer des modèles statistiques robustes de prédiction du carbone organique et de la texture du sol applicables sur l'ensemble de la région Itasy.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Zone d'étude et localisation des parcelles

Cette étude a été menée dans la région Itasy (46°54'22.66"E, 18°57'25.85"S), partie centrale des hautes terres de Madagascar. Sept cent soixante et un (761) parcelles de culture appartenant à 200 exploitations agricoles réparties sur quatre communes de la région Itasy ont fait l'objet de l'échantillonnage (Carte 4). Les parcelles ainsi échantillonnées ont représenté les diversités de situations rencontrées dans la région Itasy que ce soit en termes de types de sols (Ferrallitique, volcanique) de systèmes agricoles (riziculture, culture annuelle de « tanety », agroforesterie,

foresterie), de niveaux d'apport en matière organique et de localisation dans le paysage (sommet, versant, bas versant et bas fond).



**Carte 4: Localisation des parcelles d'échantillonnage dans les quatre communes d'étude de la Région Itasy**

## **2.2 Protocole d'échantillonnage de sol**

Le protocole d'échantillonnage suivi a consisté en des prélèvements d'échantillons de sols à la tarière sur 3 profondeurs : 0-10 cm, 10-20cm et 20-30cm. Trois répétitions par parcelles ont été effectuées pour former un échantillon composite par profondeur. Ainsi, sur l'ensemble de l'étude, 2283 échantillons de sol ont été collectés.

## **2.3 Préparation des échantillons et analyses spectrales**

Tous les échantillons collectés ont été séchés, tamisés à 2 mm pour enlever les éléments grossiers et inertes, et broyés à 0,2 mm. Ils ont été ensuite scannés dans le moyen infrarouge (MIR) entre 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec un spectromètre portatif « The Agilent 4100 Exoscan FTIR » de résolution 8  $\text{cm}^{-1}$  collectant 64 scans par minute. Les spectres obtenus ont été enregistrés dans la région spectrale de 654,753 à 3999,23  $\text{cm}^{-1}$ . Un spectre de référence a été enregistré au début de chaque série d'acquisition spectrale et une fois toutes les heures. La matrice de données spectrales a ainsi été constituée de 2283 échantillons et de 901 variables correspondant aux nombres d'ondes, les valeurs mesurées étant l'absorbance.

Avec le logiciel The Unscrambler 10.3 – CAMO, 944 échantillons, représentatifs (en termes d'allure et variabilité des spectres) de l'ensemble des 2283 échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du COS au laboratoire tandis que 62 échantillons pour l'analyse granulométrique. Ces échantillons

analysés ont servi à l'élaboration des modèles de prédiction. Les modèles de prédiction ont ensuite été appliqués au reste des échantillons non analysés au laboratoire.

#### **2.4 Analyse du carbone organique et de la texture en laboratoire**

Afin d'élaborer des modèles de prédiction du COS et de la texture du sol, une partie des échantillons ont été analysés au laboratoire par les méthodes d'analyse conventionnelle.

Pour le COS, la méthode Walkley et Black (1934) a été réalisée sur les 944 échantillons sélectionnés. La méthode Walkley et Black (1934) consiste à oxyder la matière organique sans chauffage externe par une solution sulfurique de bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en excès. L'excès de bichromate de potassium est ensuite dosé par une solution de fer ferreux, le sel de Mohr. Ce dosage a été effectué à l'aide du titrateur Crison qui est muni d'une électrode redox permettant de détecter la différence de potentiel au sein de la solution à doser permettant de déterminer la quantité de sel de Mohr ayant réagi avec le bichromate en excès. La quantité de sel de Mohr versée dans la solution à doser permet de calculer la quantité de carbone organique présente dans le sol.

L'analyse granulométrique a été réalisée sur 62 échantillons par la méthode de «sédimentation et décantation successive ». Il s'agit d'un traitement à froid et à chaud par l'eau oxygénée pour la destruction de la matière organique. Puis, après tamisage, 5 fractions différentes ont été obtenues : argile (0-2  $\mu m$ ), limon fin (2-20  $\mu m$ ), limon grossier (20-50  $\mu m$ ), sable fin (50-200  $\mu m$ ) et sable grossier (200-2000  $\mu m$ ).

#### **2.5 Prétraitements des données spectrales**

Des prétraitements pour éliminer les effets des facteurs externes au sol durant les traitements de données spectrales ainsi que les bruits causés par la vibration des molécules d'eau ont été appliqués aux spectres bruts. Pour la prédiction du COS, le prétraitement SNV (standard normal variate) a été utilisé tandis que pour la prédiction de la texture, la première dérivation a été appliquée aux spectres.

#### **2.6 Elaboration des modèles de prédiction**

Un modèle par type de sol a été élaboré pour la prédiction du COS. Le premier modèle sur sols volcaniques a été établi sur les 353 échantillons dont 265 ont constitué le lot de calibration et 88 le lot de validation. Pour les sols ferrallitiques, le modèle a été réalisé sur 591 échantillons dont 445 ont constitué le lot de calibration et 146 le lot de validation.

La prédiction de la texture a été réalisée uniquement sur les sols ferrallitiques du fait que les sols volcaniques sont constitués par des éléments amorphes comme les allophanes et non de minéraux cristallisés (argile, quartz,...). Pour la prédiction du COS, les échantillons (944) ont été subdivisés en lot de calibration (75%) et de validation (25%) ; pour les modèles de prédiction de la texture, une

validation croisée a été appliquée au regard du faible nombre d'échantillons analysés au laboratoire (62 échantillons).

La régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) a ensuite été utilisée pour modéliser les relations entre les absorbances du rayon infrarouge par les constituants du sol et les teneurs en carbone et textures du sol obtenues des analyses au laboratoire. En effet, la PLSR combinée à la spectrométrie a été initiée par Haaland et Thomas (1988) pour la construction des modèles de prédiction.

Le logiciel statistique de traitement de données spectrales The Unscrambler 10.3 – CAMO a été utilisé tout au long de cette étude.

## 2.7 Paramètres de performance d'évaluation des modèles

Afin d'évaluer la performance et la robustesse des modèles, des critères d'évaluation ont été utilisés à savoir :

- Le coefficient de détermination  $R^2$  qui est la mesure de la qualité du modèle. En effet,  $R^2$  exprime le degré de relation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites. Cette valeur étant toujours entre 0 et 1, plus elle est proche de 1, plus la relation est dite parfaite.
- L'erreur standard de calibration (SEC) et de prédiction (SEP) expriment les erreurs de prédiction. Par conséquent, pour réduire l'incertitude sur la prédiction, SEP doit être réduite.
- Le RPD qui est le rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée dans le lot de calibration ou de validation et SEC ou SEP. Une valeur élevée du RPD indique un meilleur modèle (Chang *et al.*, 2001 ; Cozzolino et Moron, 2006).

## 3 Résultats

### 3.1 Caractéristiques des spectres moyens par type de sol

Deux principaux types de sols dominants à savoir les sols ferrallitiques et les sols volcaniques ont été identifiés dans la région Itasy et notamment des quatre communes d'étude. Les spectres moyens par type de sol sont présentés dans la Figure 47.

Les sols ferrallitiques sont caractérisés par l'argile kaolinitique de type 1:1 et de formule  $[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$  qui est exprimée par les bandes proches de 3694, 3655 et 3622  $\text{cm}^{-1}$  (Nguyen *et al.*, 1991). En effet, la région entre 3800 à 3600  $\text{cm}^{-1}$  peut être attribuée à la vibration d'élongation des groupes O-H des éléments minéraux du sol (Viscarra Rossel et Lark, 2009). La gibbsite de formule chimique  $\text{Al}(\text{OH})_3$  présente des pics caractéristiques dans les zones proches de 3530, 3525 et 3450  $\text{cm}^{-1}$  (Nguyen *et al.*, 1991). Le quartz affiche des bandes caractéristiques dans la région de 2000 à 1600  $\text{cm}^{-1}$  (Viscarra Rossel et Lark, 2009). Les pics correspondant au quartz se situent autour de 2000, 1870 et 1790  $\text{cm}^{-1}$  issus de la vibration d'élongation des groupes Si-O-H (Nguyen *et al.*, 1991) (Figure 47, A).

Les sols volcaniques se différencient par la présence de l'halloysite, argile de type 1 :1 de formule chimique  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  qui est observée à  $3626\text{ cm}^{-1}$ . La bande située à  $3700\text{ cm}^{-1}$  correspond également à la présence de ce minéral (Hidalgo *et al.*, 2010). Les sols volcaniques se différencient des ferrallitiques par la présence d'une bande unique à  $1640\text{ cm}^{-1}$  correspondant à de la silice amorphe. Cette bande est également caractéristique de la vibration due soit à l'élongation les groupes O-H soit à la vibration des groupes H-O-H des molécules d'eau adsorbées (Barois, 1998 ; Hidalgo *et al.*, 2010). On assiste à la présence de silicate d'aluminium amorphe hydraté correspondant aux allophanes (Figure 47, B).

### 3.2 Statistique descriptive des résultats d'analyse au laboratoire

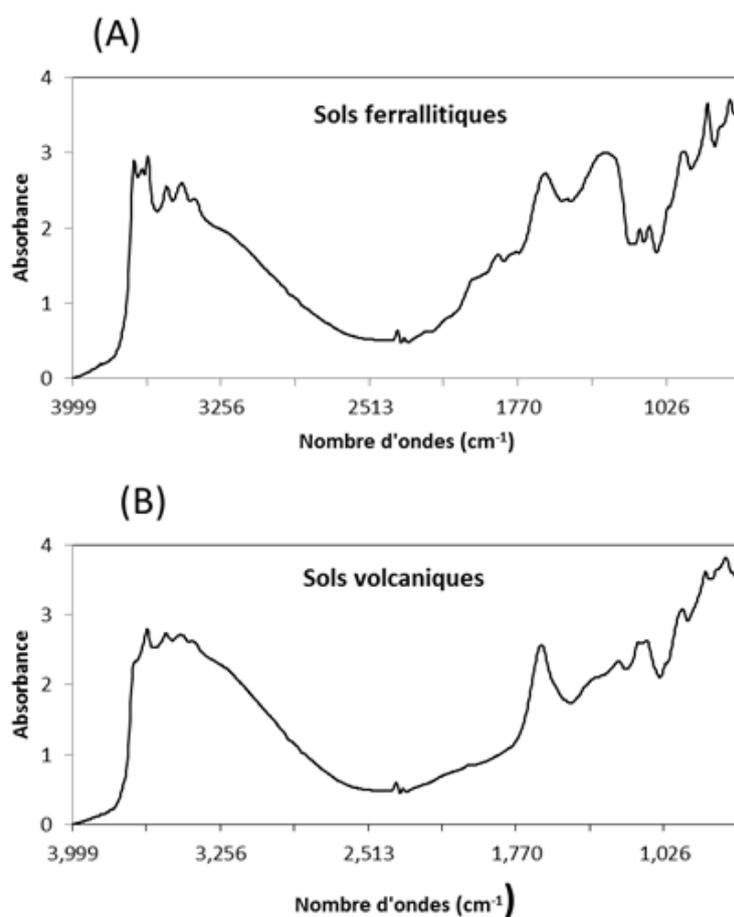
Les analyses au laboratoire des échantillons de référence ont montré une valeur moyenne du COS de l'ordre de  $21\text{ gC.kg}^{-1}$  de sol. L'écart-type moyen étant de  $12\text{ gC.kg}^{-1}$  de sol, exprime une variabilité importante des teneurs en carbone des sols considérés dans la présente étude. Les résultats de l'analyse texturale ont montré un sol généralement riche en argile (Tableau 10 : Résultat statistique des analyses du COS et de la texture des sols).

**Tableau 10 : Résultat statistique des analyses du COS et de la texture des sols**

Analyses	Unité	n	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
COS	$\text{g.kg}^{-1}$	944	20,86	18,97	0,55	78,98	12,77
Argile	$\text{g.100g}^{-1}$	62	35,82	35,40	10,50	62,38	11,51
Argile + limon fin	$\text{g.100g}^{-1}$	62	55,06	57,73	20,12	79,05	13,24
Limon	$\text{g.100g}^{-1}$	62	24,83	23,64	10,07	44,24	7,56
Sable	$\text{g.100g}^{-1}$	62	26,41	25,50	5,83	55,10	10,29

### 3.3 Calibration et validation des modèles de prédiction

Sur les sols volcaniques, les résultats de la prédiction du COS ont montré qu'avec le prétraitement SNV, le modèle obtenu présente de bonnes performances avec un  $R_c^2$  de 0,95 et un  $RPD_c$  de 4,31 en calibration et un  $R_v^2$  de 0,93 et  $RPD_v$  de 3,79 en validation. Pour les sols ferrallitiques, les résultats de



**Figure 47: Allure des spectres moyens des différents types de sol dominants de la zone d'étude**

la prédiction du COS ont montré une performance acceptable avec un  $R_c^2$  de 0,9 et un  $RPD_c$  de 3,15 en calibration tandis qu'un  $R_v^2$  de 0,85 et  $RPD_v$  de 2,56 en validation (Tableau 11 et Figure 48).

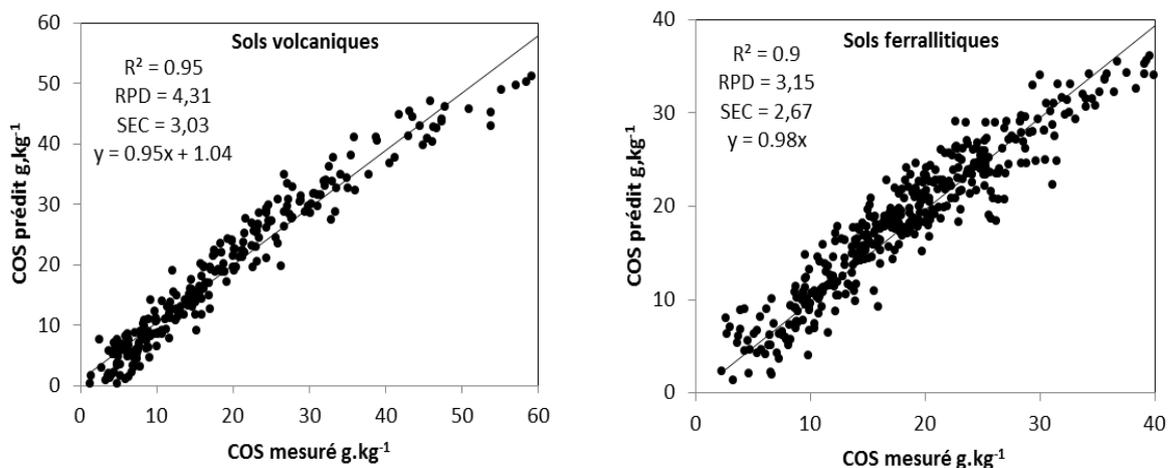
Une bonne performance des modèles de prédiction de la texture des sols a également été observée avec un  $R^2$  de calibration égale à 0,98 pour les argiles, argile+ limons fins et sable. Les  $RPD$  étant tous supérieurs à 2 indiquent également la bonne performance de ces modèles (Tableau 12).

#### 4 Discussions

L'analyse qualitative des spectres moyens de chaque cluster s'est fortement appuyée sur des connaissances de base en pédologie et des résultats d'études antérieures, internationales et nationales, réalisées sur le domaine (Nguyen *et al.*, 1991 ; Madari *et al.*, 2006 ; Hidalgo *et al.*, 2010 ; Razafimahatratra, 2011) . La connaissance de la dominance pédologique de la région Itasy par deux types de formation, ferrallitique et volcanique, a constitué une base essentielle à l'analyse qualitative des spectres. De plus, une étude récemment publiée traitant des sols malgaches et la spectroscopie

dans le moyen infrarouge (Razafimahatratra, 2011) a beaucoup aidé dans le traitement et l'analyse de données spectrales. Comme l'analyse qualitative des spectres s'est focalisée sur la minéralogie des sols, la spectrométrie dans le moyen infrarouge a été l'outil approprié pour l'identification des pics correspondant aux composants minéraux des sols.

Les résultats ont montré en général une bonne prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture du sol par la SMIR. Les valeurs élevées des RPD ont particulièrement indiqué une bonne performance des modèles élaborés. Chang *et al.* (2001) ont indiqué qu'un RPD > 2 indique une bonne performance. Cozzolino et Moron (2006) ont même suggéré un RPD au moins égale à 3 pour une bonne performance des modèles.



**Figure 48: COS mesuré vs prédit en calibration des modèles par type de sol**

Par ailleurs, nous avons pu constater que la prédiction du carbone organique du sol est nettement meilleure pour les sols volcaniques que pour les sols ferrallitiques ce qui peut s'expliquer en premier par la nature différente de la matière organique dans les deux types de sol (Figure 49). En effet, les sols volcaniques sont caractérisés par la présence de minéraux amorphes ou paracrystallins comme les allophanes ayant un effet protecteur vis-à-vis de la matière organique rendant la matière organique très stable (Chevallier *et al.*, 2007). Ce fait est supposé avoir un effet significatif sur la facilité de prédiction du carbone organique du sol dans les sols volcaniques par rapport aux sols ferrallitiques. Les sols ferrallitiques sont généralement des sols à texture argileuse. Il est reconnu que la teneur en argile d'un sol a une corrélation positive avec son stock de carbone (Feller *et al.*, 1991). Ainsi, puisque les sols ferrallitiques sont dominés par des argiles kaolinitiques à faible activité, il est supposé que la matière organique présente dans ces sols est moins stable par rapport à celle rencontrée dans les sols volcaniques.

**Tableau 11 : Performance des modèles de prédiction du COS en calibration et validation**

Variables	Unités	Prétraitement	Type de sols	Calibration					Validation			
				N <sub>c</sub>	out <sub>c</sub>	SEC	R <sup>2</sup> <sub>c</sub>	RPD <sub>c</sub>	N <sub>v</sub>	SEP	R <sup>2</sup> <sub>p</sub>	RPD <sub>v</sub>
SOC	g.kg <sup>-1</sup>	SNV	Sols volcaniques	265	13	3,03	0,95	4,31	88	3,08	0,93	3,79
SOC	g.kg <sup>-1</sup>	SNV	Sols ferrallitiques	445	44	2,67	0,90	3,15	146	3,65	0,85	2,56

N<sub>c</sub> : nombre d'échantillons en set de calibration, out<sub>c</sub> : outliers de calibration, SEC : erreur standard de calibration, R<sup>2</sup><sub>c</sub> : coefficient de détermination en set de calibration, RPD<sub>c</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC, N<sub>v</sub> : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction, R<sup>2</sup><sub>p</sub> : coefficient de détermination en set de validation, RPD<sub>v</sub> : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP

**Tableau 12 : Performance des modèles de prédiction de la texture du sol en cross-validation**

Variables	Unités	Prétraitement	Type de sol	Cross-validation			
				N	SEC	R <sup>2</sup>	RPD
Argile	g.100g <sup>-1</sup>	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	1,67	0,98	6,89
Argile+LF	g.100g <sup>-1</sup>	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	1,43	0,99	9,26
Sable	g.100g <sup>-1</sup>	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	2,13	0,98	6,70

N : nombre d'échantillons en cross-validation, SEC : erreur standard en cross-validation, R<sup>2</sup> : coefficient de détermination, RPD : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC

Les résultats obtenus dans cette étude sont assez similaires aux résultats obtenus par Razafimahatratra (2011) pour la prédiction du carbone organique des sols de Madagascar ( $R^2 = 0,83$  et  $PD = 2,33$ ). En effet, les résultats d'étude publiés sur la prédiction du carbone organique du sol dans le moyen infrarouge et utilisant la régression PLS ont généralement affiché de bons résultats. D'Acqui *et al.*, (2010) ont obtenu un  $R^2 = 0,95$  et  $RPD = 4,4$  en régression PLS pour prédire le carbone organique des sols des îles de l'ouest de la Méditerranée. Cobo *et al.* (2010) ont obtenu d'excellents modèles avec un  $R^2$  variant de 0,96 à 0,98 et un  $RPD$  variant de 5 à 6,8 pour la prédiction du carbone organique du sol dans l'étude de la variabilité spatiale des sols au Zimbabwe.

## 5 Conclusion

La spectrométrie en moyen infrarouge constitue une alternative aux techniques d'analyse de sol conventionnelle. Une seule acquisition spectrale suffit pour caractériser plusieurs éléments constituant du sol. Dans le cadre de cette étude, la SMIR nous a permis de prédire la teneur en carbone organique des sols et la texture suivant différents types de sols sur un nombre considérable d'échantillons de sols prélevés dans la Région Itasy, ce qui a permis de réduire considérablement les coûts d'analyse. Les modèles élaborés dans le cadre de cette étude peuvent également être utilisés dans d'autres régions de Madagascar et contextes ayant les mêmes types de sols (ferrallitiques et volcaniques) que ceux considérés dans cette étude.

## Remerciements

La présente étude a été réalisée et financée dans le cadre du projet Mahavotra, « Agroécologie et foresterie paysanne en Itasy ». Nous adressons nos sincères remerciements à tous les partenaires du projet Mahavotra. Nous tenons également à remercier l'International Foundation for Science (IFS) qui a octroyé un appui financier à ce travail.

## Références bibliographiques

- Barois T., Dubroeuq D., Rojas P., Lavelle P., 1998. Andosol-forming process linked with soil fauna under the perennial grass *Mulhembergia macroura*. *Geoderma* 86, 241-260.
- Bellon-Maurel V., McBratney A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1398-1410.
- Brunet D., Barthès B.G., Chotte J.L., Feller C., 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma* 139, 106-117.

- Chang C.W., Laird D.A., Mausbach M.J., Hurburgh Jr C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 480-490.
- Chevallier T., Toucet-Louri J., Blanchart E., Woignier T., 2007. Minéralisation de la matière organique d'une gamme d'Andosol de la Martinique. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers.
- Cobo J.G., Dercon G., Yekeye T., Chapungu L., Kadzere C., Murwira A., Delve R., Cadisch G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma* 158(3-4), 398-411.
- Cozzolino D., Moron A., 2006. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil & Tillage Research* 85, 78–85.
- D'Acqui L. P., Pucci A., Janik L.J., 2010. Soil properties prediction of western Mediterranean islands with similar climatic environments by means of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *European Journal of Soil Science* 61, 865–876.
- Feller C., Fritsch E., Poss R., Valentin C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). Cahier ORSTOM, Série Pédologique XXVI(1), 25-36.
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- Haaland D. M., Thomas V. T., 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. *Analytical Chemistry* 60, 1193-1202.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., Vera-Graziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49, 348–358.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., VeraGraziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49, 348-358.

- Jenkinson D. S., Adams D. E., Wild A., 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351, 304 – 306.
- Madari B.E., Reeves J.B., Machado P.L.O.A., Guimarães C.M., Torres E., McCarty G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma* 136(1-2): 245-259.
- McBratney A.B., Minasny B., Viscarra Rossel R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma* 136(1-2), 272-278.
- Nguyen T., Janik L.J., Raupach M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research* 29, 49-67.
- Razafimahatratra H., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Reeves J.B., 2012. Mid-infrared spectral interpretation of soils: Is it practical or accurate? *Geoderma* 189-190, 508-513.
- Viscarra Rossel R.A. et Lark R.M., 2009. Improved analysis and modelling of soil diffuse reflectance spectra using wavelets. *European Journal of Soil Science* 60, 453-464.
- Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., 2006. Visible near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59-75.
- Walkley A. et Black I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.

## **Chapitre 3: Etude des stocks de carbone des sols et influence des pratiques agroécologiques**

### **6 Introduction**

Le stock de carbone des sols est un indicateur de la qualité et de la durabilité des agroécosystèmes. Le carbone organique est présent dans le sol sous la forme de matière organique. La matière organique étant apportée aux sols de différentes manières. Il est estimé que les matières organiques, qui recouvrent une gamme extrêmement étendue de composés plus ou moins stables ou labiles, contiennent en moyenne environ 58 % de carbone (Arrouays, 2008). En effet, la séquestration de ce carbone dans le sol améliore la fertilité du sol, restaure les sols dégradés, augmente la production de biomasse, purifie les eaux de surface et souterraines, et réduit le taux d'enrichissement du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui est bénéfique pour atténuer le phénomène du réchauffement climatique (R. Lal, 2004).

Dans le contexte actuel pour limiter la hausse de la température mondiale en dessous des 2°C, nombreuses sont les mesures et initiatives prises à différentes échelles pour réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement climatique et augmenter la séquestration de carbone dans les puits de carbone comme le sol. La séquestration de carbone dans le sol figure parmi les mesures d'atténuation au changement climatique proposée par le GIEC. Cette mesure requiert cependant de nombreux efforts que ce soit en termes d'amélioration des pratiques agricoles traditionnelles vers des pratiques séquestrantes qu'en termes de réduction de la minéralisation rapide de la matière organique ajoutée au sol.

Ainsi, dans le cadre de cette optique visant à favoriser le stockage de carbone dans le sol et compte tenu de la nécessité de formuler des recommandations relatives à la gestion durable des sols, l'étude des déterminants édaphiques (texture, type de sol) et agronomiques (mode de gestion et pratiques agricoles) du stockage de carbone dans le sol s'avère indispensable.

Dans les régions tropicales comme Madagascar, nombreuses sont les éléments entrant en jeu dans le processus du stockage de carbone dans le sol. La diversité et la nature du sol elle-même ainsi que l'effet du climat influent déjà significativement sur la dynamique du carbone dans le sol. S'ajoute à cela l'action humaine qui tient également un rôle considérable dans le maintien de la fertilité et de la qualité des sols. En région tropicale, différentes pratiques ont été identifiées comme séquestrante telle que l'agroforesterie, l'amélioration de la fertilité des sols par l'apport de biomasse et de la matière organique et l'adoption des techniques de culture alternatives comme les systèmes d'agriculture de conservation (Razafimbelo, 2005; Hutchinson et al., 2007).

Ainsi, identifier et hiérarchiser le rôle des déterminants du stock de carbone du sol est essentiel afin de pouvoir formuler les recommandations relatives à la gestion durable des sols et à la séquestration de carbone, ce qui fait l'objet de cette étude.

Les objectifs spécifiques de ce chapitre se résument aux différents points suivants :

- (i) Quantifier le stock de carbone du sol des parcelles de culture étudiées ;
- (ii) Etudier l'effet des déterminants du stockage de carbone du sol ;
- (iii) Evaluer l'effet des pratiques agroécologiques sur le stock de carbone du sol sur les situations considérées.

## 7 Matériels et méthode

### 7.1 Zones d'étude et échantillonnage

La présente étude a été réalisée dans la région Itasy, Madagascar dans le cadre du projet Mahavotra, « agroécologie et foresterie paysanne en Itasy ». Les parcelles de culture appartenant à 200 exploitations agricoles représentatives de la zone d'action du projet ont fait l'objet d'échantillonnage. Quatre zones de la région Itasy où les activités du projet sont les plus concentrées ont été choisies pour cette étude. Il s'agit des zones où les pratiques agroécologiques sont les plus diffusées. Ces zones sont Imerintsiatosika, Miarinarivo II, Analavory et Alatsinainikely (Tableau 13).

**Tableau 13 : Caractéristiques des zones étudiées**

Zones	Localisation	Climat	Type de sol dominant	Argile + Limons fins (0-30 cm) (g.100g <sup>-1</sup> sol)
Imerintsiatosika	18°58'15.50"S 47°17'52.76"E	Climat tropical d'altitude	Sols ferrallitiques	58,90
Miarinarivo II	18°57'17.10"S 46°48'47.76"E	Climat tropical d'altitude	Sols ferrallitiques	51,93
Analavory	18°59'6.27"S 46°38'58.63"E	Climat tropical d'altitude de versant ouest	Sols volcaniques	-
Alatsinainikely	18°56'21.53"S 46°34'21.12"E	Climat tropical d'altitude de versant ouest	Sols ferrallitiques	58,70

### 7.2 Inventaire des parcelles de culture

Les travaux d'inventaire des parcelles de culture ont été réalisés en amont des campagnes de prélèvement de sol. Ces inventaires ont eu pour principaux objectifs d'identifier les parcelles de culture, et de localiser leur emplacement pour y faciliter l'accès une fois les campagnes de prélèvement de sol en cours. L'inventaire proprement dit a été effectué par le biais de travaux d'enquête auprès des exploitants agricoles et de visite de parcelle.

L'inventaire a fait état de 714 parcelles de culture pour les 200 exploitations agricoles étudiées. Cependant 697 parcelles ont été retenues pour la campagne de prélèvement du fait de l'éloignement et de la difficulté d'accès.

Les 697 parcelles sont réparties sur les deux grands groupes de sol dominant qui caractérisent la région Itasy à savoir les sols ferrallitiques et les sols volcaniques. Une sous-catégorisation des sols ferrallitiques en sols ferrallitiques kaolinitiques et sols ferrallitiques gibbsitiques ont été réalisée par le biais de l'analyse spectrale. Sur chaque zone et type de sol, les parcelles ont été réparties sur différentes positions topographiques (sommet, versant, bas versant et bas-fond) et sur différents mode d'usage et système de culture (riziculture, culture vivrière, agroforesterie et foresterie) (Tableau 14).

### **7.3 Prélèvement de sols**

Suite aux travaux d'inventaire au niveau des 200 exploitations agricoles, 697 parcelles de culture ont été identifiées et ont fait l'objet de prélèvement d'échantillon de sol. La campagne de prélèvement de sol a été réalisée du mois de mai au mois d'août 2014 en fin de saison culturale.

Sur chaque parcelle de culture, les prélèvements de sol ont été réalisés à la tarière sur trois points de la parcelle, c'est à dire suivant trois répétitions. Sur chaque point, les prélèvements ont été faits sur trois profondeurs de sol, 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm. Pour chaque parcelle, les sols prélevés sur un horizon identique ont été mélangés pour constituer un échantillon composite. Au milieu de la parcelle, un profil de densité apparente ( $D_a$ ) a été réalisé à l'aide d'un cylindre sur les trois profondeurs de sol, 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm. Le profil de la densité apparente a été fait sur un sol non perturbé (Figure 49).

### **7.4 Classification des types de sol suivant leur signature spectrale**

La méthode des k-means a été utilisée pour classifier les échantillons suivant la similarité de leurs spectres. En effet, c'est un algorithme qui permet de partitionner les échantillons en K groupes homogènes dans lesquels chaque échantillon appartient au groupe avec la moyenne la plus proche. Ainsi, chaque cluster est constitué d'échantillons similaires. Cette méthode est basée sur des mesures spécifiques de distance entre les échantillons de telle sorte que les distances entre chaque échantillon et le centroïde du cluster auquel il appartient sont minimisées. Dans la présente étude, la distance euclidienne a été utilisée. Le nombre d'itération, correspondant au nombre de fois où l'opération est répétée pour obtenir un résultat de clustering optimal a été fixé à 50.

L'analyse qualitative des spectres se réfère à l'observation de la distribution et de l'intensité des différents pics composant chaque spectre afin de décrire les différents composants du sol (Viscarra Rossel *et al.* 2008). Dans la présente étude l'analyse qualitative des spectres a eu pour principal objectif d'identifier les différents composants minéraux du sol afin de déterminer à quel groupe ou

type de sol il appartient. En effet, dans le moyen infrarouge, les groupes de sols de Madagascar peuvent être discriminés par l'étude de leur minéralogie (Razafimahatratra, 2011, Rakotovao 2011).

### 7.5 Détermination de la teneur en carbone organique du sol

La détermination de la teneur en carbone organique du sol a été effectuée à partir de la méthode spectrométrique dans le moyen infrarouge combinée à des traitements chimiométriques multivariées. Les valeurs de référence utilisées pour la prédiction de la teneur en carbone du sol ont été obtenues à partir des analyses chimiques en laboratoire utilisant la méthode Walkley et Black (1934). Cette méthode consiste à oxyder la matière organique sans chauffage externe par une solution sulfurique de bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en excès qui est ensuite dosée par une solution de fer ferreux, le sel de Mohr (cf. Partie2, chapitre 2).

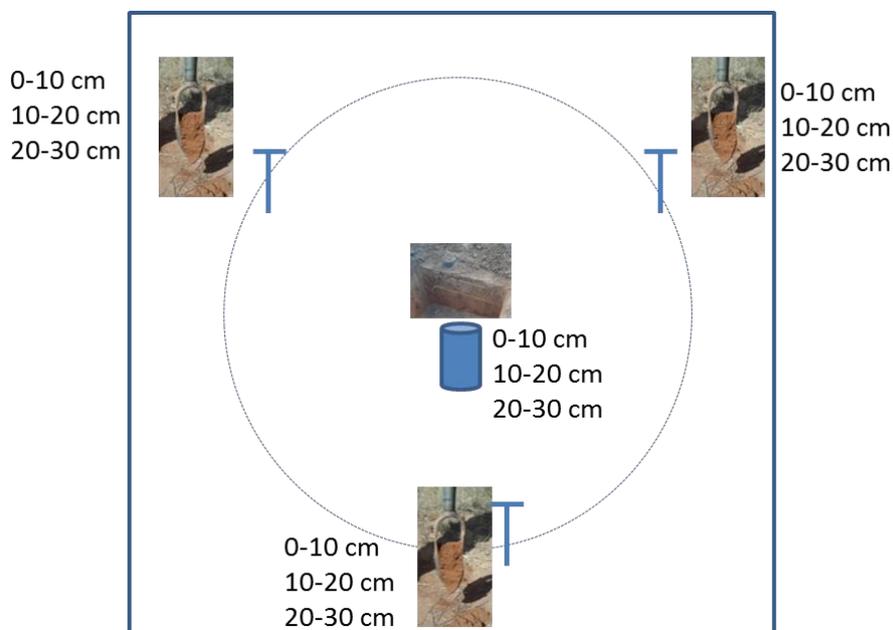


Figure 49 : Méthode de prélèvement de sol sur chaque parcelle de culture

Tableau 14: Distribution des parcelles échantillonnées suivant le type de sol, la position topographique et les systèmes de culture

Sols volcaniques à halloysite			Sols ferrallitiques gibbsitiques			Sols ferrallitiques kaolinitiques		
Position topographique	Système de culture	Nombre de parcelle	Position topographique	Système de culture	Nombre de parcelle	Position topographique	Système de culture	Nombre de parcelle
Sommet	Agroforesterie	1	Sommet	Agroforesterie	13	Sommet	Agroforesterie	5
				Culture vivrière	30		Culture vivrière	16
				Foresterie	4		Foresterie	1
Versant	Agroforesterie	3	Versant	Agroforesterie	41	Versant	Agroforesterie	12
	Culture vivrière	11		Culture vivrière	48		Culture vivrière	26
	Foresterie	3		Foresterie	31		Foresterie	12
	Riziculture	3		Riziculture	19		Riziculture	11
Bas versant	Agroforesterie	7	Bas versant	Agroforesterie	32	Bas versant	Agroforesterie	34
	Culture vivrière	13		Culture vivrière	74		Culture vivrière	30
				Foresterie	5		Foresterie	4
				Riziculture	8		Riziculture	13
Bas fond	Agroforesterie	1	Bas fond	Agroforesterie	1	Bas fond	Agroforesterie	4
	Riziculture	10		Culture vivrière	21		Culture vivrière	16
				Foresterie	1		Foresterie	2
				Riziculture	47		Riziculture	84
<b>Total</b>		<b>52</b>			<b>375</b>			<b>270</b>

## 7.6 Détermination de la densité apparente du sol

La détermination de la densité apparente du sol est utile pour le calcul du stock de carbone du le sol. La densité apparente est le rapport entre le poids total sec et le volume de l'échantillon prélevé au cylindre et exprimé en  $\text{g.cm}^{-3}$ .

Les échantillons prélevés au cylindre sur trois profondeurs de sol, 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm ont été pesés pour obtenir le poids frais. Une aliquote d'environ 20g pour chaque échantillon a été ensuite placée dans des sachets étuvables pour pesage du poids frais et mis à l'étuve 105°C pendant 48 heures. Une fois sorti de l'étuve, l'aliquote a été repesée pour obtenir le poids sec. Ces résultats ont été utilisés pour faire l'objet de calcul d'humidité permettant de déterminer la masse sèche de l'échantillon.

## 7.7 Détermination de la texture du sol

La détermination de la texture du sol a été réalisée en utilisant la méthode de sédimentation et de décantation successives. Il s'agit d'un traitement à froid et à chaud par l'eau oxygénée pour la destruction de la matière organique. Puis, après tamisage et sédimentation, 5 fractions différentes ont été obtenues : argile (0-2  $\mu\text{m}$ ), limon fin (2-20  $\mu\text{m}$ ), limon grossier (20-50  $\mu\text{m}$ ), sable fin (50-200  $\mu\text{m}$ ) et sable grossier (200-2000  $\mu\text{m}$ ).

## 7.8 Calcul du stock de carbone organique du sol

Le stock de carbone du sol pour les 30 premiers centimètres de sol est égal à la somme des stocks de carbone pour chaque profondeur de sol : 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm. La formule utilisée pour le calcul du stock de carbone pour chaque horizon étant la suivante :

$$\text{St} = \text{C} * \text{Da} * \text{e} * 0,1$$

**St** : le stock de carbone dans le sol ( $\text{MgC.ha}^{-1}$ )

**C** : teneur en carbone de la couche de sol tamisé à 2mm ( $\text{gC.kg}^{-1}$  de sol)

**Da** : la densité apparente du sol ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

**e** : épaisseur de couche (cm).

Les fragments grossiers retenus par le tamisage à 2 mm ont été pesés pour être exprimés en densité relative (%).

## 7.9 Analyses statistiques

Les données ont été comparées entre elles en utilisant les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

## 8 Résultats et discussions

### 8.1 Classification et identification des types de sol

La méthode du K-means clustering a partitionné les échantillons en 3 grands groupes et l'analyse qualitative des spectres moyens de chaque groupe de sol dans le moyen infrarouge a permis d'identifier cinq principaux éléments minéraux du sol à savoir : la kaolinite, la gibbsite, le quartz et l'halloysite et de la silice amorphe (Figure 50).

La présence de kaolinite, de gibbsite et de quartz dans le premier et le deuxième groupe de sol a permis d'attribuer aux échantillons de ces groupes le type de sol ferrallitique. Les sols ferrallitiques sont caractérisés par une accumulation relative en minéraux primaire dont principalement le quartz (si originellement présent dans la roche mère) et de minéraux secondaires dominées par les argiles kaolinite et des oxydes de type goethite, hématite et gibbsite. En effet, malgré la teneur importante en Fe contenu dans les sols ferrallitiques, les allures des spectres n'ont pas permis de distinguer la goethite  $\text{FeO}(\text{OH})$  et l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); ce fait est prévisible du fait que ces minéraux sont difficiles à identifier dans le moyen infrarouge (Madari et al., 2006) et en particulier à une fréquence supérieure à  $600 \text{ cm}^{-1}$  (Nguyen et al., 1991).

Ces sols ferrallitiques correspondant au premier et au deuxième groupe de sol diffèrent l'un de l'autre par l'abondance en gibbsite des échantillons :

- Les sols ferrallitiques kaolinitiques qui sont caractérisés par une faible teneur en gibbsite tandis qu'une dominance en argile kaolinite. Dans ces sols, la forte teneur en kaolinite est expliquée par la recombinaison de la silice qui s'accumule relativement dans la solution du sol avec l'aluminium (sous forme  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) conduisant à une formation d'argile de type kaolinite. Ce phénomène apparait surtout en milieu à mauvais drainage empêchant le départ rapide de la silice dissoute.
- Les sols ferrallitiques gibbsitiques qui sont caractérisés par la présence à la fois de l'argile kaolinite et de la gibbsite mais cette dernière étant en plus grande quantité. L'accumulation massive en gibbsite s'explique par la cristallisation d'hydroxydes insolubles l'aluminium en milieu très drainé.

Le troisième groupe de sol qui est caractérisé par la présence de l'halloysite et la silice amorphe a été identifié comme étant les sols volcaniques à halloysite de l'Itasy.

Le pic assez prononcé dans la bande proche de  $1639\text{-}1640 \text{ cm}^{-1}$  indique la présence en quantité assez importante de silice amorphe et de molécules d'eau adsorbées (Barois, 1998, Hidalgo et al., 2010). Ce fait est corroboré par des résultats d'étude énonçant que les andosols de l'Itasy contiennent une teneur

élevée en produits amorphes en particulier de la silice amorphe (Zebrowski, 1971). Ces sols contiennent également des produits allophaniques qui sont des produits dérivés de la cristallisation incomplète des alumino-silicates.

L'halloysite fait partie des phyllosilicates de néoformation du type 1 : 1 (Bonfils et Moinereau, 1971). Ce minéral a été considéré comme faisant partie de la catégorie des kaolinites mais avec une structure plus désordonnée (Chukhrov et Zvyagin, 1966 in Hidalgo et al., 2010), soit à une étape de cristallisation moins avancée.

## **8.2 Densité apparente et teneur en carbone organique du sol**

Une différence nette de la densité apparente entre les deux grands domaines pédologiques volcanique et ferrallitique a été observée avec des valeurs moyennes respectives de  $0,95 \pm 0,14 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $1,15 \pm 0,22 \text{ g.cm}^{-3}$ . Pour les deux domaines pédologiques, la densité apparente n'augmente que légèrement jusqu'à 30 cm de profondeur ce qui correspond à la partie labourée du sol. La faible densité apparente des sols volcaniques à halloysite est attribuée à la nature même de ce sol qui est en grande partie constitué de produits allophaniques. Les sols ferrallitiques présentent des densités apparentes plus élevées car ils sont constitués de matériaux plus lourds notamment des minéraux cristallisés à dominance d'argile et de sable. La différence entre la densité apparente des sols ferrallitiques kaolinitiques et des sols ferrallitiques gibbsitiques est très faible du fait de leur nature et composition minéralogique assez proche avec respectivement  $1,19 \pm 0,31 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $1,13 \pm 0,14 \text{ g.cm}^{-3}$  (Figure 51).

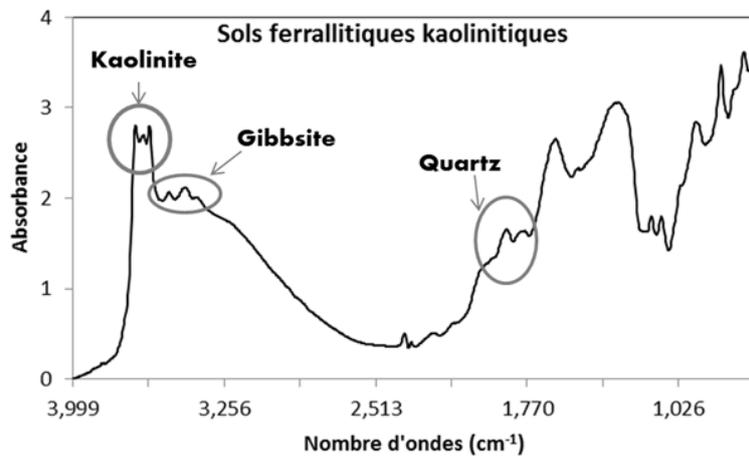
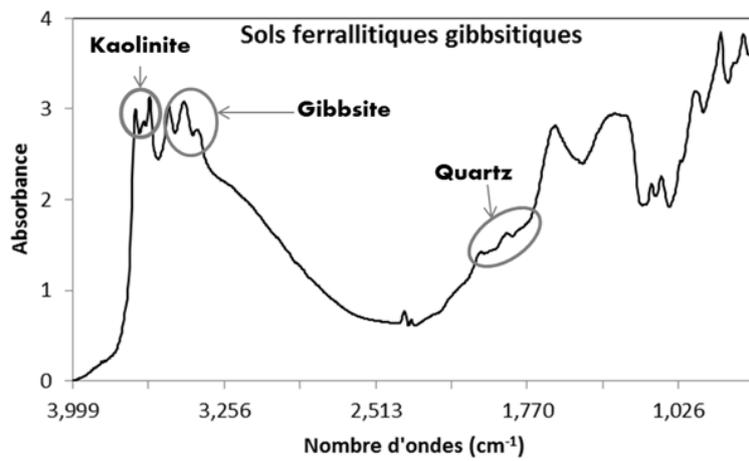
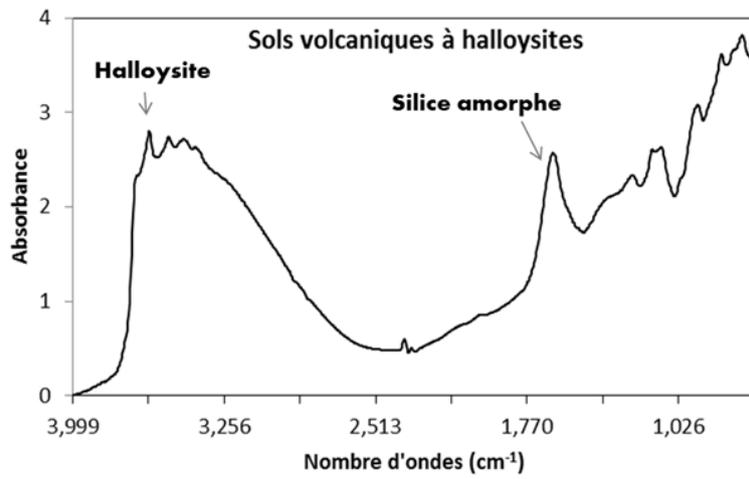
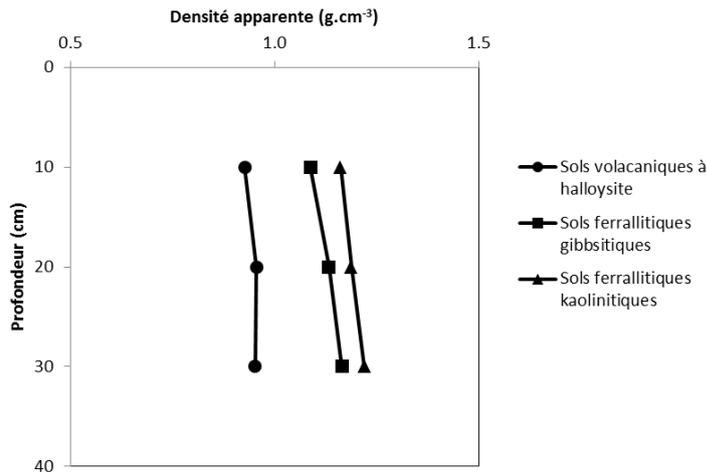


Figure 50: Spectre moyen de chaque type de sol



**Figure 51: Densité apparente du sol (g.cm-3) sur 30 cm de profondeur pour chaque type de sol**

Les teneurs en carbone organiques du sol sont différentes pour les deux grands domaines pédologiques volcaniques et ferrallitiques. La teneur moyenne en carbone organique des sols volcaniques à halloysite est de  $45,16 \pm 30,46 \text{ g.kg}^{-1}$  tandis qu'elle est à  $23,41 \pm 9,56 \text{ g.kg}^{-1}$  pour les sols ferrallitiques gibbsitiques et  $20 \pm 18,44 \text{ g.kg}^{-1}$  pour les sols ferrallitiques kaoliniques. Pour tous les types de sol, la teneur en carbone ne diminue que faiblement jusqu'à une profondeur de 30 cm (Figure 52). Il a été constaté une forte variabilité des teneurs en carbone des sols sur l'ensemble des situations rencontrées. Cela est attribué à la grande diversité des situations étudiées en milieu paysan. Cette diversité concerne à la fois les caractéristiques édaphiques (morpho-pédologie, minéralogie) des parcelles d'étude et le mode de gestion qui diffère d'un exploitant agricole à un autre.

### 8.3 Stocks de carbone suivant le type de sol

Les stocks de carbone des sols ont été comparés suivant les trois principaux types de sols rencontrés dans les zones d'étude. Il en ressort une différence significative ( $p=0,0001$ ) entre les valeurs des stocks de carbone des trois types de sol de 0 à 30 cm de profondeur (Figure 53).

Les sols volcaniques à halloysite ont la valeur moyenne des stocks de carbone du sol la plus élevée avec  $125 \text{ MgC.ha}^{-1}$  suivis des sols ferrallitiques gibbsitiques ( $78 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ) et des sols ferrallitiques kaoliniques ( $70 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ). Un écart plus net des stocks de carbone du sol est observé entre les sols volcaniques qui sont de nature riches en matière organique par rapport à l'ensemble des sols ferrallitiques (Torn et al. 1997). En effet, les sols à caractère

andique ont généralement des stocks de carbone plus élevés par rapport aux sols ferrallitiques à argiles cristallisées de type 1:1 ou 2:1 (Feller et Beare, 1997).

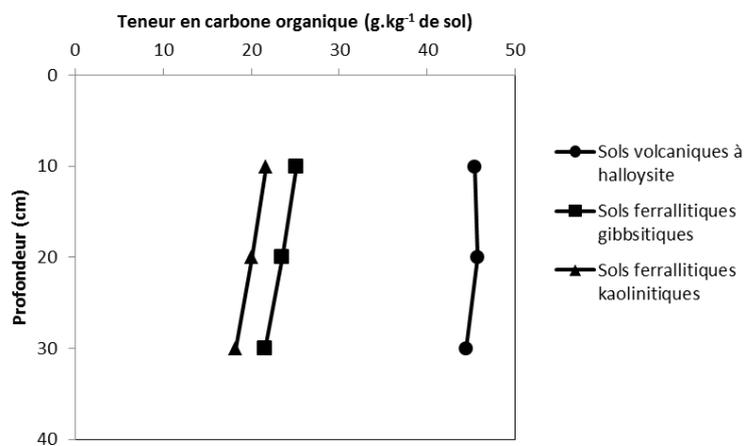


Figure 52 : Teneur en carbone organique du sol (g.kg-1) sur 30 cm de profondeur pour chaque type de sol

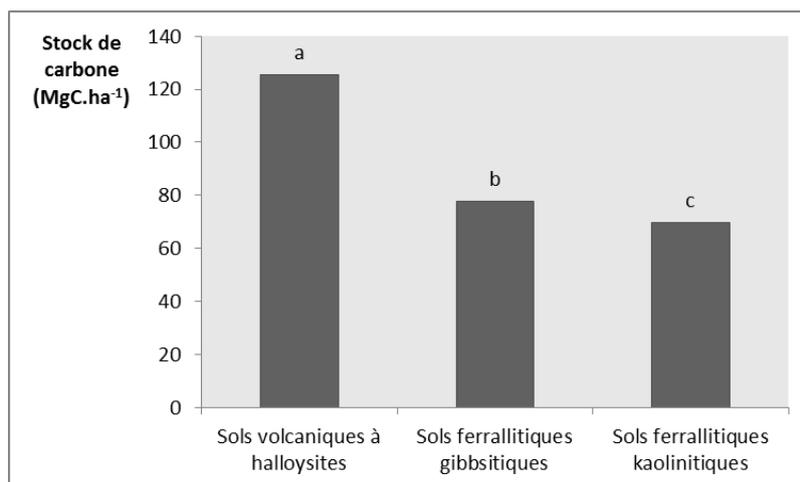


Figure 53 : Stock de carbone du sol sur 30 cm de profondeur suivant les types de sols dominants rencontrés dans l'Itasy

#### 8.4 Stock de carbone du sol en fonction de la texture du sol

Les résultats des analyses granulométriques ont montré la nature plus argileuse des sols ferrallitiques gibbsitiques par rapports aux sols ferrallitiques kaolinitiques. Les sols ferrallitiques kaolinitiques étant plus sableux par rapport aux sols ferrallitiques gibbsitiques (Tableau 15).

**Tableau 15 : Texture du sol sur 30 cm de profondeur**

<b>Texture du sol</b>	<b>Sols volcaniques</b>	<b>Sols ferrallitiques gibbsitiques</b>	<b>Sols ferrallitiques kaolinitiques</b>
Argile (g.100g <sup>-1</sup> )	-	41,59 ± 5,5	32,17 ± 7,4
Sable (g.100g <sup>-1</sup> )		31,58 ± 7,4	39,91 ± 10,9
Limon (g.100g <sup>-1</sup> )		26,82 ± 5,7	27,92 ± 6,5
Argile + limon fin (g.100g <sup>-1</sup> )		59,66 ± 6,7	51,20 ± 10,9

A partir des valeurs des stocks de carbone et de la teneur en argile + limon fin du sol sur 30 cm de profondeur, nous avons obtenu les équations suivantes (Figure 54):

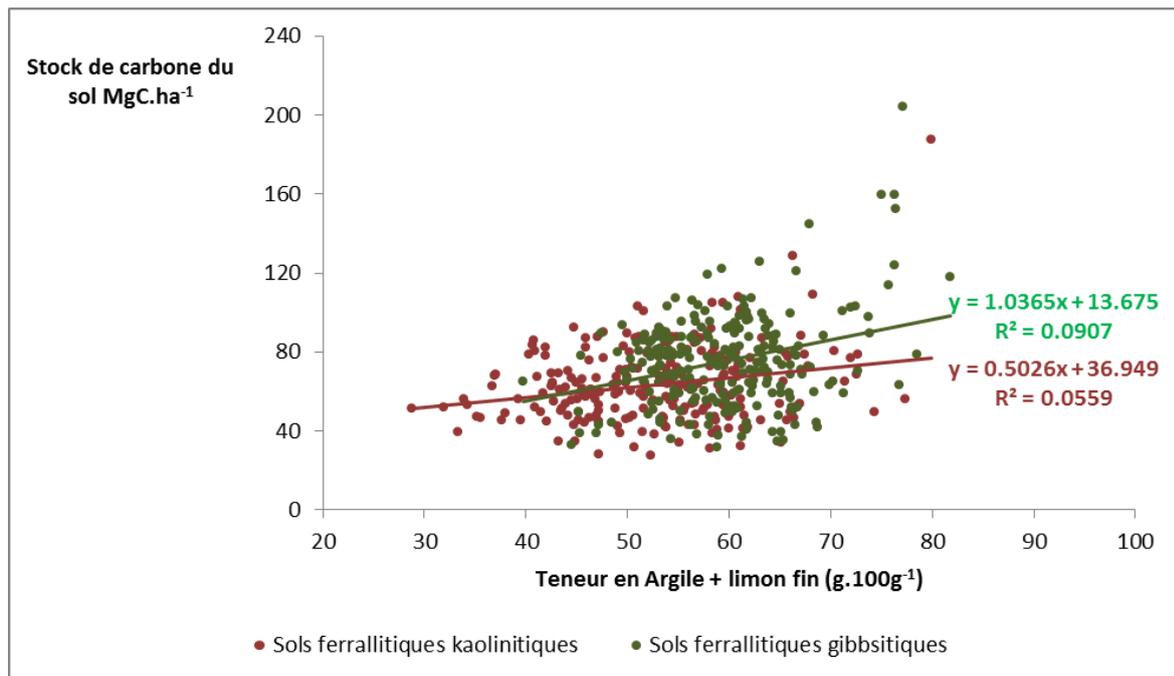
$$\text{Stock C (ferrallitiques gibbsitiques)} = 1.0365 (\text{Argile} + \text{limon fin}) + 13.675 \quad (r^2 = 0.09)$$

$$\text{Stock C (ferrallitiques kaolinitiques)} = 0,5026 (\text{Argile} + \text{limon fin}) + 36,949 \quad (r^2 = 0.06)$$

Ces résultats indiquent une faible corrélation positive entre le stock de carbone du sol et la teneur en (argile + limon). En effet les coefficients de déterminations ( $r^2$ ) obtenus de ces modèles sont assez faibles ce qui veut dire que d'autres déterminants, et non seulement la texture, influent également sur le stockage de carbone du sol.

Les sols ferrallitiques gibbsitiques qui sont plus argileux par rapport aux sols ferrallitiques gibbsitiques ont des stocks de carbone plus élevés. En effet, les sols contenant une proportion plus élevée en fines particules comme les argiles ont une plus grande capacité à stocker le carbone organique du sol (Kong et al., 2009).

La relation entre les stocks de carbone du sol et la teneur en argile + limon fin des sols ferrallitiques gibbsitiques qui est légèrement meilleure par rapport à celle des sols ferrallitiques kaolinitiques peut être attribuée à cette proportion plus importante en particules fines des sols ferrallitiques gibbsitiques.



**Figure 54 : Relation entre stock de carbone du sol et teneur en argile + limon fin sur 30 cm de profondeur pour les sols ferrallitiques kaolinitiques et sols ferrallitiques gibbsitiques**

### 8.5 Stocks de carbone du sol suivant la position topographique

Suivant la position des parcelles dans le paysage, et tous modes d'usage confondus il a été constaté que le stock de carbone du sol a tendance à augmenter lorsqu'on descend de plus en plus vers les bas-fonds fonds pour tous les types de sols considérés; les sommets des collines étant moins riches en matière organique par rapport aux étages inférieurs (Figure 55).

Sur sols volcaniques à halloysite, l'écart des stocks de carbone du sol entre les parcelles situées sur différentes positions topographique n'est pas significativement différent malgré la tendance nette observée ; tandis que sur sols ferrallitiques gibbsitiques et kaolinitiques, la différence des stocks de carbone du sol suivant la position topographique est significativement différente ( $p=0,002$ ).

Les parcelles de bas fond sur sols volcaniques à halloysite ont présenté les valeurs de stocks de carbone les plus élevées sur tout l'ensemble de la situation avec une moyenne de 165 MgC.ha<sup>-1</sup> tandis que les parcelles situées en sommet de colline des sols ferrallitiques kaolinitiques ont montré les valeurs les plus faibles avec une moyenne de 60 MgC.ha<sup>-1</sup>.

Pour les sols ferrallitiques, les bas-fonds présentent des stocks de carbone significativement élevés par rapport aux autres emplacements ou positions de la parcelle dans le paysage. Les sommets et versant ont des stocks très similaires.

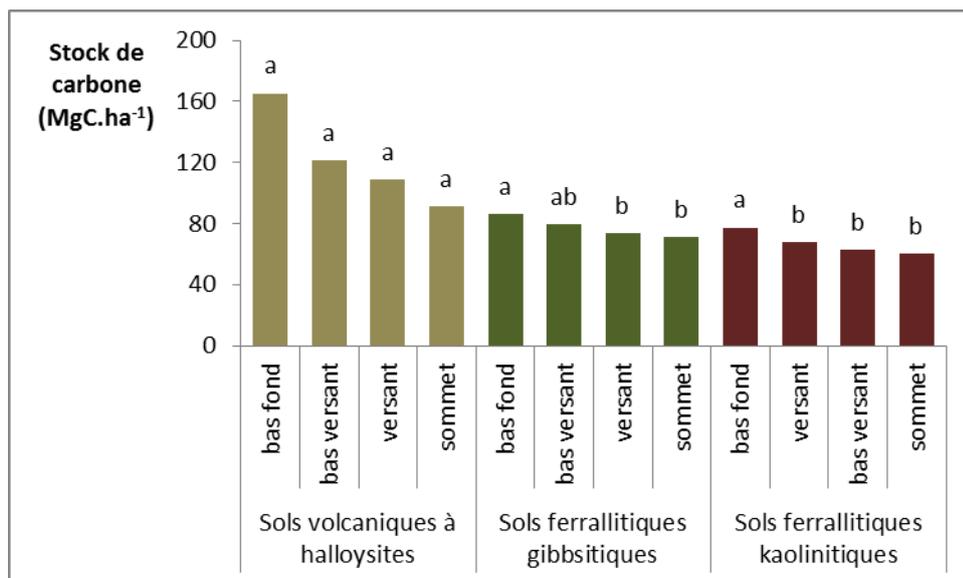


Figure 55: Stock de carbone du sol suivant la position topographique des parcelles

### 8.6 Stock de carbone du sol suivant les systèmes et pratiques agricoles

Les stocks de carbone du sol ont été comparés suivant les systèmes de culture pour chaque zone pédologique (Figure 56).

Sur sols volcaniques à halloysite, il a été constaté que les systèmes de culture et pratiques agricoles n'influencent pas significativement les stocks de carbone du sol ( $p > 0,05$ ).

Sur sols ferrallitiques gibbsitiques, Il a été observé que les systèmes en riziculture ont des stocks de carbone significativement plus élevés ( $p = 0,002$ ) par rapport aux autres systèmes de culture existants, avec une moyenne générale de  $85 \text{ MgC.ha}^{-1}$ . La foresterie affiche la valeur des stocks de carbone la plus faible avec une moyenne de  $68 \text{ MgC.ha}^{-1}$  ( $p = 0,002$ ). Il faut noter que dans le contexte de l'étude, le système « foresterie » est caractérisé par des jeunes plantations de ligneux à espacement et à nombre de pieds très variables selon l'exploitant. Ces systèmes en foresterie sont souvent installés sur mes terres marginales des versants ou sommet de collines ne bénéficiant d'aucune forme de fertilisation.

Pour les sols ferrallitiques kaolinitiques, une différence significative des stocks de carbone entre les systèmes de culture a été observée ( $p = 0,042$ ). La riziculture présente également un stock de carbone significativement supérieur sur l'ensemble des autres systèmes avec une moyenne de  $81 \text{ MgC.ha}^{-1}$ . Les parcelles en culture vivrière affichent les valeurs les plus faibles avec seulement  $62 \text{ MgC.ha}^{-1}$ .

L'effet des systèmes sur sols ferrallitiques gibbsitiques et kaolinitiques a été étudié pour chaque position topographique (sommets, versant, bas de versant et bas fond). Les résultats ont montré la même tendance des valeurs de stock à être plus élevées sur riziculture et plus faible sur foresterie et culture vivrière. En effet, sur les bas-fonds et les versants, les stocks de carbone sur riziculture sont significativement supérieures aux autres systèmes étudiés tandis que les systèmes en foresterie et culture vivrière affichent toujours les valeurs les plus faibles ( $p=0.02$ ). Les bas versants et les sommets n'ont pas permis d'observer des différences significatives des valeurs des stocks de carbone entre les systèmes de culture.

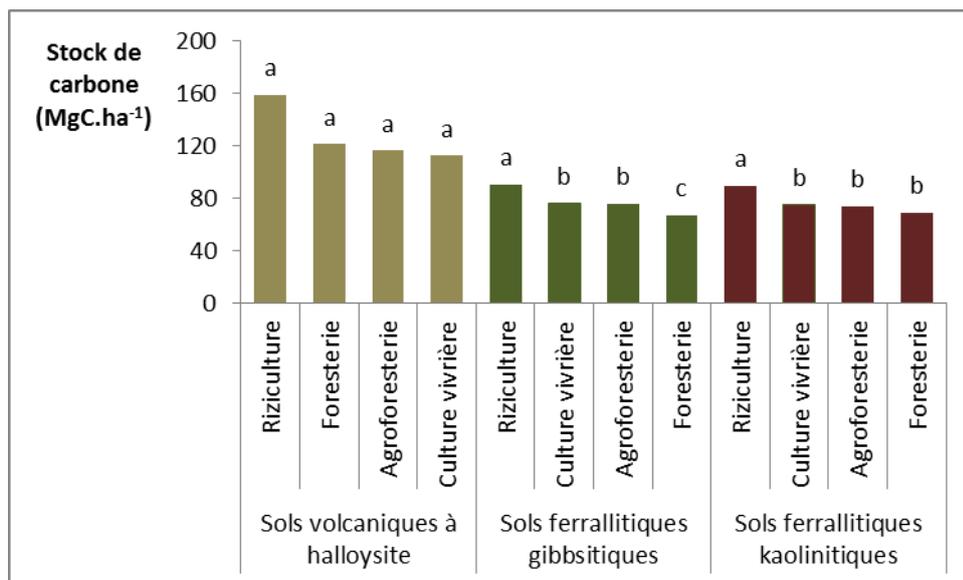


Figure 56 : Stock de carbone du sol suivant les systèmes de culture

### 8.7 Influence des déterminants du stock de carbone du sol

Afin de rechercher les déterminants du stock de carbone du sol dans le contexte de cette étude, une analyse des correspondances multiples (ACM) a été effectuée sur l'ensemble des données caractérisant chaque zone d'étude. L'étude de la contribution des différentes variables déterminants du stock de carbone du sol à la formation de chaque axe factoriel a permis de comprendre les relations qui lient chacune des variables aux valeurs des stocks de carbone (Figure 57).

L'axe factoriel F1 qui représente 61% de l'inertie de la variance oppose d'une part les parcelles situées sur les sommets des collines ayant des stocks de carbone faibles (inférieur à  $70 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ) et d'autres part celles avec des stocks de carbone élevés (supérieur à  $100 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ). En étudiant la relation des déterminants du stock de carbone du sol représentés par F1, nous pouvons dire que le type de sol est un fort déterminant du stock de carbone du sol. En effet, les sols volcaniques à halloysite représentent en général les sols avec des

valeurs considérables ( $> 100 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ) des stocks de carbone ; contrairement aux sols ferrallitiques kaolinitiques qui ont généralement des stocks de carbone moyens à faibles ( $<70 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ). Les sols ferrallitiques gibbsitiques représentent les sols avec des valeurs de stock de carbone moyen.

L'axe factoriel F1 montre également que l'apport en matière organique sur les parcelles (apport supérieur à 3 t/an) est positivement corrélé avec le stock de carbone du sol. Ainsi, plus la parcelle bénéficie d'un apport en matière organique, plus son stock de carbone augmente. En effet, la quantité d'apport en matière organique diffère suivant les systèmes de culture. Sur les bas-fonds correspondant généralement aux systèmes en riziculture et en agroforesterie fruitière l'apport moyen est de l'ordre de 9t/ha. Sur les versants et sommets des collines, là où généralement sont pratiqués les systèmes de culture vivrière l'apport moyen de matière organique est de l'ordre de 4t/ha.

L'axe factoriel F2 qui explique 60% de l'inertie de la variance oppose les parcelles en riziculture situées sur les bas-fonds et les parcelles en foresterie situées sur les versants ne bénéficiant d'aucun apport en matière organique.

En intégrant le déterminant texture dans l'analyse des correspondances multiples (ACM) notamment le teneur en argile et limons fins du sol, il en ressort que la texture est également un déterminant fort du stockage de carbone dans le sol. La teneur en argile + limon fin du sol est corrélée positivement avec le stock de carbone du sol. L'analyse des axes factoriels montre que les sols ferrallitiques kaolinitiques sont caractérisés par des teneurs plus faibles à la fois en argile + limon fin et en stocks de carbone par rapport aux sols ferrallitiques gibbsitiques qui sont plus argileux (Figure 58).

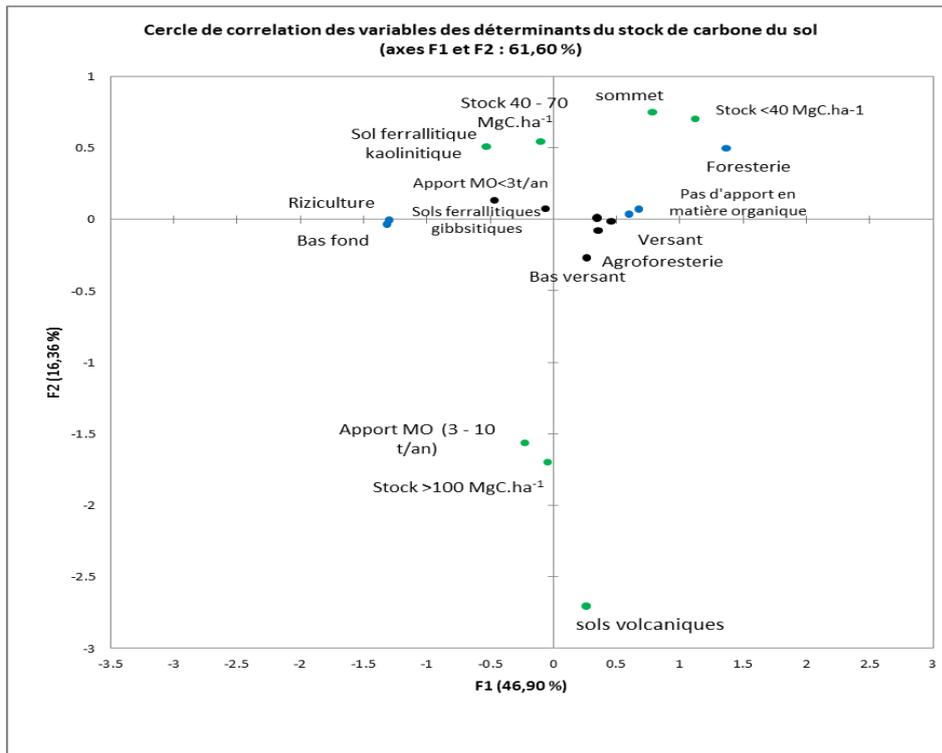


Figure 57: Analyse des correspondances multiples (ACM) des déterminants du stock de carbone du sol

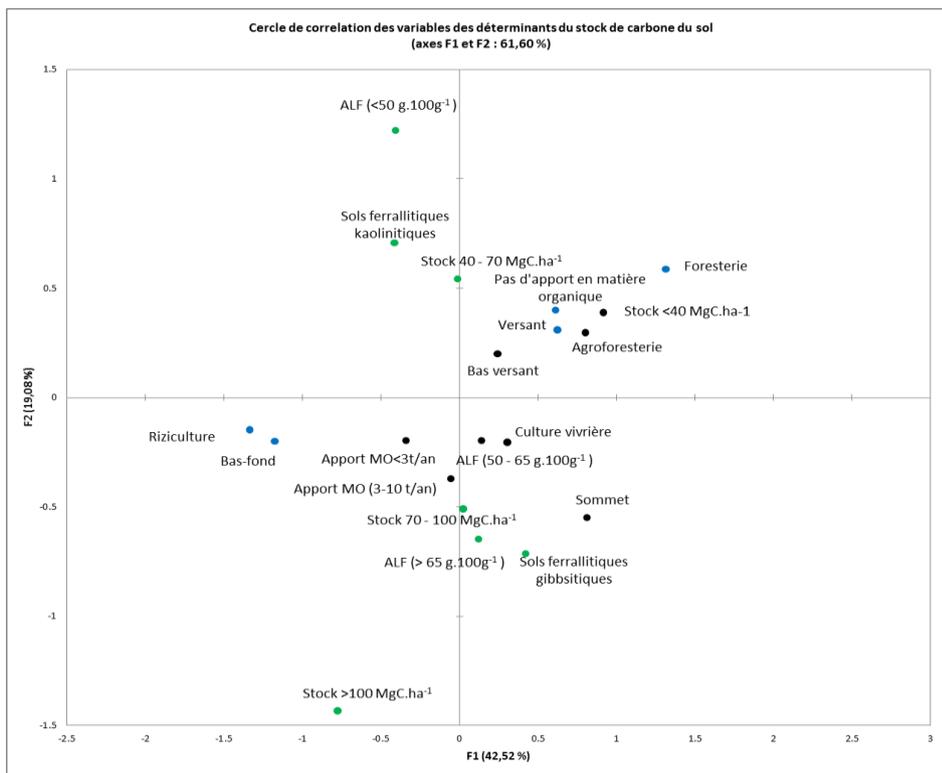


Figure 58: Analyse des correspondances multiples (ACM) des déterminants du stock de carbone du sol en intégrant la teneur en argile et limon fin

## 8.8 Effet des pratiques agroécologiques sur le stock de carbone du sol

Trois pratiques agroécologiques diffusées dans la région Itasy par le projet Mahavotra ont été étudiées particulièrement dans le cadre de la présente thèse à savoir l'agroforesterie et foresterie paysanne, l'utilisation de compost organique comme fertilisant et l'adoption du système de riziculture intensif (SRI).

### ➤ Conversion des parcelles de culture en agroforesterie

Les systèmes en agroforesterie ont été comparés au système de culture vivrière étant donné qu'il s'agit généralement d'intégrer l'arbre (espèce forestière ou espèce fruitière) dans des systèmes de cultures annuelles et vivrières déjà existantes. Les résultats ont montré que sur les sols volcaniques à halloysite, malgré l'absence de différence significative, les systèmes en agroforesterie présentent généralement des stocks de carbone plus élevés par rapport aux systèmes en culture vivrière. Sur les sols ferrallitiques kaolinitiques et gibbsitiques, les systèmes en agroforesterie et en culture vivrière sont similaires en termes de stocks de carbone du sol étant donné l'absence de différence significative entre les valeurs observées (Figure 59).

En effet les systèmes en agroforesterie ont été récemment installés donc sont caractérisés par des jeunes plants d'arbre d'âge moyen de 3 ans, ce qui est assez court pour permettre un développement racinaire et un apport de biomasse suffisamment important au niveau de la parcelle pour avoir un impact positif sur le stock de carbone du sol.

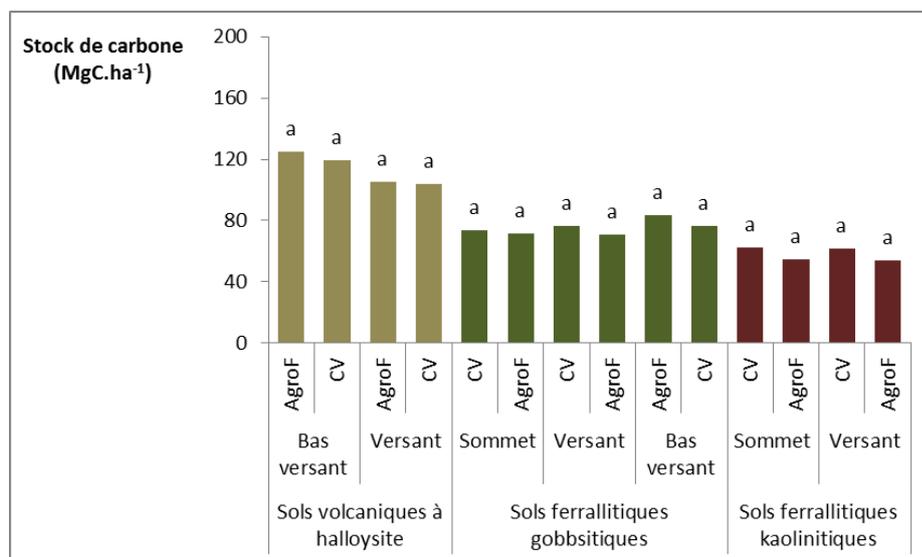
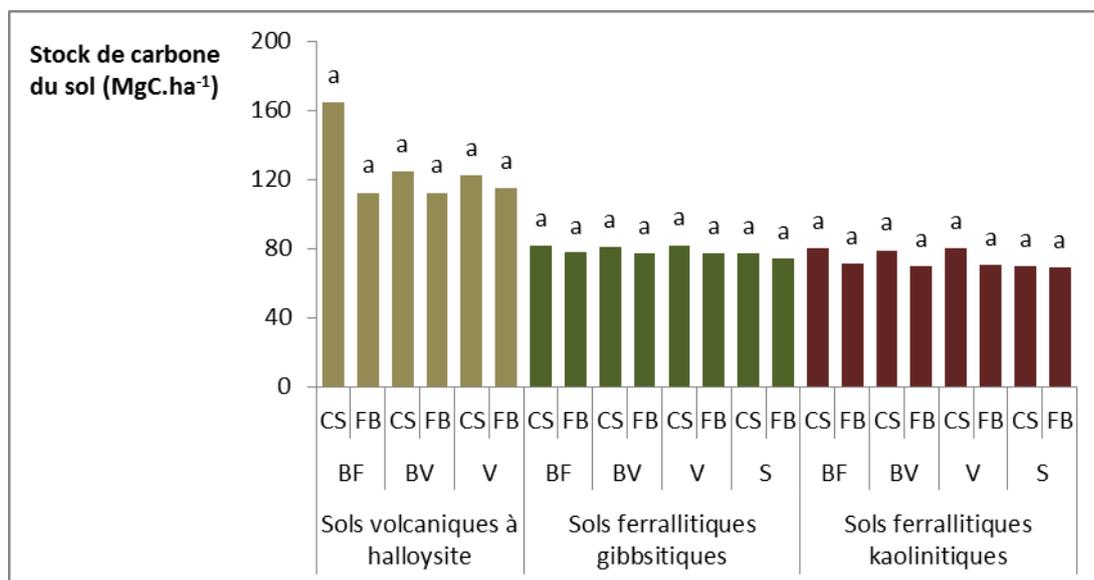


Figure 59: Comparaison entre système culture vivrière et agroforesterie (AgroF = agroforesterie, CV = culture vivrière)

➤ La fertilisation au compost

Pour chaque domaine pédologique, l'effet de l'utilisation du compost a été également comparé aux systèmes avec ajout de fumier de ferme. Il en ressort que malgré l'absence de différence significative entre les parcelles bénéficiant d'apport en compost solide et en fumier de ferme, une tendance nette est observée indiquant que les parcelles bénéficiant d'apport en compost ont des stocks de carbone plus élevés par rapport à celle recevant des apports en fumier de ferme (Figure 60). Comme pour le cas de l'agroforesterie, la fabrication et la fertilisation au compost est encore récente pour les situations étudiées, ce qui explique l'absence de la différence significative.



**Figure 60: Comparaison entre l'utilisation de compost et de fumier sur le stock de carbone du sol (CS = compost solide, FB = fumier de bovin ; BF = bas-fond ; BV = bas versant ; V = versant ; S= sommet)**

➤ L'adoption du SRI

Sur l'ensemble des parcelles inventoriées dans le cadre de la présente étude, il a été constaté que le nombre de rizières en SRI reste encore assez faible par rapport à l'échantillon considéré. En effet, seulement 25 parcelles de rizières en SRI ont été identifiées sur les 195 rizières inventoriées rendant les analyses statistiques et comparaison peu fiables. Il a été également observé que les systèmes en SRI adoptés par les exploitants sont très récents (<3 ans) et encore peu maîtrisés par les exploitants. Cela nous amène à plutôt proposer des recommandations par rapport à l'étude de l'effet de ces pratiques sur le stockage de carbone dans le sol. En effet, des comparaisons sur des systèmes plus âgés et respectant les notions de base du SRI seraient plus appropriées pour évaluer l'impact réel de ce système de riziculture sur le stock de carbone du sol.

## 9 Conclusion et perspectives

La présente étude nous a permis de quantifier le stock de carbone du sol de différentes parcelles en milieu paysan, appartenant aux 200 exploitations agricoles. La grande diversité des situations et contextes par zone d'étude (type de sol, position topographique, texture, systèmes de culture et mode de gestion) explique la grande variabilité des stocks de carbone du sol des parcelles de culture en milieu réel. L'étude des déterminants du stock de carbone révèle l'importance de l'effet du type de sol sur la variabilité du stock de carbone. Les systèmes de culture combinés au niveau d'apport en fertilisants organiques (par exemple rizière + 9t de fumier/ha, par rapport à la foresterie sans apport en fertilisant organique) constituent également un déterminant à l'origine de la variabilité du stock de carbone du sol.

Au vu de la très récente adoption des pratiques agroécologiques par les exploitants agricoles (en moyenne 3 ans), ainsi que du faible effectif des parcelles inventoriées en agroécologie (surtout pour le cas du SRI), par rapport aux parcelles en pratiques conventionnelles, et surtout tenant compte qu'il s'agit de dispositif en milieu paysan non contrôlé, les effets des pratiques agroécologiques comme l'agroforesterie et la fertilisation au compost sur le stock de carbone du sol restent actuellement des tendances positives permettant d'augmenter le stock de carbone du sol ; néanmoins non encore statistiquement significatifs. Une étude plus poussée et idéalement en milieu paysan contrôlé s'avère ainsi indispensable pour mieux cerner les effets réels de chacune de ces pratiques agroécologiques sur le stockage du carbone dans le sol.

## Bibliographie

- Arrouays, D., 2008. Changement climatique et évolution du stockage de carbone dans les sols-Enjeux et incertitudes. *Ol. Corps Gras Lipides* 15, 314–316.
- Barois T., Dubroeuq D., Rojas P., Lavelle P., 1998. Andosol-forming process linked with soil fauna under the perennial grass *Mulhembergia macroura*. *Geoderma* 86 : 241–260.
- Bonfils P. et Moinereau J., 1971. Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au sud du massif central. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IX, no 3.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., Vera-Graziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49: 348–358.
- Hutchinson, J.J., Campbell, C.A., Desjardins, R.L., 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 142, 288–302. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.030.

- Kong, X., Dao, T.H., Qin, J., Qin, H., Li, C., Zhang, F., 2009. Effects of soil texture and land use interactions on organic carbon in soils in North China cities' urban fringe. *Geoderma* 154, 86–92. doi:10.1016/j.geoderma.2009.09.016.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Madari, B.E., Reeves, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E., McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma* 136, 245–259. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.026.
- Nguyen T., Janik L.J., Raupach M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 49-67.
- Rakotovo H. N., 2013. Utilisation de la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR) pour la classification des principaux groupes de sol et établissement de modèles de prédiction du carbone organique du sol. Région Itasy – Madagascar. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
- Razafimahatratra H., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Razafimbelo T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol Ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches. Thèse de Doctorat en Science du Sol. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. France.
- Torn, M., Trumbore, S., Chadwick, O., Vitousek, P. and Hendricks, D. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*. 389: 170-173.
- Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B., 2008. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In 'Digital soil mapping with limited data'. *Developments in Soil Science series*. (Eds AE Hartemink, AB McBratney, L Mendonça-Santos) (Elsevier Science: Amsterdam).
- Zebrowski C., 1971. Propriété des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IX, no 1.

## **Chapitre 4 : Cartographie des stocks de carbone des sols**

### **1 Introduction**

Le carbone organique du sol joue un rôle essentiel à la fois d'un point de vue agronomique et d'un point de vue environnemental. Il maintient une structure favorable au développement des microorganismes rendant les éléments fertilisants contenus dans le sol disponible pour les plantes (Arrouays, 2008). Le sol a également un fort potentiel de séquestration de carbone et participe ainsi aux processus d'atténuation au changement climatique (R. Lal, 2004). Au niveau planétaire, le sol contient environ  $1,500 \cdot 10^9$  tonnes (1,500 Gt) de carbone organique ; l'atmosphère en contient environ la moitié de cette valeur sous forme de  $\text{CO}_2$  (720 Gt) et il y a à peu près 600 Gt dans la végétation (Batjes, 1996). Une modification du flux de carbone séquestré ou émis par le compartiment sol pourrait être alors significatif à l'échelle mondiale d'où l'intérêt porté sur les études de quantification et de suivi de l'évolution du stock de carbone dans les sols. La spatialisation via des outils, logiciels et modèles de plus en plus modernes et performants offre un moyen d'évaluation et de suivi de l'évolution des stocks de carbone du sol sur une zone déterminée et au cours du temps.

Ce chapitre propose d'essayer de produire une carte du stock de carbone du sol pour chacune des zones étudiées (Imerintsiatosika, Ampasamanantongotra, Analavory et Alatsinainikely) à partir des données obtenues tout au long de cette thèse

### **2 Méthodologie**

#### **2.1 Zone d'étude**

Cette étude a été réalisée dans la Région Itasy, notamment sur les zones où les activités du projet Mahavotra « agroécologie et foresterie paysanne en Itasy » sont les plus concentrées, à savoir Imerintsiatosika, Ampasamanantongotra, Analavory et Alatsinainikely. Ainsi, les travaux d'échantillonnage pour les prélèvements d'échantillons de sols ont été réalisés au niveau de ces quatre zones (Tableau 16). Deux principaux types de sol dominant en Région Itasy à savoir les sols ferrallitiques et les sols volcaniques. Les sols hydromorphes sont rencontrés sur toute la région dans les bas-fonds (Région Itasy, 2005).

**Tableau 16: Les quatre zones de la région Itasy où les travaux d'échantillonnage ont été effectués**

Zones	Localisation	Type de sol dominant	Climat
Imerintsiatosika	18°58'15.50"S 47°17'52.76"E	Sols ferrallitiques	Climat tropical d'altitude
Miarinarivo II	18°57'17.10"S 46°48'47.76"E	Sols ferrallitiques	Climat tropical d'altitude
Analavory	18°59'6.27"S 46°38'58.63"E	Sols volcaniques	Climat tropical d'altitude de versant ouest
Alatsinainikely	18°56'21.53"S 46°34'21.12"E	Sols ferrallitiques	Climat tropical d'altitude de versant ouest

## 2.2 Détermination du stock de carbone du sol

Les données stocks de carbone du sol utilisée dans le cadre de cette étude sont issues de campagnes de prélèvement d'échantillons de sol sur le terrain, d'analyse en laboratoire et de prédiction du carbone organique au spectromètre en moyen infra-rouge (cf. partie 2, chapitre 3).

Ainsi, 460 profils de sols situés sur les quatre zones à cartographier constituent la base de données des stocks de carbone utilisée pour la présente modélisation et spatialisation. Les profils ont été géo-localisés à l'aide de GPS. Les échantillons de sols ont été prélevés sur 3 horizons à savoir 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm de profondeur. Des modèles de prédiction ont été élaborés pour prédire la teneur en carbone organique du sol en utilisant la spectrométrie en moyen infrarouge (MIRS) (cf. partie 2, chapitre 2). Des mesures de densité apparente du sol ont été également réalisées au niveau de chaque profil de sol et ont été utilisées pour le calcul des stocks de carbone du sol.

Ainsi, les stocks de carbone du sol ont été calculés à partir de la formule suivante :

$$St = C * Da * e * 0,1$$

**St** : le stock de carbone dans le sol (MgC.ha-1)

**C** : teneur en carbone de la couche de sol tamisé à 2mm (gC.kg<sup>-1</sup> de sol)

**Da** : la densité apparente du sol (g.cm<sup>-3</sup>)

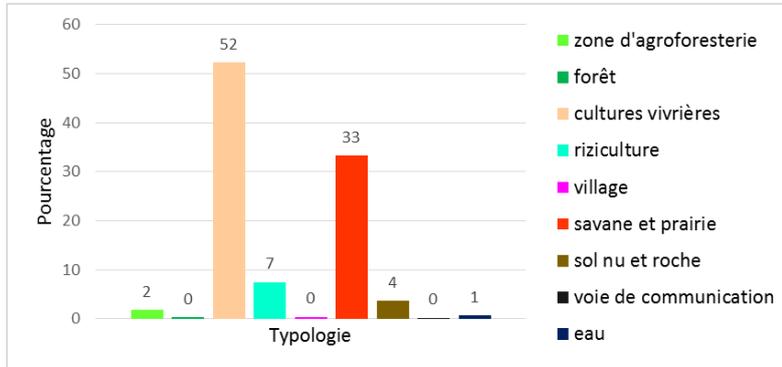
**e** : épaisseur de couche (cm).

## 2.3 Traitement des données spatiales

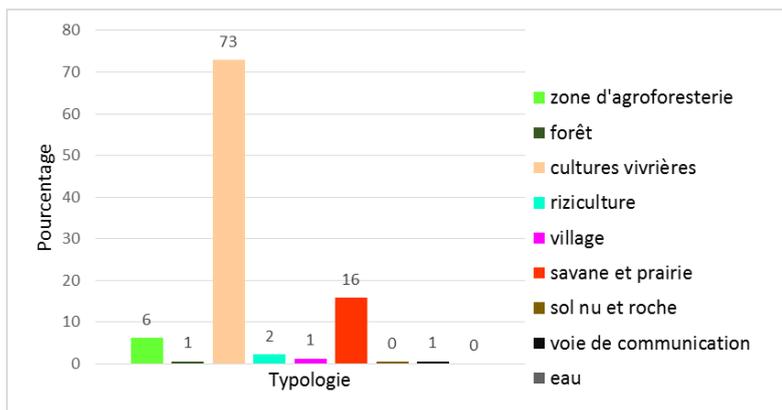
### i) Typologie de l'occupation du sol

L'élaboration de la carte de l'occupation du sol a fait l'objet d'un stage de mémoire d'un étudiant en Master II, option TELEDETECTION et S.I.G de l'Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (I.O.G.A.). Une étude de photo-interprétation combinée à la méthode de classification semi-automatique a été réalisée pour produire la carte d'occupation du sol des quatre zones d'étude à

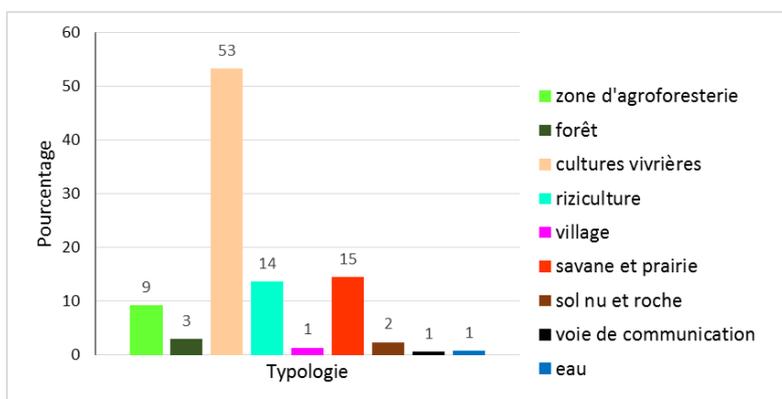
cartographe. Ainsi, la classification suivante a été retenue: zone d'agroforesterie, forêt, cultures vivrières, riziculture, village, savanes et prairie, sol nu et riche, voie de communication et eau (Figure 61, Figure 62, Figure 63, Figure 64). Les typologies de l'occupation du sol ont été codifiées afin de pouvoir être traitées et utilisées pour la modélisation des stocks de carbone du sol.



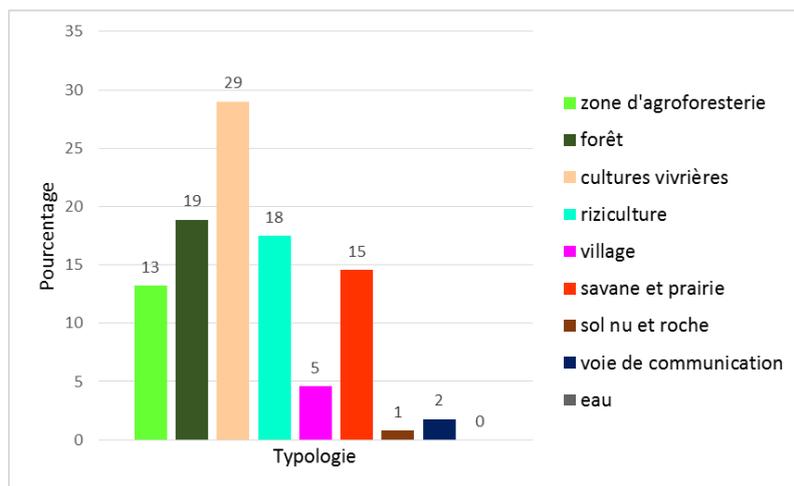
**Figure 61 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Alatsinainikely - Andranomody (Source : Andrianirina T., 2015)**



**Figure 62 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Analavory - Ankonabe (Source : Andrianirina T., 2015)**



**Figure 63 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Ampasamanantongotra (Source : Andrianirina T., 2015)**



**Figure 64 : Pourcentage de la superficie occupée par chaque typologie pour la zone Imerintsiatosika (Source : Andrianirina T., 2015)**

#### ii) **Modèle numérique de terrain (MNT)**

Des extractions de données morphologiques ont été réalisées à partir du MNT de résolution 30 mètres. Les données: ombrage, altitude, pente, exposition et rugosité ont été extraites.

#### iii) **Données climatiques**

La température annuelle moyenne et la précipitation annuelle moyenne ont été extraites de la base WorldClim de résolution 1km.

#### iv) **Types de sols**

Les données relatives aux types de sols existants ont été obtenues à partir de la carte morpho-pédologique de Madagascar (FTM, BD 200). Les données correspondant aux types de sol ont été codifiées.

Une fois l'ensemble des traitements des données spatiales réalisé, un arrangement des 11 variables spatiales a été fait pour faire correspondre les données aux quatre zones étudiées et à cartographier. Les données ayant été ramenées à une même résolution de 30m.

#### v) **Image satellite SPOT 5**

L'image satellite SPOT 5 a été utilisée pour le calcul des indices spectraux comme l'indice de végétation normalisé (NDVI). La formule utilisée est la suivante :  $(PIR-Rouge) / (PIR+Rouge)$ .

## 2.4 Modélisation des stocks de carbone

La modélisation consiste à analyser les corrélations entre les valeurs des stocks de carbone sur les 460 profils de sol et les variables correspondant aux données spatiales. Un set de calibration (n= 321) constituant 2/3 de l'ensemble des échantillons et un set de validation (139) sur 1/3 des échantillons ont été élaborés. Les modèles de spatialisation du stock de carbone du sol ont été faits à partir de l'algorithme Random-Forest et utilisant le logiciel libre R-stat.

Les paramètres de la modélisation se résument comme suit :

- Variable à modéliser : stock de carbone du sol sur 0 – 30 cm de profondeur exprimé en  $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$  correspondant à 460 profils de sols
- Variables explicatives : NDVI, occupation du sol, ombrage, altitude, pente, exposition et rugosité, précipitation moyenne, température moyenne, type de sol
- Modèle utilisé : Random-Forest
- Paramètres de validation du modèle : constitution d'un set de calibration (2/3 des échantillons) et d'un set de validation (1/3 des échantillons)
- indicateurs de performance du modèle : le coefficient de détermination ( $R^2$ ) qui est la mesure de la qualité du modèle. Cette valeur étant toujours entre 0 et 1, plus elle est proche de 1, plus la relation est dite parfaite. Le Root Mean Square Error (RMSE) permettant de mesurer la différence moyenne entre les valeurs mesurées et prédites dans l'étape de calibration et de validation. RMSE peut être interprété comme étant l'erreur moyenne de la modélisation.

Par la suite, chaque variable spatiale a été ramenée à un même système de référence spatiale (WGS 84/ UTM 38S) puis ré-échantillonnée à  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  de résolution. Les valeurs des variables explicatives ont été extraites de chaque profil de sol à l'aide du logiciel QGIS software 2.10.

## 3 Résultats

### 3.1 Stocks de carbone du sol

Les cartes du stock de carbone du sol sur 30 cm de profondeur ont été produites pour les quatre zones étudiées (Carte 5). Sur l'ensemble des zones cartographiées, le stock de carbone du sol varie de  $55\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$  à  $150\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$  avec une moyenne de  $88\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

La zone Ampasamanantongotra présente le stock de carbone le plus élevé avec une moyenne de  $107\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$  tandis que Imerintsiatosika affiche la valeur la plus faible avec  $84\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Les sols volcaniques présentent les stocks de carbone les plus élevés avec une moyenne de  $96,29 \pm 33\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Les sols ferrallitiques affichent un stock moyen de  $72,71 \pm 22\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Les systèmes en riziculture ( $86,43 \pm 27\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) et en cultures vivrières ( $79 \pm 29\text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) sont les modes d'usage

(occupation du sol) affichant les valeurs des stocks les plus élevés. Une forte variabilité des stocks de carbone du sol a même été observée pour une même typologie. Cela est dû à la grande diversité des historiques des parcelles où les travaux de prélèvement de sol ont été effectués (Tableau 17).

Ces valeurs observées corroborent avec les intervalles de valeurs des stocks de carbone du sol trouvées par Ramifehiarivo et al. (2016) sur sols ferrallitiques (35,4 à 165.1 MgC.ha<sup>-1</sup>) et sur sols volcaniques (47,3 à 197,6 MgC.ha<sup>-1</sup>) en cartographiant les stocks de carbone du sol à l'échelle nationale. Les valeurs moyennes trouvées par Grinand et al. (2009) sur sols ferrallitiques (61,3 MgC.ha<sup>-1</sup>) et sur sols volcaniques (90,8 MgC.ha<sup>-1</sup>) sont également assez proches des valeurs du stock de carbone obtenues dans la présente étude.

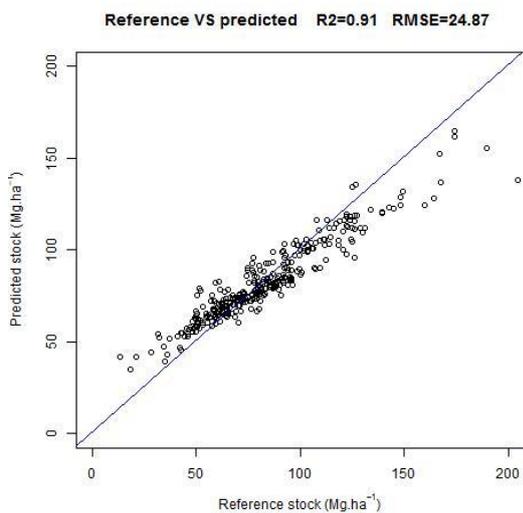
### 3.2 Résultats de la modélisation

Les variables explicatives ayant contribué le plus à l'élaboration du modèle ont été le type de sol, la végétation, l'altitude et le climat. En effet, les résultats du précédent chapitre (Partie 2, chapitre 3), ont montré que le type de sol est un fort déterminant à l'origine de la variabilité spatiale du stock de carbone ( $p=0,0001$  ;  $\alpha = 0,05$ ).

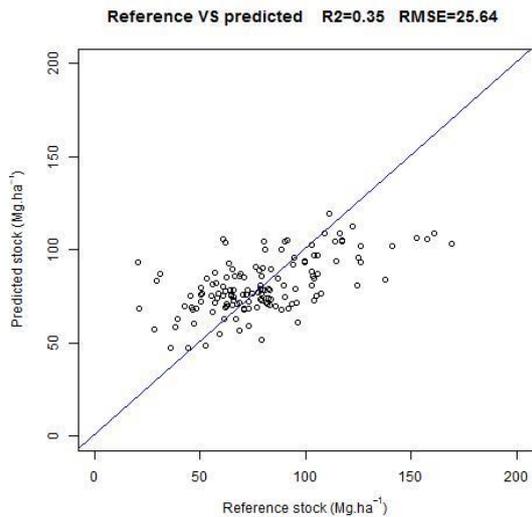
Les résultats de la modélisation ont montré des indices de performances correspondant à  $R^2= 0,91$  et  $RMSE= 24,87$  en calibration tandis que  $R^2= 0,35$  et  $RMSE= 25,64$  en validation (Figure 65). En comparaison avec les résultats obtenus par Ramifehiarivo et al., (2016) pour la cartographie du stock de carbone à l'échelle nationale, en modélisant des données existantes ( $n= 1193$  ;  $R^2= 0,59$  et  $RMSE= 25$ ), la faible performance du modèle obtenu par la présente étude s'explique essentiellement par le faible nombre d'échantillon utilisé dans la calibration et la validation du modèle.

**Tableau 17: Stocks de carbone du sol sur 30 cm de profondeur par type de sol et par occupation de sol (MgC.ha<sup>-1</sup>)**

Morpho pédologie	Occupation du sol				
	Agroforesterie	Cultures vivrières	Foresterie	Rizière	Savane
Sols ferrallitiques	70.33 ±21	69.76 ±19	76.18 ±27	79.65 ±32	75.27 ±19
Sols volcaniques	90.92 ±33	94.32 ±34		97.93 ±23	111.72 ±31
Sols ferrallitiques indures concrétionnés		67.52 ±28		95.61 ±42	

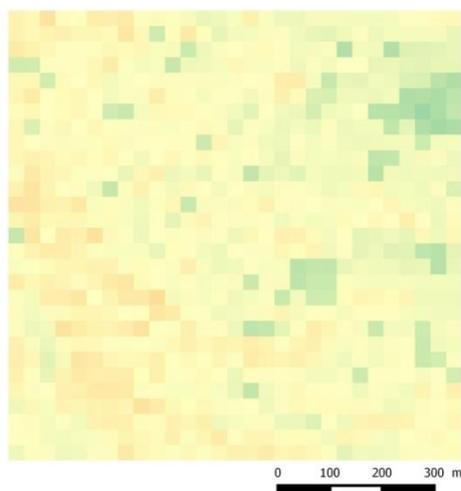
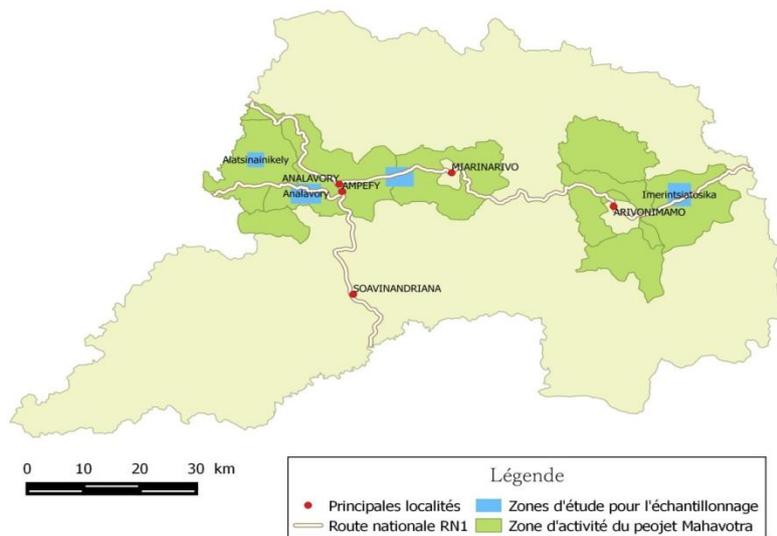


(a)

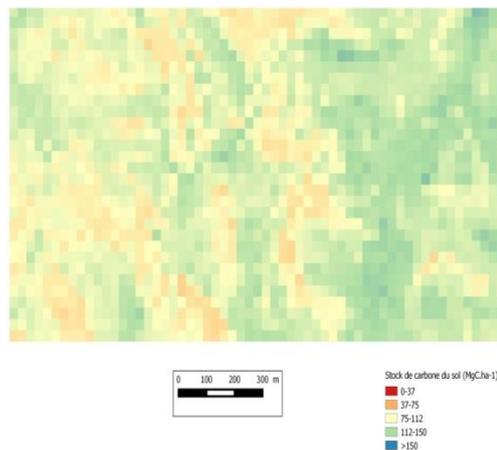


(b)

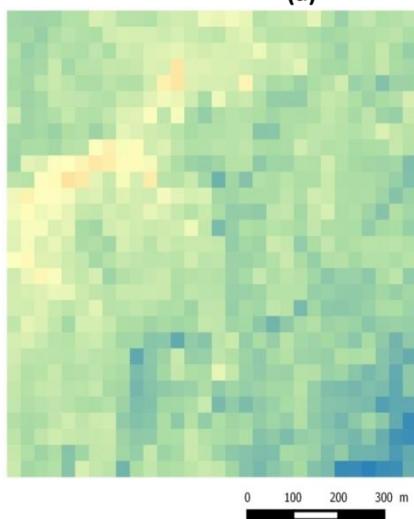
**Figure 65: Modélisation du stock de carbone du sol (a) en set de calibration n=321 et (b) en set de validation n=139**



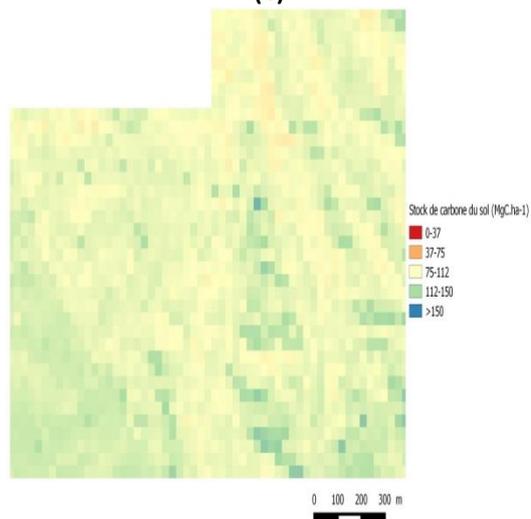
(a)



(b)



(c)



(d)

Carte 5 : Carte du stock de carbone (MgC.ha<sup>-1</sup>) des zones étudiées (a) Alatsinainkely, (b) Analavory, (c) Ampasamanantongotra, (d) Imerintsiosika sur une profondeur de 0 à 30 cm

## 4 Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de spatialiser le stock de carbone du sol sur 30 cm de profondeur et à une résolution de 30m, les quatre zones étudiées (Imerintsiatosika, Ampasamanantongotra, Analavory et Alatsinainikely) dans le cadre de cette thèse. Cette cartographie a été réalisée à partir de données stocks de carbone mesurées au niveau régional voire local. Les variables explicatives telles que le type de sol, la végétation, l'altitude et le climat ont été les variables qui ont contribué le plus à l'élaboration du modèle. Le stock de carbone du sol a été ainsi estimé entre 55 MgC.ha<sup>-1</sup> et 150 MgC.ha<sup>-1</sup> avec une moyenne de 88 MgC.ha<sup>-1</sup>. Les paramètres ( $R^2 = 0,35$  et RMSE = 25,64) du modèle indiquent des valeurs à faible performance notamment pour la phase de validation. Ce qui nous amène à proposer pour la conduite des prochaines études d'étoffer le nombre d'inventaires de sols sur le terrain afin de réduire les incertitudes liées à la modélisation. Dans cette même optique, la cartographie du stock de carbone du sol peut être également réalisée à une échelle plus grande, par exemple à l'échelle régionale.

## Bibliographie

- Arrouays, D., 2008. Changement climatique et évolution du stockage de carbone dans les sols-Enjeux et incertitudes. *Ol. Corps Gras Lipides* 15, 314–316.
- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151–163.
- Grinand, C., Rajaonarivo, Bernoux, M., Pajot, Brossard, M., Razafimbelo, T., Albrecht, A. Le Martret, H., 2009. Estimation des stocks de Carbone dans les sols de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols* 16 ,23-33.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
- Nandrianina Ramifehiarivo, Michel Brossard, Clovis Grinand, Andry Andriamananjara, Tantely Razafimbelo, Andriambolantsoa, Rasolohery, Hery Razafimahatratra, Frédérique Seyler, Ntsoa, Ranaivoson, Michel Rabenarivo, Alain Albrecht, Franck, Razafindrabe, Herintsitohaina Razakamanarivo. 2016. Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. In press. *Geoderma*.

## **SYNTHESES ET PERSPECTIVES**

Cette dernière partie est consacrée d'une part à la synthèse des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette thèse et d'autre part à proposer les différentes perspectives qui en découlent.

La synthèse des résultats se rapportent à l'effet de l'adoption des pratiques agroécologiques sur l'empreinte carbone des exploitations agricoles et sur le stockage de carbone dans les sols.

Les perspectives s'ouvrent notamment sur i) l'application des outils et modèles développés dans le cadre de cette thèse, ii) les améliorations méthodologiques proposées dans le cadre de futurs travaux de recherche.

### **1 Synthèse des résultats**

Les pratiques agroécologiques telles que la plantation d'arbres en système d'agroforesterie et de foresterie paysanne, la fabrication de compost à partir de résidus de récolte et d'effluents d'élevage ainsi que l'adoption du SRI ont été adoptées progressivement par les exploitants agricoles depuis ces dernières années. La synthèse des informations collectées lors des travaux d'enquête ont permis de classer les exploitations agricoles en quatre classes suivant leur niveau d'adoption des pratiques agroécologiques : exploitants à (1) très faible niveau d'adoption, (2) faible niveau d'adoption, (3) niveau d'adoption moyen, (4) niveau avancé d'adoption.

La plantation d'arbre est la pratique la plus adoptée étant donné sa facilité de mise en œuvre ainsi que le bénéfice monétaire plus attrayant du point de vue du paysan. D'une part, les arbres à espèces forestières sont facilement valorisables en bois d'énergie et/ou en bois d'œuvre et d'autre part les arbres à espèce fruitière, par la vente des fruits constituent une source de revenu à moyen voir à long terme pour les exploitants. Le compostage de matières organiques est la deuxième pratique la plus adoptée même si sa mise en œuvre nécessite encore pour l'exploitant un surplus de main d'œuvre et un du temps pour sa fabrication. Le SRI est la pratique la moins adoptée par les exploitants faute de maîtrise de la technique, mais néanmoins le niveau d'adoption augmente progressivement depuis ces trois dernières années.

L'analyse de l'empreinte carbone des 200 exploitations agricoles qui ont fait l'objet de la présente étude a été ainsi réalisée par comparaison des quatre classes d'exploitations à différents niveaux d'adoption des pratiques agroécologiques. Il en ressort de l'analyse que l'empreinte carbone des exploitations agricoles représentatives de la région Itasy a en moyenne une faible valeur (0,8

tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup>) par rapport à l’empreinte carbone des exploitations rencontrées dans les pays développés, émergents et en développements. Ce qui signifie une faible contribution des exploitations agricoles de l’Itasy sur les émissions de GES dans l’atmosphère. Les résultats ont montré que l’adoption des pratiques agroécologiques peut réduire l’empreinte carbone des exploitations agricoles jusqu’à 364%.

L’empreinte carbone des exploitations agricoles pratiquant les techniques traditionnelles est estimée en moyenne à 1,9 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup> tandis que -4,9 tCO<sub>2</sub>eq.ha<sup>-1</sup> pour celles adoptant les pratiques agroécologiques (figure 71). Un fort potentiel d’atténuation au changement climatique a été ainsi observé grâce à la séquestration de carbone dans les puits de carbone comme les arbres (agroforesterie et foresterie) et le sol (restitution de biomasse et matière organique).

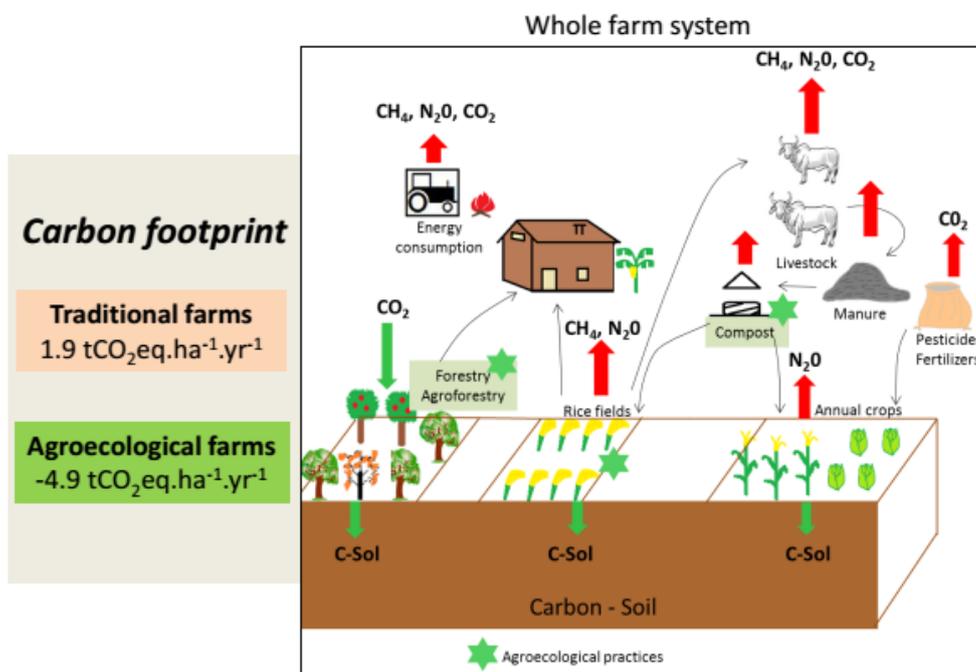


Figure 66: Résumé graphique des résultats de l’évaluation de l’empreinte carbone suivant l’adoption des pratiques agroécologiques

L’étude du stockage de carbone dans le sol a permis tout d’abord de mettre en place des démarches méthodologiques permettant de faciliter à moindre coûts et d’une manière rapide les travaux de prédiction du carbone organique du sol par la technique de la spectrométrie en moyen infrarouge (MIRS). Des modèles statistiques robustes ont été élaborés pour prédire le carbone organique du sol sur chacun des deux types de sol dominant de la région Itasy, à savoir les sols ferrallitiques (R<sup>2</sup>=0,9 et RPD=3,15) et les sols volcaniques (R<sup>2</sup>=0,95 et RPD=4,31). Des modèles statistiques ont été également élaborés pour prédire la texture du sol.

Une grande diversité de sols a été prélevée sur les zones où les activités du projet Mahavotra sont le plus concentré. Au total, 697 parcelles de culture appartenant aux 200 exploitations agricoles ont été inventoriées et étudiées dans le cadre de cette thèse. Cette grande diversité des situations et contextes a permis de classer les parcelles suivant le type de sol, la position topographique, la texture et les systèmes de culture. La valeur et la tendance des stocks de carbone du sol en milieu paysan ont pu être ainsi évaluées.

Par ailleurs, il en ressort de l'étude que le type de sol est un fort déterminant à l'origine de la variabilité spatiale du stock de carbone, suivi du mode de gestion notamment de l'apport en matière organique et du système de culture. Les sols volcaniques à halloysite ont montré la valeur moyenne des stocks de carbone du sol la plus élevée avec  $125 \text{ MgC.ha}^{-1}$  suivis des sols ferrallitiques gibbsitiques ( $78 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ) et des sols ferrallitiques kaolinitiques ( $70 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ). Il a été également observé que les systèmes en riziculture ont la valeur moyenne des stocks de carbone la plus élevée ( $85 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ) tandis que les systèmes en foresterie affichent la valeur moyenne la plus faible ( $68 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ). Ce fait est principalement expliqué par le mode d'apport en matière organique (fumier de ferme et/ou compost) qui est nettement plus élevé sur les rizières ( $9\text{t/ha}$ ) que sur les parcelles en foresterie ( $<4\text{t/ha}$ ).

L'effet des pratiques agroécologiques sur le stock de carbone du sol a été évalué comme positif si l'on se base sur les données acquises dans le cadre de cette thèse. Les pratiques agroécologiques telles que l'agroforesterie et le compostage de matières organiques ont tendance à augmenter le stock de carbone du sol, néanmoins, la très récente adoption des pratiques agroécologiques (en moyenne 3 ans), ainsi que le faible effectif des parcelles inventoriées en agroécologie (surtout pour le cas du SRI), n'ont pas permis de voir l'effet significatif de ces pratiques. D'autant plus que, comme il s'agit de dispositif en milieu paysan non contrôlé ; et que l'historique des parcelles est assez hétérogène d'une parcelle à une autre ; quelques fois peu détaillée, il a été difficile de cerner les effets réels de chacune de ces pratiques agroécologiques sur le stockage du carbone dans le sol.

## **2 Perspectives de l'étude**

Tenant compte de l'importance des différents enjeux relatifs aux problèmes engendrés par le changement climatique notamment pour (i) réduire les émissions de GES dans l'atmosphère et (ii) favoriser le stockage de carbone dans les sols ; nous constatons que de nombreuses perspectives et pistes de recherche peuvent faire suite à la présente thèse.

### **2.1 L'outil TropiC Farm Tool**

L'élaboration et le développement de l'outil TropiC Farm Tool dans le cadre de cette thèse a permis de (i) faciliter le calcul de l'empreinte carbone des exploitations agricoles puisqu'il est adapté à l'échelle

ferme et (ii) d'utiliser les facteurs d'émissions et de séquestration de GES les plus adaptés au contexte malgache et notamment de la région Itasy. Ainsi, comme perspectives, cet outil peut être adapté et utilisé à d'autres contextes (exemple étude de filière) et une échelle plus élargie (paysage ou régionale) en agréant les données « inputs ». Une utilisation plus générique de l'outil sur des contextes plus diversifiées en région Tropicale constitue également une perspective à ce travail.

## **2.2 Mesure et modélisation de facteurs d'émission et de séquestration de GES**

Dans le cadre de l'évaluation de l'empreinte carbone des exploitations agricoles, il a été constaté une grande insuffisance ou inaccessibilité des facteurs d'émission et de séquestration de GES adaptés au contexte malgache voir même adapté en condition tropicale. Ce qui nous amène à proposer des axes de recherche dans ce sens afin de réduire les effets des incertitudes sur les calculs de l'empreinte carbone. Des mesures en conditions réelles ou expérimentales suivies de modélisation pourraient être réalisées pour étoffer la base de données des facteurs d'émission et de séquestration de GES.

## **2.3 Application des modèles de prédiction du carbone organique du sol**

Des modèles robustes pour prédire le carbone organique du sol sur sols ferrallitiques et sur sols volcaniques ont été élaborés dans le cadre de cette thèse. Comme ces modèles ont été élaborés à partir d'un nombre considérable d'échantillons de sols prélevés sur une diversité de situations (pédologiques et agronomiques), ils pourront être appliqués pour prédire le carbone du sol pour les zones ayant des conditions plus ou moins similaires à la région Itasy.

## **2.4 Cartographie du carbone**

Les résultats de la modélisation pour la spatialisation du stock de carbone ont montré un modèle à faible performance en set validation du fait du nombre d'échantillon estimé insuffisant et mal réparti sur la zone à cartographier. De ce fait, nous proposons comme recommandation et dans la même optique comme perspective d'étoffer la base de données stock de carbone du sol de telle sorte que les profils de prélèvement de sol soient bien répartis sur l'ensemble de la zone à cartographier et notamment pour élaborer une carte du carbone à l'échelle régionale.

Ce travail de cartographie est essentiel non seulement pour pouvoir évaluer le niveau actuel du stock de carbone dans le sol mais aussi pour pouvoir suivre l'évolution des objectifs de séquestration annuelle de carbone comme le propose l'initiative 4 Pour 1000 qui est actuellement proposée pour stopper l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

## CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette thèse, nous avons pu aborder à la fois l'aspect flux de gaz à effet de serre du secteur agricole et l'aspect stocks de carbone dans le sol. Différents outils et méthodes ont été développés tout au long de ce travail afin de mettre en exergue l'impact des pratiques agricoles notamment agroécologiques sur l'environnement. L'approche empreinte carbone nous a permis d'estimer le bilan GES des exploitations agricoles et de comprendre l'origine des émissions et stockage de GES à l'échelle des fermes. Le développement de l'outil TropiC Farm Tool a été un point essentiel de cette thèse étant donné son originalité et son adéquation au contexte agricole local et malgache. L'étude des stocks de carbone nous a permis d'hierarchiser les déterminants du stock de carbone du sol et de développer des méthodes de prédiction du carbone par la technique de la spectrométrie en moyen infrarouge. Cette méthode rapide, non destructive et moins coûteuse a été appliquée sur un nombre considérable d'échantillons de sols et a permis d'effectuer à la fois des analyses qualitatives et quantitatives. Les travaux de cartographie à travers la modélisation spatiale nous offrent également un moyen de suivi de la dynamique des stocks de carbone du sol sur les zones étudiées.

La présente étude a permis de mettre en avant les avantages de l'adoption des pratiques agroécologiques par rapport à la dimension environnementale. La plantation d'arbre et la fertilisation organique ont été identifiées comme des pratiques séquestrantes de GES. Par ailleurs, il a été observé que l'apport de matière organique au sol contribue à augmenter le stock de carbone organique dans le sol. Le compostage et le système de riziculture intensif pouvant réduire considérablement les émissions de GES donc contribuent à améliorer le bilan GES des exploitations agricoles.

Par ailleurs, les outils et méthodes développés au cours de cette thèse constituent des apports à la fois pour la science et le développement. Les perspectives à l'issue de cette thèse sont essentiellement axées à l'application de ces outils dans des domaines et contextes plus élargies.

## Références bibliographiques

- Albrecht, A., Kandji, S.T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99, 15–27. doi:10.1016/S0167-8809(03)00138-5.
- Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P (Eds), 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Synthèse de l'Expertise collective INRA pour le MEDD.
- Arrouays, D., 2008. Changement climatique et évolution du stockage de carbone dans les sols-Enjeux et incertitudes. *Ol. Corps Gras Lipides* 15, 314–316.
- Barois T., Dubroeuq D., Rojas P., Lavelle P., 1998. Andosol-forming process linked with soil fauna under the perennial grass *Mulhemburgia macroura*.. *Geoderma* 86, 241-260.
- Bastian G., 1967. Madagascar : étude géographique et économique-Paris, 192 p.
- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151–163.
- Bellon-Maurel V., McBratney A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1398-1410.
- Bonfils P. et Moinereau J., 1971. Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au sud du massif central. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IX, no 3.
- Brown S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. In *FAO Forestry Papers* 134, 134, 55 pp. Rome, Italy.
- Brown, M.E., Funk, C.C., 2008. Food security under climate change.
- Brunet D., Barthès B.G., Chotte J.L., Feller C., 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma* 139, 106-117.
- Céline Allaverdian, Pierre Ferrand, Jean-François Kibler, Lucie Reynaud, 2014. L'agroécologie, un concept pour une diversité d'approches. *Grain de sel, La revue d'inter-réseaux, Développement rural. Agroécologie en Afrique de l'Ouest et du Centre : réalités et perspectives.* N° 63-66 — juillet 2013 – juin 2014.
- Chang C.W., Laird D.A., Mausbach M.J., Hurburgh Jr C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 480-490.
- Chapuis-Lardy, L., Metay, A., Martinet, M., Rabenarivo, M., Toucet, J., Douzet, J.M., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Rakotoarisoa, J., 2009. Nitrous oxide fluxes from Malagasy agricultural soils. *Geoderma* 148, 421–427. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.015
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Folster, H., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*. 145, 87–99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x

- Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yan, M., 2011. Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993–2007. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 231–237. doi:10.1016/j.agee.2011.05.012
- Chevallier T., Toucet-Louri J., Blanchart E., Woignier T., 2007. Minéralisation de la matière organique d'une gamme d'Andosol de la Martinique. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers.
- Cobo J.G., Dercon G., Yekeye T., Chapungu L., Kadzere C., Murwira A., Delve R., Cadisch G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma* 158(3-4), 398-411.
- Coley, D., Howard, M., Winter, M., 2009. Local food, food miles and carbon emissions: A comparison of farm shop and mass distribution approaches. *Food Policy* 34, 150–155.
- Cozzolino D., Moron A., 2006. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil & Tillage Research* 85, 78–85.
- Craswell, E.T. & Waring, S.A. 1972. Effect of grinding on the decomposition of soil organic matter; part 1, the mineralization of organic nitrogen in relation to soil type. *Soil Biology & Biochemistry*, 4, 427–433.
- Čuček, L., Klemeš, J.J., Kravanja, Z., 2012. A Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *J. Clean. Prod.* 34, 9–20. doi:10.1016/j.jclepro.2012.02.036.
- D'Acqui L. P., Pucci A., Janik L.J., 2010. Soil properties prediction of western Mediterranean islands with similar climatic environments by means of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *European Journal of Soil Science* 61, 865–876.
- Edwards, A.P. & Bremner, J.M. 1967. Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 18, 64–70.
- Esilaba A. O., Nyende P., Nalukenge G., Byalebeka J.B., Delve R.J., Ssali H., 2005. Resource flows and nutrient balances for crop and animal production in smallholder farming systems in eastern Uganda, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109: 192–201.
- Falinirina M. V., 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et services écosystémiques. Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Fanjaniaina, M. L., 2012. Evaluation des stocks de carbone sous rizières : Comparaison des divers modes de gestion en différents contextes pédologiques-cas de la région d'Itasy, Madagascar. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Feller C., Fritsch E., Poss R., Valentin C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). *Cahier ORSTOM, Série Pédologique XXVI(1)*, 25-36.
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B. and Giljum, S. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a 'footprint family' of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, Vol. 16, pp. 100–112.
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du

- climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- Gilley, J.E., Risse, L.M., 2000. Runoff and soil loss as affected by the application of manure. *Transactions of the ASAE* 43, 1583 – 1588.
- Gregorich, E.G., Drury, C.F., Baldock, J.A., 2001. Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian Journal of Soil Science* 81, 21 –31.
- Grinand, C., Rajaonarivo,, Bernoux, M., Pajot, Brossard, M., Razafimbelo, T., Albrecht, A. Le Martret, H.,2009. Estimation des stocks de Carbone dans les sols de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols* 16 ,23-33.
- Haaland D. M and Thomas V. T., 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. *Analytical Chemistry* 60: 1193-1202.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., Vera-Graziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49, 348–358.
- Hillier, J., Hawes, C., Squire, G., Hilton, A., Wale, S., Smith, P., 2009. The carbon footprints of food crop production. *Int. J. Agric. Sustain.* 7, 107–118. doi:10.3763/ijas.2009.0419
- Hoekstra, A. Y. (ed.). 2003. *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, 12–13 December 2002*. Value of Water Research Report Series No. 12. Delft, the Netherlands, UNESCO-IHE.
- Hutchinson, J.J., Campbell, C.A., Desjardins, R.L., 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 142, 288–302. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.030.
- INSTAT, 2011. *Enquête périodique auprès des ménages 2010, Rapport principal*. Ministère d'Etat chargé de l'Economie et de l'Industrie.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), IGES, Tokyo, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- Jenkinson D. S., Adams D. E., Wild A., 1991. Model estimates of CO2 emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351, 304 – 306.
- Jianyi, L., Yuanchao, H., Shenghui, C., Jiefeng, K., Lilai, X., 2015. Carbon footprints of food production in China (1979–2009). *J. Clean. Prod.* 90, 97–103. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.072
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10.
- Kenny, T., Gray, N.F., 2009. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland. *Environ. Impact Assess. Rev.* 29, 1–6. doi:10.1016/j.eiar.2008.06.001
- Knudsen, M.T., Meyer-Aurich, A., Olesen, J.E., Chirinda, N., Hermansen, J.E., 2014. Carbon footprints of crops from organic and conventional arable crop rotations – using a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 64, 609–618. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.009

- Kong, X., Dao, T.H., Qin, J., Qin, H., Li, C., Zhang, F., 2009. Effects of soil texture and land use interactions on organic carbon in soils in North China cities' urban fringe. *Geoderma* 154, 86–92. doi:10.1016/j.geoderma.2009.09.016.
- Kristensen, T., Søgaard, K., Eriksen, J., Mogensen, L., 2015. Carbon footprint of cheese produced on milk from Holstein and Jersey cows fed hay differing in herb content. *J. Clean. Prod.* 101, 229–237. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.087
- Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30, 981–990. doi:10.1016/j.envint.2004.03.005
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Le Bissonnais Y, Arrouays D. Aggregates stability and assessment of soil crustability and erodibility : II Application to humic soils with various organic carbon contents. *Eur J Soil Sci* 1997 ; 48 : 39-48.
- Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333, 616–620.
- Lovett, D., Lovell, S., Stack, L., Callan, J., Finlay, M., Conolly, J., O'Mara, F.P., 2003. Effect of forage/concentrate ratio and dietary coconut oil level on methane output and performance of finishing beef heifers. *Livest. Prod. Sci.* 84, 135–146. doi:10.1016/j.livprodsci.2003.09.010
- Luo, T., Yue, Q., Yan, M., Cheng, K., Pan, G., 2015. Carbon footprint of China's livestock system – a case study of farm survey in Sichuan province, China. *J. Clean. Prod.* doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.077
- Madari, B.E., Reeves, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E., McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma* 136, 245–259. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.026.
- Mahdizadeh Khasraghi, M., Gholami Sefidkouhi, M.A., Valipour, M., 2015. Simulation of open- and closed-end border irrigation systems using SIRMOD. *Arch. Agron. Soil Sci.* 61, 929–941. doi:10.1080/03650340.2014.981163
- Marcotorchino, F., Michaud, P., 1982. Agrégation de similarités en classification automatique. *Revue de statistique appliquée*, tome 30, n°2, France, pp 21-24.
- McBratney, A.B., Minasny, B., Viscarra Rossel, R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma* 136, 272–278. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.051.
- Nandrianina Ramifehiarivo, Michel Brossard, Clovis Grinand, Andry Andriamananjara, Tantely Razafimbelo, Andriambolantsoa, Rasolohery, Hery Razafimahatratra, Frédérique Seyler, Ntsoa, Ranaivoson, Michel Rabenarivo, Alain Albrecht, Franck, Razafindrabe, Herintsitohaina Razakamanarivo. 2016. Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. In press. *Geoderma*.
- Nguyen T., Janik L.J., Raupach M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research* 29, 49-67.
- Padgett, J.P., Steinemann, A.C., Clarke, J.H., Vandenberg, M.P., 2008. A comparison of carbon calculators. *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 106–115. doi:10.1016/j.eiar.2007.08.001

- Pandey, D., Agrawal, M., 2014. Carbon Footprint Estimation in the Agriculture Sector, in: Muthu, S.S. (Ed.), *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1*. Springer Singapore, Singapore, pp. 25–47.
- Pandey, D., Agrawal, M., Pandey, J.S., 2011. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ. Monit. Assess.* 178, 135–160. doi:10.1007/s10661-010-1678-y
- Parry, M.L., 2007. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Pathak, H., Jain, N., Bhatia, A., Patel, J., Aggarwal, P.K., 2010. Carbon footprints of Indian food items. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 66–73.
- Pattey, E., Trzcinski, M.K., Desjardins, R.L., 2005a. Quantifying the Reduction of Greenhouse Gas Emissions as a Result of Composting Dairy and Beef Cattle Manure. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 72, 173–187. doi:10.1007/s10705-005-1268-5
- Payraudeau, S., van der Werf, H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107, 1–19. doi:10.1016/j.agee.2004.12.012
- Peters, G.P., 2010. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 245–250. doi:10.1016/j.cosust.2010.05.004
- Plassmann, K., Norton, A., Attarzadeh, N., Jensen, M.P., Brenton, P., Edwards-Jones, G., 2010. Methodological complexities of product carbon footprinting: a sensitivity analysis of key variables in a developing country context. *Environ. Sci. Policy* 13, 393–404. doi:10.1016/j.envsci.2010.03.013
- Rabetokotany Rarivoson, N. V., 2013. *Matières organiques exogènes issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical : apport de la spectrométrie proche infrarouge pour leur orientation d'usage agronomique et/ou énergétique*. Thèse de Doctorat en Sciences. Université De La Réunion, France et Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Rakotovao H. N. 2011. *Emmpreinte carbone d'exploitations agricoles basées sur des pratiques agroécologiques*. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
- Rakotovao H. N., 2013. *Utilisation de la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR) pour la classification des principaux groupes de sol et établissement de modèles de prédiction du carbone organique du sol. Région Itasy – Madagascar*. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
- Randrianarisoa, J.-C., Minten, B., 2003. Accessibilité et utilisation des engrais chimiques à Madagascar, in: *Conférence Agriculture et Pauvreté, Projet ILO, FOFIFACORNELL*.
- Razafimahatratra H., 2011. *Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat*. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Razafimbelo T., 2005. *Stockage et protection du carbone dans un sol Ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches*. Thèse de Doctorat en Science du Sol. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. France.
- Reeves J.B., 2012. Mid-infrared spectral interpretation of soils: Is it practical or accurate? *Geoderma* 189-190, 508-513.

- Région Itasy, 2005. Plan Régional de Développement Itasy.
- Rotz, C.A., Montes, F., Chianese, D.S., 2010. The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. *J. Dairy Sci.* 93, 1266–1282.
- Rugani, B., Vázquez-Rowe, I., Benedetto, G., Benetto, E., 2013. A comprehensive review of carbon footprint analysis as an extended environmental indicator in the wine sector. *J. Clean. Prod.* 54, 61–77. doi:10.1016/j.jclepro.2013.04.036
- Ruviaro, C.F., de Léis, C.M., Lampert, V. do N., Barcellos, J.O.J., Dewes, H., 2015. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *J. Clean. Prod.* 96, 435–443. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.037
- Schils, R.L.M., Olesen, J.E., del Prado, A., Soussana, J.F., 2007. A review of farm level modelling approaches for mitigating greenhouse gas emissions from ruminant livestock systems. *Livest. Sci.* 112, 240–251. doi:10.1016/j.livsci.2007.09.005
- Seebauer, M., 2014. Whole farm quantification of GHG emissions within smallholder farms in developing countries. *Environ. Res. Lett.* 9, 35006.
- Silici, L., 2014. Agroecology What it is and what it has to offer, IIED Issue Paper. IIED.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkoy, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 789–813. doi:10.1098/rstb.2007.2184.
- Sommerfeldt, T.G., Chang, C., Entz, T., 1988. Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen and decrease carbon to nitrogen ratio. *Soil Science Society of America Journal* 52, 1668 – 1672.
- Stoop, W.A., Uphoff, N., Kassam, A., 2002. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. *Agric. Syst.* 71, 249–274.
- Stumpe, B., Weihermüller, L., Marschner, B., 2011. Sample preparation and selection for qualitative and quantitative analyses of soil organic carbon with mid-infrared reflectance spectroscopy. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 849–862. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01401.x.
- Tittonell, P., Leffelaar, P.A., Vanlauwe, B., van Wijk, M.T., Giller, K.E., 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agric. Syst.* 91, 71–101. doi:10.1016/j.agsy.2006.01.010.
- Topp, K., Rees, B., 2008. Carbon footprint reporting for a Scottish livestock farm. Rural Policy Centre.
- Torn, M., Trumbore, S., Chadwick, O., Vitousek, P. and Hendricks, D. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature.* 389: 170-173.
- Tubiello F.N., Salvatore M., Córdor Golec R.D., Ferrara A.F., Rossi S., Biancalani R., Federici S., Jacobs H., Flammini A., 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. *Stat. Div. Food Agric. Organ. Rome.*
- Valipour, M., 2012a. Sprinkle and Trickle Irrigation System Design Using Tapered Pipes for Pressure Loss Adjusting. *J. Agric. Sci.* 4. doi:10.5539/jas.v4n12p125

- Valipour, M., 2012b. Comparison of Surface Irrigation Simulation Models: Full Hydrodynamic, Zero Inertia, Kinematic Wave. *J. Agric. Sci.* 4. doi:10.5539/jas.v4n12p68
- Valipour, M., Sefidkouhi, M.A.G., Eslamian, S., 2015. Surface irrigation simulation models: a review. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.* 5, 51–70.
- Viscarra Rossel R.A. et Lark R.M., 2009. Improved analysis and modelling of soil diffuse reflectance spectra using wavelets. *European Journal of Soil Science* 60, 453-464.
- Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B., 2008. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In 'Digital soil mapping with limited data'. *Developments in Soil Science series*. (Eds AE Hartemink, AB McBratney, L Mendonça-Santos) (Elsevier Science: Amsterdam).
- Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59-75.
- Walkley A. et Black I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.
- Wang, Z.Y., Xu, Y.C., Li, Z., Guo, Y.X., Wassmann, R., Neue, H.U., Lantin, R.S., Buendia, L.V., Ding, Y.P., Wang, Z.Z., 2000. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 58, 55–63.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 503–515. doi:10.1051/agro/2009004.
- Wiedmann, T., Minx, J., 2008. A definition of “carbon footprint.” *Ecol. Econ. Res. Trends* 1, 1–11.
- Yan, M., Cheng, K., Luo, T., Yan, Y., Pan, G., Rees, R.M., 2015. Carbon footprint of grain crop production in China – based on farm survey data. *J. Clean. Prod.* 104, 130–138. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.058
- Yan, X., Ohara, T., Akimoto, H., 2003. Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice fields in the East, Southeast and South Asian countries. *Global Change Biology*. 9, 237-254.
- Yannopoulos, S., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A., Angelakis, A., 2015. Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide. *Water* 7, 5031–5060. doi:10.3390/w7095031
- Yuttitham, M., Gheewala, S.H., Chidthaisong, A., 2011. Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand. *J. Clean. Prod.* 19, 2119–2127. doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.017
- Zebrowski C., 1971. Propriété des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IX, no 1.

## **Webographie**

<http://www.ecterra.org/en/projects/mahavotra>

TropiC Farm Tool: <http://reseau-carbone-sol-afrique.org/en/news/tropic-farm-tool-innovative-tool-calculate-carbon-footprint-farms>.

<http://sri.cals.cornell.edu/>

<http://sri.cals.cornell.edu/>

<http://fr.climate-data.org/location/765319/>

<http://fr.climate-data.org/location/951480/>

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Communication Orale lors de la conférence internationale Agroecology for Africa 2014 (AfA), Antananarivo, Madagascar.**

**AfA 2014**  
*Agroecology for Africa*

**Drivers of soil organic carbon spatial variability at watershed scale, Itasy Region, Madagascar**

**Narindra H. Rakotovao<sup>a</sup>**, Tantely M. Razafimbelo<sup>a</sup>, Stéphan Rakotosamimanana<sup>b</sup>, Sylvain Deffontaines<sup>b</sup>, Alain Albrecht<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire des Radioisotopes (LRI), Université d'Antananarivo, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar ; <sup>b</sup>Agrisud International,

<sup>c</sup>Institut de Recherche pour le Développement (IRD) - UMR Eco&Sols, 2 Place Viala, 34060 Montpellier cedex 2, France.

[n.rakotovao@yahoo.fr](mailto:n.rakotovao@yahoo.fr)

Soil organic carbon (SOC) is an indicator of soil quality and sustainability of agro ecosystems. Besides, the soil carbon sequestration reduces the rate of enrichment of atmospheric CO<sub>2</sub> caused by human activities. Understanding the drivers of the spatial variability of soil organic carbon (SOC) is essential for recommendations concerning sustainable land management. Therefore, this study aims to contribute to a better knowledge of the factors determining spatial heterogeneity of SOC in three watersheds of the Itasy region. The factors considered are soil type ("Ferrallitique typique" or ferralsols, "Ferrallitique rajeuni" or ferric cambisols and andic soils), landscape locations (upper, mid, lower) and land use systems including agroecology practices (forestry, agroforestry, conventional and intensified cropping systems, paddy rice fields and fallows). Each watershed corresponds to a main soil type as described above. 109 representative plots located along transects were selected for the soil sampling work and four depths of soil were considered (0 to 40 cm). Multivariate analysis (MCA) and analysis of variance (ANOVA) using the Fisher tests were performed to determine and compare the influences of the factors to the SOC spatial variability between and within each watershed. The SOC concentrations for the overall sample were moderately variable with a coefficient of variation CV= 54%. The watershed dominated by volcanic soils showed the highest SOC variability (CV= 65%) and the highest SOC concentrations. For the overall sample, lower SOC concentrations were associated with upper landscape and conventional cropping systems whereas higher SOC concentrations were associated with lower landscape, agroforestry, flooded rice fields and intensified cropping systems.

**Annexe 2 : Communication Poster lors du séminaire « Empreinte carbone des organisations, des produits et des services : Evaluer et agir. Un enjeu interdisciplinaire pour la recherche ? », Jeudi 08 janvier 2015, Paris, France.**

**Mise en place d'une méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des exploitations agricoles de la région Itasy, Madagascar**

**AXE 1**

Narindra H. Rakotovao<sup>1</sup>, Tantely M. Razafimbelo<sup>1</sup>, Arimamy Mahefa<sup>1</sup>, Razafisoazara Mihajaso<sup>1</sup>, Rabarison Felahasina<sup>1</sup>, Stéphan Rakotosamimanana<sup>2</sup>, Zafyson Randrianasolo<sup>3</sup>, Clovis Grinand<sup>3</sup>, Alain Albrecht<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Radioisotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar ; <sup>2</sup>Agrisud International, Lot VL32M Androntra 101 Antananarivo ; <sup>3</sup>ETC Terra, 127 Rue d'Avron, 75020 Paris, France ; <sup>4</sup>Institut de Recherche pour le Développement-UMR Eco&Sols, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, France.

[n.rakotovao@yahoo.fr](mailto:n.rakotovao@yahoo.fr)

Le secteur agricole contribue significativement à la fois aux émissions et à la séquestration de gaz à effet de serre (GES) à travers divers mécanismes et processus. La présente étude a pour objectif de mettre en place une méthodologie d'estimation de l'empreinte carbone des exploitations agricoles rencontrées dans la région Itasy, Madagascar. Elle s'inscrit dans le cadre plus large du projet Mahavotra visant à promouvoir la diffusion des pratiques agroécologiques en démontrant leur potentiel en termes d'atténuation du changement climatique. L'approche adoptée dans cette étude définit l'empreinte carbone d'une exploitation agricole comme étant le bilan annuel des émissions et de la séquestration de GES au niveau de chaque exploitation. 200 exploitations agricoles représentatives de la région ont fait l'objet de l'étude. La première étape du travail a été de collecter les données relatives aux activités de chaque exploitation par le biais d'enquêtes. L'ensemble des caractéristiques et du fonctionnement de chaque exploitation a été ensuite représenté schématiquement *via* des cartes des flux des ressources. Un calculateur d'empreinte carbone d'exploitation agricole sous format Excel a été élaboré pour le calcul, comprenant différents volets : (1) Description de l'exploitation, (2) Agriculture, (3) Elevage, (4) Foresterie, (5) Energie (6) Résultat. Les trois principaux GES du secteur agricole à savoir le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O ont été considérés. Les facteurs d'émissions intégrés dans ce calculateur correspondent à ceux les plus adaptés au contexte de la région, issus de l'IPCC, d'étude spécifique au niveau de la région et du pays (tiers 2) et déterminés dans le cadre de cette étude (tiers 3). Dans ce dernier cas, des mesures sur le terrain ont été effectuées afin d'estimer la séquestration de carbone dans la biomasse ligneuse et dans les sols. Les données collectées ont été introduites dans le calculateur et les résultats ainsi obtenus ont été exprimés en tonne de CO<sub>2</sub> équivalent par an pour chaque exploitation et permettent d'analyser l'intérêt de la mise en place à l'échelle de l'exploitation agricole des pratiques agroécologiques.

**Annexe 3 : Communication Poster lors de la conférence internationale « Climate Smart Agriculture » CSA 2015, Montpellier, France.**



**Smallholders farm carbon footprint reduced by agro ecological practices (Highlands & East Coast, Madagascar)**

<sup>a</sup>Rakotovao Narindra, <sup>a</sup>Razakaratrimo Joyce, <sup>a</sup>Razafimbelo Tantely, <sup>b</sup>Deffontaines Sylvain,  
<sup>b</sup>Rakotosamimanana Stéphan, <sup>c,d</sup>Jahiel Michel, <sup>e</sup>Albrecht Alain

<sup>a</sup>Laboratoire des Radioisotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar

<sup>b</sup>Agrisud International, Lot VL32M Androntra, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>c</sup>Centre Technique Horticole de Tamatave, BP 11, Tamatave, Madagascar

<sup>d</sup>Cirad UR HortSys, BP 11, Tamatave Madagascar

<sup>e</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 34060 Montpellier, France

Carbon footprint calculation is being more and more used to assess the contribution of activities to greenhouse gas emission. This work aimed to determine the impact of farm activities and agricultural practices to farm carbon footprint. The carbon footprint is the equivalent CO<sub>2</sub> impact of the activities within each farm. Smallholder farms located on two different soil and climate areas of Madagascar have been selected: 12 in the Highlands and 8 on the East Coast. The farms located in the Highlands were characterized by intensification of annual cropping systems using agro ecological practices such as intensified rice system, composting organic residues and fruit tree plantation in association with annual cropping systems. Farms from the East Coast were using agroforestry systems (simple and multiple tree species) and the traditional twice-a-year rice cropping system. Farm resource flow maps were developed in order to represent all of the structures and characteristics of each farm. GHG source and sink compartments' inventory was carried out and emission factors adapted to each zone were selected from the literature. A local/specific farm carbon footprint calculator was developed. The results showed that farm carbon footprint average amounted to 3.04 Mg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> and 7.69 Mg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> in the Highlands and in the East Coast respectively. The intensified rice cropping system alternating wet and dry period improved the farm carbon footprint in the Highlands by reducing methane emission while the traditional twice-a-year rice cropping system is an important source of methane in the East Coast. Nevertheless, the contribution of agroforestry systems in the East Coast allowed a farm carbon footprint reduction between 15 to 51%.

**Annexe 4: Communication Orale lors de la conférence internationale Our Common Future Under Climate Change, 7-10 July 2015, Paris, France.**



**International Scientific Conference**

**7-10 July 2015 | Paris, France**

**Agroecological practices adopted by Malagasy farmers reduce farms carbon footprint  
Central (Itasy) and East Coast (Analanjirofo) of Madagascar**

<sup>a</sup>Rakotovao Narindra, <sup>a</sup>Razakaratriho Joyce, <sup>a</sup>Razafimbelo Tantely, <sup>b</sup>Deffontaines Sylvain,  
<sup>b</sup>Rakotosamimanana Stéphan, <sup>c,d</sup>Jahiel Michel, <sup>e</sup>Albrecht Alain

<sup>a</sup>*Laboratoire des Radioisotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar*

<sup>b</sup>*Agrisud International, Lot VB 7 - Villa Ambinintsoa Ambatoroka - 101 Antananarivo, Madagascar*

<sup>c</sup>*Centre Technique Horticole de Tamatave, BP 11, Tamatave, Madagascar*

<sup>d</sup>*Cirad UR HortSys, BP 11, Tamatave Madagascar*

<sup>e</sup>*Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 34060 Montpellier, France*

For decades, Malagasy farmers have to deal with the low performance of the agricultural system and cope with the threat of food insecurity. This low productivity is caused by various factors included the lack of means of production and the degradation of natural resources such as loss of soil fertility. In addition, the effects of climate variability constrained farmers to shift constantly cropping calendars. Therefore, agroecology was proposed to farmers in one hand to cope with food insecurity by increasing agricultural production and diversifying crops in order to get more sources of income and in another hand to restore the production environment such as watersheds, soil and water availability and to contribute to climate change adaptation. First, this work aims to estimate the carbon footprint of farms in two regions located in the Central and the East Coast of Madagascar. Secondly to assess the contribution and influence of the agroecological practices adopted by farmers to carbon footprints at farm scale. The annual flux of the three main greenhouse gases encountered in the agricultural sector including the Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), the Methane (CH<sub>4</sub>) and the

Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) expressed in CO<sub>2</sub> equivalent is considered as the carbon footprint of each farm. Twenty smallholder farms selected from typologies of farms of each region were studied. Twelve farms in the central and eight farms in the east coast. Farms located in the central region were characterized by intensification of annual cropping systems using agroecological practices such as intensified rice system which alternates flooding and drying of rice fields, composting organic residues and planting fruit trees in association with annual cropping systems. Agricultural activities of farms located in the East Coast were based on clove plantation associated with annual crops either in simple specie agroforestry or multiple tree species agroforestry and the traditional twice-a-year rice cropping system. Farm resource flow maps were developed in order to represent all of the structures and characteristics of each farm. GHG source and sink compartments' inventory was carried out and emission factors adapted to each zone were selected from the literature. A local/specific farm carbon footprint calculator was developed. The results showed that farm carbon footprint average amounted to 3.04 Mg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> and 7.69 Mg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> in the central and in the east coast respectively. Farms in the East Coast showed high carbon footprint because of the traditional twice-a-year rice cropping. In the central region, the intensified rice cropping system reduces the farm carbon footprint by reducing methane emission, composting organic residues reduces also farm carbon footprint up to 30% by improving carbon storage in soils. In the East Coast, agroforestry allowed a farm carbon footprint reduction between 15 to 51% due to carbon storage in woody biomass. These results show another aspect of the beneficial impact of agroecological practices adopted by smallholder farmers in Madagascar at farm scale to climate change mitigation.

**Annexe 5 : Communication Poster lors de la conférence internationale ECOSUMMIT  
2016, Montpellier, France**

**Carbon footprint of smallholder farms in Madagascar: examples of agroecological  
practices integrated at farm scale**

*N. Rakotovao<sup>1</sup> ; J. Razakaratrio<sup>1</sup> ; T. Razafimbelo<sup>1</sup> ;  
S. Rakotosamimanana<sup>2</sup> ; M. Jahiel<sup>3</sup> ; S. Deffontaines<sup>2</sup> ; A. Albrecht<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> *University of Antananarivo, Laboratoire des RadioIsotopes, 101 Antananarivo, Madagascar;*

<sup>2</sup> *Agrisud International, 101 Antananarivo, Madagascar;*

<sup>3</sup> *Centre Technique Horticole de Tamatave, Tamatave, Madagascar*

<sup>4</sup> *Institut de Recherche pour le Développement, Umr eco&sols, Montpellier, France*

[n.rakotovao@yahoo.fr](mailto:n.rakotovao@yahoo.fr)

Agroecological practices were proposed to farmers in central and east coast of Madagascar in order to tackle challenge of food security and improve their climate change adaptation. However, the contribution of farmer's activities to climate change and their potential of mitigation are not yet well known and need to be assessed. Therefore, this study aimed to assess the carbon footprint (CF) of smallholder farms in central and east coast of Madagascar, and to determine the impact of adoption of agroecological practices on farms CF. 20 representative farms from two regions were selected to conduct the work. We took into account the three main GHG encountered in the agricultural sector: carbon dioxide, methane and nitrous oxide. The annual balance of all emissions and all captures of GHG associated to farm activities was considered as carbon footprint of each farm. The agroecological practices identified in the two regions were (i) tree planting in forestry or agroforestry system, (ii) organic matter composting from manure and crop residues and (ii) intensified rice system which alternates drought and flooding period. Emission and capture factors of GHG the most adapted to Madagascar conditions were used for calculation. We elaborated a calculator called TropiC Farm Tool in Excel, adapted to farm scale and highlighting smallholder's activities to calculate farms CF. Results showed that (i) the intensified rice system reduced farm CF by reducing methane emission, (ii) composting organic matter reduced farm CF up to 30% by improving carbon storage in soils and (iii) agroforestry and forestry allowed farm CF reduction between 15 to 51% due to carbon storage in woody biomass. These results enable to analyse the climate mitigation potential of smallholder farms by promoting mitigating practices.

**Annexe 6 : Typologie des exploitations agricoles de la Région Itasy établie par l'ONG Agrisud International (étude réalisée sur 410 exploitations agricoles)**

Classe 1	Classe 2	Classe 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 49% de paysans non adoptants seulement</li> <li>• Pas d'illettré, 31% secondaire, 16% lycée et 5% université</li> <li>• Nombre d'actif permanent réparti entre les 3 classes (&lt;2, 2-4 et &gt;4)</li> <li>• Total de surface de tanety : <b>66%</b> ont une superficie entre <b>100 et 500 ares</b> et 10% ont plus de 500 ares</li> <li><b>Moyenne : 257 ares</b></li> <li>Surface agricole utile : <b>50%</b> ont une superficie <b>de 200-400 ares</b> et <b>29% &gt;400 ares</b></li> <li><b>Moyenne : 392 ares</b></li> <li>• Culture 1 : <b>49% autoconsommés</b>, 24% vendus et 27% les deux</li> <li>• Légumes : <b>66% ne cultivent pas</b>, 23% pour la vente</li> <li>• Arbre fruitier : <b>40% ont plus de 10 pieds</b></li> <li>• Aviculture : 40% ont 5-20 têtes et <b>35% ont &gt;20 têtes</b></li> <li>• Charrue : 40% ont 1 seule, <b>40% ont plus de 1</b></li> <li>• Sarcluse : 56% ont 1 sarcluse, <b>9% plus de 1</b></li> </ul> <p>Critère d'adoption :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Augmentation de la production (54%)</li> <li><b>2) Proximité du dispositif (26%)</b></li> <li>3) Répondre à des contraintes (25%)</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominée largement par des paysans non adoptants (82%)</li> <li>• Pas d'illettré, dominée par un niveau d'études « primaire » (64%)</li> <li>• Nombre d'actif permanent : 61% ont &lt; 2 et 30% pour 2-4 actifs</li> <li>• Total surface de tanety : <b>11% n'ont pas de tanety</b>, <b>73%</b> ont une superficie de <b>0 à 50 ares</b> et 14% entre 50 et 100 ares</li> <li><b>Moyenne : 32 ares</b></li> <li>• Surface agricole utile : <b>85%</b> ont une superficie de <b>0-100 ares</b></li> <li><b>Moyenne : 71 ares</b></li> <li>• Culture 1 : <b>80% autoconsommés</b></li> <li>• Légumes : <b>44% ne cultivent pas</b>, 36% pour la vente</li> <li>• Arbres fruitiers : <b>53% n'en possèdent pas</b>, 29% &lt; 10 pieds</li> <li>• Aviculture : <b>63% ont &lt; 5 têtes</b>, 31% ont 5-20 têtes</li> <li>• Charrue : <b>53% n'ont pas de charrue</b>, 38% 1 seule</li> <li>• Sarcluse : 57% 1 sarcluse</li> </ul> <p>Critère d'adoption :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Augmentation de la production (70%)</li> <li>2) Répondre à des contraintes (21%)</li> <li>3) Proximité du dispositif (16%)</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominée par des paysans non adoptant (82%)</li> <li>• 5% d'illettré, majoritairement, primaire (61%) et secondaire (28%)</li> <li>• Nombre d'actif permanent : 60% ont &lt;2 et 23% pour 2-4 actifs</li> <li>• Total surface de tanety : <b>74%</b> ont une superficie de <b>50 à 100 ares</b>, 16% 100-500 ares</li> <li><b>Moyenne : 103 ares</b></li> <li>• Surface agricole utile : <b>77%</b> ont une superficie de <b>100-200 ares</b>, <b>11% entre 200 et 400 ares</b></li> <li><b>Moyenne : 166 ares</b></li> <li>• Culture 1 : <b>76% autoconsommés</b></li> <li>• Légumes : <b>35% ne cultivent pas</b>, 35% pour la vente</li> <li>• Arbres fruitiers : <b>42% n'en possèdent pas</b>, 35% &lt; 10 pieds</li> <li>• Aviculture : 40% ont &lt;5 têtes, <b>49% ont 5-20 têtes</b></li> <li>• Charrue : 36% n'ont pas de charrue, <b>54% ont 1 seule</b></li> <li>• Sarcluse : 73% 1 sarcluse</li> </ul> <p>Critère d'adoption :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Augmentation de la production (62%)</li> <li><b>2) Proximité du dispositif (23%)</b></li> <li>3) Répondre à des contraintes (14%)</li> </ol>

## Annexe 7 : Liste des exploitations agricoles sélectionnées pour la présente étude

Nom de l'exploitant	Commune	Fokontany	Hameau
RANDRIANASOLO Charles	Analavory	Amparaky	Bemahatazana
RASOANAIVO Marius	Analavory	Ankorondrano	Ankorondrano
RAKOTONIAINA Nicolas René Richard	Analavory	Ngilomby	Andasibe
LAINGIDO	Analavory	Ankonabe	Andranonatoho
FANAHSOIA Julien	Analavory	Ankonabe	Andranonatoho
RAKOTONIRINA Modeste	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAZAFINDRAVELO Marcelline	Analavory	Andranomavo	Amparihivato
RAKOTOMALALA Grégoire	Analavory	Andranomavo	Amparihivato
FARAMALALA Hantavololona	Analavory	Andranomavo	Ambihifotsy
RAHARITSIMBA Hantaniaina Henriette	Analavory	Andranomavo	Ambatokely
RAKOTOMALALA Jeannot	Analavory	Andranomavo	Mangarivotra
RAKOTOARISOA Clément	Analavory	Ankonabe	Morarano
RAMASIVÉLO Mamalisoa Dieu Donné	Analavory	Ankonabe	Morarano
RAKOTONANDRASANA Andriamamenosoa	Analavory	Ankonabe	Morarano
RAZAFIMAHATRATRA Julien	Analavory	Ankonabe	Anjiro
RAZAFIMAHATRATRA Solomon	Analavory	Ankonabe	Anjiro
RAZAFIMAHATRATRA Fanomezantsoa	Analavory	Ankonabe	Anjiro
TENDRIMALALA Dany	Analavory	Ankonabe	Ankonabe
RANDRIAMANJAKA Nirina Jules	Analavory	Ankonabe	Ankonabe
RAVAOARISOA Suzanne	Analavory	Ankonabe	Ankonabe
ANDRIANAIVO Jacquot Sylvain	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAKOTONINDRINA Jean Marcel	Analavory	Andranomavo	Amparihivato
RAKOTONDRA SOA Jean Martin	Analavory	Amparaky	Tsinjovary
RAKOTONIRINA Marie Joseph	Analavory	Analavory	Imazy
RANDRIAMAMONJY Grégoire	Analavory	Ankonabe	Morarano
RASOLOFONOMENJANAHARY Jean Baptiste	Analavory	Ankonabe	Ampitanomby
RAKOTOARISOA Joseph	Analavory	Ngilomby	Andasibe
RASOARIMALALA Jeannine	Analavory	Andranomavo	Ambohibola
MAHAVERY Michel	Analavory	Ankonabe	Ankonabe
RAKOTOMALALA Jean Pierre Maurille	Analavory	Andranomavo	Betenina
RAKOTOARIMALALA Mamy	Analavory	Ankonabe	Ambodimanga
RAZAFINDRABE Félix	Analavory	Ankonabe	Ambodimanga
RASOLONJATOVO Théo	Analavory	Ankonabe	Ambodimanga
RAKOTOARIVÉLO Georges	Analavory	Ankonabe	Ambodimanga
RANDRIANARIVÉLO Jean Wilson	Analavory	Ankonabe	Morarano
RAFAMANTANANTSOA Joseph Emile	Analavory	Ankonabe	Anjiro
RABEMANANJARA Jean René	Analavory	Ankonabe	Ampitanomby
RAKOTOMANANA Jean Joseph Félix	Analavory	Ankonabe	Ankonabe
RANDRIAMPARANY Modeste	Analavory	Ankonabe	Morarano
RANDRIARIMANANA Dimby	Analavory	Amparaky	Fenomanana
RAZAKATIANA Jean Sosthène	Analavory	Amparihy	Ambodiamontana
RAKOTONDRAJAO Jean Delore	Analavory	Ngilomby	Andasibe
MANONGAFENO Régis	Analavory	Ngilomby	Andasibe
RAZANADRAZANANY Hantanirina Emma	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RANDRIANARITOVO Hanitriniaina Rolland	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAKOTONIAINA Tiana Bruno	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAKOTOARISOA Jean Baptiste	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAOLIMALALA Jacqueline	Analavory	Ankonabe	Ambatomenaloha
RAVOLOLONIRINA	Analavory	Andranomavo	Ambohibola
RAKOTOARITSIMBA Charles	Analavory	Ankonabe	Ampitanomby
RASOANIRINA(Razafindramiarana)	AMBODIRANOKELY	AMBOARA	Ambodiranokely

RAKOTOARISON William Solo	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RAKOTONDRAFARA Roger	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RANDRIANARY Tolotra	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RANDRIAMIHAJA Arison Gérard	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RANDRIANARISON Albert	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RAKOTONIRINA Fidèle	AMBODIRANOKEYLY	AMBOARA	Ambodiranokely
RAKOTOMALALA Jean de Matha	AMBODIVONA	AMBOARA	Ambodivona
RAKOTOZAFY Jean Baptiste	ANKAMORY	AMBOARA	Ankamory
RAKOTOVOLOLONA René	Ankonabe	AMBOARA	Ankonabe
RAKOTONDRANDRIANASOLO	Beronono	Amboara	Beronono
RAHARIMALALA Noëline	BERONONO	AMBOARA	Beronono
ANDRIAMIHAJA Jean Michel	BERONONO	AMBOARA	Beronono
RAMANAMPISOA Emile	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RAKOTONOELY	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RAKOTOMALALA Jean	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RAKOTOSAONA( Richard)	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RAKOTOMAHEFA (Gilbert)	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RANDRIANARISOA (Rafalimanana)	Ambatomanandrina	Ambohidehibe	Ambatomanandrina
RAMAROKOTO	Ambohipetraka	Ambohidehibe	Ambohipetraka
RANDRIANARISOA Solofonirina Désiré	Mahazina	Ambohidehibe	Mahazina
RAKOTONDRABE Jean Paul	Anosy	Ambohimarivo	Anosy
RAZAFIMAHAFALY Roger	Anosy	Ambohimarivo	Anosy
RAZANATSARA Joséphine(Phine)	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RAHELIARISOA Hanitra	Ambohijafy	Antamboho I	Ambohijafy
RAZANABOLOLONA Edvise	Ambohijafy	Antamboho I	Ambohijafy
RAZAFINDRASANDRA Bernadette	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RAMANANDRAIBE Laurence	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
ANDRINIRINA Liva(Doudou)	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RASOAMBOLOLONA	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RASOAMANAHIRANA Sabine	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RANARISON Clément	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RAKOTOVOLOLONA Maxim	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
ANDRIANANDRASANA Toky Fenomanana(Julia)	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RAKOTONIAINA Jean Marie	AMBOHIJAFY	Antamboho I	Ambohijafy
RAKOTONIAINA Marcel	Anononkomby	Antsetsindranovato	Anononkomby
RANDRIANASOLO Victor	Anononkomby	Antsetsindranovato	Anononkomby
RAKOTOVAO Edmé	Anononkomby	Antsetsindranovato	Anononkomby
RASAMOELINA Jonah	Ambohitrinibe	Fonenana	Ambohitrinibe
RALAIVAHATRA Edmond Jacques	Fonenana	Fonenana	Fonenana
RAMANANTOANINA Louis	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RAKOTONIRINA Edouard	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RAKOTONAIVO Safidy	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RAFALIMANANA Jean Louis	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
FANOMEZANA Noely Germain	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RAVELOARA	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RABEARIVelo	Tsiandangaina	Fonenana	Tsiandangaina
RATSIMIOLIARISON Rivo Mampionona	Antsorokahitra	Tsenamasoandro	Antsorokahitra
RAZAFITSOA Elisabeth	Antsorokahitra	Tsenamasoandro	Antsorokahitra
RAKOTOMALALA José	Antsorokahitra	Tsenamasoandro	Antsorokahitra
ANDRIANARISOA Fidèle	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Alatsinainikely
RABENANTENAINA Gilbert	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Alatsinainikely
RANDRIAMAROLAHY Nirina	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Alatsinainikely
RANDRIANTSOA Marotafika Jules	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Alatsinainikely
RAKOTOSOLOFO Roger	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Ambalavato

RANAIVO Jean Baptiste	Alatsinainikely	Alatsinainikely	antanetibe
RASAMOELINA Razafimandimdy	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Antsikiry
RATAVILAHY René	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Antsikiry
RATOVOARISON Edmond	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Antsikiry
RAZAFIMANAMPY Lova	Alatsinainikely	Alatsinainikely	Antsikiry
RAMIALISOA Albert landry	Alatsinainikely	Alatsinainikely	fiadanana
RANDRIAMANANDAZA Augustin	Alatsinainikely	Alatsinainikely	fiadanana
RABIBISOA Maurice	Alatsinainikely	Ambatokolaka	Ambatofolaka
RAMILISON Camille	Alatsinainikely	Ambatokolaka	Ambatofolaka
RAZAFIMANANTSOA Fulgence	Alatsinainikely	Ambatokolaka	Ambatofolaka
RAZAFINDRAIBE jean Claude	Alatsinainikely	Ambatokolaka	Ambatofolaka
RAKOTONDRAMANGA Raphaël	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Ambodimanga
RANDRIANASOLO Edouard	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Ambodimanga
RAFAMANTANANTSOA Jean Denis	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Ambohimandroso
RANDRIANARISOA Mamisoa Jean Paul	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Ankijandava
RAZAFIMAHATRATRA Clément	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Ankijandava
RABEMIRINALA Etienne	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Avaradalana
RANDRIAVONJY Charles	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Avaradalana
RANAIVOSON André	Alatsinainikely	Ambohimandroso	Marovoalavo
RAKOTONIRINA Armand	Alatsinainikely	Andranomody	Andambotokana
RABENOROSOA Alain Patrick	Alatsinainikely	Andranomody	Andranomody
RAKOTONDRALAY Gilbert	Alatsinainikely	Andranomody	Andranovelona
RAKOTOVOHITRA	Alatsinainikely	Andranomody	Andranovelona
Tolojanahary	Alatsinainikely	Andranomody	Andranovelona
RANDRIANARISOA Martin	Alatsinainikely	Andranomody	Manakambahiny
RAZANANTSOA Héléne	Alatsinainikely	Andranomody	Manakambahiny
RAHARINARIVO N. Alice Josephine	Alatsinainikely	Mahatsinjo	Avaratrinihavo
RALAIMADY Robert	Alatsinainikely	Mahatsinjo	mahatsinjo
RANDRIANANTENAINA Jean Fredy	Alatsinainikely	Mahatsinjo	mahatsinjo
RATOLOJANAHARY Solofoniaina Benjamin	Alatsinainikely	Mahatsinjo	mahatsinjo
RALANTOMANANA Jackie	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohidrano
RAZANARIKOTO Solofa Herman	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohidrano
RAHARISOA Simone Jusette	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohimandroso
RAKOTONDRAVONJY Pierrette	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohimandroso
RAZANADRAVO Herizo Jacqueline	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohimandroso
RAFALISOA Mampionona Vololomboahirana	Miarinarivo II	Igararana	Ambohitraivo
RAKOTOARIMANANA Dimisoa	Miarinarivo II	Igararana	Ambohitraivo
RAMANANJARA Jean	Miarinarivo II	Igararana	Ambohitraivo
RAHARILAMBOMANANA Isabelle Chimène	Analavory	Ambohimanana	Ambohitrivihazo
RAHARINIRINA Marie Lucie	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohitrondry
RAKOTOARIVONY Pierre	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohitrondry
RANOMENJANAHARY Solofo Vonona Jean Pierre	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohitrondry
RAZAFISOLO Alfred	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohitrondry
RAZANAKOLONA Jean Louis	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ambohitrondry
MANDIMBIARISOA Dany Hel-Rapha	Analavory	Ambohimanana	Ambotrivihazo
MANDIMBIARISOA Juliana	Analavory	Ambohimanana	Ambotrivihazo
RAZAFIMANDIMBY Jules	Analavory	Ambohimanana	Ambotrivihazo
RAKOTOMANDIMBY Claude	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Amohitrondry
RAKOTONIAINA Zafimaharavo Pierre	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ampasamanantongotra
RALAIZAFIKOTO Charles	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Ampasamanantongotra
RAHERISON Laurent	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanambao Nord
RAMANOVANTSOA Max Ferdinand	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanambao Nord
ANDRIAMANARIVO Bien Eudèle	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
ANDRIANARIMALALA Fetramampionona Voahary Lanto	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe

ANDRIANARIMALALA Nirilanto Volatiana	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
FETRIMANANA Njiva	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
LANTONIRINA Olga	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAHANTARIMALALA Berthe	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAHARIMALALA Lucienne	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAHOLONIRINA Aina Joshna	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAKOTOARIMANANA Jean de Dieu	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAKOTOARISOA Fety jean michel	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAKOTONIRINA Rijason	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAMAHOLIARIMANANA Vololomboahangy Pascaline	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RANDRIAMAMONJY Fidimalala Bruno	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RANDRIANASOLO André	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAVAOARIMALALA Minoarisoa	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAZAFINANDRASANA Norine	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAZAFINATOANDRO Julienne	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RAZAFINDRAKOTO Ranto	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antanetibe
RABENARISON Germain	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAKOTOARISON Jean de Matha	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAKOTOARIZAKA Pierre	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAKOTONARIVO Marie Joseph	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAZAFIMAMONJY Jeanne	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAZAFIMAMONJY Raymond	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAZAFINDRAMASY Tolojanahary	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsahabe IV
RAKOTOHAVANA Armand	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampandrano
RAKOTOARINOSY Jean Paul	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampandrano
RAKOTONDRATSIMBA André Fidèle	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampandrano
RANAIVOSON Jean Michel	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampandrano
TEFIARISON Maminirina	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampandrano
RAVOLOLOMALALA Hanitra Aminah	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampanimahazo
RAZAFINTSOA Hajamananirina	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampanimahazo
RAZAKAMANANTSOA Harinjato Alphonse	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Antsampanimahazo
HAJASON Nomenjanahary Harimanana jacquis	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	keliampombo
Lovasoalalalana Yvette	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	keliampombo
RAHARINIVONIRINA Joeline Landisoa	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	keliampombo
RAKOTOARIMANANA Joachin	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	keliampombo
RASOAVELOMANANA Esther	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	keliampombo
RAKOTONDRAFARA	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Morafeno
RAKOTONDRAISOLO Jean Baptiste	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Morafeno
RAKOTOSON Raymond	Miarinarivo II	Ampasamanantongotra	Morafeno
RAKOTONDRAINIBE Justin	Analavory	Ambohimana	Tsarahononana
RASOLOFOMANANA Jean Louis	Analavory	Ambohimana	Tsarahononana

## Annexe 8 : Fiche d'enquête

Fiche N° : .....

Nom de l'enquêteur : .....

Date .... /...../.....

### IDENTIFICATION DE L'EXPLOITATION

Code exploitant : .....

ZPC : .....

Nom du chef de ménage : .....

Latitude :

Longitude :

Nom du hameau : .....

Nom du Fokontany : .....

### AGRICULTURE

#### ➤ Identification des systèmes de culture :

Systèmes de culture	Oui/ Non	Nombre de parcelles
Cultures Vivrières		
Cultures Maraichères		
Agroforestières vivrières		
Agroforestières maraichères		
Foresterie pure		
Riziculture irriguée sans contre saison		
Riziculture irriguée + contre saison		

#### ➤ Identification des intrants agricoles

Intrants	OUI	NON	Quantité (kg/an)	Cultures à fertiliser
Fumier de bovins				
Fumier de bovins laitiers				
Fumiers de porcs				
Fumiers de volailles				
Compost solide				
Compost liquide				
Autres (si oui, lesquels ?)				
Urée				
NPK				
Autres engrais chimiques				
Dolomie				
Autres produits de chaulage				
Insecticides				
Fongicides				
Herbicides				

Fertilisants organiques										
Type	Compositions	Quantité <sup>1</sup> (kg)	Origine		Entreposage <sup>2</sup>			Durée moyenne d'entreposage avant épandage	Fréquence de retournement	Quantité produite t/an
			Int	Ext	Tas sans abri	Tas sous abri	Fossé			

➤ **Cultures vivrières et maraichères**

N° parcelle .....	SC : .....		OUI	NON	Devenir des résidus de récolte			
Latitude :	<u>Position topographique :</u> Sommet Versant Bas de versant Baiboho	Labour				Oui	Non	Nom cult
Longitude :		Sans labour (SCV)			Exportés de la parcelle			
Altitude (m) :					Enfouis			
Surface (ares) :					L laissés à la surface			
					Brûlés			
Nom de culture <sup>3</sup> (noter s'il y a jachère)	Début/Fin (mois)	Fertilisants		Pesticides		Production annuelle (kg)	Destination des produits	
		Types	Quantité (kg)	Types	Quantité (kg)		Autocons (kg)	Vente (kg)

<sup>1</sup> Identifier l'état du matériau (frais ou sec)

<sup>2</sup> Identifier si fermentation en anaérobie ou aérobie

<sup>3</sup> Suivant l'ordre de la rotation sur la parcelle ; noter dans la même case s'il y a association

➤ **Cultures en agroforesterie**

N° parcelle .....	SC : .....			OUI	NON	Devenir des résidus de récolte			
Latitude :	<u>Position topographique :</u>		Labour				Oui	Non	Nom cult
Longitude :	Sommet		Sans labour (SCV)			Exportés de la parcelle			
Altitude (m) :	Versant					Enfouis			
Surface (ares) :	Bas de versant					L laissés à la surface			
	Baiboho					Brûlés			
Nom de culture (noter s'il y a jachère)	Début/Fin (mois)	Fertilisants		Pesticides		Production annuelle (kg)	Destination des produits annuels		
		Types	Quantité (kg)	Types	Quantité (kg)		Autocons (kg)	Vente (kg)	
Espèces ligneuses	Nombre de pieds	Age	DHP (à 1,30m)	Fréquence de coupe	Destination du bois en m <sup>3</sup> / an				
					Bois de chauffe	Charbon	Bois d'œuvre		

➤ **Parcelles en foresterie**

N° parcelle .....		Position topographique							
Latitude :	Superficie (ares) :	Sommet							
Longitude :	Altitude (m) :	Versant							
		Bas de versant							
		Baiboho							
Espèces ligneuses	Nombre de pieds	Age	DHP (à 1,30m)	Fréquence de coupe	Destination du bois récolté (en m <sup>3</sup> / an)				
					Bois de chauffe	Charbon	Bois d'œuvre	Vente	Autres

➤ Parcelles en riziculture irriguée

N° parcelle .....			OUI	NON	Durée du cycle (jrs)	Devenir des résidus de récolte/an		Paille (kg)	Autres (kg)
Latitude :		SRI				Elevage			
Longitude :		SRA				Vente			
Altitude (m) :		SRT				Enfouis sur place			
Surface (ares) :		Contre saison				Fabrication de fertilisants			
<u>Position topographique :</u>		Riz 2è saison				Laissés à la surface			
Versant		Régime hydrique durant le riz :			Régime hydrique avant la culture de riz :				
Bas fond		Inondation			OUI	NON	Durée (jrs)		
		En permanente					Assèchement		
		En intermittence					Inondation		
Succession des cultures	Début/Fin (mois)	Fertilisants		Pesticides		Production annuelle (kg/an)	Destination des produits		
		Types	Quantité (kg)	Types	Quantité (kg)		Autocons (kg)	Vente (kg)	

## ELEVAGE

Type d'élevage	Bovins de trait		Vaches laitières		Porcins		Volaille	
Nombre de tête								
Race								
Type d'alimentation : - Fourrage - Aliment concentré - Mixte - Autres (préciser)	Type	Quantité (kg/an)						
Destination des produits (vente ou auto consom.)								
Devenir des effluents (kg/an)	Vente : Fertilisants : Autres :							

## CONSOMMATION D'ENERGIE

Type d'énergie <sup>4</sup>	Bois de chauffe (m <sup>3</sup> /an)	Charbon de bois (t/an)	Essence (m <sup>3</sup> /an)	Gasoil (m <sup>3</sup> /an)	Pétrole (litre/an)	Biodiesel (préciser) (m <sup>3</sup> /an)	Gaz (kg/an)
Quantité annuelle consommée							
Usage (domestique, activités agricoles, autres*)							

\*autres à préciser

<sup>4</sup> Charbon de bois, bois de chauffe, essence, gasoil, butane, pétrole

