



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
 ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Soutenu le 19 mai 2011

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Tantely Maminiana RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY

Document 1 : Synthèse des travaux de recherches

Jury :

Panja RAMANOELINA	Professeur Titulaire, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Président
Roeland MERCKX	Professeur, Université Catholique de Leuven	Rapporteur externe
Lilia RABEHARISOA	Professeur, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Rapporteur interne Co-Directeur des recherches
Alain ALBRECHT	Directeur de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement	Co-Directeur des recherches
Estelle RAMANANKASINA	Professeur Emérite, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Examineur
Zafera Antoine RABESA	Professeur Titulaire, Université de Majunga	Examineur

REMERCIEMENTS

Faire une synthèse des travaux de recherche passés nous oblige à jeter un regard sur le chemin déjà parcouru. Certes pour mon cas, ce chemin n'est pas encore très long en nombre d'années, mais toutefois très riche en termes d'activités de recherche et d'expériences vécues. Ce chemin, je ne l'ai pas parcouru toute seule. Tout au long de mon parcours de chercheur et d'enseignant-chercheur, j'ai été accompagnée par de nombreux collègues et étudiants sans lesquels je n'aurai pu accomplir les différentes études qui seront présentées dans ce mémoire. Ce mémoire est ainsi le résultat de collaborations fructueuses, de travail d'équipes et d'études encadrées. C'est donc à tous ceux qui ont contribué à ces études que je dédie les pages qui vont suivre.

Je tiens d'abord à remercier :

- Madame **Lilia Rabeharisoa**, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Directeur du Laboratoire des Radiosotopes. Elle a su me motiver pour entreprendre ce mémoire, me guider et m'encourager. Elle a co-dirigé ce mémoire et est également le rapporteur interne de ce travail,
- Monsieur **Alain Albrecht**, Directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR Eco&Sols. Je le remercie pour ses précieux conseils, le partenariat, la collaboration, et aussi, les plus importantes, les différentes discussions scientifiques que nous avons eues depuis plus de 8 ans maintenant, je lui suis reconnaissante également d'avoir accepté de co-diriger ce travail,
- Monsieur **Roeland Merckx**, Professeur à l'Université Catholique de Leuven, qui a accepté d'être le rapporteur externe de ce mémoire,
- Madame **Estelle Ramanankasina**, Professeur Emérite à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), qui a accepté d'évaluer ce mémoire,
- Monsieur **Zafera Antoine Rabesa**, Professeur Titulaire à l'Université de Majunga, qui a également accepté d'évaluer le présent mémoire, malgré ses multiples occupations.
- Monsieur **Panja Ramanoelina**, Professeur Titulaire à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, qui a accepté d'évaluer ce travail et de présider le jury de ce mémoire. Je lui remercie également pour les différents conseils qu'il m'a prodigués pour améliorer le présent document.

Je remercie également :

- Monsieur **Martial Bernoux**, Directeur de Recherche à l'IRD, UMR Eco&Sols, qui a accepté de diriger ce travail lors de mon séjour à Eco&Sols, Montpellier. Je lui suis reconnaissant pour tout son soutien, ses conseils, ses encouragements dans la réalisation du présent mémoire,

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

- Monsieur **Christian Feller** , Directeur de Recherche de Classe Exceptionnel à l'IRD, qui depuis la thèse n'a cessé de jeter un regard critique sur mes travaux de recherche,
- Monsieur **Jean Rasoarahona**, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques et Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, pour les conseils et encouragements qu'il a fait montre à mon égard pour la réalisation de ce mémoire.
- Messieurs **Jean Chrysostome Rakotondravelo** et **Arsène Randrianariveloseheno**, pour avoir facilité mes participations aux cours à l'ESSA,
- tous les étudiants, qui ont contribué à la réalisation du présent mémoire. Je pense particulièrement à **Haja Ravelojaona**, **Fela Nirina Rakotondrasolo**, **Vola Ramaroson**, **Jocelyn Rakotondramanana**, **Ranto Solofo**, **Sismondry Ramiandrisoa** et **Tafita Andrianoroharison**, mais aussi à **Marie Lucia Fanjaniaina**, **Narindra Rakotovao**, **Heriniony Andrianasolo**, **Joyce Razakaratrio** et **Nantenaina Rabetokontany**,
- tous mes collègues, qui sont devenus depuis des complices voire des amis. Je pense particulièrement à **Lydie Lardy**, **Tiphaine Chevallier**, **Marie Paule Razafimanantsoa**, **Tovo Rafolisny**, **Herintsitohaina Razakamanarivo**, **Michel Rabenarivo**, **Andry Andriamananjara**, **Onja Razanakoto**, **Ando Razakavololona** et **Hery Razafimahatratra**,
- tous les techniciens du Laboratoire des Radiosotopes,
- le personnel enseignant et administratif du Département Agriculture de l'ESSA,
- le personnel de la Représentation de l'IRD à Madagascar,
- tous les partenaires de recherche, plus particulièrement : l'ONG TAFA, l'URP SCRiD, le FOFIFA, le Cirad, le GSDM, le CTHT, AgriSud International et le Projet BV-Lac

Sans oublier :

- Madame **Odette Rasoarimalala**, pour ses aides et appuis lors de la résolution des différentes démarches administratives,
- **dada sy neny** et **dada sy mama**, pour leurs appuis inconditionnels de tout genre, appuis sans les quels je n'aurai pas pu mener à termes ces travaux.

Enfin, un mot pour ma famille : **Bob**, **Onitiana** et **Noah**, pour m'excuser des périodes d'absence et des soucis qui me suivent parfois jusqu'à la maison. Merci de partager ma vie et de m'apporter tant de joies et de bonheurs. Vous êtes mon appui et la source d'énergie qui me permet d'avancer encore plus loin dans mon métier d'enseignant-chercheur.

Merci à tous.

Sommaire

I. CADRE GENERAL DE RECHERCHE.....	10
II. SYNTHESE DE MES TRAVAUX ET PRINCIPAUX RESULTATS SCIENTIFIQUES (PERIODE 2003-2010).....	16
II.1. STOCKAGE DE C DANS LES SYSTEMES SCV : QUANTIFICATION ET DETERMINANTS.....	16
II.1.1. <i>Quantification du stockage de C sous systèmes SCV</i>	16
II.1.2. <i>Les déterminants du stockage de C pour les systèmes SCV étudiés.</i>	24
II.2. PROTECTION DU C DANS LE SOL.....	37
II.2.1. <i>Protection physique du C</i>	39
II.2.2. <i>Protection physico-chimique du C</i>	45
II.3. CONCLUSIONS	51
III. PERSPECTIVES (PROJET DE RECHERCHE)	53
III.1. VERS DES PRATIQUES AGRICOLES SEQUESTRANTES	53
III.1.1. <i>Introduction et justification</i>	53
III.1.2. <i>L'agroforesterie : étude bibliographique commentée</i>	54
III.1.3. <i>Riziculture : étude bibliographique commentée</i>	60
III.1.4. <i>Objectifs et questions de recherche</i>	63
III.1.5. <i>Mise en œuvre</i>	64
III.2. LA PROTECTION DU C DU SOL : VERS LA PROTECTION CHIMIQUE ?	66
III.2.1. <i>Etude bibliographique commentée</i>	66
III.2.2. <i>Objectifs et questions de recherche</i>	70
III.2.3. <i>Mise en œuvre</i>	71
IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	74

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Dynamique de la MO et de la structure du sol en semis direct avec couverture végétale (Séguy et al., 2009)	14
Figure 2 : Les déterminants de la séquestration du C dans le sol à l'échelle d'un agrosystème donné.	15
Figure 3 : Relations entre (a) la pluviométrie (P) et (b) la température (T) et les stocks de C en systèmes SCV. Les stocks de C sont exprimés à masse équivalente de l'horizon 0-20 cm afin de pouvoir comparer les différents types de sols entre eux.	26
Figure 4 : Relation entre la texture du sol (A+LF ; argile+limon fin) et les stocks de carbone du sol sous systèmes SCV à Madagascar pour divers types de sols à argiles 1:1 et 2 :1.	27
Figure 5 : Effet de la fertilisation sur les niveaux de stocks du C pour différents types de sols. ...	29
Figure 6 : Effet des systèmes SCV sur les stocks de C pour différents types de sol.	32
Figure 7 : Profil des concentrations en C des systèmes SCV (NT) en et des systèmes en labour conventionnel (CT) avec 2 modalités de restitution de résidus de récolte (-R : résidus exportés et +R : résidus restitués) après 2 ans (T0 : mise en place du dispositif, T1 : 1 ans et T2 : 2 ans) de mode de gestion.	35
Figure 8 : Effet à court terme (2 ans) des systèmes SCV (NT) en comparaison avec des systèmes en labour conventionnel (CT) et du mode de restitution des résidus de récoltes (-R : résidus exportés et +R : résidus restitués) sur les stocks de C (couche 0-20 cm).	36
Figure 9 : Les différentes formes de protection de la MO dans le sol, modifiée de Rasse et al. (2005)	38
Figure 10 : Corrélations entre teneurs en C (SOC), teneurs en macroagrégats stables (MA), texture du sol (Clay+Fine silt) et C protégé physiquement dans le sol (Protected SOC). (n=15, Test de Kendall).	44
Figure 11 : Concentrations (g.kg^{-1} fraction) et contenus (g.kg^{-1} sol) en C des traitements en semis direct (NT) et labour (CT) en culture de riz ou soja, après une année de mise en place du dispositif. Couche 0-5 cm (Moyennes et écart-types, n=4).	49

Figure 12 : Concentrations (g.kg^{-1} fraction) et contenus (g.kg^{-1} sol) en C des fractions granulométriques issues des différents traitements pour les trois types de sol étudiés..... 50

Figure 13 : Schéma conceptuel des paramètres qui influencent la séquestration des GES pour les agrosystèmes étudiés..... 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des différents dispositifs agronomiques	20
Tableau 2 : Dénomination des systèmes de cultures.	21
Tableau 3 : Stocks de carbone du sol, en Mg C.ha ⁻¹ .sol, à masse de sol équivalente à 1479 Mg sol.ha ⁻¹ . (Valeurs moyennes et écart-types, n=4).....	24
Tableau 4 : Sols sélectionnés pour l'étude de la protection physique du C dans le sol.....	41
Tableau 5 : Quantification des niveaux de la protection physique du C dans les sols pour différents systèmes SCV et pour différents types de sols. (Valeurs moyennes et écart-types, n=3)	43
Tableau 6 : Valeurs indicatives du stock de C du sol et du potentiel de séquestration de C dans principaux types d'agrosystèmes en milieu tropical (Nair <i>et al.</i> 2009b)	57

LISTE DES ABREVIATIONS

AFD	: Agence Française de Développement
BRL	: Bas Rhône et du Languedoc (ancienne Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas Rhône et du Languedoc ou CNARBRL, devenue société BRL)
BV-Lac	: Projet « Bassin Versant du Lac Alaotra »
BVPI	: Projet « Bassins Versants et Périmètres Irrigués à Madagascar »
C	: Carbone
CT	: Labour conventionnel (Conventional Tillage)
FFEM	: Fonds Français pour l'Environnement Mondial
GES	: Gaz à effet de serre
GSDM	: Groupement pour le Semis Direct à Madagascar
MDP	: Mécanismes pour le Développement Propre
MO	: Matière organique
MOS	: Matière organique du sol
NT	: Non-labour (No-Tillage)
SCV	: Systèmes en semis direct avec couverture végétale
SD	: Semis Direct
SDMAD	: Semis Direct de Madagascar
SRA	: Système de Riziculture Améliorée
SRI	: Système de Riziculture Intensif
TAFA	: Tany sy Fampanandrosoana

Bref rappel des principales étapes de la carrière scientifique

J'ai débuté ma carrière de chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) au sein de l'Unité de recherche (UR) « Séquestration de Carbone (SeqC) », dirigée par C. Feller. En effet en janvier 2002, j'ai commencé mon stage de DEA en Sciences du Sol, avec l'UR SeqC sur la séquestration du carbone dans les sols cultivés en canne à sucre non-brûlée avant récolte au Brésil. Même si les études ont été effectuées sur des sols du Brésil, la thématique abordée était déjà révélatrice de la thématique que j'aborderai par la suite dans ma carrière de chercheur / enseignant-chercheur.

Après le DEA, grâce à l'obtention d'une bourse de l'Agence Universitaire pour la Francophonie (AUF), j'ai initié ma thèse de doctorat intitulée *Stockage et protection de carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches*, en octobre 2002, avec l'UR SeqC de l'IRD, qui est devenue en 2004 l'UR Séquestration de Carbone et Biofonctionnement des Sols (SeqBio, Directeur J.L. Chotte). L'encadrement de la thèse était assurée par : MM. Christian Feller et Alain Albrecht du côté IRD, (feu) M Robert Randriamiharisoa de l'ESSA et Mme Lilia Rabeharisoa du Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo. Ma thèse a été ainsi à l'origine de la collaboration forte qui s'est établie par la suite entre l'UR SeqBio, devenue ensuite UMR Eco&Sols, de l'IRD et le LRI. Cette thèse a été effectuée sur les dispositifs agronomiques expérimentaux de l'ONG TAFa à Antsirabe, mais aussi en très forte collaboration avec l'unité de recherche en partenariat (URP) Scrid, qui regroupe le Cirad, l'Université d'Antananarivo et le Fofifa. Les travaux de ma thèse ont été menés dans le cadre d'un projet d'appui à l'agroécologie financé par le Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) et l'Agence Française de développement (AFD).

Après ma soutenance en novembre 2005, j'ai fait un court post-doc à Montpellier, à l'UMR Eco&Sol. Afin de vérifier la généralité de mes travaux de thèse, le sujet était l'étude de stockage de carbone sous systèmes SCV en conditions pédoclimatiques diversifiées.

J'ai ensuite été recrutée à l'Université d'Antananarivo en juin 2006, en tant qu'enseignant-chercheur au Laboratoire des RadioIsotopes et j'ai ainsi continué mes travaux de recherches sur le stockage/séquestration de carbone en systèmes SCV, mais en abordant cette fois-ci différents paramètres tels que l'effet de l'âge des systèmes, les types de sols et le suivi de la dynamique de C à court terme. J'ai également débuté les travaux sur les mécanismes de protection physico-chimique et physique du C dans le sol. Ces travaux ont été et sont toujours menés avec l'UMR Eco&Sols (M Alain Albrecht, Mmes Lydie Lardy et Tiphaine Chevallier), le FOFIFA (Mme Bodo Rabary), le CIRAD (MM. Jean Marie Douzet, Krishna Naudin et Eric Scopel) et l'ONG Tafa (ses différents techniciens et ingénieurs), et, plus récemment, le projet BV-Lac et AgriSud International.

Concernant les enseignements, depuis mon recrutement, j'ai dispensé des cours de Sciences du Sol, de Pédologie Générale pour les 2^{èmes} années de l'ESSA, et Pédologie Descriptive pour les 4^{èmes} années et Pédologie Appliquée pour les 5^{èmes} années du Département Agriculture. J'ai également encadré plusieurs mémoires d'ingénieurs et de DEA relatifs aux thématiques de stockage/protection de C sous systèmes SCV.

Depuis 2007, je suis responsable d'une unité de recherche du LRI intitulée *Sols et Changements Climatiques*, et, au sein de celle-ci, je suis responsable des thématiques qui tournent autour des changements globaux et de la séquestration des gaz à effet de serre, et à ce titre j'entretiens des collaborations étroites de recherche avec l'équipe « Carbone et Changement Globaux » de l'UMR Eco&Sols ».

I. Cadre général de recherche

Stocker du carbone (C) atmosphérique dans le sol ou dans la végétation est l'une des alternatives permettant l'atténuation de l'effet de serre d'origine anthropique. En effet, bien que l'effet de serre soit un phénomène naturel, l'industrialisation poussée depuis la fin du 19^{ème} siècle, a entraîné une augmentation exponentielle des teneurs en gaz à effet de serre (GES) de l'atmosphère, dont les principaux sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). La teneur en CO₂ est passée de 280 ppm à 379 ppm, celle du CH₄ est passée de 715 ppb à 1732 ppb, et celle de N₂O de 270 ppb à 319 ppb entre 1750 et 2005, soit des augmentations respectives de 135, 242 et 118% (IPCC 2007).

Ces émissions sont fortement liées aux activités humaines. Elles proviennent essentiellement de l'utilisation des combustibles fossiles (7,2 GtC.an⁻¹ entre 2000 et 2005 contre 6,4 GtC.an⁻¹ pour les années 90) mais, aussi des changements d'usages des terres (1,6 GtC.an⁻¹ dans les années 90), et de l'agriculture (par exemple, la riziculture et l'élevage pour le CH₄ et la fertilisation pour le N₂O) (IPCC 2007).

Les potentiels de réchauffement global (PRG) de ces trois gaz ne sont pas identiques. En prenant le CO₂ comme référence, on sait que le CH₄ et le N₂O présentent des valeurs de PRG de 23 fois et 296 fois plus élevés que le CO₂, respectivement (IPCC 2001). Ainsi en termes de réchauffement, 1 kg de N₂O est équivalent à 296 kg de CO₂. Il est donc important de considérer les trois gaz pour les bilans de GES provenant d'un secteur ou d'un mode de gestion des terres donnés. Les émissions, ou la séquestration de GES, sont alors généralement exprimées en équivalent CO₂ ou C-CO₂.

Face à ces augmentations de teneurs en GES, des actions sont ainsi entreprises afin de réduire les émissions de GES et/ou d'augmenter leur séquestration/stockage dans des compartiments stables. Pour les activités liées à l'utilisation des terres, le changement d'utilisation des terres et la foresterie (LULUCF selon l'acronyme anglais), les compartiments considérés comme puits potentiel de C sont la « plante ou le végétal » et le compartiment « sol ». Si en foresterie, ces deux compartiments peuvent être considérés, en agriculture c'est essentiellement le

compartiment « sol » qui est impliqué comme puits de C car le stockage de C dans la plante est fugace, rarement supérieur à une année.

Le sol constitue un important réservoir de carbone, environ 1500 Gt de C organique dans le premier mètre, soit de 2 à 3 fois plus que la végétation (600 Gt C) et l'atmosphère (780 Gt). Une faible variation de la quantité de C émis ou stocké dans le sol peut ainsi affecter significativement la quantité de C dans l'atmosphère. L'augmentation annuelle de C au niveau de l'atmosphère est estimée à 3,3 Pg .an⁻¹ (Follett 2001). Elle représente environ 0,5% du stock de C des 30 premiers centimètres de sol, et pourrait ainsi être compensé (ou absorbé) par un stockage annuel équivalent de C au niveau du sol par des pratiques agricoles ou forestières.

Diverses pratiques agricoles permettent de séquestrer du C dans le sol.

L'utilisation des « mulch » à la surface du sol est souvent citée par la littérature comme des pratiques séquestrantes (Neto *et al.* 2010; Razafimbelo *et al.* 2006) du fait de l'apport importante de MO et de l'amélioration des propriétés du sol qui en résulte. Des travaux concernant le Brésil ont montrés que les systèmes à mulch peuvent stocker en zones subtropicale et tropicale jusqu'à 1.7 t C.ha⁻¹.an⁻¹ (Bernoux *et al.*, 2006). L'agroforesterie, via l'association de l'arbre dans le système de culture permet à la fois de stocker du C dans la biomasse végétale et dans le sol ; le stockage dans ces deux compartiments varie suivant les systèmes, de 0,3 à 15 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ (Nair *et al.* 2009a). Les rotations et/ou association de cultures, suite aux interactions légumineuses/graminées induisent une meilleure disponibilité des éléments minéraux (surtout N et P) et par conséquent, une augmentation de la production et peuvent également entraîner, via les restitutions végétales au sol (pailles, feuilles, racines, etc.) une accumulation de C dans le sol (Hutchinson *et al.* 2007). De même pour la fertilisation et l'irrigation (Hutchinson *et al.* 2007; Robert 2002; Wu *et al.* 2008).

La réduction ou la suppression du labour peut également conduire vraisemblablement à une diminution de la minéralisation du C du sol et donc apparaître comme une technique favorable à des bilans de C améliorés.

Ainsi, les systèmes en semis direct avec couverture du sol (abrévés en SCV), qui associent mulch et non labour, font partie des pratiques agricoles potentiellement séquestrantes les plus en avant.

Les systèmes SCV ont été développés pour leur effet positif sur le contrôle de l'érosion (Bertol *et al.* 2007; Scopel *et al.* 2005). Ils présentent toutefois d'autres avantages : le mulch de résidus à la surface du sol augmente la capacité de rétention en eau des horizons de surface (Fischer *et al.* 2002), stimule les activités biologiques (Blanchart *et al.* 2007) et améliore ainsi la porosité du sol (Singh *et al.* 2007) et l'infiltration de l'eau (Saha *et al.* 2010). Le stockage de C par ces systèmes peut être important et peut varier de 0,4 à 1,7 Mg C.ha.an⁻¹ selon les observations faites par Bernoux *et al.* (2006) au Brésil. L'amplitude de ce stockage dépend de plusieurs paramètres, notamment le climat (température et conditions d'humidité), les propriétés du sol (texture, teneurs en argile, minéralogie), et la quantité et la qualité des résidus restitués au sol.

Du fait de ces multiples avantages, les systèmes SCV sont considérés comme durables et assurent ainsi des services écosystémiques tels : l'amélioration de la fertilité (du sol), la régulation des organismes du sol (amélioration de la biodiversité), la régulation des flux d'eau (amélioration de l'infiltration, diminution du ruissellement et de l'érosion) et la régulation de la composition de l'atmosphère et du climat (lutte contre l'effet de serre par séquestration de C dans le sol).

Les variations de stocks de C dans le sol sont dues (i) aux variations des apports organiques (quantité et qualité), (ii) aux transferts de C sous forme soluble (lixiviation, ruissellement) ou sous forme solide (érosion) et (iii) aux pertes par minéralisation de la matière organique du sol (MOS).

Pour les systèmes SCV, qui limitent déjà largement les pertes de C par érosion ou ruissellement, le stockage de C va alors être déterminé en priorité par les quantités des apports de C provenant des résidus de récolte, et de la manière dont ce C stocké est stabilisé dans le sol (donc des modalités de protection).

Mes principaux questionnements de recherche sont donc les suivantes :

- **Quelles quantités de C peuvent être stockées dans les sols malgaches par les divers systèmes SCV proposés par la recherche?**
- **Quels sont les déterminants (dans le sens des niveaux de restitutions, sols et climat, mais aussi protection) qui expliquent ce stockage, et comment les hiérarchiser ?**

Pour répondre à ces questions, il a fallu identifier différents systèmes SCV en conditions pédoclimatiques contrastées, de différents âges, car les niveaux de stockage peuvent être différents selon l'âge des systèmes (car la dynamique de stockage de C dans le sol n'est jamais complètement linéaire (Expertise INRA, 2002).

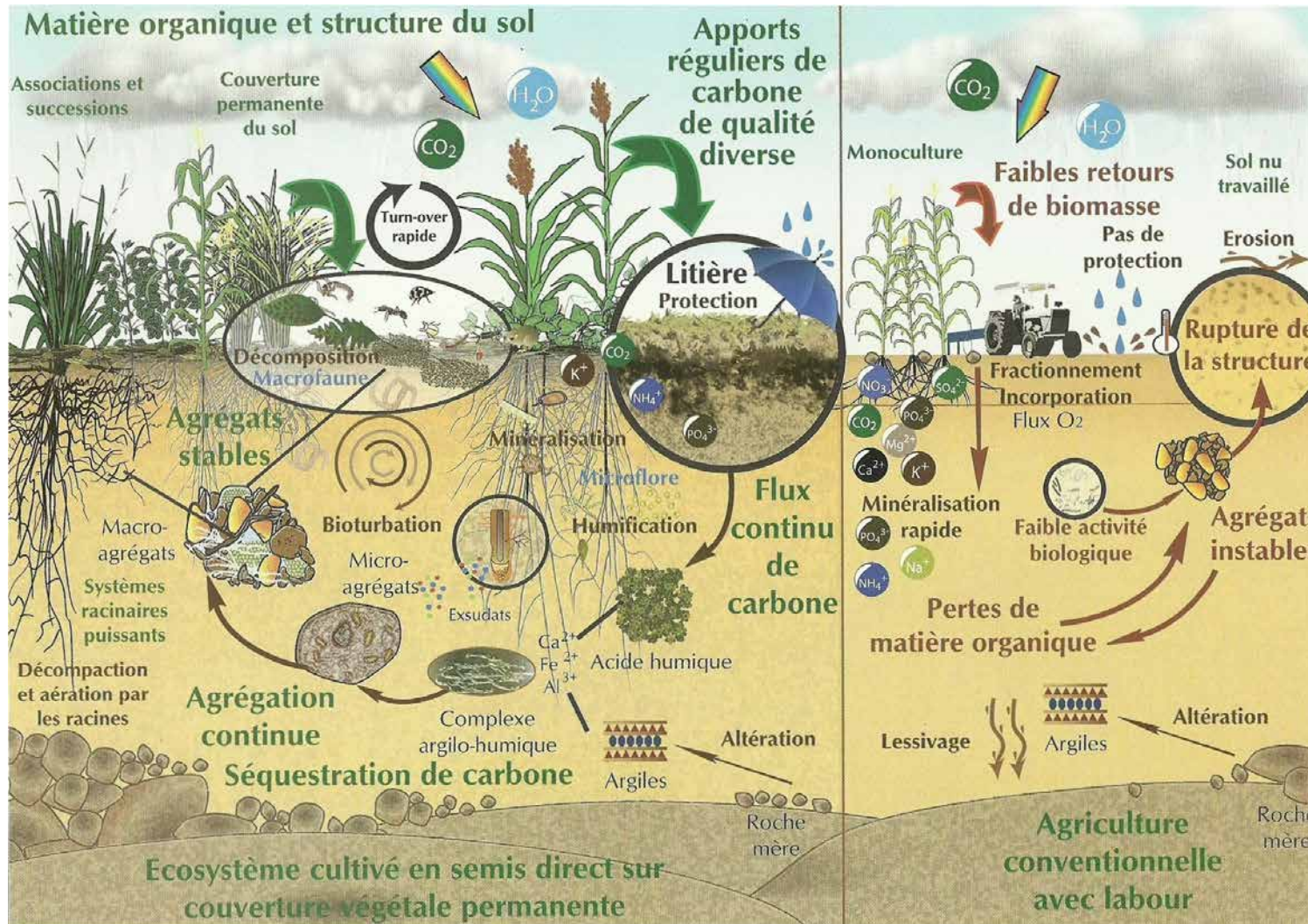


Figure 1 : Dynamique de la MO et de la structure du sol en semis direct avec couverture végétale (Seguy et al. 2009).

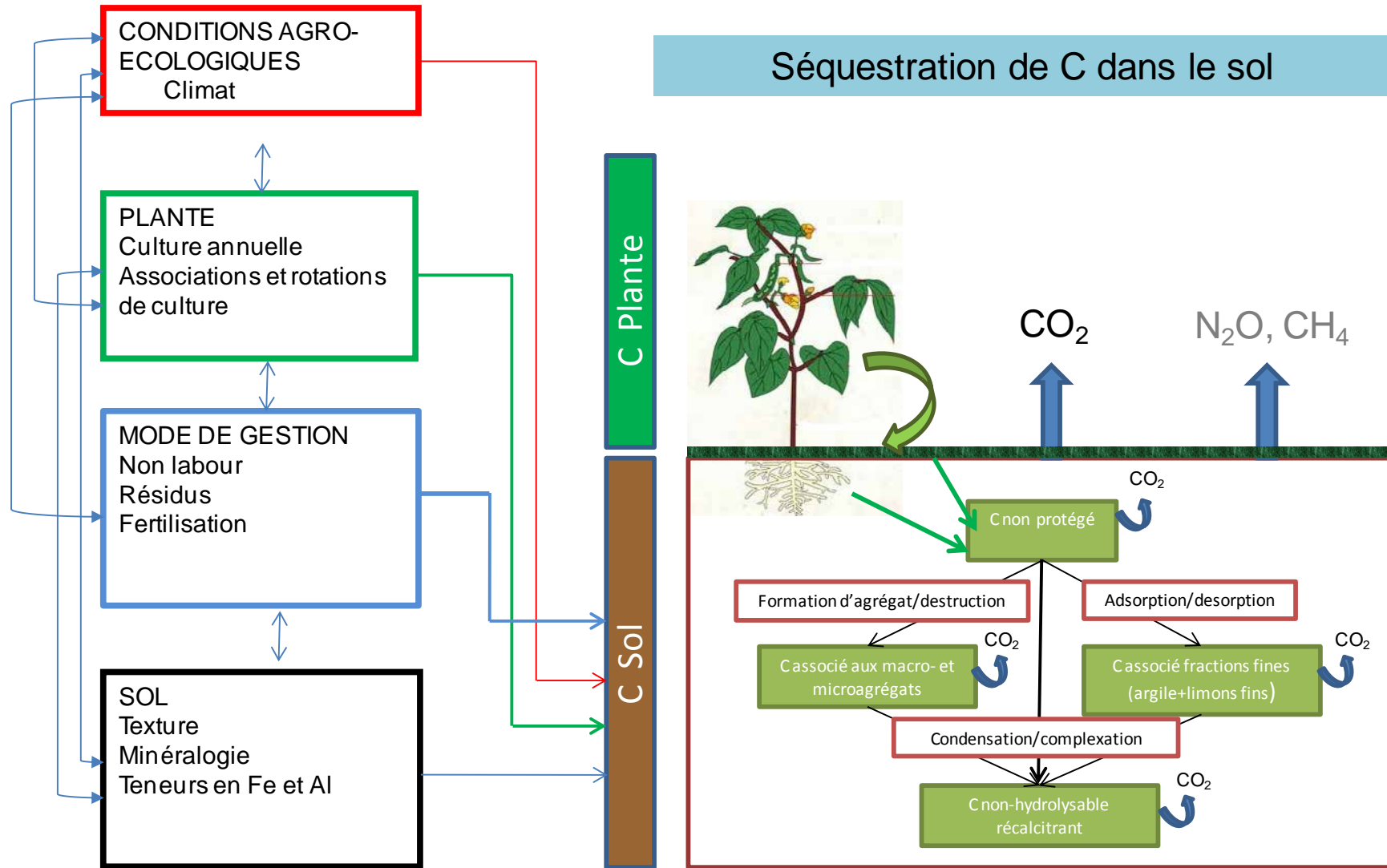


Figure 2 : Les déterminants de la séquestration du C dans le sol à l'échelle d'un agrosystème donné.

II. Synthèse de mes travaux et principaux résultats scientifiques (période 2003-2010)

Mes travaux de recherches se divisent essentiellement en deux parties :

- la première partie consiste à quantifier le stockage de C dans les systèmes SCV, en essayant de rechercher et d'étudier les déterminants majeurs de ce stockage,
- la deuxième partie consiste à étudier les formes de C dans la perspective d'une meilleure connaissance des processus de protection vis-à-vis de la minéralisation microbienne, et, *in fine*, de leur stabilisation dans le sol. Parmi les méthodes permettant d'aborder la qualité du C stocké, je me suis intéressée aux formes associées aux fractions granulométriques du sol (voir Feller, 1995 ; Feller et Beare, 1997).

II.1. Stockage de C dans les systèmes SCV : quantification et déterminants

II.1.1. Quantification du stockage de C sous systèmes SCV

Les systèmes SCV sont des systèmes agro écologiques basés sur trois principes : (i) le non travail du sol, (ii) la couverture permanente du sol par des plantes de couverture ou des mulch (couverture morte) et (iii) le semis à travers la couverture du sol par le biais d'un outil spécial. Les systèmes SCV ont été créés afin de contrôler les pertes par érosion. Ils ont connu un grand développement aux Etats Unis et au Brésil où la superficie peut atteindre jusqu'à 10 millions d'hectares. A Madagascar, ces systèmes ont été introduits au début des années 1990, et les premières expérimentations ont été effectuées par l'ONG Tafa en partenariat avec le Cirad. Les premiers dispositifs expérimentaux sur les systèmes SCV ont été installés dans la région du Vakinankaratra en 1991. D'autres dispositifs ont été ensuite installés dans d'autres régions, notamment à Manakara, Tuléar, et au Lac Alaotra. Ces systèmes ont été ensuite diffusés en milieu paysan par différents ONGs comme Fafiala, SDMAD, BRL, BV Lac, BVPI, Interaid et AVSF (Agronome et Vétérinaires Sans Frontières).

Les systèmes SCV présentent certes des avantages agronomiques (contrôle de l'érosion, amélioration de la porosité du sol, de l'infiltration de l'eau et de la capacité de rétention en eau,

stimulation de l'activité biologique), mais peuvent ainsi également présenter des avantages environnementaux, notamment par le stockage du C d'origine atmosphérique dans le sol. Toutefois, comme dit précédemment, la quantité de C stocké dans le sol peut dépendre de plusieurs facteurs (type de sol, quantité et qualité de l'apport, travail du sol, mode de fertilisation, etc.).

L'existence de dispositifs expérimentaux localisés dans différentes conditions pédoclimatiques contrastés permet ainsi une quantification des stocks de C pour différents de types de sol, mais aussi pour différents niveaux de fertilisation et différentes rotations/systèmes SCV.

a) Les dispositifs expérimentaux étudiés pour la quantification du stockage de C

Les quatre régions où des dispositifs expérimentaux de l'ONG TAFE ont été installés, ont été sélectionnées : Antsirabe, Manakara, Tuléar et Lac Alaotra.

Ces dispositifs sont installés dans des contextes pédo-climatiques contrastés Ces situations comprennent différents types de sols : des sols ferrallitiques avec ses variantes (typique, hydromorphe, rajeuni, humifère), fersiallitiques, ferrugineux tropicaux, et peu évolués ; ainsi que différents types de climat : tropical humide, tropical moyenne altitude, semi-aride et tropical d'altitude. Ces situations sont présentées dans le Tableau 1.

Des niveaux et formes de fertilisation variées ont été également considérés: faibles ou élevées, organiques et/ou minérales (Tableau 2).

Des prélèvements de sols ont été effectués en 2003, pour le cas d'Antsirabe, et en 2006-2007 pour les autres sols (Manakara, Lac Alaotra, Tuléar), à 5 profondeurs (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm), à l'aide d'un cylindre de volume connu afin de déterminer la densité apparente du sol. Les sols prélevés ont été séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

Les teneurs en C ont été mesurées suivant la méthode Walkley et Black (1934) par combustion en voie humide, la MO étant oxydée par du bichromate de potassium en excès.

Les stocks de C sont calculés à partir des concentrations en C et des valeurs de densités apparentes. Toutefois, afin de pouvoir comparer les différents types de sol entre eux, les stocks sont ramenés à une même masse de sol dénommée « masse équivalente ».

La texture du sol est déterminée par tamisages successifs du sol suivis d'une sédimentation-centrifugation du sol après destruction de la MO afin de séparer les particules élémentaires du sol (sables grossiers et fins, limons grossiers et fin, argile). Pour cela, 10 g de sol sont additionnés de 50 ml H₂O₂ (50 vol.) à froid pendant une nuit, puis portés à 80°C pendant 3 h. La suspension est additionnée de 20 ml de pyrophosphate de sodium à 40g/l et agitée pendant 4h. Les fractions sont ensuite séparées par tamisage sur des tamis de 200, de 50 et de 20 µm afin de séparer les sables grossiers, sables fins, limons grossiers). Le filtrat qui passe à travers le tamis de 20 µm est ensuite sédimenté puis centrifugé afin d'isoler les limons fins et l'argile. Toutes les fractions recueillies sont séchées à l'étuve à 105°C.

b) Principaux résultats sur la quantification du stockage de C sous SCV

Mes premiers résultats sur les systèmes SCV de la région d'Antsirabe (campagne de prélèvement 2003) ont montré un stockage de C de l'ordre de 0,7 à 1,0 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour un horizon de 20 cm de sol et pour des systèmes SCV âgés de 11 ans. Ce stockage est déjà important car si Bernoux et al. (2006) ont donné des stockages de C sous SCV variant de 0,4 à 1,7 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ en région subtropicale, Six et al. (2002b) dans une revue bibliographique donne plutôt des valeurs moyennes de 0,35 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹. Les valeurs élevées trouvées pour la situation d'Antsirabe s'expliquent à la fois par les caractéristiques du climat et par celles des sols :

- le climat est de type subtropical d'altitude, c'est-à-dire relativement frais (Température moyenne de 16°5, Tableau 1), ce qui est défavorable à l'activité microbienne et donc à la minéralisation de la MO du sol et du C.

- le sol est un sol ferrallitique très argileux et présentant des caractères andiques. Aussi bien la texture argileuse (au moins 80% d'argile+limons fins) que la présence d'allophanes et de

constituants amorphes (caractère andique) sont très favorables à une protection physique et physico-chimique du C dans le sol (voir section II.2).

Il s'est alors avéré nécessaire de vérifier les variations des stocks de C sous systèmes SCV en fonction des paramètres disponibles, notamment le climat, les propriétés du sol (texture, minéralogie), l'âge des systèmes et le niveau de fertilisation, à partir de l'ensemble des dispositifs en SCV disponibles, donc incluant ceux du Lac Alaotra, de Manakara et de Tuléar.

L'effet de la durée du système est abordé suivant une approche synchronique, les stockages de C en fonction du temps étant alors estimés à partir de la différence de stocks de C entre un système SCV donné et un système conventionnel à un même instant t . Les systèmes conventionnels pris comme référence sont des situations en labour conventionnel ou des situations en défriche-brûlis pour les régions où le labour n'existe pas.

Les résultats ont montré des effets positifs des systèmes SCV sur les stocks de C au niveau des horizons de surface. Ce qui est généralement le cas des systèmes à mulch ou l'activité biologique est importante dans la partie superficielle entraînant une lixiviation des MO dans la partie superficielle d'une part et une activité importante de la faune du sol qui entrainerait un mélange intime de la MO aux fractions minérales du sol les rendant ainsi difficilement minéralisable (Razafimbelo 2005). Alors qu'en labour conventionnel, la MO a été mélangée aux horizons plus profonds accélérant ainsi sa minéralisation (Balesdent *et al.* 2000).

Les stockages de C sous SCV pour les différents types de sols et les différents systèmes de rotation varient de 0 à 1,816 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ avec une valeur moyenne de 588 ± 483 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour les premiers 1479 Mg sol.ha⁻¹ (horizon équivalent à 0-20 cm). Ces valeurs sont ainsi cohérentes avec celles déjà trouvées pour les sols d'Antsirabe et avec les valeurs de stockage de C sous systèmes en semis direct données par la littérature.

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 1 : Caractéristiques des différents dispositifs agronomiques

Site	Climat	P (mm)*	T° (°C)*	Localité	Types de sol	Granulométrie (%)		
						Argile	Limon	Sable
Manakara (Sud Est)	Tropical humide	2577	23,1	Ankepaka 22°11'S, 47°52'E	Sol hydromorphe à pseudo-gley (H)	25	50	25
		2560	23,1	Andasy 22°12'S, 47°50'E	Sol ferrallitique typique 1 (Ft1)	53	34	13
		2439	23,0	Faraony 21°49'S, 47°55'E	Sol ferrallitique typique 2 (Ft2)	30	10	60
Lac Alaotra (Centre Nord-Est)	Tropical de moyenne altitude	1178	20,8	Marololo 17°32'S, 48°32'E	Sol ferrallitique rajeuni (Fr)	20	38	42
					Sol peu évolué d'apport (PE)	15	17	68
					Sol ferrallitique hydromorphe (Fhy)	39	29	32
Tuléar (Sud-Ouest)	Semi-aride	623	23,3	Andranovory 23°7'S, 44°14'E	Sol fersiallitique (FS)	35	26	39
		733	22,8	Sakaraha 22°54'S, 44°37'E	Sol ferrugineux (FU)	10	11	79
Antsirabe (Hautes-Terres)	Tropical d'altitude	1382	16,5	Andranomanelatra 19°47'S, 47°06'E	Sol ferrallitique humifère (Fhu)	62	19	19

* (Hijmans *et al.* 2005)

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 2 : Dénomination des systèmes de cultures.

Sol	Systèmes	Age	Mode de gestion	Rotation	Fertilisation
		ans			
H	LB RS F0	8	Labour	Riz (<i>Oriza sativa</i>) en association avec Stylosanthes (<i>Stylosanthes guyanensis</i>)	F0
H	SD RS F0	8	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	F0
H	SD RP F0	8	Semis direct	Riz en association avec Pueraria (<i>Pueraria phaseolides</i>)	F0
H	LB RS Fm	8	Labour	Riz en association avec Stylosanthes	Fm
H	SD RS Fm	8	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	Fm
H	SD RP Fm	8	Semis direct	Riz en association avec Pueraria	Fm
Ft1	Défriche Riz-Manioc	4	Défriche	Riz en rotation	-
Ft1	SD RS F0	4	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	F0
Ft1	SD RS Fm	4	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	Fm
Ft2	LB RS F0	4	Labour	Riz en association avec Stylosanthes	F0
Ft2	SD RS F0	4	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	F0
Ft2	LB RS Fm	4	Labour	Riz en association avec Stylosanthes	Fm
Ft2	SD RS Fm	4	Semis direct	Riz en association avec Stylosanthes	Fm
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	8	Labour	Maïs (<i>Zea mays</i>) associé à une légumineuse en rotation annuelle avec du riz associé à une légumineuse	Fu
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	8	Semis direct	Maïs associé à une légumineuse en rotation annuelle avec du riz associé à une légumineuse	Fu
Fr	LB M-leg/R-leg Fu+Fm	8	Labour	Maïs associé à une légumineuse en rotation annuelle avec du riz associé à une légumineuse	Fu+Fm
Fr	SD M-leg/R-leg Fu+Fm	8	Semis direct	Maïs associé à une légumineuse en rotation annuelle avec du riz associé à une légumineuse	Fu+Fm
Fr	Jachère	8	Jachère	<i>Aristida sp.</i>	-

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 2 (suite)

Sol	Systèmes	Age	Mode de gestion	Rotation	Fertilisation
PE	LB R-leg/M-leg Fu	8	Labour	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu
PE	SD R-leg/M-leg Fu	8	Semis direct	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu
PE	LB R-leg/M-leg Fu+Fm	8	Labour	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu+Fm
PE	SD R-leg/M-leg Fu+Fm	8	Semis direct	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu+Fm
Fhy	LB R-leg/M-leg Fu	8	Labour	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu
Fhy	SD R-leg/M-leg Fu	8	Semis direct	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu
Fhy	LB R-leg/M-leg Fm	8	Labour	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu+Fm
Fhy	SD R-leg/M-leg Fm	8	Semis direct	Riz associé à une légumineuse en rotation inter-annuelle avec du maïs associé à une légumineuse	Fu+Fm
FS	Jachère	12	Jachère	<i>Aristida sp.</i>	-
FS	LB Arachide	12	Labour	Arachide (<i>Arachis hypogea</i>) en culture continue	F0
FS	LB maïs	12	Labour	Maïs en culture continue	F0
FS	SD MN F0	12	Semis direct	Maïs en association avec du niébé (<i>Vigna unguiculata</i>)	F0
FS	SD MAP F0	12	Semis direct	Maïs-association avec arachide et pois de terre (<i>Vigna subterranea</i>)	F0
FS	SD MN Fm	12	Semis direct	Maïs en association avec du niébé	Fm
FS	SD MAP Fm	12	Semis direct	Maïs-association avec arachide et pois de terre	Fm

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 2 (suite et fin).

Sol	Systèmes	Age	Mode de gestion	Rotation	Fertilisation
FU	Jachère	12	Jachère	<i>Aristida sp.</i>	-
FU	Paysan	12	Parcelle paysanne		0
FU	SD MN F0	12	Semis-direct	Maïs en association avec du niébé	0
FU	SD MAP F0	12	Semis-direct	Maïs en association avec arachide et pois de terre	Fm
FU	SD MN Fm	12	Semis-direct	Maïs en association avec du niébé	Fm
FU	SD MAP Fm	12	Semis-direct	Maïs-association avec arachide et pois de terre	
Fhu	LB M/S	11	Labour	Maïs en rotation inter-annuelle avec du soja	Fu+Fm
Fhu	SD M/S	11	Semis-direct	Maïs en rotation inter-annuelle avec du soja	Fu+Fm
Fhu	SD M-D /M-D	11	Semis-direct	Maïs sur couverture vive de desmodium (<i>Desmodium uncinatum</i>) en continu	Fu+Fm
Fhu	SD H-K /S-K	11	Semis-direct	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>) sur couverture vive de kikuyu (<i>Pennisetum clandestinum</i>) en rotation inter-annuelle avec du soja sur couverture vive de kikuyu.	Fu+Fm

F0 : sans fertilisation.

Fu : fumier de bovin à raison de 5 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ (en matière sèche).

Fm : fertilisation minérale à raison de 62,5 kg de N, 14,5 kg de P et 19,9 kg de K par hectare pour H, Ft1 et Ft2 et 102,0 kg de N, 29,0 kg de P et 39,8 kg de K par hectare pour FS et FU

Tableau 3 : Stocks de carbone du sol, en Mg C.ha⁻¹.sol, à masse de sol équivalente à 1479 Mg sol.ha⁻¹. (Valeurs moyennes et écart-types, n=4).

Sol	Traitement	C	Sol	Traitement	C
H	LB RS F0	29,6 1,9 A	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu	23,6 2,4 A
H	SD RS F0	36,0 4,8 AB	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu	25,9 1,8 AB
H	SD RP F0	30,1 8,1 AB	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu+Fm	25,5 2,1 AB
H	LB RS Fm	26,3 4,9 A	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu+Fm	29,0 1,8 B
H	SD RS Fm	40,8 5,0 B			
H	SD RP Fm	32,1 5,4 AB	FS	LB arachide	17,0 1,5 A
			FS	LB maïs	18,4 1,3 AB
Ft1	Défriche Riz-manioc	47,5 3,5 A	FS	SD MN F0	23,3 2,4 B
Ft1	SD RS F0	49,3 3,4 A	FS	SD MAP F0	17,4 2,5 A
Ft1	SD RS Fm	53,5 2,0 A	FS	SD MN Fm	21,2 2,9 AB
			FS	SD MAP Fm	18,0 2,2 A
Ft2	LB RS F0	21,6 4,1 A	FS	Jachère	21,0 2,1 AB
Ft2	SD RS F0	23,8 3,4 A			
Ft2	LB RS Fm	30,7 4,3 A	FU	Paysan	13,4 1,1 A
Ft2	SD RS Fm	30,2 6,6 A	FU	SD MN F0	26,2 7,8 A
			FU	SD MAP F0	19,2 4,3 A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	16,5 1,5 AB	FU	SD MN Fm	19,8 3,6 A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	17,6 2,0 AB	FU	SD MAP Fm	22,1 5,9 A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu+Fm	15,6 0,9 A	FU	Jachère	16,2 8,6 A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu+Fm	17,3 1,8 AB			
Fr	Jachère	19,7 1,6 B	Fhu	LB MS	52,1 5,2 A
			Fhu	SD MS	55,7 3,7 AB
PE	Paysan	11,9 2,3 AB	Fhu	SD MM-D	56,5 5,3 AB
PE	LB R-leg/M-leg Fu	8,1 1,0 A	Fhu	SD HS-K	61,6 0,8 B
PE	SD R-leg/M-leg Fu	13,9 3,9 B			
PE	LB R-leg/M-leg Fu+Fm	10,5 1,5 AB			
PE	SD R-leg/M-leg Fu+Fm	15,3 1,8 B			

Les chiffres suivis d'une lettre majuscule différente d'un traitement à un autre, pour un même type de sol, sont différents significativement ($p < 0,05$).

II.1.2. Les déterminants du stockage de C pour les systèmes SCV étudiés.

A partir de cette diversité de situations (climat, types de sols, traitements, de niveaux de fertilisation et âges des systèmes) nous espérons pouvoir évaluer les effets respectifs des principaux déterminants suivants sur les stocks de C du sol, à savoir :

- Le climat
- Le type de sol
- Les niveaux de fertilisation
- L'âge des systèmes
- Les modes de gestion
- Le mode d'apport des résidus (Dispositif ^{13}C)

a) Climat et stocks de C du sol

Le climat, dans l'histoire de la science du sol, a toujours été considéré comme un facteur important dans la formation du sol, ou la pédogenèse (Jenny, 1941). La température et la précipitation ont été définies comme des facteurs qui régulent la dynamique de la matière organique et font ainsi partie des facteurs clés dans la détermination des grands types de sols. Il est alors important d'évaluer l'impact de ces deux facteurs sur les stocks de C pour le cas précis des systèmes SCV à Madagascar.

Pour nos jeux de données, comprenant une gamme de précipitation variant de 620 à 2600 mm, nous avons observé une corrélation positive entre la précipitation et les stocks de C du sol (**Figure 3a**). Alvarez et Lavado (1998) ont également observé les mêmes corrélations positives sur une gamme plus faible de précipitation (200 à 1200 mm). En effet, une augmentation de la précipitation, entraîne une augmentation de la quantité d'eau disponible pour la plante (Webb *et al.* 1978) et par conséquent une augmentation de la quantité de biomasse produite et donc de la quantité de débris organiques restitués au sol.

La gamme de température moyenne annuelle est toutefois plus étroite (16 à 23°C). Nous n'avons pas observé de relations significatives entre température et stocks de C du sol (**Figure 3b**). Or, la littérature nous dit que la température entraîne une stimulation de l'activité des microorganismes du sol et par conséquent entraîne une décomposition plus rapide de la MO du sol (Kirschbaum 1995). D'un autre côté, une température plus élevée entraîne une augmentation de la biomasse végétale produite et restituée au sol.

Pour cette étude, aucune tendance majeure n'est observée. L'absence d'une relation entre la température et les stocks de C de notre étude peut provenir du fait qu'aux alentours de 22 et 23 °C, des valeurs de stocks de C très élevées sont observées ($> 40 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ sol}$) pour une faible différence de température, ce qui signifie que des facteurs, autres que la température, peuvent avoir plus d'influence sur le stockage de C pour les situations SCV étudiés.

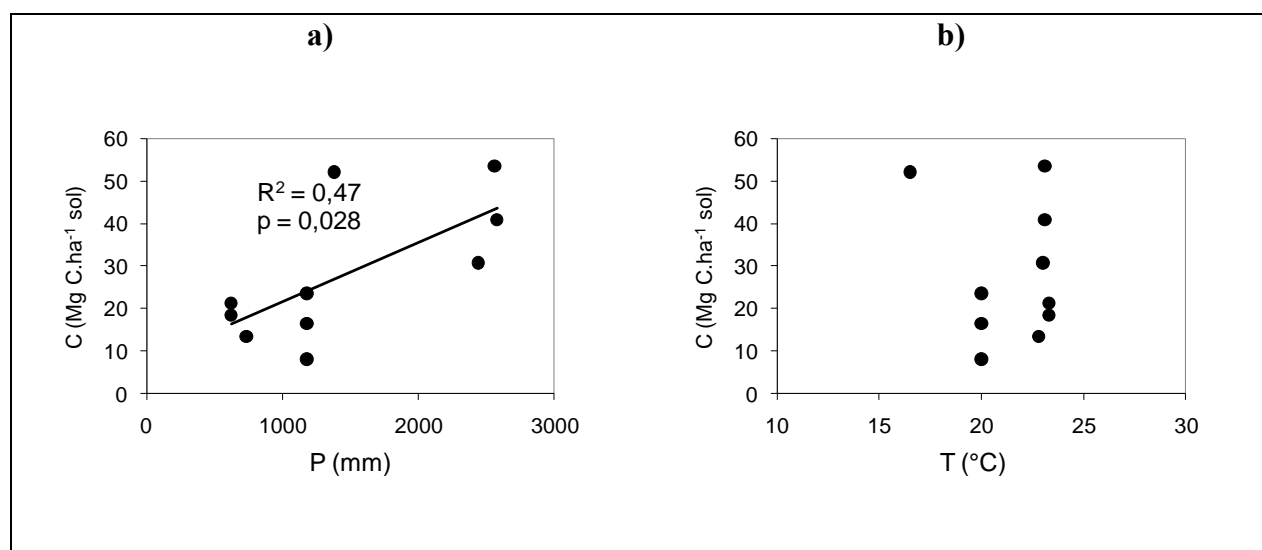


Figure 3 : Relations entre (a) la pluviométrie (P) et (b) la température (T) et les stocks de C en systèmes SCV. Les stocks de C sont exprimés à masse équivalente de l'horizon 0-20 cm afin de pouvoir comparer les différents types de sols entre eux.

b) Type de sol et stocks de C

Le type de sol, et notamment la minéralogie et la texture de sol, peuvent être également des facteurs déterminants des niveaux des stocks de C dans le sol.

Pour les sols tropicaux, selon leur **minéralogie**, trois types de sols sont principalement observés : les sols à argiles 1:1 ou argiles à faible activité, les sols à argiles 2 :1 ou argiles à forte activité, et les sols à allophane. Ces sols se différencient par les charges spécifiques de surface, généralement négatives, que ces minéraux développent à leur surface et qui permettent de fixer des cations mais également d'adsorber des particules ou colloïdes. Les sols à argiles 1:1

présentent des charges spécifiques de surfaces largement plus faibles que les sols à argiles 2:1, et les sols à allophane plus des charges plus élevées que les deux autres et à la fois négatives et positives.

Les principaux types de sols que nous avons recensés comportent majoritairement des sols à argiles 1:1 et secondairement à argiles 2:1. Pour les situations étudiées, on n'observe pas de différence de comportement concernant les stocks de C entre ces deux grands groupes de sols (Figure 4), malgré leurs grandes différences en termes de charges spécifiques de surface. Feller et Beare (1997) ont également obtenus les mêmes résultats sur un ensemble de sols tropicaux comprenant à la fois des sols à argile 1 :1, argile 2 :1 et sols à allophane. Mais le faible effectif des sols à argile 2 :1 d'une part, et l'absence de sol à allophane d'autre part, ne permettent pas de tirer des conclusions strictes sur l'effet type de sol sur les stocks de C des sols de Madagascar étudiés jusqu'à présent.

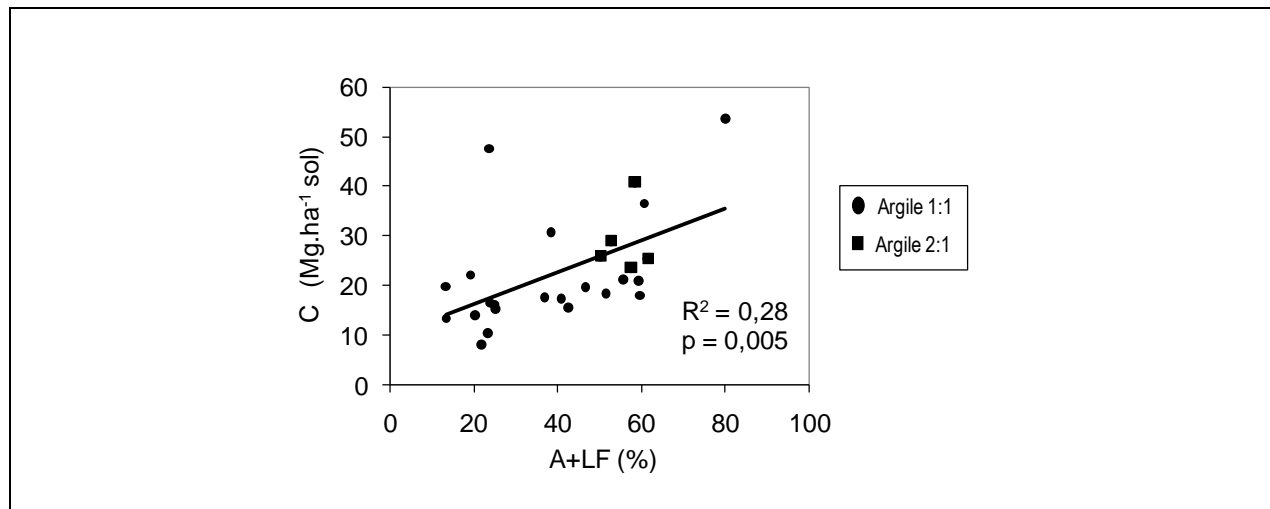


Figure 4 : Relation entre la texture du sol (A+LF ; argile+limon fin) et les stocks de carbone du sol sous systèmes SCV à Madagascar pour divers types de sols à argiles 1:1 et 2 :1.

La **texture** est également considérée comme un déterminant du stockage de C dans le sol, car le C associé aux fractions fines du sol est selon la littérature considéré comme stabilisé et résiste ainsi à la minéralisation microbienne (Feller and Beare 1997; Six *et al.* 2002a). Le potentiel de

stockage de C par un sol donné peut alors être tributaire de sa teneur en éléments fins (argile+limons fins ou A+LF).

Les sols étudiés présentent une gamme de texture assez large (teneurs en A+LF variant de 12 à 78%), et une corrélation positive et significative a été observée entre la texture du sol et les stocks de C du sol (Figure 4). Ceci est en accord avec les résultats d'autres auteurs en divers milieux tropicaux (Barthès *et al.* 2007; Feller *et al.* 2001a).

c) Niveaux de fertilisation et stocks de C du sol

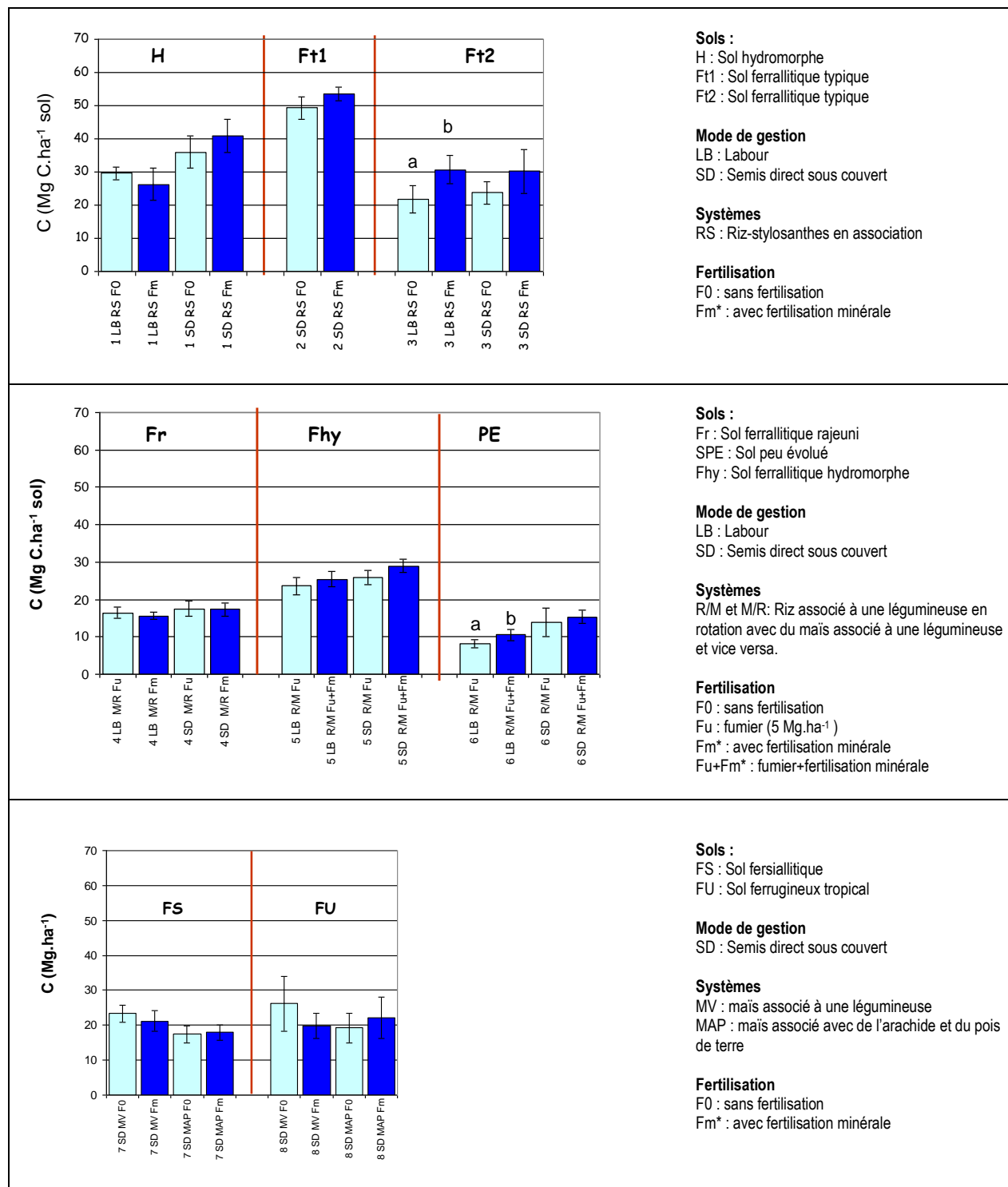
La fertilisation agit sur les stocks de C par l'augmentation de la production de biomasse qui peut affecter directement la quantité de résidus organiques restitués au sol. Certains auteurs, en pays développés, ont ainsi déjà montré que l'apport d'azote permet d'augmenter la séquestration de C dans le sol de l'ordre de 50 à 150 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ (Lal *et al.* 1998) ou de 140 à 182 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ (Halvorson *et al.* 1999). A Madagascar, les apports de fertilisants sont encore très faibles pour les systèmes traditionnels, et même pour les systèmes SCV, dont le principe de base de fertilisation est de réduire les quantités d'engrais apportés avec l'âge des systèmes afin de réduire les coûts des systèmes. Pour les situations étudiées, nous n'avons observé une augmentation des stocks de C suivant l'apport de fertilisation (Figure 5) que pour deux types de sol : Ft2 et PE et sur des systèmes en labour conventionnel.

En effet, les apports d'engrais sont d'un niveau assez faible et insuffisant (5 Mg.ha⁻¹ pour le fumier et 62 kg et 102 kg N.ha⁻¹ pour les engrais minéraux), pour faire apparaître des différences significatives et importantes en terme de rendement (Michellon *et al.* 2003) et donc de restitution organique au sol. D'après Raun *et al.* (1998), une augmentation de stocks de C du sol n'est observée que quand la quantité d'azote apportée dépasse la quantité d'azote nécessaire pour une production maximale.

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy



*Fm : fertilisation minérale à raison de 62,5 kg de N, 14,5 kg de P et 19,9 kg de K par hectare pour H, Ft1, Ft2, Fr, SPE et Fhy ; et 102,0 kg de N, 29,0 kg de P et 39,8 kg de K par hectare pour FS et FU.

Figure 5 : Effet de la fertilisation sur les niveaux de stocks du C pour différents types de sols.

d) Mode de gestion (SCV ou conventionnel) et stocks de C du sol

A partir des mêmes situations, l'effet des systèmes SCV sur les stocks de C (à masse équivalente) des horizons 0-20 cm, en comparaison avec les situations « Labour », a pu être également mesuré. Rappelons que les systèmes « SCV » se différencient des systèmes « labour conventionnel » par les pratiques suivantes : (i) le non labour, (ii) la présence d'une couverture permanente du sol, (iii) la non exportation ni brûlis des résidus de récolte.

Des concentrations en C plus élevées en systèmes SCV sont généralement observées pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Toutefois, quand on ramène les valeurs de stocks à masse équivalente de l'horizon 0-20 cm, seuls deux systèmes SCV présentent des stockages significatifs : le système riz associé à *stylosanthes* en fertilisation minérale (SD RS Fm) du Sol hydromorphe H et le système riz associé à une légumineuse en rotation avec du maïs associé à une légumineuse et fertilisé avec du fumier (SD R/M Fu) du Sol peu évolué PE (Figure 6). Mais, d'une manière générale, les stocks de C sous systèmes SCV ont tendance à être plus élevées que les stocks sous témoins labourés.

L'absence d'un effet systématiquement significatif des systèmes SCV sur le stock à masse équivalente des horizons 0-20 cm tient à deux causes : d'une part, la densité apparente du sol est plus faible pour les témoins labourés, et d'autre part, on n'observe pas de différence significative de concentrations en C entre témoins et traitements SCV pour les couches inférieures à 10 cm de profondeur. Les stocks étant ramenés à masse équivalente, et pour l'horizon 0-20 cm, les différences entre systèmes qui n'existent qu'au niveau des couches superficielles (0-5 et 5-10 cm) sont ainsi masquées.

Les taux de stockage de C sous systèmes SCV varient ainsi de 0 à 1,8 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, avec une moyenne de 0,54 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹. Ces valeurs sont cohérentes avec celles publiées par Six et al. (2002b) et Bernoux et al. (2006) pour divers types de sols tropicaux. Les stockages les plus significatifs sont observés pour les systèmes d'âge supérieur à 8 ans. Ainsi faut-il une durée minimale de pratique de SCV pour que le stockage de C dans le sol devienne significativement détectable.

Le type de rotation et/ou d'association de culture peut aussi influencer les stocks de C du sol, selon le niveau de production végétale ou des restitutions organiques au sol. Sur le même sol H, par exemple, pour un même niveau de fertilisation, on voit que le riz associé à *pueraria* (SD RP F0) est moins performant que le riz associé à *stylosanthes*. C'est également le cas, sur le sol FS, du maïs associé à *vigna* sans fertilisation (SD MV F0) qui est plus performant que le maïs associé avec de l'arachide et du pois de terre, sans fertilisation (SD MAP F0).

e) Restitutions organiques et stocks de C du sol

L'apport de résidus végétaux ou animaux au sol a également un effet sur les stocks de C du sol (Anyanzwa *et al.* 2010). Des relations linéaires entre quantité de MO restituée et stock de C dans le sol sont souvent observés (Larson *et al.* 1972). La qualité des résidus restitués peuvent également intervenir. L'apport de résidus riches en lignine, peut induire une meilleure accumulation de C dans le sol (Paustian *et al.* 1992).

Les quantités de résidus restitués sur les systèmes SCV étudiés n'ont pas été complètement évaluées *in situ* sur les différents dispositifs. Elles ont été toutefois estimées à partir des rendements et de divers coefficients de la littérature tels que les rapports Grains/ Biomasse totale, ou encore Parties aériennes/Parties souterraines. D'une manière générale, le rapport du C sol récemment stocké au C des résidus apportés, pour ces différents systèmes varie de 5 à 18 %, ce qui est assez cohérent avec les valeurs données par la littérature pour les coefficients isohumiques de différents types de matériaux végétaux.

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

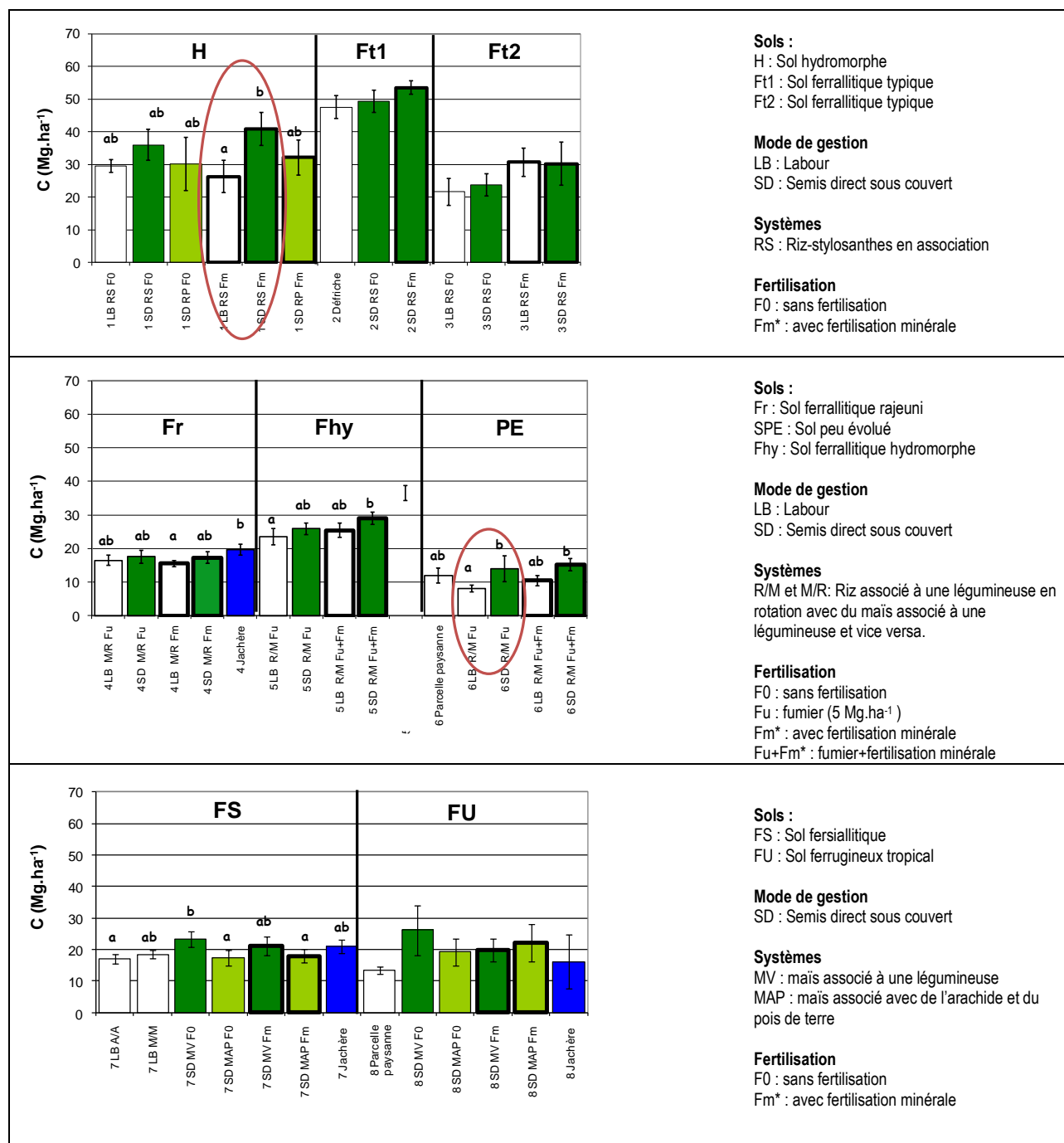


Figure 6 : Effet des systèmes SCV sur les stocks de C pour différents types de sol.

Afin de préciser cette relation et évaluer la profondeur concernée par les variations de C-sol dues aux systèmes SCV, une étude à court terme mettant en œuvre l'utilisation de l'outil ^{13}C en abondance naturelle a été menée sur 2 ans pour la comparaison entre SCV et labour conventionnel. Ce dispositif a été installé en 2007, à Andranomanelatra (Antsirabe) et comprend les traitements suivants :

- CT-R : labour conventionnel (CT, pour *Conventional Tillage*) sans restitution de résidus (-R),
- CT+R : labour conventionnel, avec restitution de résidus (+R),
- NT-R : semis direct (NT, pour *No-Tillage*), sans restitution de résidus (-R),
- NT+R : semis direct, avec restitution de résidus (+R).

Dès la première année de culture, une diminution de la concentration en C des couches superficielles (0-5 cm) est observée pour les traitements labourés alors qu'il n'y a pas de changements observés pour les traitements en SCV (Figure 7). Parallèlement, les concentrations en C des couches 10-20 cm augmentent dès la première année pour les mêmes traitements labourés. Au bout 2 ans de mode de gestion, un effet positif de la restitution des résidus sur la concentration en C est observé pour le traitement en SCV (Figure 7).

La diminution significative de la concentration en C des couches superficielles suite au labour, n'entraîne pas toujours une diminution de stock de C à 0-20 ou 0-40 cm (

Figure 8). La raison en est que lors du labour (manuel à l'angady, ou charrue), il n'y a pas un mélange parfait des couches de sols. Il n'y a qu'un simple retournement de la couche 0-20 cm, les couches superficielles riches en C (0-5 et 5-10 cm) sont enfouies à 20 cm (profondeur du labour) tandis que la couche inférieure plus pauvre en C (10-20 cm) se retrouve en surface. Aussi, les stocks de C total pour la couche 0-20 cm sont plus ou moins conservés, et les différences de concentrations pour les horizons de surfaces, résultent simplement de cette inversion et non d'une perte réelle par minéralisation du C du sol due au labour comme le rapporte souvent la littérature (Balesdent *et al.* 2000), ni encore à une érosion du C (sous forme particulière) comme dans certaines situations (Razafimbelo 2005). Cette explication est

confirmée par le profil ^{13}C des traitements qui montre une allure différente du profil en labour par rapport aux autres traitements (jachère, et SCV), une différence qui résulte de cette inversion entre couches de sol.

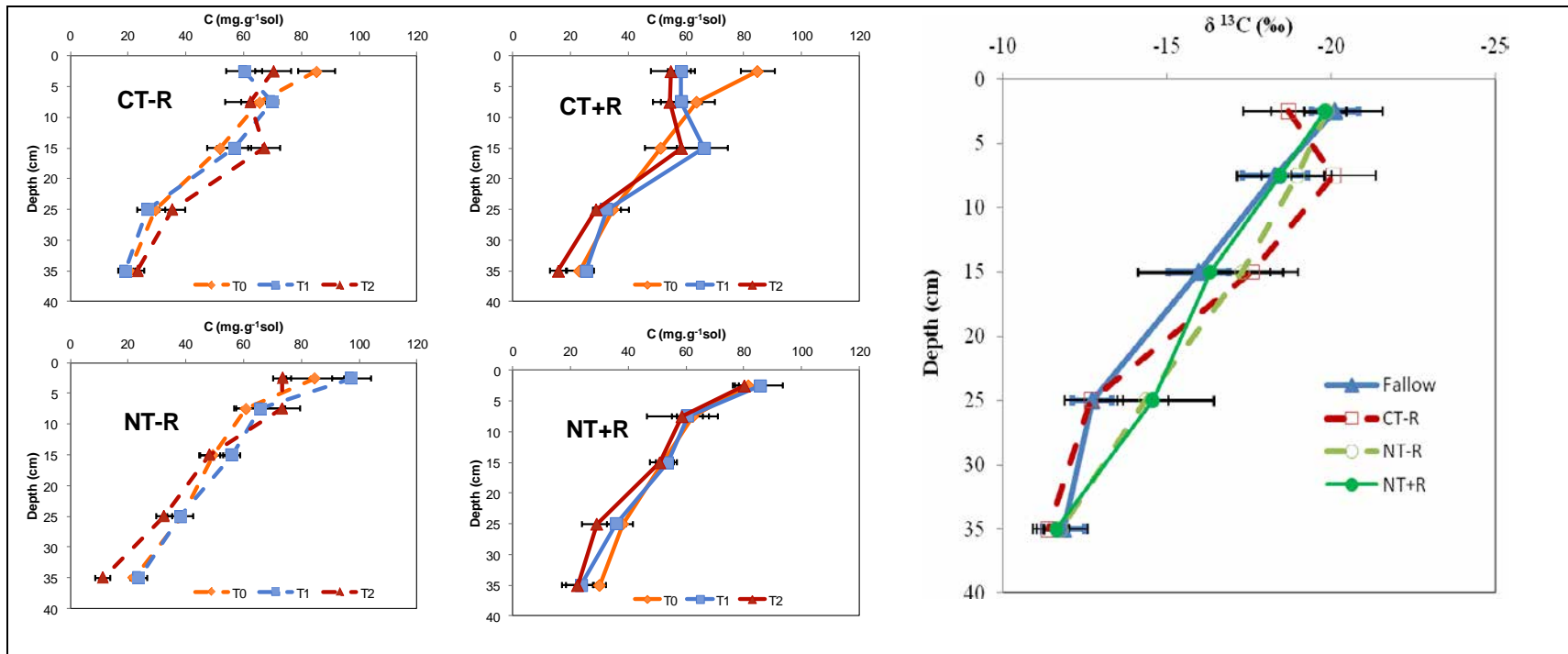


Figure 7 : Profil des concentrations en C des systèmes SCV (NT) en et des systèmes en labour conventionnel (CT) avec 2 modalités de restitution de résidus de récolte (-R : résidus exportés et +R : résidus restitués) après 2 ans (T0 : mise en place du dispositif, T1 : 1 an et T2 : 2 ans) de mode de gestion.

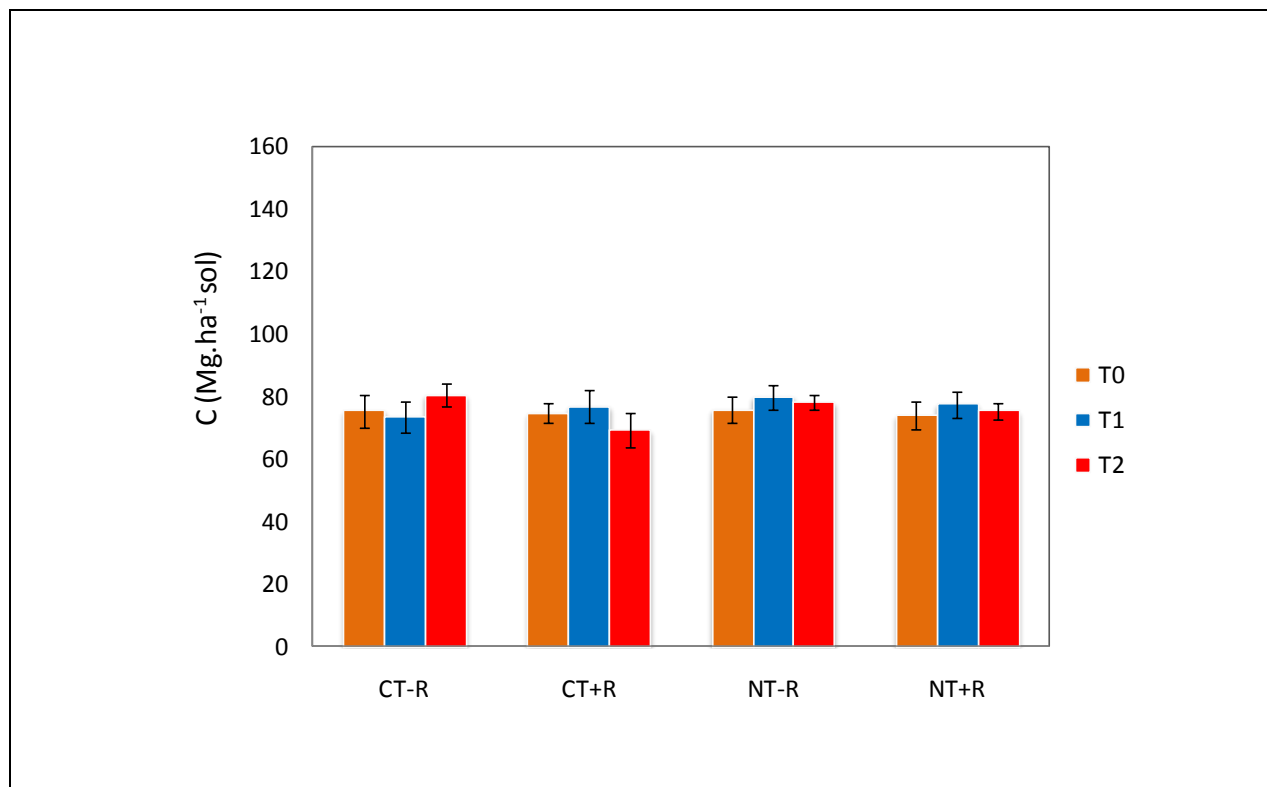


Figure 8 : Effet à court terme (2 ans) des systèmes SCV (NT) en comparaison avec des systèmes en labour conventionnel (CT) et du mode de restitution des résidus de récoltes (-R : résidus exportés et +R : résidus restitués) sur les stocks de C (couche 0-20 cm).

II.2. Protection du C dans le sol

La quantité de C stocké dans le sol ne dépend pas uniquement des apports en C (restitutions organiques), ie les résidus, mais également des sorties (ou pertes) sous formes solide (érosion particulaire), soluble (C-soluble ruisselé ou lixivié) ou gazeuse (C minéralisé).

Les pertes de C particulaire par érosion peuvent être importantes et peuvent induire une surestimation du stockage de C par agrosystème. En effet, si le stockage apparent de C sous systèmes SCV varie de 0 à 1800 C.ha⁻¹.an⁻¹, les pertes de C par érosion peuvent varier de 215 à 378 kg C. ha⁻¹.an⁻¹ en labour conventionnel alors qu'elles sont seulement de 1,3 à 4,4 kg C. ha⁻¹.an⁻¹ en système SCV selon les travaux en cours de Razafindramanana (2011). Comme les estimations des bilans apparents en approche synchronique portent sur la différence entre stocks de C sous SCV et sous Labour, les pertes importantes par érosion sous Labour s'ajoutent arithmétiquement aux gains réels sous SCV : il y a donc surestimation du stockage. Lorsque le stockage apparent est de 200 à 400 kg C. ha⁻¹.an⁻¹, du même ordre que les pertes par érosion sous Labour, de fait, le stockage réel de C sous SCV est nul.

Les flux de C sous forme soluble ne sont généralement pas estimés et donc comptabilisés comme étant égaux à 0, bien que cela ne corresponde pas de fait à la réalité. Des valeurs de C solubles représentant environ 10% du C du sol ont été, par exemple, observées sous canne à sucre au Brésil (Razafimbelo *et al.* 2003).

Pour les pertes par minéralisation, environ 80 à 90 % du C restitué au sol est émis sous forme de CO₂ (et parfois partiellement CH₄) par décomposition et minéralisation microbienne. La proportion de ce qui reste (< 20%) dépend de la manière dont le C est protégé dans le sol contre la minéralisation microbienne.

Il y a trois formes de forme de protection de C dans le sol (Figure 9) :

- la **protection physique**, qui concerne la MO à l'intérieur des agrégats stables du sol, les isolant ainsi de tout contact avec les microorganismes décomposeurs,

- la **protection physico-chimique**, qui consiste en une association forte de la MO avec les particules minérales fines du sol les rendant ainsi difficiles à décomposer par les microorganismes du sol,
- la protection « **chimique** » ou « **biochimique** », qu'on appelle également « **récalcitrance chimique** » de la MO, qui est dépendante de la composition chimique de la MO.

Jusqu'ici, j'ai principalement abordé les deux premières formes de protection de la MO dans le sol.

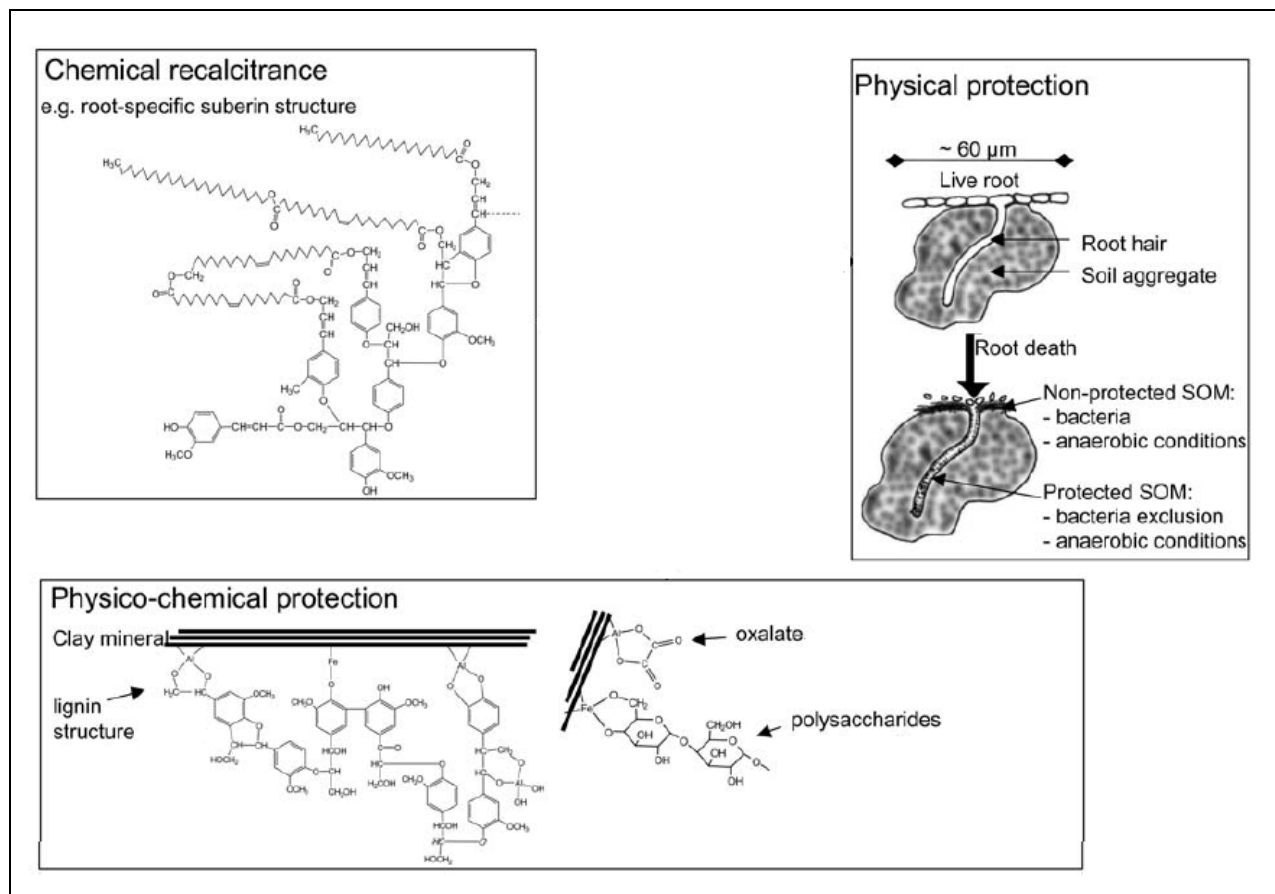


Figure 9 : Les différentes formes de protection de la MO dans le sol, modifiée de Rasse et al. (2005)

II.2.1. Protection physique du C

La protection physique est la protection du C de différentes formes de MO localisées à l'intérieur des agrégats stables du sol. Des relations positives et significatives entre la teneur en C du sol et la teneur en macroagrégats stables du sol ont été souvent observées dans la littérature (Albrecht *et al.* 1998; Barthès *et al.* 2007). Ces relations sont interprétées de deux manières : (i) la MO favorise la formation des agrégats stables dans le sol en constituant des ciments qui lient les particules entre-elles (Tisdall 1996) et (ii) les agrégats stables protègent la MO du sol contre la minéralisation microbienne en constituant des barrières physiques, empêchant ainsi aux microorganismes du sol de les minéraliser (Beare *et al.* 1994). C'est cette deuxième explication que l'on appelle par protection physique de la MO dans le sol. Pour mettre en évidence cette protection, des mesures de la respiration de sol broyés et de sols intacts sont souvent effectuées. Des travaux de la littérature rapportent que la respiration du sol (ΔCO_2) augmente quand les agrégats sont complètement détruits par broyage, car la MO qui était protégée dans les agrégats est devenue déprotégée et accessible par les microorganismes du sol lors de la destruction des agrégats stables. Toutefois, la quantité de macroagrégats stables dans le sol ne dépend pas uniquement de la teneur en C du sol mais peut également dépendre de la texture et des teneurs en oxyhydroxydes de fer et ou d'aluminium.

Aussi, l'objectif de cette partie est de déterminer le niveau de la protection physique du C dans le sol selon les types de sols existants, mais nous essayerons également de déterminer les facteurs qui influencent la protection physique de C dans le sol.

a) Dispositifs, échantillons de sols et méthodes utilisés pour la détermination de la protection physique

L'étude est effectuée sur 15 situations sélectionnées parmi celles présentées dans la partie I.1.1. Les situations ont été choisies suivant une large gamme de texture (exprimée en teneurs en argile+limons fins) allant des sols sableux aux sols très argileux (Tableau 4). Quand les situations le permettaient, pour un type de sol donné, des valeurs de teneurs en C différentes (haute et basse) ont été également sélectionnées.

Pour chaque situation, trois échantillons élémentaires ont été prélevés par parcelle élémentaire et combinés pour constituer un échantillon composite. L'échantillon est ensuite séché à l'air et tamisé à 2 mm.

La teneur en C des sols est déterminée suivant la méthode Walkley and Black (1934). La teneur en macroagrégats (MA) stables a été déterminée suivant une méthode adaptée de Kemper et Rosenau (1986). Pour cela, quatre grammes de sol séchés à l'air, préparés et tamisés à 2 mm (sol total 0-2 mm) sont introduits dans un tamis de 200 μm dont la base est mise en immersion dans un bécher de 250 ml contenant 100 ml d'eau déminéralisée. Après 2 h d'immersion, le tamis est soumis à un mouvement de va-et-vient vertical pendant 6 minutes, le bécher restant fixe (amplitude de 1,3 cm, fréquence de 33 cycles par minute) permettant une alternance d'émersions et d'immersions de l'échantillon dans l'eau. La fraction restante sur le tamis ($> 200 \mu\text{m}$) est séchée à 105°C pendant 16 h puis pesée. Cette fraction est composée de macroagrégats stables (MA, $> 200 \mu\text{m}$) et de sables grossiers (SG). Les SG sont extraits en tamisant la fraction $> 200 \mu\text{m}$ dans de la soude diluée, puis séchés à 105°C. La teneur en MA est alors calculée par différence entre la fraction $> 200 \mu\text{m}$ et SG. La fraction $< 200 \mu\text{m}$ recueillie dans le bécher est transvasée dans une allonge de 100 mL, et agitée par 30 retournements manuels. Après un temps de sédimentation dépendant de la température (loi de Stokes), une aliquote de la fraction $< 20 \mu\text{m}$, ou microagrégats (MI), est pipetée, séchée pendant 16 h à 105°C, puis pesée. Les teneurs en mésoagrégats (ME, 20-200 μm) sont calculées par différence entre sol total, SG, MA et MI. Dans cette étude, seules les teneurs en MA seront présentées.

La protection physique du C est évaluée par une incubation en conditions standards de sols non broyés et de sols broyés (Chevallier *et al.* 2004; Razafimbelo *et al.* 2008). Pour chaque situation, le sol est divisé en deux lots : une partie est laissée intact ($< 2 \text{ mm}$, agrégats intacts, MO protégée) et une autre est broyée à 200 μm afin de détruire tous les macroagrégats stables et de libérer ainsi la MO qui était protégée. 10 g de chaque échantillon (broyé et intact) sont ainsi ramenés à une humidité équivalente à 80% de l'humidité à la capacité aux champs et mis en incubation dans un flacon de 1L pendant 28 jours à 28°C. La teneur en CO₂ du flacon est

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

régulièrement dosée à l'aide d'un micro-chromatographe Varian CP4900 (Varian Chromatography Group, Walnut Creek, CA, USA).

Le C physiquement protégé est défini comme étant la différence le C-CO₂ émis par l'échantillon broyé et le C-CO₂ émis par l'échantillon de sol intact.

Tableau 4 : Sols sélectionnés pour l'étude de la protection physique du C dans le sol

Localisation	Pluviométrie	T	Code	Type de sol ^a	Argile+Limons fins
	mm	°C			g.kg ⁻¹ soil
Tulear-Andranovory	600	28	FS1	Sol fersiallitique	590
			FS2	Sol fersiallitique	590
Tulear-Sakaraha	300	28	FU1	Sol ferrugineux tropical	200
			FU2	Sol ferrugineux tropical	230
			FU3	Sol ferrugineux tropical	125
Manakara	2500	23	M1	Sol ferrallitique typique	390
			M2	Sol ferrallitique typique	390
Antsirabe	1600	16	Fhu1	Sol ferrallitique humifère	723
			Fhu2	Sol ferrallitique humifère	723
			Ft2	Sol ferrallitique humifère	539
Lac Alaotra	1200	20	Ft1-1	Sol ferrallitique typique	459
			Ft1-2	Sol ferrallitique typique	235
			PE3	Sol peu évolué	257
			PE4	Sol peu évolué	185
			PE5	Sol peu évolué	273

b) Principaux résultats sur l'étude de la protection physique

Pour les différents types de sols étudiés, le niveau de protection physique du C du sol est assez faible et varie de 13 à 198 mg C-CO₂.kg⁻¹ sol soit environ 2 à 12% du C du sol. Ces niveaux de protection physique sont assez cohérents avec ceux donnés par Beare et al. (1994). Les effets positifs des SCV sur la protection physique du C s'observent sur le Sol peu évolué (PE) quand on le compare au labour, et sur le Sol ferrugineux tropical (FU) quand on le compare avec la jachère (Tableau 5). Il n'y a pas d'effet positif des systèmes SCV sur la protection physique du C pour les autres types de sols et systèmes. Toutefois, l'absence de protection significative résulte du fait que la protection physique mesurée pour chacune des parcelles élémentaires, qui servent de base pour le calcul des valeurs moyennes est très variable, entraînant ainsi l'observation de valeurs d'écart-types très élevées.

Nos résultats ont également montré que le niveau de C protégé physiquement dans le sol n'est ni corrélé avec la quantité de macroagrégats stables (Figure 10d), ni corrélé avec la teneur en argile + limons fins (Figure 10c), alors que la teneur en C du sol est corrélée positivement avec la teneur en macroagrégats (Figure 10b) et la teneur en argile+limon fins (Figure 10a). Ceci laisse supposer l'existence d'une protection physique non mesurée, mais à une échelle d'agrégation beaucoup plus petite à l'échelle des microagrégats de tailles inférieures à 50 µm. A noter toutefois que le C protégé est positivement corrélé à la teneur totale en C du sol (Figure 10e).

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 5 : Quantification des niveaux de la protection physique du C dans les sols pour différents systèmes SCV et pour différents types de sols. (Valeurs moyennes et écart-types, n=3)

		A+LF	SOC	C min intact	C min broyé	C protégé	C protégé
		%	<i>g C.kg⁻¹ sol</i>	<i>mg C-CO₂.kg⁻¹ sol</i>	<i>mg C-CO₂.kg⁻¹ sol</i>	<i>mg C-CO₂.kg⁻¹ sol</i>	<i>g C-CO₂.kg⁻¹ C sol</i>
FS SD MD F0	TA1	59	24,1	486 (9)	548 (4)	62 (10)	20,2 (2,6)
FS SD MAP F0	TA2	59	12,8	377 (13)	431 (5)	55 (14)	29,4 (4,3)
FU SD MD F0	TS1	20	22,1	949 (13)	1094 (12)	145 (18)	43 (6,6)
FU Jachère	TS2	23	11,6	698 (17)	760 (3)	62 (17)	60 (5,3)
FU SD MV F0	TS3	13	23	1185 (40)	1280 (39)	94 (35)	51,6 (5)
Ft1 SD RS F1	M1	46	17,2	786 (50)	898 (35)	111 (61)	37 (5,2)
Ft1 LB RS F1	M2	24	14,2	559 (27)	638 (10)	79 (29)	31,5 (4,4)
Fhu LB MS Fm	A1	26	17,6	545 (66)	594 (97)	49 (117)	16 (1,4)
Fhu SD MS Fm	A2	19	7,3	1510 (184)	1708 (325)	198 (373)	30,1 (3,9)
Ft2 Jachère	A3	27	10,3	588 (114)	781 (36)	193 (120)	20,2 (7)
Fr SD M/R Fm	AL1	39	21,3	972 (42)	1059 (1)	86 (56)	56,5 (3,7)
Fr LB M/R Fm	AL2	39	17,7	841 (32)	893 (3)	52 (42)	59,1 (5,7)
PE SD R/M Fm	AL3	72	34	1467 (17)	1567 (7)	100 (32)	83,6 (1,8)
PE LB R/M Fm	AL4	72	50,2	902 (30)	915 (18)	13 (18)	122,9 (4,1)
PE LB Paysan	AL5	54	29,0	897 (72)	913 (33)	15 (79)	87,1 (1,5)

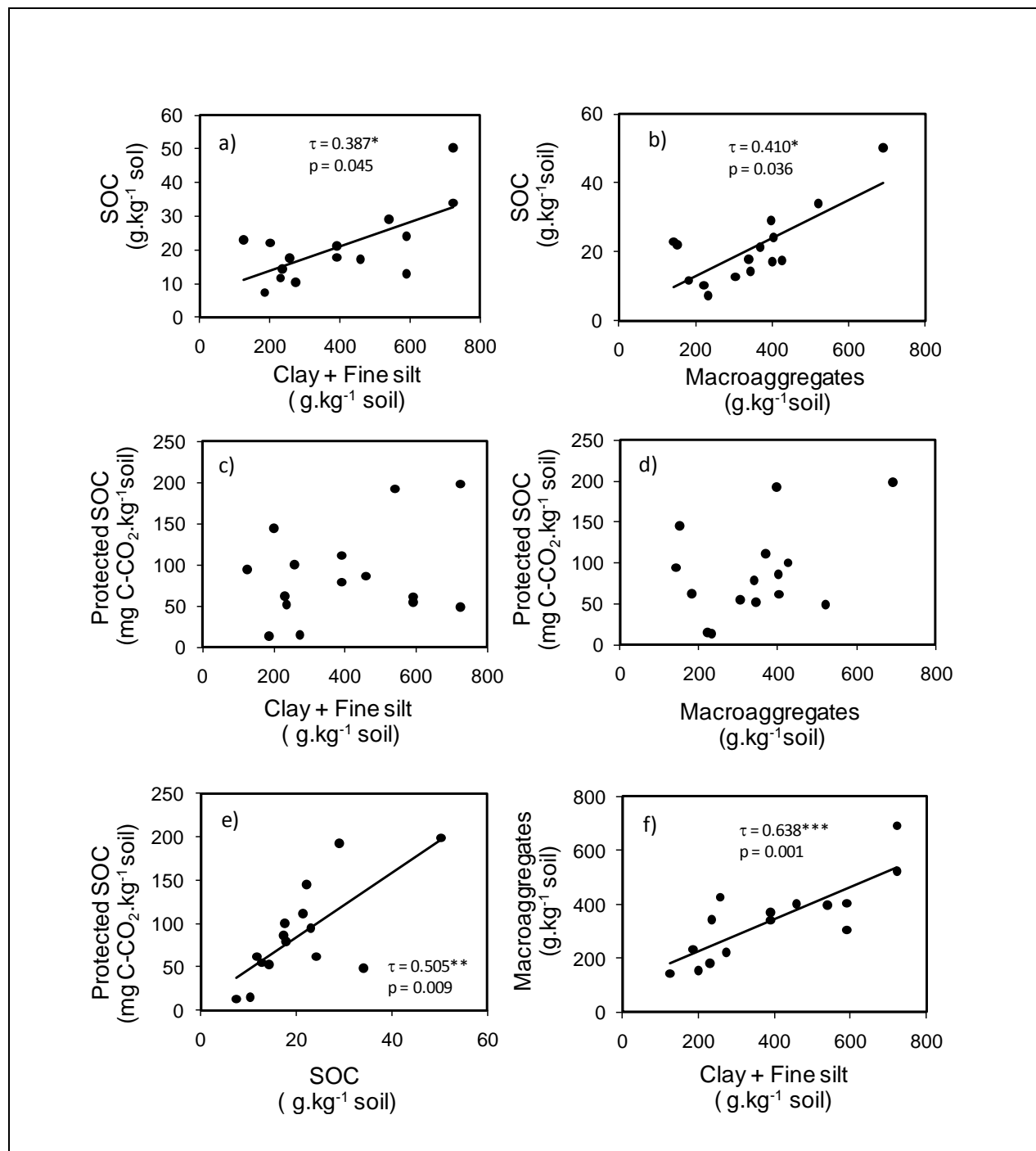


Figure 10 : Corrélations entre teneurs en C (SOC), teneurs en macroagrégats stables (MA), texture du sol (Clay+Fine silt) et C protégé physiquement dans le sol (Protected SOC). (n=15, Test de Kendall).

II.2.2. Protection physico-chimique du C

Il est connu que la protection physico-chimique est plus importante pour les sols de texture argileuse que pour les sols de texture sableuse. Dans le sol, les produits microbiens (sucres aminés) (Six *et al.* 2002a) et/ou les acides organiques produits par les racines (oxalate, malate, citrate) sont très vite adsorbés sur la fraction argileuse, ou plus globalement la fraction argile+limons fins. Ces composés sont des composés labiles (facilement minéralisable), mais du fait de leurs charges négatives, ils se fixent rapidement sur la fraction fine (argile + limons fins) du sol par l'intermédiaire des ponts cationiques. Certains de ces composés organiques s'adsorbent également plus facilement sur les oxydes de fer ou d'aluminium. Les sols tropicaux sont des sols riches en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. Ces oxyhydroxydes ont des fortes capacités de flocculer les MO du fait de leurs charges positives (interactions électrostatiques) qui peuvent également entraîner une stabilisation ou une protection physico-chimique de la MO. Barthes *et al.* (2007) ont ainsi montré que, pour les sols tropicaux, les teneurs en oxydes, mais essentiellement les teneurs en Al en substitution dans les oxydes de fer déterminent la formation des macroagrégats et l'accumulation de C dans les sols tropicaux. Suivant leur distribution dans les fractions granulométriques du sol, la MO est ainsi plus ou moins protégée. Les MO associées aux particules plus fines ($< 50 \mu\text{m}$; argiles et limons fins) sont fortement adsorbées sur les fractions minérales et se renouvellent moins vite que les MO associées aux fractions plus grossières ($> 50 \mu\text{m}$) du sol, c'est-à-dire des matières organiques particulières (MOP) de la taille des sables. Parmi les MOP, on considère que les MOP internes aux agrégats (MOPi) sont plus fortement protégées physiquement que celles (libres) situées à l'extérieur des agrégats (MOPe) (Besnard *et al.* 1996 ; Puget *et al.* 2000; Six *et al.* 1998).

a) Dispositifs et expérimentation utilisés pour la caractérisation de la protection physico-chimique

La protection physico-chimique de la MO est évaluée suivant une étude de la distribution de la MO du sol dans les classes granulométriques : sables grossiers (200-2000 μm), sables fins (50-200 μm), limons grossiers (20-50 μm), limons fins (2-20 μm) et argiles ($< 2 \mu\text{m}$). La MO

associée aux fractions fines (<20 µm) étant plus stabilisée que celle associée aux fractions plus grossières (>20 µm).

Pour cette partie, deux types de d'études ont été effectuées :

- La première est basée sur l'étude de **l'effet au champs** et à court terme des systèmes SCV sur la distribution granulométrique de la MO du sol, effectué sur un dispositif expérimental qui est le même que celui qui a été utilisé dans le paragraphe II.1.2.e (Dispositif mis en place en 2007, à Andranomanelatra, sol ferrallitique très argileux contenant 72% d'argile+limons fins, sols prélevés après 1 an de mise en culture, voir détails dans paragraphe II.1.2.e).

- La seconde est basée sur l'étude de **l'effet en pot** des types de sols, des types (riz ou soja) et des modalités de restitution (enfouis ou en mulch) des résidus apportés sur la distribution granulométrique de la MO du sol. Pour cette partie, l'expérimentation est effectuée sur trois types de sols: sol ferrallitique très argileux à caractère andique provenant de la région d'Antsirabe (ABE ; 70% d'argile+limons fins), un sol ferrallitique typique argileux provenant de la région d'Antananarivo (Lazaina, LAZ ; 40% d'argile+limons fins) et un sol ferrugineux tropical sableux provenant de la région de Majunga (MAJ ; 15% d'argile+limons fins). Quarante kilogrammes de sols ont été ainsi prélevés au hasard sur des jachères, sur une profondeur de 0-20 cm. Ces sols ont été séchés et tamisés à 2 mm. Cinq traitements, dont 4 différents apports organiques pouvant avoir un effet sur la dynamique de la MO dans le sol. Les *types* (résidus de soja : rapport C/N faible vs paille de riz : rapport C/N élevé) et *mode d'apport* de résidus de culture (enfouis ou en mulch) sont ainsi testés par type de sol. Un traitement témoin ainsi qu'un traitement avec apport de MO au sol sous forme racinaire ont été également étudiés. Pour chacun des 3 types de sol, les traitements sont ainsi les suivants :

- Témoin : sol seul sans apport organique,
- Racines : culture d'avoine, l'effet racine est testé,
- Riz Enfouis : restitution de pailles de riz enfouies, mélangées au sol,
- Riz Mulch : résidus de pailles riz restitués en surface du sol
- Soja Enfouis : restitution de résidus de soja enfouis, mélangés au sol,

- Soja Mulch : résidus de soja restitués en surface du sol.

L'essai est conduit en pots sous serre. Un kilogramme de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm a été mis dans chacun des pots d'une contenance de 1,5 L. Les résidus de soja et pailles de riz ont été apportés à raison de 293,33 g.m⁻² et 364,70 g.m⁻² respectivement. Cette dose de résidus restitués est la dose appliquée dans les systèmes en semis direct de la région d'Antsirabe (Coq et al. 2007). Une fois en pot, le sol est amené aux 2/3 de la capacité de rétention en eau. Un arrosage quotidien permet de maintenir le sol à une humidité constante ne limitant pas la disponibilité en eau pour la plante. L'expérimentation s'est déroulée sur 3 mois. A la fin des 3 mois, le sol est séché à l'air, tamisé à 2 mm pour les différentes analyses.

Pour le fractionnement granulométrique de la MO organique, la méthode utilisée est une méthode adaptée de Gavinelli et al. (1995). Brièvement, 30 grammes de sol sont mis en contact pendant une nuit avec 200 ml d'eau déminéralisée et 0,8 g d'hexaméthaphosphate de sodium (HMP). Le mélange est ensuite agité en présence de 10 billes d'agate pendant 12 h, sur un agitateur rotatif à la fréquence de 45 agitations par minute. La fraction organique légère (FLE) est de suite isolée par flottaison. La suspension de sol est tamisée successivement à 200 µm puis 50 µm pour isoler les fractions de la taille des sables grossiers (F200-2000 µm) et de la taille des sables fins (F50-200). La fraction F50-200, après séparation du reste de la fraction organique légère, est soumise pendant 1 minutes aux ultrasons (High Ultrasonic Processor 600 W), puis retamisée à 50 µm. La suspension < 50 µm est soumise aux ultrasons pendant 10 minutes (conditions identiques à ci-dessus) puis tamisée à 20 µm pour séparer la fraction de la taille des limons grossiers (F20-50). La suspension < 20 µm est agitée (30 retournements manuels) et mise à sédimenter pour permettre le siphonnage de la fraction de la taille des argiles+limons fins (F0-20). Toutes les fractions obtenues sont séchées à 60°C, pesées et broyées pour les analyses de C et N.

b) Principaux résultats de l'étude sur la protection physico-chimique du C

Concernant l'**effet au champ**, les résultats au bout d'une année de mise en place du dispositif montrent une différence de *concentrations* en C des fractions entre les traitements CT et NT,

avec des concentrations en C plus élevées pour les traitements NT (Figure 11). Autrement dit toutes les fractions des traitements NT sont plus riches en C que celles des traitements en labour, indiquant ainsi une évolution différente de la MO du sol selon ces deux pratiques. Les résultats ont également montré que pour le sol argileux étudié, 75 à 87 % du C du sol sont associés à la fraction $< 20 \mu\text{m}$. Or, la matière organique associée à cette fraction est celle qui est physico-chimiquement protégée. Pour les *contenus* en C, qui expriment la part du C du sol localisée dans chaque fraction granulométrique (Figure 11), une différence de distribution du C du sol est observée entre les traitements en NT et traitements en CT. En effet pour les traitements NT, le C du sol est à la fois localisé dans la fraction argileuse stable (F0-20) et dans la fraction sableuse labile (F50-200), alors que pour les traitements CT, il est localisé presque entièrement dans la fraction fine (F0-20). Toutefois, en sachant que le fractionnement a été effectué sur la couche supérieure 0-5 cm et en combinant ces résultats avec ceux du paragraphe II.1.2.e, la distribution du C observée ici (plus de C dans les NT, moins dans les CT, et au niveau de toutes les fractions) semble provenir surtout de l'inversion des couches de sol lors du labour (couches moins riches en C ramenées en surface lors du labour ; paragraphe II.1.2.e et la Figure 7), car dans la littérature, il est rare, voir quasi impossible de constater autant de différences au niveau des contenus en C pour une durée aussi courte (1 année).

Concernant **l'effet en pots**, les résultats montrent qu'au bout de trois mois d'expérimentation, les types de résidus et les modes d'apport de résidus n'induisent pas de changement de teneurs de C du sol. La distribution du C dans les différentes fractions granulométriques est différente pour les trois types de sol. L'apport de résidus de récolte entraîne une légère augmentation de la concentration en C de la fraction organique de 50-200 μm sur le sol très argileux, mais d'une manière générale, l'apport de résidus tend à entraîner une diminution du C des fractions fines du sol qui serait attribué au *priming effect* induit par l'apport de résidus frais au sol. Aussi, à court terme, la restitution des résidus de récolte en quantité modérée affecte peu les teneurs en C du sol. Seul le type du sol induit une différence de la distribution du C dans les différentes fractions granulométriques. L'étude spécifique de l'effet des types de résidus et de leur mode d'apport nécessite donc une expérimentation plus longue. Néanmoins, cette étude nous permet d'avancer trois tendances importantes : (i) l'apport de pailles de riz, par rapport au résidus de soja, peuvent

à long terme induire une augmentation de la teneur en C du sol, (ii) par rapport au mulch, et à court terme, l'enfouissement des résidus peuvent également entraîner une augmentation la teneur en MO du sol, (iii) l'apport des résidus engendre un *priming effect* qui, à court terme, concerne plus la fraction limoneuse grossière que les autres fractions.

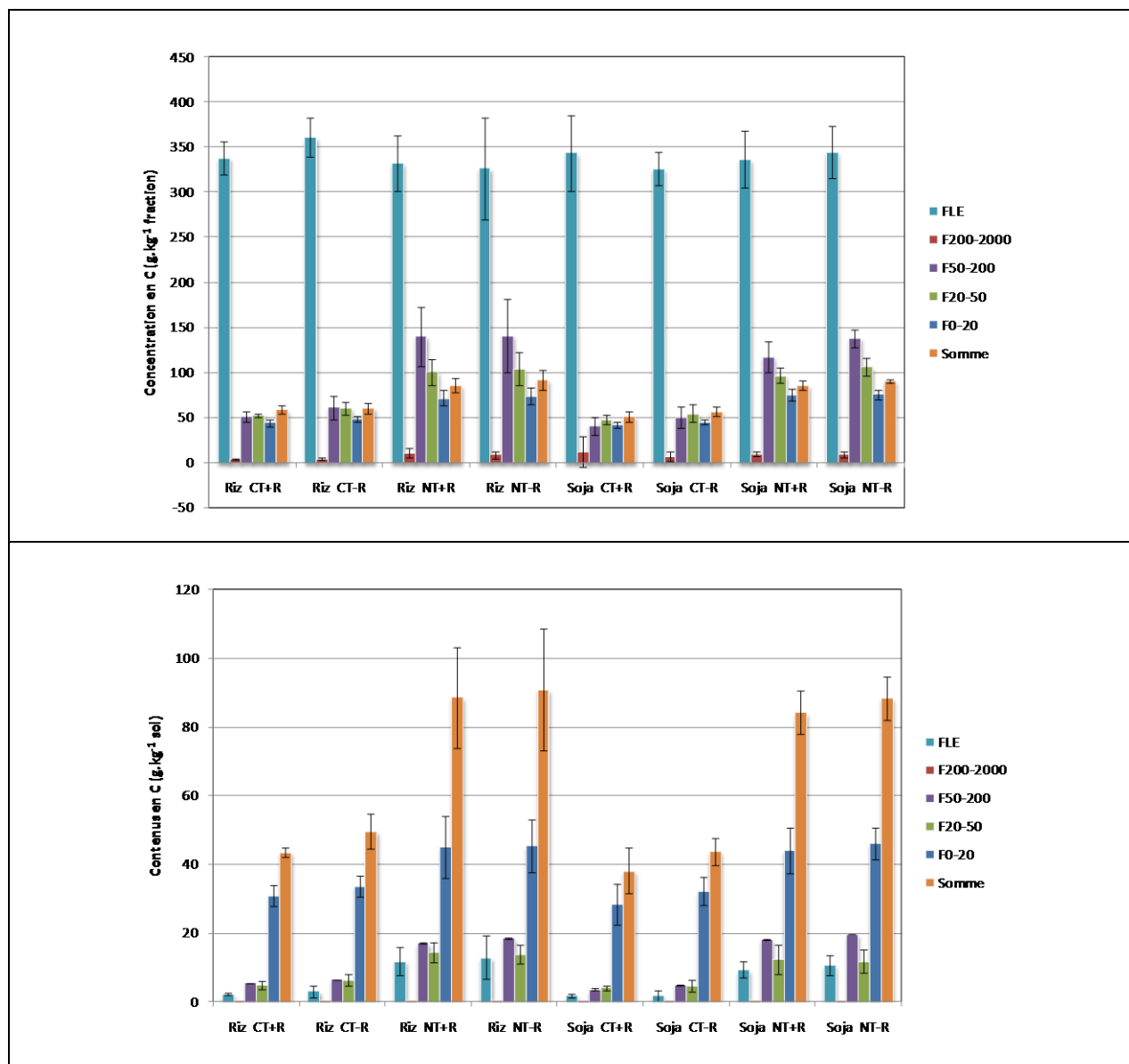
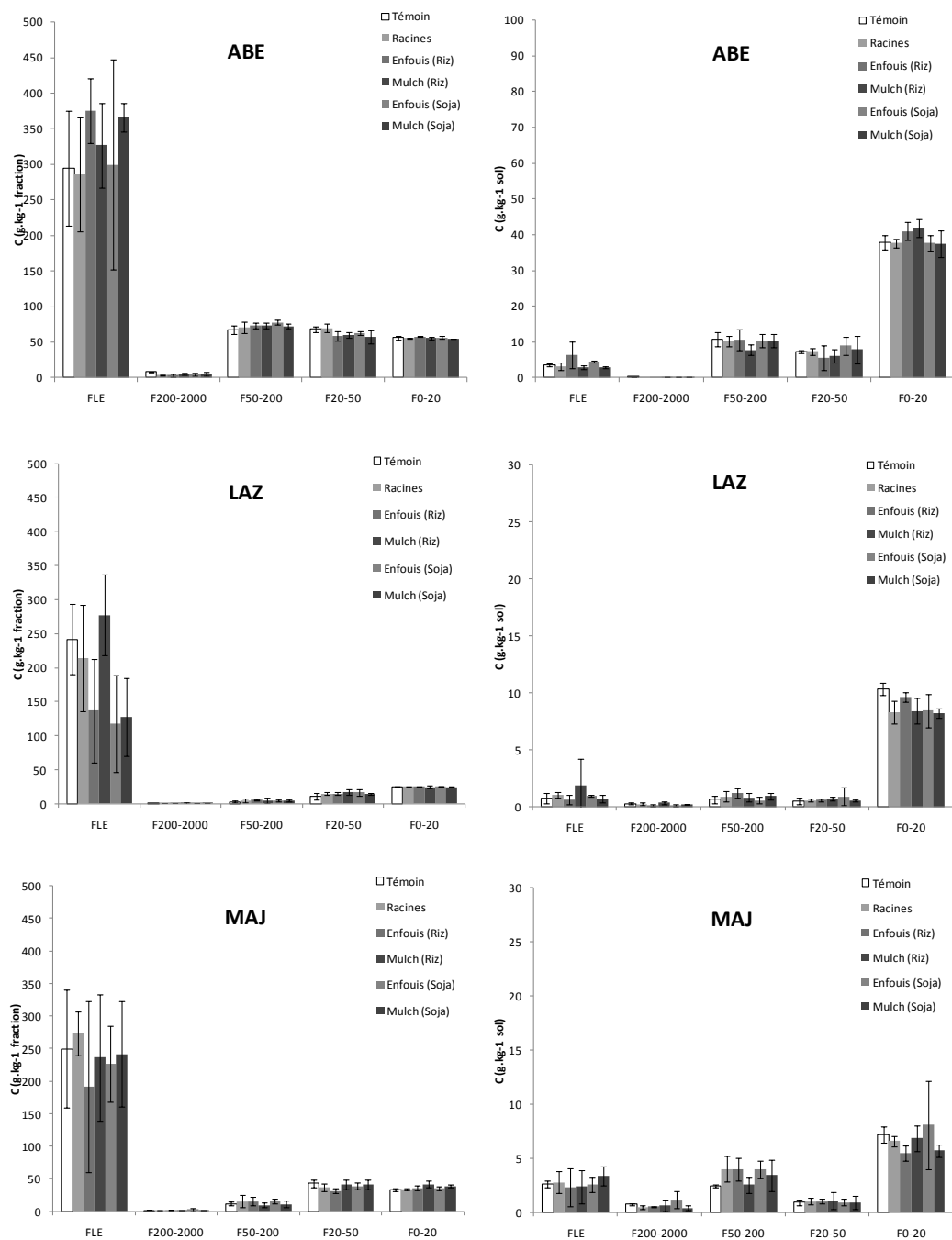


Figure 11 : Concentrations ($g.kg^{-1}$ fraction) et contenus ($g.kg^{-1}$ sol) en C des traitements en semis direct (NT) et labour (CT) en culture de riz ou soja, après une année de mise en place du dispositif. Couche 0-5 cm (Moyennes et écart-types, $n=4$).

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy



ABE : Sol ferrallitique à caractères andiques, provenant d'Antsirabe, LAZ : Sol ferrallitique typique, provenant de Lazaina, MAJ : Sol ferrugineux tropical, provenant de Majunga

Figure 12 : Concentrations ($g.kg^{-1}$ fraction) et contenus ($g.kg^{-1}$ sol) en C des fractions granulométriques issues des différents traitements pour les trois types de sol étudiés.

II.3. Conclusions

Les résultats présentés dans ce mémoire montrent bien que les systèmes en semis direct avec couverture végétal (SCV) permettent d'augmenter les stocks de C du sol, mais cette augmentation n'est pas systématique et dépend de plusieurs facteurs, notamment de la durée des systèmes (durée de l'ordre de 5 à 10 ans), des quantités de résidus organiques restitués (quantités importantes de résidus) et du type de sol (argileux). Le C stocké par ces systèmes est protégé contre la minéralisation microbienne, mais la forme de protection la plus importante pour les sols argileux, majoritairement riches en oxydes de fer et d'aluminium, est la protection physico-chimique. Cette forme de protection est démontrée par la contribution importante de la fraction <0-20 µm au C total du sol, mais également par les corrélations positives et significatives entre le C du sol et la teneur en éléments fins (fraction Argile+Limons fins).

Ainsi, au-delà de leurs effets positifs sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol (porosité, limitation de l'érosion du sol, préservation de la microfaune et de la flore, etc.), les systèmes SCV sont aussi des systèmes séquestrants. Toutefois, à Madagascar, leur diffusion reste limitée (seulement environ 5000 ha en 2008/2009). Depuis 2003, d'autres systèmes SCV basés sur des associations et rotations de culture utilisant des plantes à forte productivité de biomasse, notamment le *stylosanthes*, ont été mis en place afin de restaurer les sols de tanety les moins fertiles. Ces systèmes semblent être plus faciles à réaliser d'où leur adoption plus grande par les paysans (selon le GSDM, passage de 5000 ha en 2008-2009 à 7000 ha en 2009-2010). Les dynamiques de stockage de C en milieu expérimental et en milieu paysan peuvent toutefois se différencier en raison des conduites de culture différentes (par exemple : fertilisation et désherbage systématique en milieu expérimental alors que peu ou presque pas de fertilisation et désherbage en milieu paysan), d'où la nécessité également d'évaluer ces systèmes en milieu paysan. Des projets sur la constitution de projets Mécanismes de Développement Propre (MDP) pour des situations SCV en milieu paysan au Lac Alaotra sont en cours, sous l'initiative du projet Bassin Versant du Lac Alaotra (BV-Lac) et ses partenaires, en collaboration étroite avec l'IRD (UMR Eco&Sols) et le Laboratoire des RadioIsotopes. Ce qui démontre une évolution de la considération de ces pratiques agroécologiques en tant que pratiques également

environnementales permettant d'atténuer l'émission des GES, et donc leur prise en compte sur le marché du C.

Pourtant, pour pouvoir espérer l'intégration de ces systèmes dans le cadre des projets MDP (Mécanismes de Développement Propre) du Protocole de Kyoto, il faut pouvoir les développer sur de larges superficies. Pour l'appropriation de ces systèmes par le petit paysannat malgache, il y aura donc nécessité, dans un avenir proche, de rechercher les blocages socio-économiques qui semblent bloquer actuellement la diffusion de ces systèmes, alors qu'ils se montrent performant sur le plan agro-environnemental.

Mais les systèmes SCV ne sont pas les seuls à pouvoir être séquestrants vis-à-vis des GES. Aussi notre projet de recherche s'attachera à l'étude du stockage de C par deux autres pratiques agricoles et à comprendre les mécanismes qui régissent la stabilisation du C stocké dans le sol.

III. Perspectives (projet de recherche)

Mon projet de recherche pour les 5-10 années futures peut être présenté en deux parties :

- une première partie, plutôt ciblée sur la recherche de pratiques agricoles séquestrantes vis-à-vis des GES,
- une deuxième partie, ciblée sur l'étude de la protection du carbone dans le sol, les dynamiques de protections et les paramètres mis en cause.

III.1. Vers des pratiques agricoles séquestrantes

III.1.1. Introduction et justification

Les résultats présentés dans les parties précédentes montrent que beaucoup reste à faire dans la quantification des stocks de C sous systèmes SCV à Madagascar. D'ailleurs, les systèmes SCV que nous avons étudiés jusqu'ici sont tous des dispositifs expérimentaux. Les systèmes SCV en milieu paysan n'ont pas du tout été étudiés.

Toutefois, bien que les systèmes SCV soient des pratiques agro-écologiques séquestrantes, leur potentialité en terme de séquestration de carbone reste toutefois limitée, car le stockage de C sous ces systèmes, aussi performant qu'ils soient, ne dépasseront que très rarement les 2 Mg C.ha⁻¹. La rente C provenant de ces systèmes, est certes bénéfique pour le paysan, mais ne pourra donc pas être importante ; de plus il faudrait une superficie et/ou un nombre de paysans très important (environ 7000 paysans exploitant 0,5 ha de SCV stockant 0,7Mg.C.ha⁻¹.an⁻¹) pour pouvoir élaborer de grands projets MDP.

Il serait alors intéressant d'étendre notre domaine d'études aux pratiques agricoles à la fois productives et environnementales mais avec un meilleur potentiel de séquestration de C afin de pouvoir intégrer plus facilement et efficacement les différents marchés du carbone. A moyen terme, nous avons ainsi choisi deux pratiques : l'agroforesterie et la riziculture.

Pourquoi l'agroforesterie ? En effet, par similitude avec les systèmes SCV, les systèmes agroforestiers sont des systèmes qui restituent beaucoup de biomasse au sol, biomasse dont la quantité et la qualité peuvent varier suivant les types de plantes choisies. Toutefois, la différence réside dans le fait qu'en agroforesterie, le stockage ne se fait pas uniquement dans le sol, mais également dans la biomasse végétale notamment, le compartiment aérien (tronc, rameaux, etc), souterrain (racines grossières). D'un autre côté, les inter-rangs ou inter-arbres peuvent être cultivés ou non, ce qui peut induire des dynamiques de C différentes.

Quant à la riziculture, c'est une pratique culturelle très présente et sur de vastes surfaces à Madagascar. Elle se présente sous différentes formes (inondée, pluviale) et décline différents modes de gestion qui peuvent impacter les dynamiques du C du sol d'une part, mais aussi les flux des autres GES, (notamment le CH₄ et le N₂O), d'autre part. Ce système a été très peu étudié jusqu'ici à Madagascar en termes de sortie environnementale, alors que l'existence de pratiques rizicoles très diversifiées permet d'aborder ces questions sous des angles divers.

III.1.2. L'agroforesterie : étude bibliographique commentée

Définition

Plusieurs définitions ont été attribuées au terme agroforesterie. Le World Agroforestry Centre (www.icraf.cgiar.org) le définit comme étant « l'ensemble des systèmes et des techniques d'utilisation des terres où des plantes ligneuses vivaces sont délibérément associées aux cultures ou à la production animale sous forme d'un arrangement spatial ou d'une séquence temporelle prenant place sur une même unité de gestion de la terre. Les systèmes agroforestiers sont caractérisés par des interactions écologiques et économiques entre leurs diverses composantes ». L'Association for Temperate Agroforestry, AFTA (www.aftaweb.com) le définit comme étant un mode de gestion intensive des systèmes qui optimise les bénéfices provenant des interactions biologiques qui sont créées quand les arbres ou arbustes sont combinés avec les cultures ou l'élevage. Albrecht et Kanji (2003) dans une revue bibliographique le définit comme un mode de gestion des systèmes qui garde, introduit ou mélange les arbres ou les ligneux pérens dans les champs de culture, les pâturages et/ou élevage afin d'exploiter les interactions

écologiques et économiques entre ses différents composants. En d'autres termes, l'agroforesterie est une pratique qui, grâce aux interactions biologiques entre les arbres et la culture, permet une meilleure mise à disposition et utilisation des ressources (nutriments, eau, lumière), qui profite à l'ensemble du système. Grâce à l'introduction de l'arbre dans le paysage agricole, les systèmes agroforestiers induisent une amélioration des propriétés physiques (structuration, porosité, réserve d'eau) et chimiques (disponibilité des éléments minéraux) des sols, mais également une meilleure productivité des cultures et des pâturages. Outre, ces multiples avantages, ces systèmes restituent une quantité importante de biomasse végétale au sol, sous forme de feuilles, de rameaux, de tiges, et de racines.

Les différents types de pratiques agroforestières

Il y a différents types de systèmes agroforestiers. En **milieux tempérés**, les principaux types observés sont : les *cultures intercalaires*, l'*agrisylviculture* qui associe des feuillus (olivier, noyer, merisier) à des cultures annuelles, les *systèmes sylvopatoraux*, les *haies vives ou brise-vents*, les *bandes riveraines*, et les *produits forestiers non ligneux*. En **milieux tropicaux arides et semi-arides**, on observe les *techniques sylvopastorales* qui consistent à associer des arbres fourragers ou arbustes à des aires de pâturage ou aussi à constituer des haies vives d'arbres fourragers (*Leuceana*, *Calliandra*, *Sesbania*, *Euphorbia*) autour des champs de culture ou pâturage, et les *parcs agroforestiers* qui associent des cultures annuelles avec un couvert clairsemé d'arbres variés (*Faidherbia albida*, karité, etc.). En **milieux tropicaux humides et sub-humides**, on distingue les *plantations sous couvert arboré* qui associent des arbres nécessitant de l'ombrage (cacaoyer et caféier) avec des arbres de taille plus grande qui les recouvrent (eucalyptus), les *jardins de case*, les *jardins multi-étagés*, les *cultures en couloirs*, les *jachères améliorées*, et finalement l'*arboriculture* qui associe des arbres fruitiers (arbre à litchi) ou des arbres à épices (giroflie) avec des cultures annuelles ou du pâturage, ou qui associent lianes (poivrier, vanillier) et leur arbre à tuteur.

Agroforesterie et stocks/séquestration de C

Cette grande diversité de pratiques agroforestières entraîne souvent des difficultés quant à l'évaluation de leur impact en terme global. Rien qu'à l'échelle de la superficie actuelle en agroforesterie, les chiffres donnés par la littérature sont très différents. Si Watson *et al.* (2000) ont donné des chiffres de 400 Mha, Dixon *et al.* (1995) donnent des chiffres de 585 à 1215 Mha, ce qui est une fourchette assez large, et Nair *et al.* (2009a), de 1000 Mha. Toutefois, ce secteur est reconnu comme présentant un potentiel énorme en termes de séquestration de C. L'IPCC (2000) a estimé que si les 630 Mha de terres dégradées et les pâturages étaient aménagés en agroforesterie, 586 GgC.an⁻¹ seraient potentiellement séquestrés d'ici 2040.

En effet, contrairement, aux pratiques agricoles où le stockage de C se fait uniquement dans le sol, les systèmes agroforestiers peuvent stocker du C dans la biomasse aérienne, dans la biomasse racinaire ou souterraine et dans le sol. D'après Nair *et al.* (2009b), les stocks de C dans la biomasse aérienne des systèmes agroforestiers tropicaux varient de 6 à 172 Mg C.ha⁻¹ et ceux dans la biomasse souterraine (racines grossières) de 1 à 20 Mg C.ha⁻¹ pour des situations âgées de 2 à 26 ans avec des types et densités d'arbres très différents suivant les systèmes.

Nair *et al.* (2009b) ont également essayé de donner des valeurs indicatives de stocks de C du sol, et des potentiels de séquestration de C pour différents types de systèmes agroforestiers en milieux tropicaux (Tableau 6). Ces valeurs varient de 20 à 200 Mg C.ha⁻¹ (profondeur 0-50 cm) et de 5 à 250 Mg C.ha⁻¹ (profondeur 0-100 cm), respectivement.

Ces fourchettes de valeurs sont très larges et illustrent l'énorme variabilité du potentiel de séquestration de C par ces systèmes, et ceci dans tous les compartiments (végétation aérienne, souterraine et sol). Il est aussi à remarquer que les importances de ces différents compartiments sont quasi-identiques pour certains systèmes.

Séquestration de carbone dans les agrosystèmes à Madagascar : Bilans et protection

Synthèse des travaux de Recherche

Tantely Razafimbelo-Andriamifidy

Tableau 6 : Valeurs indicatives du stock de C du sol et du potentiel de séquestration de C dans principaux types d'agrosystèmes en milieu tropical (Nair *et al.* 2009b)

Major ecological regions and agroforestry systems	System characteristics—E: existing; N: new plantings; TD: tree density (trees ha ⁻¹); age: years (yr)	Soil carbon (Mg C ha ⁻¹) ^b		Time frame for realizing the potential (yr) ^c
		Stock to 50 cm soil depth	Potential for sequestering additional C to 100 cm soil depth	
Humid Lowlands				
Shaded perennial systems	E > 15 yr	100–200	20–30	10
	N/young, <5-yr-old	70–150	100–200	
Alley cropping	E > 5 yr	20–45	25–75	>5
	N or young < 5 yr	20–70	30–120	>10
Improved fallow		60–100	80–150	
Homegardens	Low TD < 750 trees/ha	60–90	70–150	>20
	Medium TD > 750/ha	70–120	100–180	>20
Tree intercropping	E, Low TD < 50/ha	20–80	50–100	>20
	E, Med TD, 50–100/ha	40–100	70–120	
	E, High TD > 100/ha	50–120	80–150	
Silvopasture (Grazing systems)	E, TD Low, <25/ha	80–100	80–120	>20
	E, TD High > 25/ha	80–120	90–150	
Silvopasture (Fodder bank)	E > 10-yr-old	60–95	30–60	
	N or young < 10 yr	75–95	50–150	
Woodlots	E > 10 yr	80–100	40–60	>20
	N or young < 8 yr	50–80	50–150	
Tropical Highlands				
Shaded perennial systems	E > 15-yr-old	100–200	20–50	10
	N or young, <5 yr	70–150	100–250	
Alley cropping	E > 5 yr	30–60	40–70	>5
	N or young < 5 yr	20–70	40–120	>10
Homegardens	Low TD < 250 trees/ha	50–80	70–150	>20
	Medium TD, >250/ha	70–150	100–200	
Silvopasture (Grazing systems)	E, TD Low, >20/ha	70–120	80–150	>20
	E, TD High	80–150	90–160	
Silvopasture (Fodder bank)	E > 10 yr	60–100	30–70	>20
	N or young < 8 yr	75–110	60–150	
Woodlots	E > 10-yr-old	80–100	40–70	>20
	N or young < 5 yr	50–80	60–170	
Arid and Semiarid Lands (mostly lowlands)				
Intercropping systems	Parklands, W Afr Sahel E 50 trees/ha	30–40	20–30	5–10
Silvopasture, semiarid regions: Grazing lands	E 50 trees/ha	30–40	20–30	5–10
	N: Planting trees in existing grazing lands			30–50
Fodder bank	N		30–100	
Fuelwood lot	N			

^a The values are “best-guess” estimates based on literature data (from nearly 150 peer-reviewed papers and reports) and authors’ experience. Detailed literature citations are included in Nair *et al.* (2009). ^bThe soil C stock values are reported mostly from the upper soil layers, to less than 50 cm depth. Therefore the estimates are for 0–50 cm soil depth. These as well as the values for sequestration potential will vary enormously depending on a large number of site-and system-specific factors. ^{b,c}The values proposed as potential for sequestering additional C (column 4) are for up to 1 m depth considering the substantial amounts of tree roots and the SOC in deeper soil layers. It is assumed that the existing systems have only limited potential in SCS unless they are significantly modified by management interventions such as new (tree) planting and fertilization; but the potential could be substantial in new agroforestry initiatives. It is also recognized that fairly long periods of time (column 5) are required to realize the potential for additional C sequestration in soils.

Toutefois, des ordres de grandeurs sur le potentiel de séquestration de C par ces systèmes en milieux tropicaux ont déjà été donnés dans la littérature. Ainsi, Albrecht et Kandji (2003) donnent une valeur moyenne de 95 Mg C.ha⁻¹, avec une étendue variant de 12 à 228 Mg C.ha⁻¹.

Et pourtant des problèmes d'ordre méthodologique...

La mesure/estimation du potentiel de stockage/séquestration de C par les pratiques agroforestières est toutefois difficile du fait de la grande diversité typologique de ces systèmes. A cela s'ajoute, également, les différents types d'arbres. D'une manière générale, l'évaluation est basée sur un bon inventaire de différentes pratiques agroforestières et de leur mode de gestion. La méthodologie est basée sur une estimation du C stocké dans les différents compartiments.

Pour la biomasse aérienne, les principales méthodes couramment utilisées sont l'utilisation des modèles allométriques. Les modèles allométriques existants ont été souvent développés sur des forêts naturelles. Pour les systèmes agroforestiers, il est nécessaire d'adapter ces modèles en fonction des types d'arbres composant le système.

Pour la biomasse racinaire, les données de la littérature se basent sur l'utilisation des root/shoot ratios variant de 0,18 (forêts tropicales) à 0,30 (forêts tempérées). Pourtant le stockage de C par les racines (biomasse souterraine) peut être très important. Une des méthodes utilisées est une évaluation, sur une superficie donnée (polygone de Voronoi), de la distribution spatiale des grosses, moyennes et fines racines par une excavation complète du sol (Razakavololona, 2006). C'est une méthode assez fastidieuse entraînant l'utilisation des coefficients root/shoot ratios qui peuvent entraîner des biais dans l'estimation du C séquestré.

Pour le sol, la difficulté réside dans la profondeur à prendre en compte. La littérature est très hétérogène là-dessus, et on observe des profondeurs allant de 0-10 cm (Lal 2005) à 0-200 cm (Makumba *et al.* 2007). Similairement aux cultures annuelles, des études sur systèmes agroforestiers ont montré que les principaux changements de stocks de C du sol concernent les 20 premiers centimètres et justifient ainsi la prise en compte des seuls horizons de surface (< 30

cm) dans la mesure des stocks de C sous systèmes agroforestiers. Toutefois, l'existence des racines en profondeur peut entraîner des augmentations de stocks de C non estimés.

L'agroforesterie à Madagascar : importance, types, localisation

A Madagascar, l'agroforesterie est pratiquée sous différentes formes, mais d'une manière générale, elle est pratiquée sur la partie Est, Nord-Est et Sud-Est de l'île où sont installées les cultures de rente, notamment : les caféiers, les cacaoyers, les girofliers, le poivrier, les arbres à litchis, etc. Ce sont en général des cultures qui nécessitent des arbres d'ombrage (cacaoyers et caféiers) ou des tuteurs (poivriers, vanilliers). Ces arbres (girofler, arbre à litchi) sont cultivés seuls, ou associés à ces cultures annuelles comme le riz, le manioc, etc. Leur densité de plantation varie fortement d'une exploitation à une autre.

Différents types d'exploitations existent : les grandes exploitations agricoles, qui représentent des superficies énormes et tenues par les exportateurs ou industries et les exploitations paysannes de taille moyenne ou petite qui peuvent être composées de petites parcelles, mais peuvent se limiter également à quelques arbres non regroupés géographiquement.

L'âge des exploitations varie énormément, mais d'une manière générale, les exploitations âgées > 30 ans dominent. Toutefois, des plantations jeunes sont également observées surtout pour les girofliers et les poivriers.

Cette diversité peut ainsi engendrer quelques difficultés dans notre approche de la séquestration de C en pratiques agroforestières à Madagascar puisque devrait être pris en compte les types d'arbre, les types d'association, les différences de densité et d'âge des systèmes. L'ensemble de ces paramètres implique une adaptation de notre méthodologie aux différentes pratiques agroforestières.

III.1.3. Riziculture : étude bibliographique commentée

Riziculture et gaz à effet de serre

Le riz est le principal aliment de base pour plus de 50% de la population mondiale, et occupe ainsi une superficie de 155 Mha. Les pays asiatiques (Chine, Inde, Indonésie, Bangladesh) sont les principaux producteurs de riz à l'échelle mondiale avec environ 90% de la production mondiale. A Madagascar, la riziculture occupe près de 45 % des surfaces cultivées et reste la culture principale pour la majorité des paysans malgaches.

Toutefois, la riziculture, et notamment la riziculture inondée, est connue comme principalement émettrice de méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O).

La production de 1 kg de riz, en culture inondée, correspond à une émission de 120 g de CH₄. En effet, les systèmes irrigués sont des émetteurs potentiels de CH₄ du fait de l'immersion continue dans l'eau entraînant des conditions anaérobioses, favorable pour la méthanogenèse.

L'émission de CH₄ dans le sol est toutefois la résultante entre deux activités microbiennes antagonistes mais interdépendantes : la méthanogenèse et la méthanotrophie. La méthanogenèse est le processus qui conduit à la production de CH₄ par les bactéries méthanogènes. Les quantités de CH₄ produit par méthanogenèse en rizières inondées varient de 0 à 78 kg CH₄.ha⁻¹.j⁻¹. Cette quantité augmente quand on apporte des résidus au sol (pailles) et peut aller jusqu'à 128 kg CH₄.ha⁻¹.j⁻¹. La méthanotrophie est le processus qui consiste en une consommation de CH₄ par les bactéries méthanotrophes. La méthanotrophie se fait en conditions aérobies, et en milieux cultivés, les valeurs de CH₄ consommé par ces processus sont de 0 à 1,7 kg CH₄.ha⁻¹.j⁻¹ (Le Mer and Roger 2001). En milieux inondés, on parle d'*émission ou source de méthane* car le bilan méthanogenèse-méthanotrophie est positif. En milieux exondés, on parle de *consommation ou de puits de méthane* car le bilan méthanogenèse-méthanotrophie est négatif (Le Mer and Roger 2001).

Le CH₄ est produit lors de la décomposition de matières organiques en absence d'oxygène (anaérobies) sous l'action des bactéries méthanogènes. Les émissions de CH₄ sont plus élevées

en rizières inondées en continu qu'en rizières inondées par intermittence (Nagroho *et al.* 1994). Ces émissions diminuent progressivement jusqu'à zéro au cours du drainage, puis remontent progressivement lors de l'inondation (Bronson *et al.* 1997). Toutefois, en contre partie, les émissions de N₂O, qui est un gaz à effet de serre plus puissant que CH₄, augmentent progressivement entre le drainage et la re-inondation du sol suite à une aération progressive du sol lors du retrait d'eau. Plus la période de drainage est long, plus l'émission de N₂O sera importante (Towprayoon *et al.* 2005). N₂O peut être émis en sols de rizière par des processus de nitrification et/ou dénitrification, en conditions aérobies ou strictement anaérobies si le sol est pourvu en azote en quantité suffisante suite à un apport de fertilisants chimiques ou organiques.

Les sols de rizières sont potentiellement riches en C. En effet, les résidus de récolte (pailles de riz) sont souvent restitués au sol, et augmente ainsi les teneurs en C du sol. On pourrait penser que les vitesses de décomposition de la MO du sol seraient ralenties en conditions anaérobioses (par opposition aux conditions aérobies) et entraîneraient une accumulation de MO dans le sol (Sahrawat 2004). Toutefois, Neue et Scharpenseel (1987) ont montré qu'il n'y a pas de différence de décomposition entre des pailles de riz marquées ¹⁴C mises en rizières inondées et des pailles de riz mises en conditions aérobies. Or, des augmentations significatives de teneurs en C du sol en riziculture irriguée, en expérimentation de longue durée, sont souvent observées (Kirk 2004; Li *et al.* 2005; Olk *et al.* 1996). Ces augmentations de teneurs en C sont alors plus expliquées par les quantités importantes de résidus restitués au sol que par un retard de décomposition de ces résidus (Neue *et al.* 1997).

La littérature rapporte également des teneurs en C élevées dans les horizons profonds des sols de rizières et les attribue à une migration de la MO soluble dans ces horizons profonds (Kögel-Knabner 1997).

Une méthodologie de mesure connue

Les mesures des émissions des CH₄ et N₂O sont souvent effectuées en plaçant des chambres hermétiques et statiques sur le terrain. Les dimensions des chambres varient énormément suivant la littérature. La chambre statique est installée sur la ligne de culture en y incluant le plant de riz

car le CH₄ et N₂O sont émis dans l'atmosphère par diffusion, sous forme de bulles, mais également (pour CH₄) par la plante à travers des lacunes aérifères (micropores) au niveau des feuilles, tiges et racines. Les mesures sont effectuées temporellement et à différentes phases clés du développement du riz, mais surtout des phénomènes de retraits d'eau et d'irrigation.

L'un des problèmes majeurs est la forte variabilité des émissions obtenues, à la fois dans le temps et dans l'espace, qui est souvent palliés par de très nombreuses répétitions spatio-temporelles.

Pour les stocks de C, les mesures se font par une évaluation des bilans de C à l'échelle de la parcelle.

Riziculture à Madagascar et GES

Deux types de riziculture existent à Madagascar, la riziculture pluviale et la riziculture inondée. Ces deux types d'agriculture peuvent avoir des dynamiques différentes en termes de flux de gaz à effet de serre (GES : CO₂, N₂O, CH₄) et peuvent avoir une importance non négligeable sur les émissions ou stockage de GES d'origine agricole à Madagascar. La riziculture pluviale, du fait des conditions aérobies peut-être alors un puits (stockage) de CH₄, mais par contre une source (émission) de N₂O car la riziculture pluviale reçoit annuellement des fertilisants azotés (1% de l'azote apporté annuellement est émis sous forme de N₂O). Les rizières inondées peuvent être principalement émettrices de CH₄ du fait des conditions anoxiques, mais peuvent, par contre, stocker une quantité importante de carbone (C) du fait de l'importance des racines et du ralentissement de la décomposition des résidus.

Pour des raisons agricoles, de nouvelles pratiques culturales ont été introduites en riziculture inondée : le SRA (Système de riziculture améliorée) et le SRI (Système de riziculture intensif). Ces deux techniques qui consistent à (i) une réduction de l'âge des plants repiqués (25 jours pour SRA et 8 jours pour SRI), (ii) une maîtrise de l'eau par des successions d'irrigation-drainage au cours de la saison et (iii) à un apport d'éléments fertilisants (organique et minéral pour SRA et

organique pour SRI) peuvent également induire des différences importantes en termes de flux de GES.

Il serait alors intéressant d'étudier l'impact des différents modes de gestion cités (riziculture pluviale vs riziculture irriguée) et des différentes pratiques culturales (riziculture traditionnelle vs SRA vs SRI) ci-dessus, sur les flux de GES, mais aussi, de comptabiliser ainsi, les quantités de CO₂ (ou d'équivalent-CO₂ pour les autres GES) émis ou économisés (stockés) dans le sol par ces différentes pratiques/mode de gestion selon une approche *empreinte carbone*, en considérant les émissions de GES de l'ensemble des activités (intrants, mécanisation, transport, fuites) afin d'évaluer le cout environnemental et ainsi de caractériser le type de riziculture et/ou la pratique culturale le (la) plus rentable à la fois en termes agronomiques et environnementaux.

III.1.4. Objectifs et questions de recherche

Le présent projet de recherche concerne ainsi l'étude des impacts des différentes pratiques agricoles, la riziculture principalement et pratiques agroforestières sur la séquestration de GES. Il s'agit alors de quantifier le stockage/séquestration de GES en fonction des différences en termes de modes de gestion, d'une part, mais également en fonction des autres paramètres déterminants de la séquestration de GES, notamment les types d'apports, types de sols, itinéraires techniques, etc , d'autre part.

Ce projet de recherche vise aussi à évaluer à une échelle régionale, le stockage de C induite par ces différentes pratiques dans l'objectif de mettre à disposition des ONG et groupements/associations œuvrant dans le développement des informations/données nécessaires pour une élaboration de projets en vue du marché du C .

Ainsi, les **questions de recherche** qui en découlent sont les suivantes :

A l'échelle de la parcelle, quels sont les effets des pratiques rizicoles et agroforestières sur la séquestration de GES ?

- Quelles sont les quantités de C stocké par les pratiques ?

- Quelles sont les bilans des autres GES (N₂O et CH₄) provenant de ces pratiques ?

- Quels sont les paramètres qui influent sur ces stockages/émissions ?

A l'échelle régionale, quelles sont les pratiques qui donnent un meilleur ratio production/environnement ?

- Quels sont les coûts environnementaux ? (approche filière : intrants, mécanisation, transport, etc.).

- Quels sont les bilans en termes d' « empreinte-carbone » ?

- Quelles sont les potentialités de ces pratiques en termes de « puits » de C ?

III.1.5. Mise en œuvre

Inventaire des systèmes

Cet inventaire consistera à recenser toutes les variantes de pratiques agroforestières et de la riziculture. L'objectif étant de définir une typologie des pratiques existantes pour l'agroforesterie, et des modes de gestions et itinéraires techniques pour la riziculture. L'inventaire devra aboutir à une identification de pratiques regroupant les critères nécessaires à la définition des principaux déterminants du stockage et/ou émission de GES. Dans cette phase d'inventaire, une attention particulière sera portée sur la définition du système de référence.

La méthodologie utilisée

Il s'agira, après identification des pratiques, de mesurer, pour le cas du C, les stocks de C pour les différents compartiments, et pour les autres GES, de mesurer les flux aux champs (par des cloches hermétiques) et les émissions potentielles au laboratoire.

Pour les systèmes agroforestiers, l'établissement des modèles allométriques pour chaque type d'arbre permettra une quantification plus fiable de la biomasse végétale (aérienne et racinaire). Les difficultés pourront survenir pour les types d'arbres où les plantations sont tellement âgées

qu'il est difficile de trouver des arbres jeunes. Des travaux préliminaires sur l'établissement de ces modèles ont déjà été effectués sur des arbres à litchi, giroflier et *glyricidia* (arbre tuteur de poivrier) (Mémoire d'ingénieur de Sismondy RAMIANDRISOA).

Pour le C du sol, les profondeurs considérées seront différentes entre agroforesterie et riziculture suivant les profondeurs d'enracinement considérées, une profondeur de 0-40 cm sera retenue pour la riziculture et de 0-100 cm en agroforesterie. Pour les mesures de C, l'outil MIRS (spectrométrie dans le moyen infrarouge) sera utilisé pour permettre de réaliser des mesures de C à haut débit mais à moindre coût.

Les émissions des autres GES seront réalisées in situ pour les parcelles rizicoles, avec un suivi des variations spatio-temporelles. Cette partie est actuellement abordée dans le cadre d'un projet avec AgriSud Internationale (Post-doctorat de Michel RABENARIVO). Des mesures des potentiels d'émission pourront être faites en laboratoire pour essayer de pallier aux manques de points lors des mesures sur terrain.

A l'échelle régionale, l'estimation des superficies utilisées et l'utilisation des photos satellites pourront être nécessaires pour avoir une estimation de la quantité potentielle de C en équivalent CO₂ disponible pour le marché du C via ces deux pratiques (riziculture et agroforesterie), aussi bien dans le cadre du marché volontaire que dans le cadre des projets MDP.

Pour l'approche empreinte C des filières, une évaluation/quantification des émissions de GES générées par les différentes étapes de la filière sera effectuée.

Collaborations

Ce projet sera mené en collaboration avec différents partenaires de recherche, notamment (i) avec l'UMR Eco&sols de l'IRD, qui travaille beaucoup sur le thématique stockage et séquestration de GES, (ii) avec l'URP Scrid, qui s'intéresse autant que nous par ce volet aux bénéfices environnementaux de la riziculture, mais aussi (iii) à des partenaires de développement ainsi que les paysans qui détiennent les différentes parcelles sur lesquelles nous aimerions

intervenir. Un début de collaboration a été déjà effectué avec le CTHT, pour l'aspect agroforesterie, et avec AgriSud International pour l'aspect riziculture.

III.2. La protection du C du sol : vers la protection chimique ?

III.2.1. Etude bibliographique commentée

Nous avons vu précédemment que dans le sol, le C est protégé contre la minéralisation microbienne suivant trois processus bien distincts :

- la protection physique, qui concerne la MO à l'intérieur des agrégats stables du sol,
- la protection physico-chimique, qui consiste en une association forte de la MO avec les particules minérales fines du sol,
- la protection « chimique » ou « biochimique », qu'on appelle également « récalcitrance chimique » de la MO.

Dans un sol donné, il est difficile à priori de définir quel type ou processus de protection serait le plus prépondérant par rapport à un autre.

La protection physique

Plusieurs travaux de la littérature ont déjà démontré l'existence de la protection physique de la MO et sa pertinence en tant que processus majeur de l'accumulation de la MO dans le sol. Si au départ, ces travaux ont été beaucoup menés dans les pays tempérés (Balesdent *et al.* 2000; Beare *et al.* 1994; Gupta and Germida 1988), plus tard, l'intérêt d'aborder ces problématiques dans les sols tropicaux où la stabilité des agrégats est non seulement influencée par l'existence des oxydes fer et d'aluminium mais aussi par la MO (Barthès *et al.* 2007) s'avérait pertinente. Dans le cas des sols étudiés à Madagascar par nous-mêmes, le C protégé physiquement varie de 2 à 12 % du

C du sol, avec une valeur moyenne de 5 % du C du sol, ce qui nous semble des valeurs assez faibles mais cohérentes avec la littérature.

Nos résultats antérieurs laissent également suggérer que la protection physique se fait au niveau des macroagrégats (>200 μm), mais qu'elle peut se faire également dans les microagrégats (< 50 μm). D'ailleurs, dans ce sens, Six et al. (2002a) ont rapporté que la protection du C dans les microagrégats peut être 4 à 5 fois plus élevée que celle dans les macroagrégats. Il serait alors intéressant de tester cette hypothèse pour nos sols afin de déterminer la part de ces 2 classes d'agrégats (micro et macro) dans la protection physique du C. Notons qu'il y a deux types de microagrégats : les microagrégats libres, et les microagrégats situés à l'intérieur des macroagrégats.

Le niveau de la protection physique du C dans le sol peut dépendre de plusieurs facteurs, et principalement des facteurs qui influencent la dynamique des agrégats dans le sol, notamment les modes de gestion (semis direct vs labour ou forêt vs culture, résidus mulch vs résidus enfouis) et le type de sol (texture, minéralogie, et teneurs en oxydes de Fe/Al). Jusqu'ici, nous n'avons pu faire ressortir un effet type de sol majeur du fait probablement de l'insuffisance du nombre de situations analysées par type de sol ; aussi des recherches sont à continuer dans cette perspective

La protection physico-chimique

Il est connu que la protection physico-chimique est plus importante pour les sols de texture argileuse que pour les sols de texture sableuse. Dans le sol, les produits microbiens (sucres aminés) (Six *et al.* 2002a) et/ou les acides organiques produits par les racines (oxalate, malate, citrate) sont très vite adsorbés sur la fraction argileuse, ou plus globalement la fraction argile+limons fins. Ces composés sont des composés labiles (facilement minéralisable), mais du fait de leurs charges négatives, ils se fixent rapidement sur la fraction fine (argile + limons fins) du sol par l'intermédiaire des ponts cationiques. Certains de ces composés organiques s'adsorbent également plus facilement sur les oxydes de fer ou d'aluminium. Les sols tropicaux sont des sols riches en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. Ces oxyhydroxydes ont des fortes capacités de flocculer les MO du fait de leurs charges positives (interactions

électrostatiques) qui peuvent également entraîner une stabilisation ou une protection physico-chimique de la MO. Barthes et al. (2007) ont ainsi montré que, pour les sols tropicaux, les teneurs en oxydes, mais essentiellement les teneurs en Al en substitution dans les oxydes de fer déterminent la formation des macroagrégats et l'accumulation de C dans les sols tropicaux. Dans nos sols, les teneurs en éléments fins et en oxydes de fer et d'Al peuvent ainsi être déterminants pour la protection physico-chimique du C.

La part de C associé à la fraction argile+limons fins varie également suivant les modes de gestion. Mais nos études ayant été réalisées à des pas de temps très court, il n'y a pas eu de tendance majeure d'effet des modes de gestions sur la protection physico-chimique. L'utilisation d'outils traceurs comme le cas du ^{13}C en abondance naturelle sera une des solutions à ce problèmes mais il faut que les situations étudiées s'y prêtent.

La protection chimique

La protection chimique est un mécanisme de protection de la MO qui est dû en grande partie à une composition chimique très complexe de la MO du sol (Six *et al.* 2002a). Cette composition peut provenir des propriétés initiales des résidus (qualité des résidus), mais peut également provenir des réactions de condensation et de complexation des composants organiques lors de la décomposition. Cette récalcitrance chimique est attribuée aux composés organiques à molécules complexes et riches en noyaux aromatiques (Rasse *et al.* 2005) qui regroupent les lignines et les tannins, mais aussi des composés aliphatiques comme les cutines et les subérines. La structure de ces composés est tellement complexe qu'il est difficile pour les microorganismes de les dégrader (par exemple : la lignine est une molécule polyphénolique qui a des liaisons éther et des liaisons C-C). Un nombre limité de microorganismes, notamment les champignons (*white-rot fungi* ou champignons de la pourriture blanche), est capable de minéraliser la lignine complètement (Hammel 1997). D'autres produits provenant de la faune du sol et des microorganismes du sol comme la muréine, la chitine, et certains lipides peuvent être également considérés comme des formes stables.

La protection chimique peut ainsi dépendre de la qualité des résidus restitués au sol, mais aussi des différentes modes de gestion qui peuvent influencer ou non la population microbienne du sol.

Dans nos résultats antérieurs, le fait que certains sols qui possèdent des teneurs en C élevées, minéralisent peu en conditions optimum et montrent un faible niveau de protection physique du C, pourrait laisser supposer une forte protection physico-chimique, mais également une protection chimique via des formes récalcitrantes de C. Cette dernière forme de protection de C n'a toutefois pas été abordée dans nos études antérieures.

Quelles méthodes pour appréhender l'approche protection de la MO dans le sol

Pour la protection physique, la littérature rapporte plusieurs méthodes de séparation des agrégats en différentes classes (Beare *et al.* 1994; Deneff *et al.* 2004; Elliott 1986; Pulleman and Marinissen 2004; Razafimbelo *et al.* 2008; Yoder 1936), mais la protection physique est toujours évaluée par la minéralisation d'agrégats intacts (structure conservée, MO protégée) et d'agrégats broyés (structure détruite, MO non protégée). La taille du broyage dépend de la classe d'agrégats à broyer et correspond en général à la taille inférieure de la classe d'agrégat considéré (par ex pour les agrégats 200-2000 μm , le broyage est effectué à 200 μm).

Pour la protection physico-chimique, les méthodes existantes consistent en une séparation de la MO du sol en fractions organiques associées aux fractions minérales du sol (sables, limons, argiles), par dispersion des éléments élémentaires et tamisages successifs. Les différences entre les méthodes concernent surtout l'obtention des fractions organiques légères ou les matières organiques particulières (par densimétrie, flottaison, etc), mais pour les fractions organiques associées à la fraction fine, l'ultrason est régulièrement utilisé pour disperser les fractions minérales (Christensen 1992; Feller 1979; Stemmer *et al.* 2000). La méthode Feller *et al.* (Feller 1979) combine la dispersion des particules par un dispersant chimique (hexametaphosphate), la flottaison dans l'eau des MO particulières et l'utilisation de l'ultrason pour séparer les fractions organiques plus fines (>50 μm).

Pour la protection chimique, différentes méthodologies sont proposées par la littérature. L'hydrolyse acide permet de séparer la MO hydrolysable (protéines, acides nucléiques, polysaccharides) de la MO non hydrolysable (récalcitrants, aromatique, etc.) (Six *et al.* 2002a). La mesure de la décomposition *in situ* ou en laboratoire permet d'isoler les éléments rapidement dégradés (celluloses) et les plus résistants (lignine et polyphénols). Des incubations de longues durées permettent également d'estimer les compartiments organiques stables des compartiments labiles (Marschner *et al.* 2008).

III.2.2. Objectifs et questions de recherche

Se basant sur nos résultats antérieurs effectués sur une gamme de sols malgaches, ce projet de recherche vise ainsi à comprendre les mécanismes majeurs de la protection du C dans ces sols, en fonction des types de sols et des modes de gestion selon différents agrosystèmes (labour vs semis direct, culture vs agroforesterie, riziculture et autre).

Les questions de recherche qui en découlent sont ainsi les suivantes, pour un agrosystème donné :

Pour la protection physique :

- Où se situe la protection physique du C ? Dans quelle(s) classe(s) d'agrégat(s) est-elle réellement localisée ?

- Les modes de gestion et le sol (en termes de texture, minéralogie, teneurs en oxydes) affectent-ils le niveau et la localisation de la protection physique du C ?

Pour la protection physico-chimique,

- Le C associé aux fractions fines (argile+limons fins) est-t-il réellement stable ?

Pour la protection chimique,

- Celle-ci est-elle dépendante de la qualité des intrants ?

- Quel est le niveau de protection chimique de C dans les sols cultivés à Madagascar ?

- Les modes de gestion et le type de sols affectent-ils la protection chimique du C dans le sol ?

III.2.3. Mise en œuvre

Choix des systèmes

Les agrosystèmes qui seront sélectionnés pour cette partie proviendront des principaux agrosystèmes cités ci-dessus (agroforesterie, riziculture) mais aussi ceux qui ont déjà étudiés précédemment (semis direct et labour), mais intégrant des différences en termes de teneurs en C, de texture du sol, de type d'argile (minéralogie), mais aussi de mode de gestion (mode de restitution des résidus, mulch, enfouis).

Les méthodes utilisées

La protection physique sera effectuée sur des agrégats séparés suivant la méthode Kemper et Rosenau (1986) modifiée afin de pouvoir récupérer les différentes classes d'agrégats. La protection physique sera mesurée par différence de minéralisation entre agrégats détruits et agrégats intacts en conditions contrôlées (28°C, 28 jours, 80% d'humidité à la capacité au champ). Les macro- et microagrégats seront broyés à 200 µm et à 50 µm respectivement.

La protection physico-chimique sera effectuée suivant l'approche Feller et al. (2001b) en séparant bien la MO associée aux différentes fractions granulométriques du sol. Les potentiels de minéralisation de ces différentes fractions seront déterminés ensuite par une minéralisation de ces fractions en conditions contrôlées. La méthode « micro-resp » utilisée actuellement par Tiphaine Chevallier à l'UMR Eco&Sols sera particulièrement choisie du fait de sa facilité/rapidité.

La protection chimique sera abordée par hydrolyse acide (HCl 6N) du sol. Les MO particulières seront séparées, et sur la fraction restante, la MO hydrolysable sera extraite selon la méthode utilisée par Leavitt et al. (1996), (cité par Augris et al. (1998)).

Collaborations

Une collaboration est déjà en cours avec Tiphaine Chevallier et Alain Albrecht de l'UMR Eco&Sols sur la réalisation d'une manipulation en pot où différents paramètres pouvant influencer la dynamique des agrégats et de la matière organique du sol sont testés, notamment le type de sol (3 sols étudiés), le type de résidus (légumineuse, graminée) et le mode d'apport des résidus (enfouis et mulch). La stabilité des agrégats, la répartition de la MO dans ces agrégats et la répartition de la MO dans les fractions granulométriques de la MO du sol ont été mesurées. Des débuts de mesures de la respiration des différentes classes d'agrégats ont été également entrepris avec la méthode « Micro-Resp ».

Probablement, avec un nouveau projet AIEA que nous souhaitons déposer cette année, une collaboration avec l'équipe ... est prévue afin d'appréhender plus finement l'approche protection chimique via l'utilisation de l'outil ^{13}C .

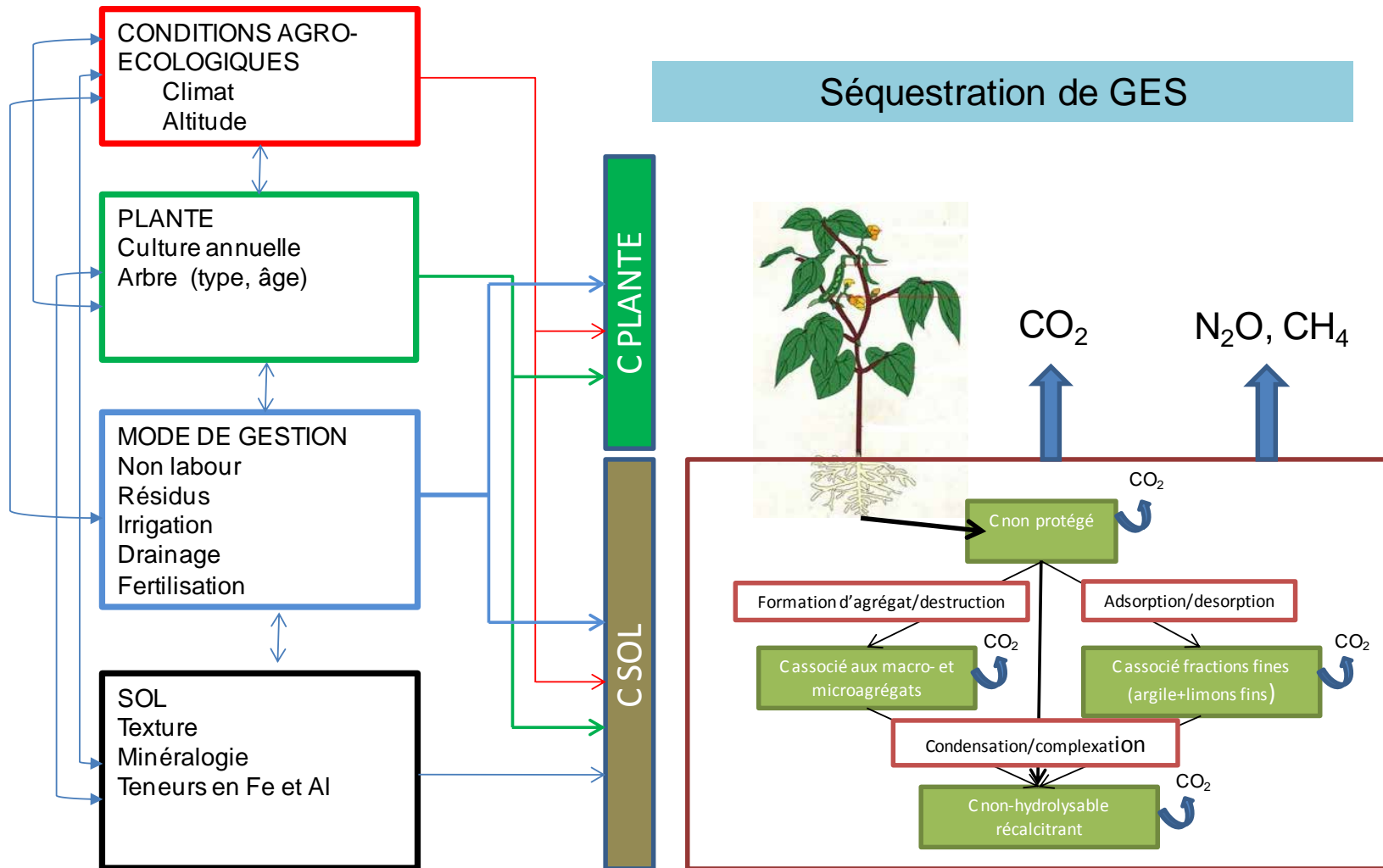


Figure 13 : Schéma conceptuel des paramètres qui influencent la séquestration des GES pour les agrosystèmes étudiés.

IV. References bibliographiques

Albrecht A, Angers DA, Beare MH, Blanchart E (1998) Déterminants organiques et biologiques de l'agrégation : implications pour la recapitalisation de la fertilité physique des sols tropicaux. *Cahiers Agricultures* **7**, 357-363.

Albrecht A, Kandji ST (2003) Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **99**, 15-27.

Alvarez R, Lavado RS (1998) Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* **83**, 127-141.

Anyanzwa H, Okalebo JR, Othieno CO, Bationo A, Waswa BS, Kihara J (2010) Effects of conservation tillage, crop residue and cropping systems on changes in soil organic matter and maize-legume production: a case study in Teso District. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **88**, 39-47.

Augris N, Balesdent J, Mariotti A, Derenne S, Largeau C (1998) Structure and origin of insoluble and non-hydrolyzable, aliphatic organic matter in a forest soil. *Organic Geochemistry* **28**, 119-124.

Balesdent J, Chenu C, Balabane M (2000) Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* **53**, 215-230.

Barthès B, Kouakoua E, Larré-Larrouy MC, Razafimbelo T, de Luca EF, Azontondé A, Neves C, de Freitas PL, Feller C (2007) Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma* **143**, 14-25.

Beare MH, Cabrera ML, Hendrix PF, Coleman DC (1994) Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal* **58**, 787-795.

Bernoux M, Cerri CC, Cerri CEP, Siqueira Neto M, Metay A, Perrin A-S, Scopel E, Razafimbelo T, Blavet D, Piccolo MdC, Pavei M, Milne E (2006) Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development* **26**, 1-8.

Bertol I, Engel FL, Mafra AL, Bertol OJ, Ritter SR (2007) Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research* **94**, 142-150.

Besnard E, Chenu C, Balesdent J, Puget P, Arrouays D (1996) Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science* **47**, 495-503.

Blanchart E, Bernoux M, Sarda X, Siqueira Neto M, Cerri CC, Piccolo MC, Douzet JM, Scopel E, Feller C (2007) Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus* **72**, 81-87.

Bronson KF, Neue HU, Singh U, Abao EB (1997) Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in flooded rice soil: I. Residue, nitrogen, and water management. *Soil Science Society of America Journal* **61**, 981-987.

Chevallier T, Blanchart E, Albrecht A, Feller C (2004) The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). *Agriculture, Ecosystems & Environment* **103**, 375-387.

Christensen BT (1992) Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In 'Advances in Soil Science'. (Ed. BA Steward) pp. 1-90. (Springer-Verlag: New York).

Denef K, Six J, Merckx R, Paustian K (2004) Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal* **68**, 1935-1944.

Dixon RK (1995) Agroforestry systems: source or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* **31**, 99-116.

Elliott ET (1986) Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal* **50**, 627-633.

Feller C (1979) Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* **17**, 338-346.

Feller C, Albrecht A, Blanchart E, Cabidoche YM, Chevallier T, Eschenbrenner V, Hartmann C, Larré-Larrouy MC, N'Dandou JF (2001a) Soil organic carbon sequestration in tropical areas.

General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **61**, 19-31.

Feller C, Balesdent J, Nicolardot B, Cerri CC (2001b) Approaching "functional" soil organic matter pools through particle-size fractionation: examples for tropical soils. Chapter 5. In 'Assessment Methods for Soil Carbon'. (Eds R Lal, JM Kimble, BA Stewart) pp. 53-67. (CRC Press Boca Raton).

Feller C, Beare MH (1997) Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma* **79**, 69-116.

Fischer RA, Santiveri F, Vidal IR (2002) Crop rotation, tillage and crop residue management for wheat and maize in the sub-humid tropical highlands I. Wheat and legume performance. *Field Crops Research* **79**, 107-122.

Follett RF (2001) Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research* **61**, 77-92.

Gavinelli E, Feller C, Larré-Larrouy MC, Bacye B, Djegui N, Nzila JD (1995) A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples of tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **26**, 1749-1806.

Gupta VVSR, Germida JJ (1988) Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* **20**, 777-786.

Halvorson AD, Reule CA, Follett RF (1999) Nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen in a dryland cropping system. *Soil Science Society of America Journal* **63**, 912-917.

Hammel KE (1997) Fungal degradation of lignin. In 'Driven by nature: Plant litter quality and decomposition'. (Eds G Cadisch, KE Giller) pp. 33-45. (CAB International: Wallingford, UK).

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra Juan L, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978.

Hutchinson JJ, Campbell CA, Desjardins RL (2007) Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* **142**, 288-302.

IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds JT Houghton, V Ding, DJ Griggs, M Noguer, P van der Linden, D X., K Maskell) p. 944. (Cambridge University Press: Cambridge).

IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds RK Pachauri, A Reisinger) p. 104p. (Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland).

Kemper WD, Rosenau RC (1986) Aggregate stability and size distribution. In 'Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs'. (Ed. A Klute) pp. 425-442 Madison, WI).

Kirk G (2004) 'The biogeochemistry of submerged soils.' (Wiley: Chichester).

Kirschbaum MUF (1995) The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* **27**, 753-760.

Kögel-Knabner I (1997) ¹³C and ¹⁵N NMR spectroscopy as a tool in soil organic matter studies. *Geoderma* **80**, 243-270.

Lal R (2005) Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* **220**, 242-258.

Lal R, Kimble JM, Follet RF, Cole CV (1998) Cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Ann Arbor Press, Michigan.

Larson WE, Clapp CE, Pierre WH, Morachan YB (1972) Effects of increasing amounts of organic residue on continuous corn. II. Organic C, N, P and S. *Agronomy Journal* **64**, 204-208.

Le Mer J, Roger P (2001) Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* **37**, 25-50.

Leavitt SW, Follett RF, Paul EA (1996) Estimation of slow- and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis. *Radiocarbon* **38**, 231-239.

Li ZP, Zhang TL, Li DC, Velde B, Han FX (2005) Changes in soil properties of paddy fields across a cultivation chronosequence in subtropical China. *Pedosphere* **15**, 110-119.

Makumba W, Akinnifesi FK, Jansenn B, Oenema (2007) Long-term impact of a griricidia-maize intercropping system on carbon sequestration in southern Malawi. *Agriculture Ecosystems & Environment* **118**, 237-243.

Marschner B, Brodowski S, Dreves A, Gleixner G, Gude A, Grootes PM, Hamer U, Heim A, Jandl G, Ji R, Kaiser K, Kalbitz K, Kramer C, Leinweber P, Rethemeyer J, Schaeffer A, Schmidt MWI, Schwark L, Wiesenberg GLB (2008) How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* **171**, 91-110.

Michellon R, Rakotondralambo P, Razanamparany C, Moussa N, Séguy L (2003) Cropping systems on permanent soil cover for Madagascar highlands. In 'IInd World Congress on Conservation Agriculture'. Iguaçu, Brazil.

Nagroho SG, Lumbanraja J, Suprpto H, Sunyoti WS, Ardjasa H, Kumura M (1994) Effect of intermittent irrigation on methan emission from an Indonesian paddy field. *Soil Science and Plant Nutrition* **41**, 275-286.

Nair PKR, Kumar BM, Nair VD (2009a) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* **172**, 10-23.

Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile SG (2009b) Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy* **12**, 1099-1111.

Neto MS, Scopel E, Corbeels M, Cardoso AN, Douzet J-M, Feller C, Piccolo MdC, Cerri CC, Bernoux M (2010) Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil and Tillage Research* **110**, 187-195.

Neue HU, Gaunt JL, Wang ZP, Beicker-Heidmann P, Quijano C (1997) Carbon in tropical wetland. *Geoderma* **79**, 163-185.

Neue HU, Scharpenseel HW (1987) Decomposition pattern of ¹⁴C-labeled rice straw in aerobic and submerged rice soils of Phillipines. *Science of the Total Environment* **62**.

Olk DC, Cassman KG, Randall EW, Kinchesh P, Sanger LJ, Anderson JM (1996) Changes in chemical properties of organic matter with intensified rice cropping in tropical lowland soil. *European Journal of Soil Science* **47**, 293-303.

Paustian K, Parton WJ, Persson J (1992) Modeling of soil organic matter in organic amended and nitrogen--fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal* **56**, 476-488.

Puget P, Chenu C, Balesdent J (2000) Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* **51**, 595-605.

Pulleman MM, Marinissen JCY (2004) Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma* **120**, 273-282.

Rasse DP, Rumpel C, Dignac M-F (2005) Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* **269**.

Raun WR, Johnson GV, Phillips SB, Westerman RL (1998) Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. *Soil and Tillage Research* **47**, 323-330.

Razafimbelo T (2005) Stockage et protection de carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. These de Doctorat, Université de Montpellier II.

Razafimbelo T, Albrecht A, Oliver R, Chevallier T, Chapuis-Lardy L, Feller C (2008) Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil & Tillage Research* **98**, 140-149.

Razafimbelo T, Barthes B, De Luca EF, Larré-Larrouy MC, Laurent J-Y, Cerri CC, Feller C (2003) Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Bresil. *Etude et Gestion des Sols* **10**, 191-200.

Razafimbelo T, Barthes B, Larre-Larrouy M-C, Luca EFD, Laurent J-Y, Cerri CC, Feller C (2006) Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **115**, 285-289.

Robert M (2002) La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. FAO, Rome.

Saha S, Chakraborty D, Sharma AR, Tomar RK, Bhadraray S, Sen U, Behera UK, Purakayastha TJ, Garg RN, Kalra N (2010) Effect of tillage and residue management on soil physical properties and crop productivity in maize (*Zea mays*)-Indian mustard (*Brassica juncea*) system. *Indian Journal of Agricultural Sciences* **80**, 679-685.

Sahrawat KL (2004) Organic matter accumulation in submerged soils. *Advances in Agronomy* **81**, 169-201.

Scopel E, Douzet JM, Macena da Silva FA, Cardoso A, Moreira JAA, Findeling A, Bernoux M (2005) Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les cerrados brésiliens. *Cahiers Agricultures* **14**, 71-75.

Seguy L, Husson O, Charpentier H, Bouzinac S, Michellon R, Enjalric F, Ramarison I, Rakotondramanana (Eds) (2009) 'Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente.' (Cirad, TAFA, GSDM, AFD, MAEP: Antananarivo).

Singh G, Jalota SK, Singh Y (2007) Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice-wheat system in Punjab, India. *Soil and Tillage Research* **94**, 229-238.

Six J, Conant T, Paul A, Paustian K (2002a) Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* **241**, 155-176.

Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW (1998) Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* **62**, 1367-1377.

Six J, Feller C, Deneff K, Ogle SM, Sà JCM, Albrecht A (2002b) Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* **22**, 755-775.

Stemmer M, Roth K, Kandeler E (2000) Carbon mineralization and microbial activity in a field site trial used for ¹⁴C turnover experiments over a period of 30 years. *Biology and Fertility of Soils* **31**, 294-302.

Tisdall JM (1996) Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In 'Structure and organic matter storage in agricultural soils'. (Eds MR Carter, BA Stewart) pp. 57-96. (Lewis Publ.: Boca Raton, FL).

Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S (2005) Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere* **59**, 1547-1556.

Walkley A, Black IA (1934) An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* **63**, 251-257.

Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000) 'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Land Use, Land-use change, and Forestry. A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.' (Cambridge University Press: Cambridge,UK).

Webb W, S. S, Lauenroth W, Kinerson R, Smith M (1978) Primary productivity and water use in native forest, grassland and desert ecosystems. *Ecology* **59**, 1239-1247.

Wu L, Wood Y, Jiang P, Li L, Pan G, Lu J, Chang AC, Enloe HA (2008) Carbon Sequestration and Dynamics of Two Irrigated Agricultural Soils in California. *Soil Science Society of America Journal* **72**, 808-814.

Yoder RE (1936) A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of soil erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy* **28**, 337-351.