

THESE

présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
pour obtenir le diplôme de : Doctorat en Science du Sol

**STOCKAGE ET PROTECTION DU CARBONE DANS UN SOL FERRALLITIQUE
SOUS SYSTEMES EN SEMIS DIRECT AVEC COUVERTURE VEGETALE
DES HAUTES TERRES MALGACHES**

par

Tantely Maminiaina RAZAFIMBELO

soutenue le 28 novembre 2005 devant le jury composé de :

Lilia RABEHARISOA	Professeur Université d'Antananarivo	Rapporteur
Roel MERCKX	Professeur Université Catholique de Leuven	Rapporteur
Brigitte BRUNEL	Professeur ENSA.M, Montpellier	Président du jury
Florent MARAUX	Directeur de Recherche CIRAD, Montpellier	Examineur
Christian FELLER	Directeur de Recherche IRD, Montpellier	Directeur de thèse
Alain ALBRECHT	Directeur de Recherche IRD, Montpellier	Co-directeur de thèse

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a bénéficié de l'appui de l'Agence Universitaire pour la Francophonie (AUF) et du « Département Soutien et Formation » de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Je les remercie de m'avoir octroyé des bourses d'études.

Ce travail n'a pu aboutir sans le concours de nombreuses personnes à qui j'aimerais témoigner ici ma profonde gratitude et reconnaissance, plus particulièrement à :

- Monsieur Christian Feller, Directeur de Recherche à l'IRD, à qui je dois la direction de cette thèse. Malgré ses multiples occupations, il a toujours su accorder une importance particulière à ce travail, depuis la formulation du sujet jusqu'aux derniers jours de la correction du présent document. Il a porté un regard critique et objectif sur ce travail et ses remarques et conseils ont guidé l'orientation générale de cette thèse,

- Monsieur Alain Albrecht, Directeur de Recherche à l'IRD, pour avoir énormément contribué à la facilitation des opérations de prélèvements de sol et les manipulations effectuées à Madagascar. Je lui suis également reconnaissante de ces longues discussions qui ont guidé l'interprétation des résultats de la présente étude ;

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus profonde gratitude ;

- Madame Lilia Rabeharisoa, Professeur à l'Université d'Antananarivo, et Monsieur Roel Merckx, Professeur à l'Université Catholique de Leuven, pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse.

- Madame Brigitte Brunel, Professeur à l'ENSAM et Monsieur Florent Maraux, Directeur de Recherche au CIRAD, pour avoir accepté de siéger au jury de cette thèse,

Qu'ils soient assurés de mes plus profonds respects ;

- Monsieur Robert Oliver, Chercheur au CIRAD, pour son appui au niveau de la réalisation des travaux de laboratoire effectués au laboratoire MOST CIRAD ;

- Monsieur Vincent Eschenbrenner, pour m'avoir initié aux premiers gestes de prélèvement de sol au cylindre, un véritable point de départ pour la présente étude.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma vive reconnaissance ;

Mes sincères remerciements à l'endroit de tous les techniciens qui m'ont assisté durant ces trois années, particulièrement à :

- Monsieur Jean Luc Marger, pour son appui lors des dosages de l'azote minérale au laboratoire MOST CIRAD ;

- Monsieur Jean Yves Laurent et Henri Ferrer, pour avoir réalisé les analyses de carbone et d'azote organiques, sur les milliers d'échantillons que j'ai ramenés du terrain ;

- Madame Joële Louri et Monsieur Ivan Grandière pour la mise au point et la réalisation des fractionnements granulo-densimétriques ;

- Messieurs Eugène Andriamisamanana, Lova Andriambao et Madame Hantanirina Ravomanana, pour leur aide lors de la préparation d'échantillons et des travaux de laboratoire au LRI.

Je remercie les équipes de terrain pour leur contribution lors des échantillonnages, particulièrement :

- L'équipe de l'ONG Tafa, pour avoir permis l'accès aux dispositifs expérimentaux de longue durée. Merci à Roger Michellon, Narcisse Moussa, Célestin Razanamparany et Florizat, pour les renseignements qu'ils ont apportés pour la compréhension et la description des dispositifs ;

- Toute l'équipe du FOFIFA Antsirabe, pour leur aide et appui, ainsi que leur convivialité lors des préparations des échantillons, au centre FOFIFA Antsirabe ;

- Monsieur Bertrand Muller, pour avoir organisé les premiers jours de prélèvements. Je n'oublierai pas le dynamisme et la disponibilité dont il a fait montre pour l'organisation de ce travail ;
- Monsieur Lala Zakariasy Andriarimalala, pour avoir largement facilité les procédures d'envoi des échantillons, par le biais du service Agronomie du laboratoire des Radioisotope (LRI).

Je tiens aussi à remercier Tiphaine Chevallier, Lydie Lardy, Raphaël Manlay, Eric Blanchart et Martial Bernoux pour leurs aides et conseils ; toute l'équipe de l'UR SeqBio de l'IRD et du laboratoire MOST du CIRAD pour leur accueil chaleureux et leur convivialité; sans oublier les deux secrétaires Noémie Cauquil et Michèle Tigny pour leur efficacité dans la résolution des problèmes administratifs.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire des Radiosotopes (LRI) et de la représentation de l'IRD à Madagascar pour leur convivialité.

Que tous mes amis, thésards et stagiaires, trouvent ici mes sincères remerciements pour leur amitié et sollicitude, particulièrement : Aurélie Métay, Edmond Hien, Sansan Youl, Bodo Rabary, Berthe Rasoamampionona, Afef Ben Arfa, Alina Cicani, Victoria Altinier, Aude Ripoche, Ivan Grandière, Thomas Boyer, Fidy Ramahandry, Laingo Rakotoson, Herizo N. Rakotoniaina, Michel Rabenarivo, David Ferrat, Guilhem Soutou, Sozic Touzard, Mathieu Goudet, Cécile Guillou, Mahmoudou Bélem, Taoufik Ouagga, Olivier Porte et Sofian Conche, sans oublier tous ceux qui m'ont témoigné leur sympathie et amitié.

Un grand merci à mes parents qui n'ont cessé de nous baigner depuis notre enfance dans le milieu de la recherche et de l'enseignement, qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude ;

Enfin, que mon cher époux, qui m'a toujours soutenu et encouragé, trouve ici ma reconnaissance et le témoignage de mon amour.
C'est à lui et à toute ma famille que je dédie ce travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR	: Association Française des Normalisations
AOC	: Aggregate organic carbon
C	: Carbone
Ca	: Calcium
CEC	: Capacité d'échange cationique
CH ₄	: Méthane
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
cm	: Centimètre
C _{min}	: Carbone minéralisé
CO ₂	: Dioxyde de Carbone
CPG	: Chromatographie en phase gazeuse
CT	: Conventional Tillage, labour conventionnel
CV	: Coefficient de variation
DRX	: Diffraction des rayons X
Fe	: (élément) Fer
FGDMO	: Fractionnement granulo-densimétrique de la matière organique
FOFIFA	: Foibe Fikarohana momba ny Fambolena
g	: Gramme
GES	: Gaz à effet de serre
h	: Heure
h/s-k	: Rotation de culture haricot/soja sur couverture de kikuyu
H ₂ O ₂	: Peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée)
ha	: Hectare
HMP	: Hexamétaphosphate de sodium
INRA	: Institut Nationale de la Recherche Agronomique
IPCC	: InterGovernmental Panel on Climate Change
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
ITCF	: Institut Technique des Céréales et des Fourrages
K	: Potassium
KCl	: Chlorure de potassium
kg	: Kilogramme
L	: Litre
m/m-d	: Rotation de culture maïs/maïs sur couverture de desmodium
m/p	: Rotation de culture maïs/pomme de terre
m/s	: Rotation de culture maïs/soja
MA	: Macroagrégat (200-2000 µm)
MAEP	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
ME	: Mésoagrégat (20-200 µm)
mg	: Milligramme
Mg	: (élément) Magnésium
Mg	: (unité) Mégagramme, 10 ⁶ grammes
MI	: Microagrégat (0-20 µm)
mL	: Millilitre
MO	: Matière organique
MOP	: Matière organique particulaire
MO _{Pe}	: Matière organique particulaire externe aux agrégats
MO _{Pi}	: Matière organique particulaire interne aux agrégats
MS	: Matière sèche
µm	: Micron-mètre (10 ⁻⁶ m)
N	: Azote
N ₂ O	: Protoxyde d'azote
Na	: Sodium
NT	: No-Tillage, semis direct

ONG : Organisation Non Gouvernementale
P : Phosphore
PIB : Produit Intérieur Brut
r/s : Rotation de culture riz/soja
SCV : Semis direct avec Couverture Végétale
SG : Sable grossier
SOC : Soil organic carbon, carbone organique du sol
TAFA : Tany sy Fampandrosoana (Terre et Développement)
TS : Taux de saturation
UPDR : Unité de Politique de Développement Rural
W : Water-soluble, fraction soluble à l'eau

RESUME

Stocker du carbone (C) dans le sol représente à la fois des enjeux agronomiques (amélioration des propriétés physico-chimiques du sol) et environnementaux (réduction de la quantité de CO₂ atmosphérique). A Madagascar, le stockage et la protection de C dans le sol, sous systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sont étudiés sur un dispositif de longue durée (11 ans) de la région d'Antsirabe, Hautes Terres malgaches).

Quatre systèmes sont étudiés : un système en labour conventionnel (Conventional-tillage) [CT m/s, rotation maïs (*Zea mays* L.)-soja (*Glycine max.* L.)], et trois systèmes en SCV sans travail du sol (No-tillage, NT) [NT m/s, rotation maïs-soja ; NT m/m-d, rotation maïs-maïs avec une couverture végétale de *Desmodium uncinatum* ; et NT h/s-k, rotation haricot (*Phaseolus vulgaris*)-soja avec une couverture de *Pennisetum clandestinum*]. Les résidus de récoltes sont exportés de la parcelle pour CT m/s alors qu'ils sont restitués pour les NT.

Les résultats montrent des teneurs en C significativement plus élevées sous systèmes NT par rapport à CT à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Au-delà de 10 cm de profondeur, les deux modes de gestion ne sont plus différents. Les valeurs de stocks de C à masse équivalente indiquent des stockages annuels élevés pour les systèmes NT étudiés, de 0,7 à 1,0 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour la couche de 0-20 cm. Ce stockage annuel élevé sous systèmes NT est en grande partie attribué à l'importante quantité de biomasse restituée par ces systèmes, par rapport au système labouré.

Les teneurs en C élevées sous NT s'accompagnent d'une teneur élevée en macroagrégats (MA) stables à l'eau, de 16 à 33 % plus élevée par rapport à CT, à 0-5 et 5-10 cm. Ces macroagrégats stables contribuent à plus de 80 % à la différence de teneur en C entre systèmes NT et CT. Ceci pourrait induire une protection physique du C se trouvant à l'intérieur des agrégats contre la minéralisation microbienne.

Les fractionnements granulo-densimétriques effectués sur ces échantillons permettent de localiser le C stocké sous NT. A 0-5 cm, 30 à 40 % du C stocké sont associés aux matières organiques particulières internes aux agrégats stables (MOPi) de taille supérieure à 50 µm et 40 à 60 % aux fractions fines de taille inférieure à 50 µm. A 5-10 cm, 60 à 90 % du C stocké sont localisés dans les fractions fines (< 50 µm) du sol. Si la matière organique associée aux fractions fines du sol est protégée physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne par son adsorption sur les particules minérales du sol, les MOPi sont protégées physiquement par leur emprisonnement à l'intérieur des agrégats.

Par ailleurs, la déprotection de ces MOPi, par broyage grossier (< 200 µm) du sol total ou par broyage fin (< 50 µm) des macro- et mésoagrégats, ne révèle, qu'une faible quantité de C protégé physiquement (de 26,2 à 54,0 µgC.g⁻¹ sol). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces MOPi, comme le montrent les observations au microscope électronique à balayage, sont recouvertes et imprégnées de fractions fines qui les protègent physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne malgré la destruction des agrégats.

En conclusion, pour le sol argileux considéré ici, les systèmes SCV testés s'avèrent très efficaces pour stocker du C dans le sol. Ce C stocké est relativement stabilisé puisqu'il est protégé, au moins physico-chimiquement, contre la minéralisation microbienne.

MOTS CLES : Sol tropical argileux, semis direct sous couvert végétal, stockage et protection de C, stabilité des agrégats, fraction granulométrique, fraction densimétrique, minéralisation.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) storage can improve soil physico-chemical properties and reduce atmospheric carbon dioxide content. SOC storage and protection under no-tillage (NT) systems were studied in a long term (11 years) experiment at Antsirabe, Madagascar Highlands. Four treatments were studied: (i) control (CT m/s), annual rotation of maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max*) with conventional tillage (CT, i.e. hand ploughing). (ii) the same rotation but without tillage (NT m/s); (iii) a maize/maize rotation with a legume crop (*Desmodium uncinatum*) as permanent cover and no tillage (NT m/m-d); (iv) a common bean (*Phaseolus vulgaris*)/soybean rotation with kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) as a permanent cover, and no tillage (NT h/s-k). Plant residues were exported for CT treatments while not removed for NT.

Results showed SOC content significantly higher in NT than in CT systems at 0-5 and 5-10 cm depths while no differences were found below 10 cm depth. At 0-20 cm depth, the annual rate of SOC storage in NT, in soil mass basis, was relatively high, about 0.7 to 1.0 MgC ha⁻¹ yr⁻¹. This difference was mainly attributed to the high quantity of residues input in NT systems.

Water stable aggregates (WSA) were 16 to 33 % more in NT than in CT at 0-5 and 5-10 cm-depths. In NT systems, WSA accounted for more than 80 % of the stored C suggesting a physical protection of C inside aggregates structure from microbial mineralization.

Granulo-densimetric fractionation indicated the location of the stored C among soil fractions. In the upper soil layer (0-5 cm) of NT, 30 to 40 % of the stored C was located in particulate organic matter inside aggregates (POMi, >50 µm) and 40 to 60 % was associated with fine fraction (clay+silt, < 50 µm). At 5-10 cm depth, the stored C was mainly associated with fine fractions (60 to 90 %). This SOC fraction was protected physico-chemically against microbial mineralization by its adsorption on fine mineral particles while POMi was protected physically by its confinement inside aggregates.

Incubation experiments of intact and crushed soil (ground until < 200 µm) and aggregates (macro- and mesoaggregates, ground until < 50 µm) showed a little quantity of C physically protected inside aggregates (26.2 to 54.0 µg C g⁻¹ soil). Electronic microscopy observations revealed that POMi was recovered by clay particles which protected them from microbial mineralization, despite of the destruction of aggregates structure.

In conclusion, no-tillage management was efficient to store C in the studied clayey soil because the SOC was relatively stabilized by at least physico-chemically protection against microbial mineralization.

KEYWORDS: tropical clayey soil, no-tillage, SOC storage and protection, aggregate stability, granulometric fraction, densimetric fraction, mineralization.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
SITUATION GENERALE	2
Géographie	2
Relief.....	2
Climat.....	2
Type de sol	3
PROBLEMES DE L'AGRICULTURE A MADAGASCAR.....	4
LE SEMIS DIRECT DANS LE MONDE ET A MADAGASCAR	6
Histoire.....	6
Les principaux systèmes SCV.....	7
Semis direct et productivité en milieu tropical.....	8
Systèmes SCV et propriétés des sols.....	8
Développement des systèmes SCV à Madagascar.....	8
LA SEQUESTRATION DU CARBONE.....	11
Définition, flux de gaz et déterminants du stockage du C dans le sol en milieu tropical. 11	
Stockage de C sous systèmes SCV	13
HYPOTHESES DE L'ETUDE	14
Chapitre 1. Teneurs et stocks de C sous différents systèmes SCV dans la région d'Antsirabe, Hautes Terres, Madagascar	16
1.1. PRESENTATION DU MILIEU	17
1.1.1. La région d'Antsirabe - Vakinankaratra	17
1.1.2. Les sites d'études	19
1.1.3. Les systèmes étudiés.....	20
1.2. METHODES	22
1.2.1. Prélèvements de sol.	22
1.2.2. Analyses.....	22
1.3. RESULTATS	24
1.3.1. Densités apparentes	24
1.3.2. Profils et stocks de carbone du sol.....	27
1.3.3. Stabilité des agrégats	28
1.3.4. Caractérisation morphologique, physico-chimiques et minéralogique des profils pédologiques	30
1.4. DISCUSSION	36
1.5. CONCLUSION.....	37

Chapitre 2. Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar

41

2.1. INTRODUCTION	43
2.2. MATERIELS ET METHODES	44
2.2.1. Présentation du milieu.....	44
2.2.2. Présentation du site expérimental et prélèvements de sol.....	45
2.2.3. Méthodes analytiques	50
2.3. RESULTATS	52
2.3.1. Profil type, description, analyses et classification.....	52
2.3.2. Densités apparentes, teneurs et stocks de carbone selon les traitements.....	56
2.3.3. Stabilité des agrégats de sol selon les traitements.....	57
2.3.4. Respirométrie.....	58
2.4. DISCUSSION	60
2.4.1. Type de sol et teneur en C.....	60
2.4.2. Systèmes SCV et stocks de C du sol	61
2.4.3. Systèmes SCV, stabilité de l'agrégation et protection physique du C.....	62
2.5. CONCLUSION.....	64
2.6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64

Chapitre 3. Distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar selon différents systèmes SCV.....68

3.1. INTRODUCTION	70
3.2. MATERIELS ET METHODES	71
3.2.1. Site expérimental et prélèvements de sol	71
3.2.2. Fractionnement physique de la MO du sol.....	72
3.2.3. Dosages de C et azote (N)	74
3.2.4. Microscopie électronique à balayage.....	75
3.2.5. Analyse statistique des résultats	75
3.3. RESULTATS	75
3.3.1. Teneurs en C des sols totaux.....	75
3.3.2. Fractionnement de la matière organique : résultats méthodologiques.....	76
3.4. DISCUSSION	85
3.4.1. Teneurs et stocks en C des sols totaux : rappel des résultats antérieurs.....	85
3.4.2. Qualité du fractionnement et variabilité	85
3.4.3. Caractéristiques des fractions	86
3.4.4. Effet du semis direct sur la distribution du carbone dans les fractions.....	88
3.5. CONCLUSION.....	90

3.6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90
Chapitre 4. Distribution et protection physique de la matière organique dans les différentes classes d'agrégats d'un sol argileux des Hautes Terres malgaches sous systèmes SCV 94	
4.1. INTRODUCTION	96
4.2. MATERIALS AND METHODS.....	97
4.2.1. Site description and soil samples.....	97
4.2.2. Water-stable aggregates.....	97
4.2.3. Aggregate mineralization experiment.....	98
4.2.4. Organic carbon and nitrogen contents of soil and aggregates	98
4.2.5. Calculation and statistical analysis.....	98
4.3. RESULTS.....	99
4.3.1. Soil aggregate stability	99
4.3.2. SOC content and C distribution among aggregate class	101
4.3.3. C mineralization	102
4.4. DISCUSSION	106
4.4.1. Soil water stable aggregates and aggregate associated C	106
4.4.2. AOC Mineralization of aggregate-associated C	107
4.5. CONCLUSION.....	110
4.6. REFERENCES.....	110
CONCLUSIONS, LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE	113
1- SCV, teneurs et stocks de C	114
2- SCV et stabilité des agrégats et propriétés physiques du sol	115
3- SCV et distribution de C dans les fractions granulo-densimétriques.	116
4- Protection physique du C contre la minéralisation microbienne dans les systèmes SCV.....	117
5- Conclusion générale sur l'accumulation de C dans les sols par LES SYSTEMES SCV.....	120
6- Limites de l'étude et perspectives	120
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	124
ANNEXES.....	133
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	

INTRODUCTION GENERALE



SITUATION GENERALE

Géographie

Madagascar est une île de l'Océan Indien, séparée du Sud-Est du continent africain par le Canal de Mozambique. Elle s'étend (587 040 km²) sur une longueur de 1570 km du Nord au Sud et sur une largeur de 575 km d'Est en Ouest.

Relief

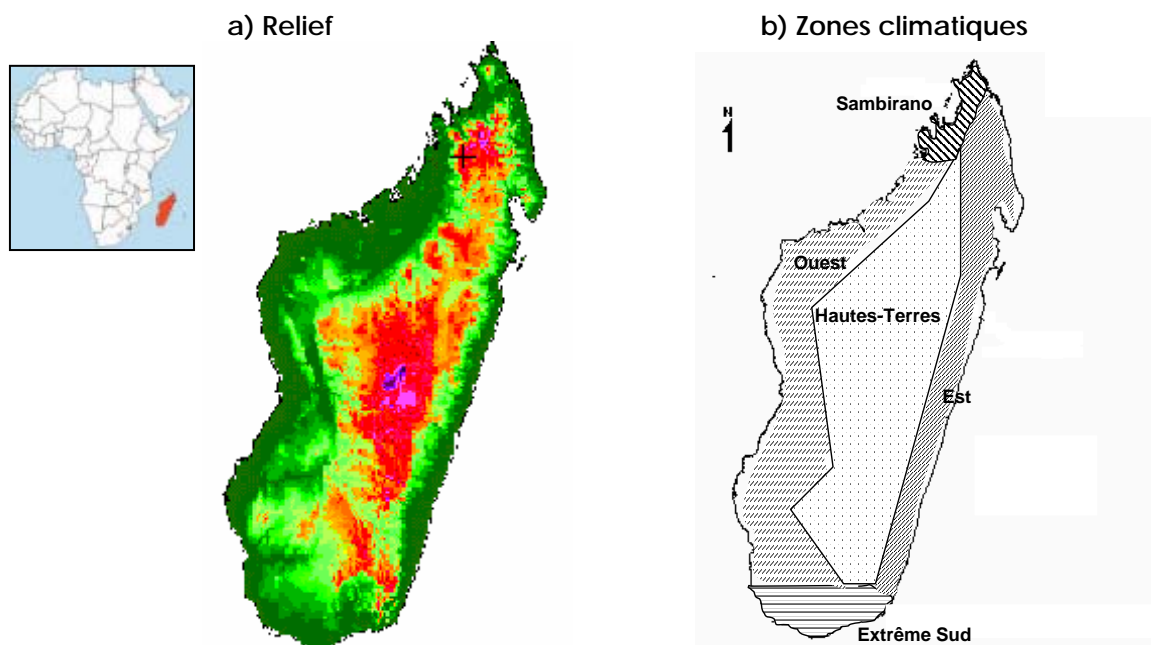
Les Hautes Terres, constituées par un enchevêtrement de plateaux, de collines (800 à 1500 m d'altitude en moyenne), de massifs compacts (2600 à 2900 m d'altitude) mais aussi de hautes plaines et de vastes bassins, forment un ensemble morcelé de reliefs volcaniques divers, formant un ensemble dissymétrique orienté d'axe Nord-Sud. Les Hautes Terres sont séparées de l'Océan Indien, à l'Est, par une étroite plaine côtière, rectiligne, bordée de lagunes, de marais et de basses collines s'élevant juste au pied de l'escarpement faisant office de bordure orientale. Sur les versants ouest, la pente est plus douce et la région est dominée par de vastes plaines et des plateaux calcaires à 900 m d'altitude. Le Nord comprend des cuvettes et plaines entourées dans des formations volcaniques, karstiques ou cristallines, débouchant sur des deltas alluviaux. La pointe méridionale de l'île est essentiellement constituée d'une pénéplaine d'une altitude variant de 150 à 500 m.

Climat

La température moyenne annuelle, varie entre 23°C à 27°C avec une amplitude thermique moyenne annuelle passant d'environ 3°C au Nord à 8°C dans les régions sèches du Sud-Ouest. Les précipitations diminuent de l'Est à l'Ouest et du Nord au Sud. On distingue cinq régions climatiques : le Littoral Est, les Hautes-terres, l'Ouest, l'Extrême Sud et le Sambirano (Figure 0-1).

- *Le Littoral Est* est une région à climat tropical chaud et humide. Elle est exposée directement aux courants d'alizé, et reçoit plus de 1100 mm de pluie par an avec un maximum de 3700 mm à Sainte-Marie. La température moyenne annuelle est de 24°C. Les températures maximales moyennes sont de 32°C à Antsiranana (nord) et 30°C (sud) à Taolagnaro ; et les températures minimales moyennes de 19°C à Antsiranana et 16°C à Taolagnaro.
- *Les Hautes-Terres* est une région à climat tropical d'altitude, caractérisé principalement par un hiver frais et sec de 4 à 5 mois (de mai à septembre) et un été chaud et humide de 8 mois (octobre à avril). La pluviométrie moyenne annuelle varie de 900 mm (Ranohira, Sud) à 1500 mm (Ivato), et la température moyenne annuelle de 16°C à 22°C.

- *La Région Ouest* est une région à climat de type tropical, caractérisé par un été chaud et humide. La température moyenne annuelle varie de 24°C dans le Sud à 27°C au Nord. La pluviométrie moyenne annuelle diminue du Nord au Sud en passant de 1650 mm à 400 mm. La saison sèche est particulièrement bien marquée et s'étend de mai à octobre.
- *L'Extrême-Sud* est une région à climat de type semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle est de 500 mm à 700 mm et la température moyenne annuelle de 24°C.
- *Le Sambirano* est une région au climat analogue à celui de la côte Est, de type tropical chaud et humide avec de fortes pluviométries moyennes annuelles (2000 à 2300 mm) réparties sur 180 jours.



Source : D. Rollin (CIRAD).

Source : Service météorologique, Antananarivo, 2002.

Figure 0-1 : Cartes du relief et des différentes zones climatiques, Madagascar.

Type de sol

Divers types de sols ont été distingués par Roederer et Bourgeat (1971), dont les principaux sont : les sols ferrallitiques, les sols ferrugineux, les sols hydromorphes et les sols alluvionnaux (Classification française des sols, CPCS, 1960) (Figure 0-2).

Sur le versant oriental, les sols ferrallitiques rouges fortement désaturés prédominent sur les sols formés sur alluvions (sols peu évolués ou sols hydromorphes), faiblement micacés, à taux de saturation inférieur à 30 %. En arrière des cordons littoraux, on note la présence de sols tourbeux, et sur les matériaux sableux, la présence des podzols de nappe.

Sur les Hautes Terres, les sols ferrallitiques rouges fortement désaturés prédominent. On note toutefois aussi la présence des sols formés sur alluvions à hydromorphie moins accentuée que

dans la région orientale. Dans les dépressions (Plaine d'Antananarivo, Lac Alaotra), se développent des sols tourbeux.

Dans la zone occidentale et méridionale, on observe surtout une prédominance de sols ferrugineux tropicaux, mais aussi la présence de vertisols, et de sols calcimorphes. Les sols hydromorphes restent localisés dans les dépressions, et les bas fonds. Les sols alluvionaux, peu évolués, très fertiles, se situent dans les environs immédiats des grands fleuves.

PROBLEMES DE L'AGRICULTURE A MADAGASCAR

L'agriculture tient une place importante dans la vie économique malgache. En effet, ce secteur concerne 80 % de la population active et contribue pour 33 % à la formation du produit intérieur brut (PIB). C'est une agriculture dominée par des petites exploitations familiales : agriculture de subsistance, extensive, et basée sur l'utilisation des pratiques agricoles traditionnelles. Durant les 20 dernières années, des campagnes d'intensification agricole au niveau des petits exploitants, ont été menées par le Ministère de l'Agriculture malgache auprès des paysans sans toutefois apporter de réels impacts sur la production agricole. En effet, celle-ci ne suit plus l'augmentation de la population, et le recours à l'importation des produits agricoles de base devient de plus en plus inévitable.

Dans la région des Hautes Terres, on observe généralement deux types d'agriculture (i) l'agriculture de bas fonds, basée essentiellement sur la riziculture irriguée en saison des pluies et sur des cultures légumières de contre saison, et (ii) une agriculture pluviale effectuée sur les collines déboisées ou « *tanety* ». Ces deux types sont tout aussi importants car le rapport moyen *tanety*/bas-fonds en terme de surface exploitée au niveau d'une exploitation varie de 1,3 à 1,6 (Minten et Ralison, 2003). Si la fertilité des bas-fonds n'a pas trop changé au cours de ces dix dernières années, celle des *tanety* s'est détériorée d'une manière significative (Minten et Ralison, 2003). Cette diminution de la fertilité est attribuée principalement à l'érosion, mais aussi à la faible utilisation d'intrants et à la mauvaise gestion des rotations de culture. L'agriculture traditionnelle implique des pratiques de labour, aussi bien pour les cultures de bas fonds que pour celles sur *tanety*. Le labour du sol est soit manuel à l'aide d'une bêche traditionnelle, l'*angady*, et retournement complet du sol sur une profondeur de 25 à 30 cm, soit par traction animale en utilisant des charrues à soc. Le labour a lieu généralement en août et la mise en culture se fait vers mi-novembre. La diminution de la fertilité observée sur *tanety* résulte de l'exposition de la surface du sol au ruissellement occasionné par les premières pluies du mois d'octobre, novembre et décembre, lorsque les plantes cultivées sont encore peu développées et ne constituent pas un couvert végétal suffisant pour limiter l'effet splash des pluies ainsi que le ruissellement.

LE SEMIS DIRECT DANS LE MONDE ET A MADAGASCAR

Histoire

Le semis direct n'est pas un concept récent puisque cette pratique était déjà pratiquée par les agriculteurs de l'Égypte ancienne et les Incas des Andes en Amérique du Sud (Derpsh, 1998a). Dans les tropiques humides, et notamment dans les pays de l'Amérique centrale, les *tapado* (en espagnol) ou *slash and mulch* (en anglais), qui consistent à cultiver un abattis sans utilisation de feu, ont déjà été pratiqués depuis longtemps, et constituent aussi une des formes les plus anciennes du semis direct. Mais c'est seulement dans les années 1940, après la grande érosion éolienne, le « Dust Bowl », des années 30, puis la découverte de l'herbicide à base de la molécule 2-4 D et ensuite des autres herbicides totaux de contact (paraquat et diquat), que la forme moderne du semis direct a commencé à prendre de l'ampleur (Derpsh, 1998a). La première diffusion du semis direct a été initiée par Harry Young en 1962, agronome du Kentucky (USA). En Europe, les premières recherches sur le semis direct ont été menées en Grande Bretagne, avec la découverte du Paraquat. En France, les premières expérimentations sur le semis direct ont été mises en place par l'INRA et l'ITCF en 1970. En Espagne, c'est en 1982, que les premières recherches ont été effectuées. Toutes ces expérimentations ont abouti généralement à une même conclusion : un effet positif du semis direct sur le rendement, la réduction du coût de production et la diminution de l'érosion. C'est au Brésil que le semis direct connaîtra une réussite exceptionnelle. Adopté par les grandes exploitations pour son coût réduit de production, le semis direct connaît alors une évolution fulgurante. Ailleurs, en Afrique, Asie, Madagascar, La Réunion et autres pays de l'Amérique Latine, le semis direct commence peu à peu à s'installer dans les petites exploitations agricoles.

Le semis direct recouvre en fait un grand nombre de pratiques agricoles associant, ou non, le non labour, la pratique du mulch végétal et des associations-rotations entre la plante cultivée et une ou plusieurs plantes de couverture. Les systèmes développés par le CIRAD (Séguy et al., 2001) prônent souvent le semis direct dans une couverture végétale (morte ou vivante) symbolisé par le sigle SCV que nous utiliserons maintenant.

Les plus grands utilisateurs de semis direct (Figure 0-3) sont les Etats-Unis, le Brésil et l'Argentine avec respectivement 23 700 000, 21 863 000 et 16 000 000 ha soit 21, 50, 55 % de la surface totale cultivée (Derpsh, 1998b).

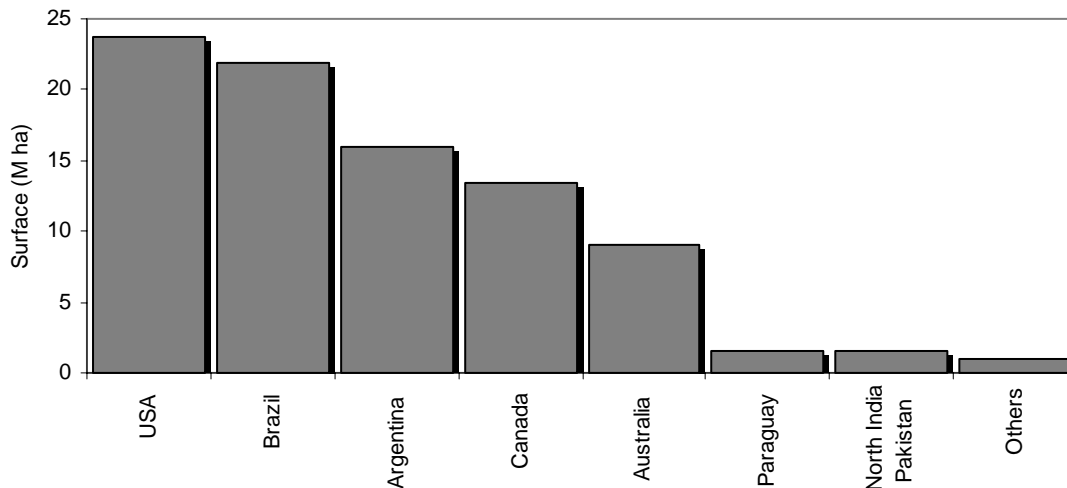


Figure 0-3 : Superficie des systèmes en semis direct dans différents pays (M ha) (Derpsch, 1998b, mis à jour)

Les principaux systèmes SCV

De nombreux systèmes SCV existent, différenciés, entre autres, par la présence et la nature de l'interculture. On peut ainsi distinguer 3 grands types de SCV : à « couvertures mortes », à « couvertures vivantes », et « mixtes » (Séguy et Bouzinac, 1996).

Dans les systèmes avec couverture morte (SCVm), la couverture ou *mulch* est issue des résidus de récolte et d'une culture ou interculture de renfort fournissant une importante masse végétale, implantée avant ou après la culture principale ; elle est totalement desséchée aux herbicides totaux avant le semis direct de la culture. Parmi les SCVm, on peut distinguer 3 systèmes en fonction de l'origine du paillage :

- le paillage est produit par les résidus de récolte de la culture principale,
- le paillage est importé d'une autre parcelle,
- le paillage provient d'une culture secondaire de couverture (espèce à croissance rapide) implantée avant ou après la culture principale.

Dans les systèmes avec couverture vivante permanente (SCVv), cette dernière est une espèce fourragère pérenne dont la seule partie aérienne a été desséchée aux herbicides tout en préservant les organes de reproduction végétative souterrains ; elle est maintenue en vie ralentie jusqu'à ce que la culture assure un ombrage total ; après la récolte, la couverture vivante couvre à nouveau le sol et peut être pâturée. La culture principale est donc implantée sur la couverture dont on a seulement desséché la partie aérienne.

Les systèmes mixtes comportent des successions annuelles avec une culture principale et une seconde culture avec minimum d'intrants (apportant une récolte de grains et une masse végétale importante), associée à une espèce fourragère. Les cultures sont récoltées à la saison des pluies et la culture fourragère permet une production animale en saison sèche.

Selon les choix de l'agriculteur et ses possibilités (irrigation ou non), cette couverture constitue une culture intermédiaire (pâturée ou détruite) ou une seconde culture de rente.

Semis direct et productivité en milieu tropical

Les systèmes SCV agissent positivement sur la production végétale. Au Brésil, dans la région Centre Nord du Mato Grosso, l'équipe de recherche CIRAD (Séguy et Bouzinac, 2005) rapporte une augmentation du rendement en soja, de 1700-2000 à 4500 kg.ha⁻¹ au bout de 15 ans de pratique de SCV, un rendement qui est étroitement corrélé avec la quantité et la qualité de la biomasse de graminées qui sert de couverture morte (maïs, sorgho, mil associé à *Brachiaria ruziziensis*) ou de couverture vivante (*Cynodon dactylon*). Des résultats similaires ont été trouvés sur le riz et le coton. Toutefois, les gains de rendement obtenus par ces systèmes ne sont significatifs qu'au bout de 5 ans de SCV. A Madagascar, pour de faibles niveaux de fertilisation (seulement fumier à raison de 5 Mg.ha⁻¹), au bout de 7 ans de pratique SCV, les rendements en grain de maïs et haricot ont doublés, par rapport au système conventionnel ; ils ont quadruplé, pour une fertilisation minérale moyenne (Michellon et al., 2003). Ces rendements résultent d'une bonne complémentarité entre les systèmes de cultures (rotation et association de culture) et les plantes de couverture afin de mieux valoriser les ressources du sol.

Systèmes SCV et propriétés des sols

Les systèmes SCV présentent de multiples avantages agronomiques. Le premier est une diminution significative des pertes en sols et en éléments nutritifs par érosion, d'une part, par protection directe du sol par la couverture végétale et, d'autre part, par l'amélioration de la stabilité structurale et de la porosité du sol, entraînant ainsi une diminution du ruissellement et une amélioration de l'infiltration (Scopel et al., 2005). L'importante biomasse produite (résidus de la plante cultivée et de la plante de couverture) avec les systèmes SCV permet d'augmenter la teneur en matière organique (MO) (Séguy et al., 2001; Six et al., 2002b) et en éléments nutritifs du sol, notamment l'azote (Dounias, 2001). Le paillis des résidus, ou la plante de couverture, favorisent le développement de l'activité macro- et microbiologique du sol (Kushwaha et al., 2000) et empêchent souvent, par ailleurs, le développement des mauvaises herbes (Raunet, 1988). Toutefois, d'autres plantes adventices vivaces peuvent apparaître et nécessitent alors l'utilisation d'herbicides (Dounias, 2001).

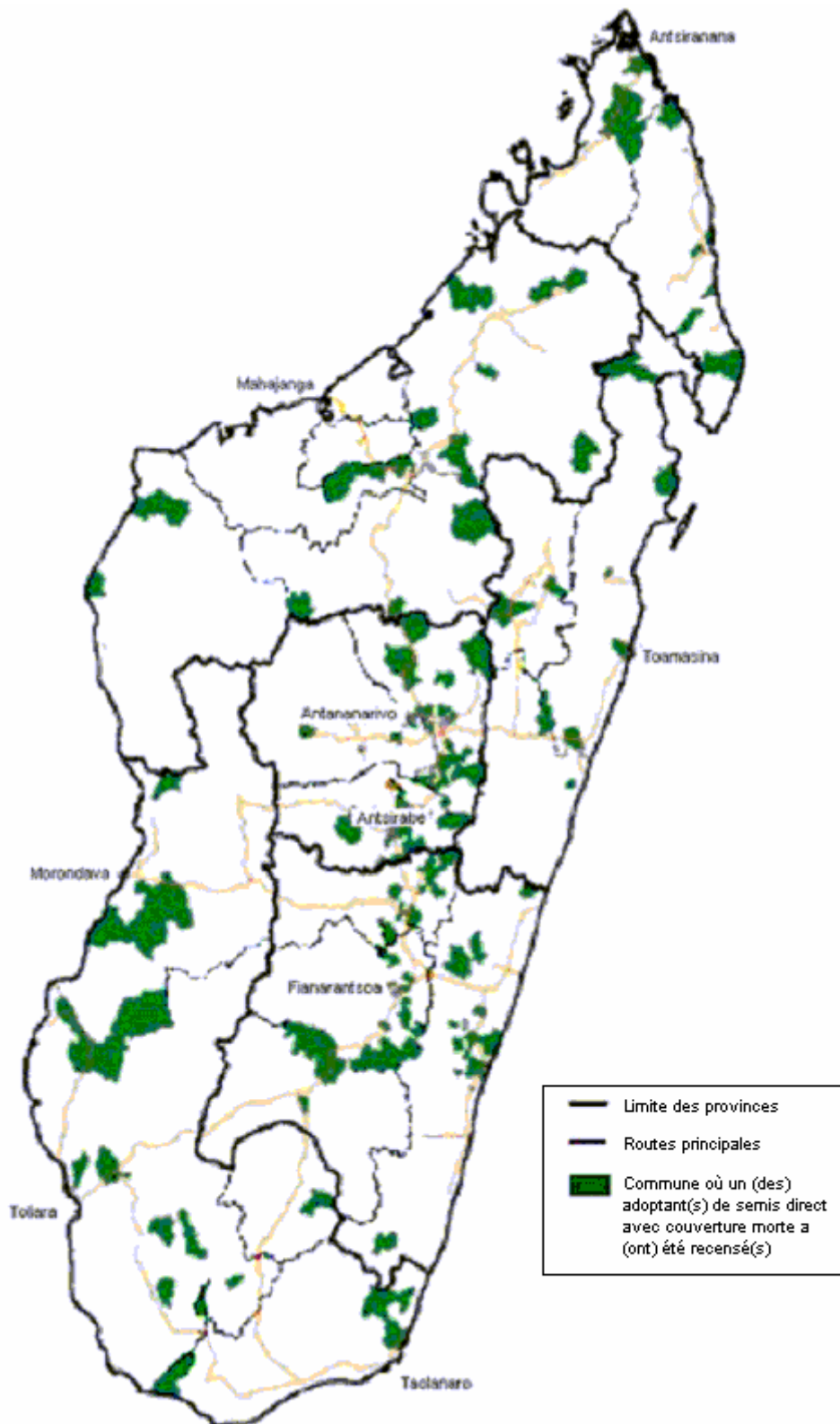
Développement des systèmes SCV à Madagascar

A Madagascar, les premières expérimentations en systèmes SCV ont commencé au début des années 1990. Des dispositifs agronomiques de démonstration sont installés par l'ONG Tafa (*Tany sy Fampandrosoana* ou Terre et Développement) avec l'appui technique du CIRAD, dans diverses régions aux contextes pédoclimatiques différents :

- sous climat tropical de moyenne altitude : région du Lac Alaotra et du Moyen Ouest,
- sous climat tropical d'altitude : région des Hautes Terres,
- sous climat tropical humide : région du Sud Est,
- sous climat semi-aride : région du Sud Ouest.

Les systèmes SCV ne couvrent encore qu'une faible partie du territoire national, mais sont bien répartis dans l'île (Figure 0-4). Leur introduction dans les systèmes de production agricole du Lac Alaotra vise à diminuer la forte érosion des versants ou tanety et donc à limiter l'ensablement des rizières. Dans les Hautes Terres et la région du Sud Est, il s'agit d'accroître la fertilité des tanety cultivés et dégradés. Dans le Sud Ouest, où la pluviométrie est très faible, ces systèmes, grâce au paillage, permettent d'améliorer l'efficacité de l'eau.

Figure 0-4 : Adoption des systèmes SCV à Madagascar (Randrianarison, 2003)



LA SEQUESTRATION DU CARBONE

Les perturbations climatiques engendrées par le réchauffement global à l'échelle planétaire se sont amplifiées au cours de ce dernier siècle. En effet, depuis 150 ans, une concentration de plus en plus élevée des trois principaux gaz (CO_2 , CH_4 , N_2O), à effet de serre (GES) est observée dans l'atmosphère. La concentration en dioxyde de carbone (CO_2) est passée de 280 ppmv (partie par million en volume), avant l'ère industrielle, à près de 367 ppmv en 1999 (31 % d'augmentation), celle du méthane (CH_4) de 700 à 1750 ppbv (partie par billion en volume) (150% d'augmentation), et celle de l'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N_2O) de 275 à 321 ppbv (16% d'augmentation) (IPCC, 2001). Ces augmentations sont essentiellement d'origine anthropique. Les augmentations, par effet anthropique, de CO_2 dans l'atmosphère sont largement dominantes, celui-ci participe pour environ 60 % au potentiel de réchauffement global (IPCC, 2001). Diverses solutions sont alors proposées afin d'atténuer cette augmentation de la teneur en GES de l'atmosphère. L'une d'entre elles est la séquestration du carbone d'origine atmosphérique dans le sol.

Définition, flux de gaz et déterminants du stockage du C dans le sol en milieu tropical

La « séquestration du carbone (C) » par l'agriculture ou la foresterie est souvent définie comme la capture et le stockage à long terme du carbone atmosphérique (C-CO_2) par un système sol-plante donné, pendant une durée et sur un espace donné. Toutefois, la notion de « séquestration du C » doit être étendue à l'ensemble des flux de gaz à effet de serre (GES), que ceux-ci soient carbonés (CO_2 , CH_4) ou non (N_2O), mais tous exprimés en « équivalents C-CO_2 » en prenant en compte leur potentiel de réchauffement global relatif à CO_2 : 23 pour CH_4 et 296 pour N_2O (IPCC, 2001 ; Bernoux et al., 2006b). La « séquestration du C » réfère au problème de la recherche de solutions conduisant à un ralentissement de l'augmentation des concentrations en GES dans l'atmosphère. En effet, l'agriculture participe pour 34 % aux émissions de GES et le potentiel de séquestration de C dans le système sol-plante peut-être important à court et moyen terme, en particulier pour les milieux tropicaux (Bernoux et al., 2006b). On peut agir sur la « séquestration du C » aussi bien par un changement d'usage des terres (éviter la déforestation, augmenter la reforestation, la surface des plantations sylvicoles, et développer l'agroforesterie), que par une modification des itinéraires techniques pour un agrosystème donné (IPCC, 2001). Selon les alternatives choisies (présence ou non de ligneux), il y aura ou non stockage de C dans la plante, mais dans tous les cas, on peut espérer un stockage dans le sol. C'est le cas, en particulier, des cultures annuelles avec des alternatives comme les pratiques de SCV.

Pour aborder le bilan en équivalent C-CO₂ du « C séquestré » par un agroécosystème donné (SCV par exemple), en comparaison avec un agroécosystème de référence (conventionnel), et pour une période et une surface données, il faut tenir compte : (i) des variations du stock total de C des sols et, si possible, la part correspondant au C déposé ou érodé et du C soluble (ruisselé et lixivié), afin d'en déduire la part du C séquestré provenant uniquement de la fixation de C-CO₂, et (ii) des variations des flux des autres GES, en particulier CH₄ et N₂O. Dans la présente étude, les mesures de CH₄ et N₂O n'ayant pas été faites, nous utiliserons ici la locution « stockage de C dans le sol » plutôt que « séquestration du C dans le sol ».

Les déterminants du stockage de C dans le sol au niveau de la parcelle sont nombreux et dus, à la fois, à des facteurs biophysiques (types de sol et climat) et agronomiques (usage des terres et itinéraires techniques), les deux étant souvent liés par leurs effets interactifs sur diverses propriétés des sols. Pour un climat donné et des sols bien drainés, on peut retenir globalement les déterminants majeurs suivants : (i) le type de sol, en particulier la texture et la minéralogie, (ii) le niveau, la qualité et la localisation des restitutions organiques (iii) les itinéraires techniques, en particulier, la fertilisation minérale et le travail du sol.

Concernant la minéralogie, on manque de données quantifiées générales sur son effet dans le stockage de C dans le sol en milieu tropical (Feller et Beare, 1997). Par contre, l'effet de la texture sur les stocks de C des sols tropicaux est bien documenté (Jones, 1973; Feller et al., 1991c ; Lepsch et al., 1994; Feller et al., 2001).

Le niveau des restitutions peut influencer fortement sur le stockage à long terme de C dans le sol (Bayer et al., 2000), mais la qualité des restitutions et leur mode de placement (en surface ou enfoui) peut jouer aussi un rôle essentiel (Razafimbelo et al., 2003). A noter aussi que la qualité des restitutions, par exemple leur teneur en azote, peut intervenir sur d'autres aspects du bilan de la « séquestration du C » comme les flux de N₂O pour les légumineuses (Erickson et al., 2001; Millar et Baggs, 2004).

La fertilisation minérale, selon son effet sur la productivité végétale et donc sur le niveau des restitutions organiques au sol, peut induire des effets variés sur le stockage de C : positifs, nuls ou négatifs, (Graham et al., 2002). Par ailleurs, une partie de l'azote minéral apporté peut-être dénitrifié et conduire à des émissions de N₂O.

La dynamique de la structure du sol, généralement liée à celle de la MO, peut entraîner, selon les cas, une protection ou une déprotection du C vis-à-vis de la minéralisation. Le labour est généralement considéré comme un facteur défavorable au stockage de C dans le sol, et ce, pour deux raisons : (i) par un effet direct sur l'oxygénation du sol qui va accélérer la minéralisation de la MO, (ii) par un effet indirect sur la diminution de la stabilité des agrégats, diminution due à la dilution de la MO des horizons de surface par mélange avec des horizons de profondeurs plus pauvres, ce qui conduit, d'une part à des risques de perte

de C par érosion, et d'autre part à une « déprotection » des matières organiques (MO) au sein des agrégats (Balesdent et al., 2000; Paustian et al., 2000). Parallèlement, l'ensemble des pratiques peut modifier très rapidement, positivement ou négativement, la diversité et les activités de la macrofaune (De Luca, 2002) et de la microflore du sol, avec des interactions fortes sur l'agrégation et donc la protection ou déprotection de la MO au sein des agrégats. Enfin, la durabilité du stockage de C dépend des formes de C stocké dans le sol selon que leur temps de renouvellement est rapide ou lent (Feller et Beare, 1997; Six et al., 2002a). Des fractionnements physiques de la MO et des agrégats du sol, et une caractérisation biochimique des formes de MO stockée et l'utilisation de traceurs, permettent d'aborder l'étude de cette dynamique.

Stockage de C sous systèmes SCV

Diverses études effectuées en milieux tropicaux rapportent des effets généralement positifs des systèmes en semis direct sur le stockage du C dans le sol. Six et al. (2002b) rapportent des valeurs moyennes de stockage de C sous systèmes SCV de l'ordre de 0,35 Mg.ha⁻¹.an⁻¹, tant pour les sols tempérés que tropicaux. Des travaux, effectués majoritairement au Brésil rapportent des valeurs de stockage de C variant de 0 à 1,6 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-20 cm de profondeur (Bernoux et al., 2006a).

Tableau 0-1 : Stockage de C (Mg C.ha⁻¹.an⁻¹) dans le sol sous différents systèmes SCV au Brésil

Source	Système	Profondeur	Couverture	Durée (ans)	Stockage (MgC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Corazza et al. (1999) ¹	Soja/blé	0-20 cm	mulch	15	0,5
Machado et Silva (2001) ¹	Blé/soja	0-20 cm	mulch	22	0,25
Sà et al. (2001) ¹	(soja ou maïs)/(avoine ou blé)	0-20 cm	mulch	22	0,8
Sà et al. (2001) ¹	(soja ou maïs)/(avoine ou blé)	0-40 cm	mulch	22	0,9
Freixo et al. (2002) ¹	Blé/soja	0-10 cm	mulch	11	0,3
Freixo et al. (2002) ¹	Blé/soja	0-20 cm	mulch	11	0
Bayer et al. (2000) ¹	Avoine/maïs	0-30 cm	mulch	9	0,51
Bayer et al. (2000) ¹	Avoine+vesce/maïs+vigna	0-30 cm	mulch	9	0,71
Six et al. (2002b) ²	Synthèse	-	-	-	0,35

¹ Références cités par Bernoux et al. (2006a, accepted in *Agronomy for Sustainable Agriculture*)

² Synthèse concernant sols tempérés et tropicaux

Toutefois, l'effet positif des systèmes SCV sur le stockage du C dans le sol, peut être annulé par des émissions de N₂O ou du CH₄ (Six et al., 1999), pouvant ainsi diminuer le bilan positif en terme de séquestration de GES.

Pour que le C soit stocké durablement dans le sol, il faut qu'il soit protégé contre la minéralisation microbienne. La littérature distingue trois formes de protection du C dans le sol (Six et al., 2002a) :

- la protection « physique », par son emprisonnement à l'intérieur des agrégats stables du sol,

- la protection « physico-chimique », par son association avec les fractions fines minérales du sol (argile et limon fin), et,
- la protection « biochimique », par la récalcitrance des MO vis-à-vis de la minéralisation suite à leur composition chimique.

L'augmentation du stock de C dans les sols tropicaux, est souvent corrélée à celle de la stabilité des agrégats du sol (Feller et al., 1996) et la protection de type physique de la MO du sol est alors invoquée. D'autre part, diverses études ont mis en évidence pour les systèmes SCV ou les systèmes à mulch, une localisation du C stocké dans la fraction fine du sol (Peixoto et al., 1999; Freixo et al., 2002; Razafimbelo et al., 2003) où il pourrait être protégé durablement.

Peu de travaux ont jusqu'ici concerné, dans l'optique de la séquestration du C, l'effet des pratiques SCV à Madagascar sur le stockage de C dans le sol. **Aussi, l'objectif général de cette étude est (i) d'évaluer pour un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres malgaches, l'effet des systèmes SCV sur le stockage de C dans le sol (ii) de localiser le C stocké dans différents compartiments organiques du sol et (iii) de quantifier son niveau de protection physique vis-à-vis de la minéralisation.**

HYPOTHESES DE L'ETUDE

Les hypothèses testées au cours de cette étude sont les suivantes :

1. Les pratiques SCV permettent d'augmenter le stock de C organique dans le sol, par rapport à des systèmes labourés ;
2. Les pratiques SCV, permettent une augmentation de la stabilité structurale du sol ;
3. Le stockage de C sous systèmes SCV, pour un sol de texture argileux, peut se faire dans les matières organiques particulières, mais surtout dans les fractions limono-argileuses qui les protègent physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne ;
4. L'augmentation de la stabilité structurale sous SCV, induit une protection physique de C à l'intérieur des agrégats stables contre la minéralisation microbienne.

L'hypothèse 1 est testée par la mesure des stocks de C sur des systèmes SCV en comparaison avec un système de labour conventionnel. Dans une première partie, des inventaires des dispositifs existants dans la région d'Antsirabe (Madagascar) sont effectués pour choisir le dispositif approprié pour l'étude du stockage de C sous SCV à Madagascar (Chapitre 1), ensuite l'étude est effectuée sur le dispositif choisi (Chapitre 2).

L'hypothèse 2 est vérifiée par la mesure de la quantité des macroagrégats stables à l'eau sous SCV, en comparaison avec le système de labour conventionnel (Chapitre 1 et 4).

L'influence des systèmes SCV sur la distribution du C (hypothèse 3) est testée par la mesure du C contenu dans les différentes fractions granulo-densimétriques du sol, pour des systèmes SCV et labouré (Chapitre 3), alors que l'influence des systèmes SCV sur la protection physique du C (hypothèse 4) est testée par comparaison du C minéralisé sur des agrégats intacts et des agrégats broyés à 50 µm (Chapitre 4).

Cette thèse est alors organisée en 4 chapitres :

- **Chapitre 1.** Inventaires des stocks de C sous différents systèmes SCV pour trois types de sol dans la région d'Antsirabe, Hautes Terres, Madagascar.
- **Chapitre 2.** Etude détaillée des stocks de C sous différents systèmes SCV pour un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres de Madagascar (Andranomanelatra).
- **Chapitre 3.** Distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar selon différents systèmes SCV.
- **Chapitre 4.** Distribution et protection physique de la matière organique dans les différentes classes d'agrégats d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar sous différents systèmes SCV.

Les chapitres 2 et 3 font l'objet d'articles soumis à *Etude et Gestion des sols*, et le Chapitre 4 est rédigé en anglais, en vue d'une soumission prochaine à une revue internationale.

Chapitre 1. Teneurs et stocks de C sous différents systèmes SCV dans la région d'Antsirabe, Hautes Terres, Madagascar

Le présent chapitre vise à évaluer les dispositifs en SCV les mieux adaptés pour l'étude de la séquestration de C à Madagascar. C'est donc un inventaire des dispositifs existants dans la région d'Antsirabe.



1.1. PRESENTATION DU MILIEU

1.1.1. La région d'Antsirabe - Vakinankaratra

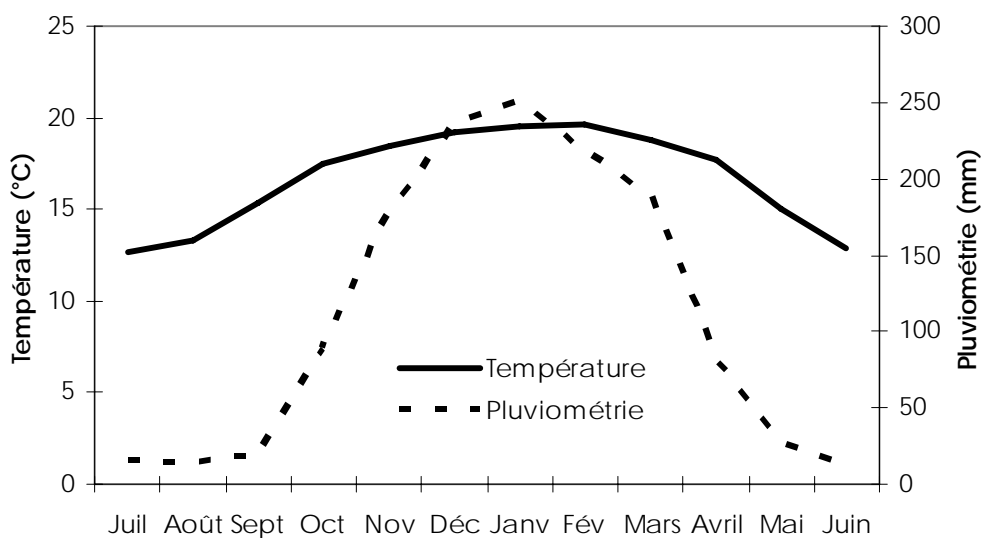
L'étude est effectuée à Madagascar dans la région d'Antsirabe (19° 52' S; 47° 04' E), située à 168 km au Sud d'Antananarivo, dans les Hautes Terres centrales malgaches. Cette région d'altitude moyenne variant de 1300 à 1600 m est densément peuplée (65,8 hab.km⁻²) avec une économie basée sur l'agriculture.

A) Climat

La région est dominée par un climat tropical d'altitude, caractérisé par deux saisons contrastées (Figure 1-1):

- une saison sèche et froide (de mai à septembre) avec une précipitation mensuelle inférieure à 30 mm, et, une température moyenne mensuelle de 13,8°C,
- une saison humide et chaude (d'octobre à avril), avec une précipitation mensuelle supérieure à 50 mm, et une température moyenne mensuelle de 18,7°C.
- La pluviométrie moyenne annuelle est de 1300 mm, mais peut varier de 900 à 2000 mm suivant les années et les altitudes. La température moyenne annuelle est de 16°C et peut varier de 2,7 à 28,5°C.

Figure 1-1 : Courbes de la température et de la pluviométrie de la région d'Antsirabe. Données de 1961-1990, Service de la Météorologie, Antananarivo.



B) Géologie

D'après Zebrowski et Ratsimbazafy (1979), trois ensembles géologiques sont observés dans la région :

- Le socle cristallin, dans la partie Ouest et Sud, constitué de schistes cristallins (socle migmatitique, micaschistes et quartzites) et de roches éruptives (essentiellement granites et gabbros).
- Le massif volcanique, au Nord Est, avec 3 périodes distinctes, (i) une première période correspondant à la mise en place du volcanisme ancien (édifice trachytiques, dômes phonolitiques et coulées basaltiques), à altération profonde ; (ii) une deuxième période correspondant à une phase d'activité récente (Quaternaire récent) consistant à une mise en place des édifices volcaniques de basanite et basanitoides ; et (iii) une troisième période correspondant à une phase d'activité récente (moins de 10 000 ans) du volcanisme d'Ankaratra, où les formations volcaniques sont encore bien conservées (cônes de scories et coulées de basanites et basanitoides).
- Les alluvions volcano-lacustres au Centre Est, qui résultent d'un dépôt de sédiment dans le bassin lacustre d'Antsirabe suite à la formation du massif d'Ankaratra jouant un rôle de barrage pour le réseau hydrographique qui s'écoulait initialement vers l'Ouest. Des dépôts de galets datant du Pliocène, se sont ensuite intercalés des dépôts lacustres, des coulées et des projections volcaniques, entraînant la formation d'un matériau très hétérogène qui constitue le matériau originel des sols qui s'y sont formés.

C) Les sols

Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) ont classé les sols de la région, selon les 5 types suivants (ancienne classification française des sols, CPCS, 1967) :

- sols minéraux bruts : d'origine non climatique d'érosion. Ces sols sont composés de lithosols sur socle cristallin, sur roche volcanique et sur cuirasse ferrugineuse ;
- sols peu évolués : tronqués par l'érosion. Ces sols possèdent un profil A-C, et même si les horizons C présentent souvent une altération de type ferrallitique, l'absence d'un horizon B, ne permettait pas de classer ces sols parmi les sols ferrallitiques. Suivant la teneur en matière organique de l'horizon A, on distingue les sols peu évolués humifères et les sols peu évolués non climatiques ;
- andosols : riches en produits amorphes silico-alumineux. Ces sols sont observés dans les régions volcaniques sur des matériaux pyroclastiques basiques datant des émissions les plus récentes du volcanisme d'Ankaratra (Période III). On peut distinguer, dans la région, les andosols peu différenciés et les andosols différenciés ;
- sols ferrallitiques : caractérisés par un profil A-B-C, l'horizon B de ces sols ne dépasse pas les 150 cm d'épaisseur, alors que l'horizon d'altération C peut atteindre quelques mètres d'épaisseur. Ces sols ont été différenciés en groupe et sous-groupes suivant l'intervention de processus physico-chimiques ou mécaniques (accumulation humifère, allitisation, rajeunissement, remaniement et l'hydromorphie)

accompagnant le processus de ferrallitisation. On peut distinguer alors dans la région, les sols ferrallitiques moyennement et fortement désaturés, avec des sous groupes : humifères, allitiques, rajeunis ou hydromorphes.

D) La végétation et les cultures

Dans la région, la végétation est constituée essentiellement par une savane herbeuse dominée par une ou deux espèces de graminées pérennes et cespitueuses : *Pennisetum pseudotriticoïdes*, *Trachypogon spicatus* ou *Aristida rufescens*. Cette savane herbeuse est appelée localement du « *bozaka* ».

Les cultures les plus répandues dans la région sont le riz, le maïs, la pomme de terre et le haricot. La culture de riz occupe 58 864 ha de terres dont 82 % dans les bas fonds et 18 % sur collines ou « *tanety* » (UPDR-MAEP, 2003). La culture de maïs occupe jusqu'à 54 285 ha et se rencontre sur le *tanety*, dans les bas de pente et sur les sols alluvionnaires (ou « *baibo* ») et est souvent associée à d'autres cultures (haricot, soja etc.). La pomme de terre est cultivée aussi bien sur les *tanety* en saison de culture normale et dans les bas fonds (rizières) en cultures de contre saison. Elle occupe 31 300 ha. La culture de haricot occupe jusqu'à 22 470 ha de terres. D'autres cultures maraichères telles que ail, oignon et carotte, sont cultivées en contre saison dans les rizières.

1.1.2. Les sites d'études

Les quatre dispositifs étudiés sont localisés dans la région d'Antsirabe, et ont été installés par l'ONG Tany sy Fampanandrosoana (TAFANA) avec l'appui du CIRAD, sur trois types de sol différents.

Les dispositifs d'Andranomanelatra et de Bemasoandro sont situés respectivement à 17 et 12 km au nord de la ville d'Antsirabe. La température moyenne annuelle locale est 16 °C et la pluviométrie de 1750 mm (données 2003). Le sol, sous ces deux dispositifs, a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide, et par Raunet (1981) comme un sol ferrallitique gibbsitique, fortement désaturé, rouge ou ocre, sur alluvions volcano-lacustres. Le dispositif d'Andranomanelatra a été mis en place en 1991, mais les systèmes de cultures, que nous étudierons dans cette thèse, n'ont démarré qu'en 1992. Le dispositif de Bemasoandro a été mis en place en 1997 par TAFANA. Ces deux dispositifs sont complètement randomisés et comprennent 3 répétitions.

Le dispositif d'Ibity est situé à 20 km au sud de la ville d'Antsirabe. La température moyenne annuelle locale est de 17 °C et la pluviométrie de 1600 mm (données 2003). Ce sol a été

classé par Raunet (1981) comme un sol ferrallitique fortement désaturé, gibbsitique à surface I (Fini-Crétacé) disséquée. Ce dispositif a été mis en place en 1997.

Le dispositif de Betafo est situé à 22 km à l'ouest de la ville d'Antsirabe. La température moyenne annuelle locale est de 17,5 °C et la pluviométrie moyenne annuelle de 1500 mm. Le sol a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme étant un andosol peu différencié, désaturé, mélanique sur matériaux pyroclastiques basiques, et par Raunet (1981) comme andosol peu différencié humique sur matériau pyroclastique basique. Ce dispositif a également démarré en 1997.

1.1.3. Les systèmes étudiés

Les dispositifs étudiés comportent plusieurs systèmes en semis direct avec couverture du sol (NT, no-tillage) et en labour conventionnel (CT, conventional tillage), avec plusieurs niveaux de fertilisation : la fertilisation F0, qui ne comporte aucune fertilisation ; une fertilisation F1, consistant à l'utilisation du fumier de bovin à raison de 5 Mg.ha⁻¹ ; une fertilisation F2, consistant à l'utilisation du fumier de bovin (5 Mg.ha⁻¹) associé à une fertilisation minérale normale ; et une fertilisation F3, consistant à l'utilisation du fumier de bovin (5 Mg.ha⁻¹) associé à une fertilisation minérale élevée. Pour cette étude, nous avons retenu le niveau de fertilisation F2. Chaque traitement étudié est répété 3 fois, et les parcelles sont disposées au hasard sur chaque dispositif. Les systèmes étudiés par dispositif sont les suivants :

A) Dispositif 1 : *Andranomanelatra*

Ce dispositif comprend les 4 systèmes de cultures :

- **CT1 m/s** : système en labour conventionnel (CT1), composé d'une culture de maïs (m, *Zea Mays* L.) en rotation annuelle avec une culture de soja (s, *Glycine max.* L.). Les résidus de récoltes sont exportés de la parcelle,
- **NT1 m/s** : système en semis direct (NT1), composé d'une culture de maïs (m) en rotation annuelle avec une culture de soja (s). Le sol est recouvert par des résidus de récolte qui sont restitués sur la parcelle,
- **NT1 m/m-d** : système en semis direct (NT1), composé d'une culture de maïs (m) en rotation annuelle avec une culture de maïs (m), le sol étant recouvert par une plante de couverture en légumineuse, le desmodium (d, *Desmodium uncinatum*). Les résidus de récolte sont restitués sur la parcelle,
- **NT1 h/s-k** : système en semis direct (NT1), composé d'une culture de haricot (h, *Phaseolus vulgaris*) en rotation annuelle avec une culture de soja (s), le sol étant recouvert par une plante de couverture en graminée, le kikuyu (k, *Pennisetum clandestinum*). Les résidus de récolte sont restitués sur la parcelle.

B) Dispositif 2 : Bemasoandro

Ce dispositif comprend 4 systèmes de cultures :

- **CT2 r/s** : système en labour conventionnel (CT2), composé d'une culture de riz pluvial (r, *Oryzae sativa*) en rotation avec une culture de soja (s). Les résidus de récoltes sont exportés de la parcelle,
- **NT2 r/s** : système en semis direct (NT2), composé d'une culture de riz pluvial (r), en rotation avec une culture de soja (s). Le sol est recouvert par des résidus de récolte qui sont restitués à la parcelle,
- **CT2 m/p** : système en labour conventionnel (CT2), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria (*Crotalaria* sp.), en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p, *Solanum tuberosom*), suivie d'une deuxième saison d'avoine (*Avena sativa*), en labour conventionnel. Les résidus de récolte, de crotalaire et d'avoine sont tous exportés de la parcelle,
- **NT2 m/p** : système en semis direct (NT2), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria, en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p) suivie d'une deuxième saison d'avoine. Le crotalaire et l'avoine sont rabattus avant la nouvelle saison culturale pour servir de mulch pour la culture suivante.

C) Dispositif 3 : Ibity

Ce dispositif comprend les 2 systèmes de cultures :

- **CT3 m/p** : système en labour conventionnel (CT3), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria, en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p), suivie d'une deuxième saison d'avoine, en labour conventionnel. Les résidus de récoltes, de crotalaire et d'avoine sont tous exportés de la parcelle. Ce système ne comporte pas de répétition terrain,
- **NT3 m/p** : système en semis direct (NT3), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria, en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p) suivie d'une deuxième saison d'avoine. Le crotalaire et l'avoine sont rabattus avant la nouvelle saison culturale pour servir de mulch pour la culture suivante.

D) Dispositif 4 : Betafo

Ce dispositif comprend 4 systèmes de cultures, identiques à ceux sur le dispositif de Bemasoandro :

- **CT4 r/s** : système en labour conventionnel (CT4), composé d'une culture de riz pluvial (r) en rotation avec une culture de soja (s). Les résidus de récolte sont exportés de la parcelle. Ce système ne comporte pas de répétition de terrain,

- **NT4 r/s** : système en semis direct (NT4), composé d'une culture de riz pluvial (r) en rotation avec une culture de soja (s). Le sol est recouvert par des résidus de récolte qui sont restitués à la parcelle,
- **CT4 m/p** : système en labour conventionnel (CT4), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria, en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p), suivie d'une deuxième saison d'avoine, en labour conventionnel. Les résidus de récoltes, de crotalaire et d'avoine sont tous exportés de la parcelle,
- **NT4 m/p** : système en semis direct (NT4), composé d'une culture de maïs (m) suivie d'une deuxième saison de crotalaria, en rotation annuelle avec une culture de pomme de terre (p) suivie d'une deuxième saison d'avoine. Le crotalaire et l'avoine sont rabattus avant la nouvelle saison culturale pour servir de mulch pour la culture suivante.

1.2. METHODES

1.2.1. Prélèvements de sol.

Les échantillons sont prélevés en avril-mai 2003, en fin de saison de culture (après récolte). Sur chaque parcelle élémentaire, 4 prélèvements au cylindre, dont deux sur lignes et deux sur interlignes, sont effectués à 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm de profondeur. Chaque horizon de sol prélevé au cylindre est immédiatement mis dans un sachet fermé dans une glacière, à l'ombre pour éviter l'évaporation. Au laboratoire, les échantillons sont pesés et une aliquote de 20 g de chaque horizon est mis à l'étuve à 105°C pour la détermination de l'humidité pondérale.

Le reste des échantillons est séché à l'air, à l'ombre, avant d'être tamisé à 2 mm. Des parties aliquotes des 4 prélèvements (répétitions intra parcelles) d'une même profondeur, sur la même parcelle, sont regroupées pour constituer un échantillon composite par parcelle et par profondeur pour chaque traitement étudié. Ces échantillons composites seront utilisés pour les autres analyses au laboratoire.

1.2.2. Analyses

A) Analyses physico-chimiques

- Les pH eau et KCl 1M ont été mesurés sur un mélange sol/solution selon le rapport 1/2,5.
- Le carbone et l'azote total ont été mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Les sols n'étant pas carbonatés, le C total représente le C organique.

- La granulométrie a été réalisée selon la méthode de la pipette (méthode sur sol séché à l'air) après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à chaud et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. L'argile (0-2 μm) et les limons fins (2-20 μm) ont été prélevés à la pipette de Robinson et les autres fractions, sables grossiers (200-2000 μm), sables fins (50-200 μm), limons grossiers (20-50 μm) obtenues par tamisage (AFNOR, 2004b).
- Les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et la capacité d'échange cationique (CEC) ont été déterminées par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH7. L'aluminium échangeable a été extrait par KCl 1M. Tous les dosages ont été réalisés à l'ICP-AES (inductive coupled plasma - atomic emission spectroscopy).
- La densité apparente est mesurée sur du sol non perturbé prélevé au cylindre de 250 et 500 cm^3 .
- La teneur en eau à pF 4,2 a été déterminée par la méthode des plaques poreuses sur des échantillons tamisés à 2 mm (AFNOR, 2004a).
- La rétention en phosphore a été déterminée suivant la méthode décrite par Blakemore et al.(1987).
- Les formes du fer, de l'aluminium et de la silice ont été extraits à l'aide de réactifs sélectifs : (i) le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD), ou réactif de Mehra et Jackson (1960), qui permet d'extraire les formes cristallisées et amorphes, notées Fe, Al, Si, (ii) l'oxalate d'ammonium tamponné à pH3 (McKeague et Day, 1966; Blakemore et al., 1987) qui extrait les formes amorphes et microcristallines, notées Fe_o, Al_o, Si_o, et (iii) le pyrophosphate de sodium (Wada et Higachi, 1976) qui concerne les formes liées à la matière organique (complexes organo-métalliques) notées Fe_p, Al_p, Si_p.

A partir de ces résultats, divers indices sont calculés :

- l'indice 'oxalfe', (Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 1 :

$$\text{« oxalfe \% = Al}_o + 1/2 \text{ Fe}_o \text{ »}, (\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol}) \quad (1)$$

- la quantité des produits allophaniques (Parfitt et Wilson, 1988; Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 2 :

$$\text{« Allophanes \% = 7,1 Si}_o \text{ »}, (\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol}) \quad (2)$$

- les quantités de complexes organo-aluminiques (CoAl) pour 2 extrêmes du rapport molaire C/Al_p : une valeur minimum (CoAl_m) et une valeur maximum (CoAl_M), (Poulenard et Herbillon, 2000) selon les équations 3 et 4 :

$$\text{- pour C/Al}_p \text{ molaire} = 13 \quad \text{« CoAl}_M = 12 \text{ Al}_p \text{ »}, (\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol}) \quad (3)$$

$$\text{- pour C/Al}_p \text{ molaire} = 7 \quad \text{« CoAl}_m = 7,5 \text{ Al}_p \text{ »}, (\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol}) \quad (4)$$

B) Diffraction des rayons X sur poudre de sol

L'analyse minéralogique est effectuée sur des échantillons finement broyés à une granulométrie inférieure à 50 μm . Les données permettant d'identifier et de quantifier les

minéraux cristallins du sol sont obtenues à l'aide d'un diffractomètre Philips MPD 3710 équipé d'une anticathode de cobalt.

C) Stabilité structurale

La stabilité structurale est étudiée au moyen d'un test dérivé de celui proposé par Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de sol sont introduits dans un cylindre de diamètre 4,5 cm fermé à sa base par un tamis de 200 μm . Le tamis avec échantillon est placé sur un agitateur à deux plateaux superposés, l'un inférieur fixe, et l'autre supérieur pouvant être animé d'un mouvement vertical de 1,3 cm d'amplitude à une fréquence de 33 cycles par minute. Le plateau mobile est d'abord mis en position basse afin de plonger les échantillons dans un becher placé sur le plateau inférieur et contenant 100 mL d'eau déminéralisée à température ambiante pendant deux heures. Puis, l'agitateur est mis en marche pendant six minutes pour séparer, par tamisage dans l'eau, la fraction $> 200 \mu\text{m}$ (composée de macroagrégats stables et de sables grossiers). Celle-ci est ensuite séchée à l'étuve à 105°C pendant 16 h puis pesée.

La fraction $< 200 \mu\text{m}$ (passée à travers le tamis et restant dans le bécher) est transvasée dans une allonge de 100 mL, qui est 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 prélevée à la pipette Robinson, séchée 16 h à 105°C, puis pesée.

Pour évaluer la teneur en sables grossiers (SG, $> 200 \mu\text{m}$), la fraction totale $> 200 \mu\text{m}$ est tamisée avec le même appareillage dans la soude diluée (NaOH, 0,05 M) pendant six fois six minutes, pour disperser les macroagrégats. Les sables grossiers récupérés sur le tamis sont séchés à l'étuve à 105°C puis pesés. Par différence entre la fraction totale $> 200 \mu\text{m}$ et les sables grossiers, on calcule la teneur de l'échantillon en macroagrégats stables (MA, $> 200 \mu\text{m}$). La masse de la fraction 20-200 μm , ou mésoagrégats (ME), est calculée par différence entre les masses de l'échantillon initial, des SG, des MA et MI. La fraction MA représente uniquement des agrégats, tandis que les fractions ME et MI contiennent des agrégats et des particules élémentaires de taille équivalente.

La mesure de stabilité est effectuée avec quatre répétitions par échantillon. Les résultats sont exprimés en g.kg^{-1} sol pour chaque classe (SG, MA, ME, MI).

1.3. RESULTATS

1.3.1. Densités apparentes

Les dispositifs 1 et 2 (Andranomanelatra et Bemasoandro) sont géographiquement très proches (5 km à vol d'oiseau) et les sols en question sont développés sur le même type de matériau d'origine volcano-sédimentaire. Bien que ces sols soient très argileux (plus de 70%

des particules minérales inférieures à 2 μm), leur densité apparente est en moyenne de 0,9 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Tableau 1-1). Sur le dispositif 1, les pratiques SCV diminuent la densité apparente de manière significative pour les horizons de surface, 0-5 cm pour le traitement NT1 m/s et jusqu'à 20 cm pour le traitement NT1 m/m-d. Sur le dispositif 2, le traitement NT2 r/s n'induit pas des variations de densité apparente, alors que le traitement NT2 m/p conduit à une diminution significative des densités apparentes jusqu'à 10 cm.

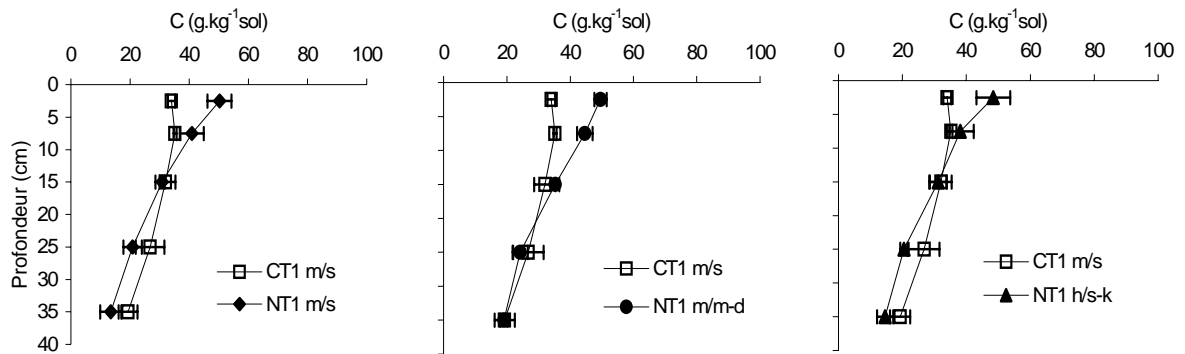
Sur le dispositif 4 (Betafo), les densités apparentes sont très faibles (de l'ordre de 0,7 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) et les systèmes en SCV n'induisent pas de variations de densités apparentes. Les valeurs de densités apparentes les plus élevées sont observées au niveau du dispositif 3 (Ibity) ($> 1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, et $> 1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour CT3 m/p), avec des différences importantes et significatives entre CT3 m/p et NT3 m/p.

Tableau 1-1 : Densités apparentes du sol ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), sur les 4 dispositifs : Andranomanelatra, Bemasoandro, Ibity, et Betafo. (Moyenne \pm écart-type, n=3)

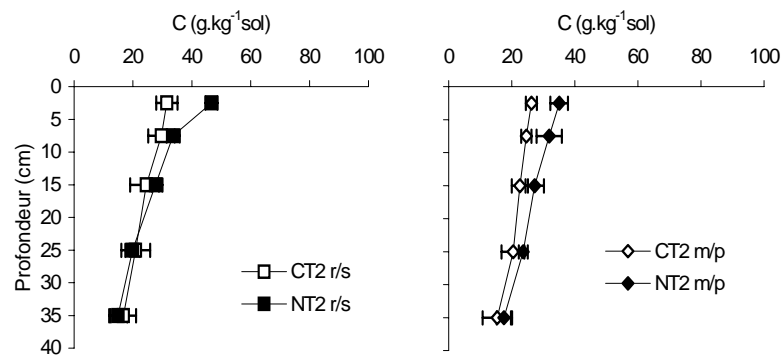
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
<u>Andranomanelatra</u>					
NT1 m/s	0,78 \pm 0,06 a	0,86 \pm 0,05 a	0,84 \pm 0,05 ab	0,95 \pm 0,02 a	1,00 \pm 0,07 a
CT1 m/s	0,89 \pm 0,02 b	0,87 \pm 0,09 a	0,87 \pm 0,06 ab	0,92 \pm 0,06 a	0,98 \pm 0,04 a
NT1 m/m-d	0,71 \pm 0,03 a	0,78 \pm 0,07 a	0,77 \pm 0,04 a	0,92 \pm 0,05 a	1,01 \pm 0,01 a
NT1 h/s-k	0,77 \pm 0,07 a	0,86 \pm 0,04 a	0,89 \pm 0,03 b	0,98 \pm 0,03 a	1,04 \pm 0,04 a
<u>Bemasoandro</u>					
NT2 r/s	0,78 \pm 0,03 a	0,90 \pm 0,01 b	0,88 \pm 0,03 a	0,92 \pm 0,05 a	0,92 \pm 0,08 a
CT2 r/s	0,78 \pm 0,04 a	0,79 \pm 0,06 a	0,86 \pm 0,02 a	0,90 \pm 0,05 a	0,92 \pm 0,06 a
NT2 m/p	0,85 \pm 0,05 ab	0,80 \pm 0,05 a	0,89 \pm 0,04 a	0,86 \pm 0,05 a	0,92 \pm 0,09 a
CT2 m/p	0,95 \pm 0,04 c	0,89 \pm 0,05 ab	0,88 \pm 0,03 a	0,91 \pm 0,04 a	0,92 \pm 0,05 a
<u>Ibity</u>					
NT3 m/p	1,02 \pm 0,04 a	1,06 \pm 0,12 a	1,13 \pm 0,11 a	1,19 \pm 0,05 a	1,28 \pm 0,08 a
CT3 m/p	1,30 \pm 0,04 b	1,24 \pm 0,08 a	1,29 \pm 0,11 a	1,31 \pm 0,11 a	1,28 \pm 0,10 a
<u>Betafo</u>					
NT4 r/s	0,64 \pm 0,03 a	0,74 \pm 0,04 a	0,75 \pm 0,07 a	0,73 \pm 0,10 a	0,72 \pm 0,05 a
CT4 r/s	0,68 \pm 0,02 a	0,66 \pm 0,02 a	0,66 \pm 0,04 a	0,66 \pm 0,06 a	0,74 \pm 0,08 a
NT4 m/p	0,64 \pm 0,02 a	0,68 \pm 0,04 a	0,74 \pm 0,07 a	0,71 \pm 0,06 a	0,69 \pm 0,07 a
CT4 m/p	0,70 \pm 0,08 a	0,71 \pm 0,05 a	0,70 \pm 0,06 a	0,69 \pm 0,07 a	0,71 \pm 0,05 a

Les moyennes suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une colonne pour un même dispositif sont significativement différentes ($p < 0,05$).

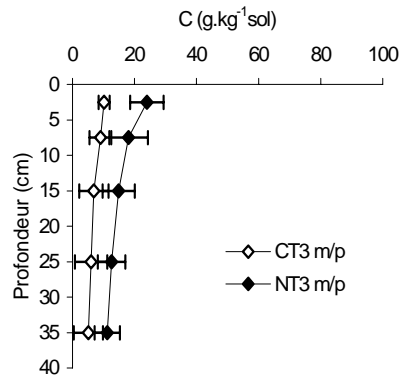
Andranomanelatra



Bemasoandro



Ibity



Betafo

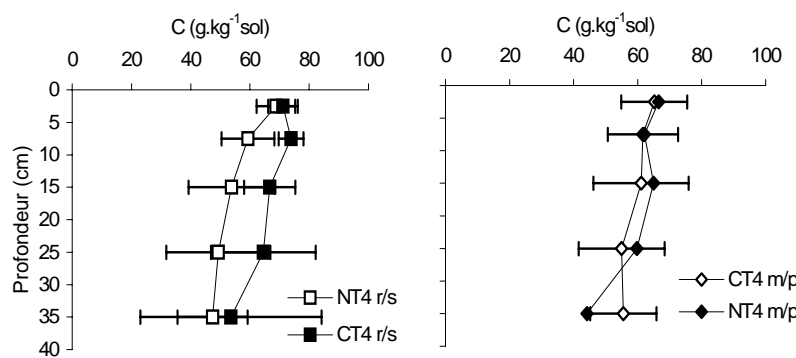


Figure 1-2 : Profils des teneurs en C des systèmes SCV (NT) et labour (CT) sur les 4 dispositifs étudiés : Andranomanelatra (1), Bemasoandro (2), Ibity (3) et Betafo (4).

1.3.2. Profils et stocks de carbone du sol

D'une façon générale, les teneurs en carbone (Figure 1-2) sont relativement élevées, largement supérieures à 20 gC.kg⁻¹ sol en surface, dans toutes les situations, exceptées celles du dispositif 3 (Ibity). L'ordre général des teneurs en C par dispositif varie dans le sens : dispositif 4 (Betafo) > dispositifs 1 et 2 (Andranomanelatra, Bemasoandro) > dispositif 3 (Ibity). Sur le dispositif 1 et 2, les teneurs en C sont significativement plus élevées sous SCV que sous CT, pour les couches 0 à 10 cm. Sur le dispositif 4, aucun effet SCV n'est observé sur les teneurs en C et la variabilité est très élevée. Sur le dispositif 3, les teneurs en C sont largement plus faibles sous CT3 m/p que sous NT3 m/p, avec des différences encore très fortes en profondeur contrairement à ce qui est observé pour les dispositifs 1 et 2.

Etant donné les différences de densités apparentes, les stocks de C doivent être calculés sur une base de « masse équivalente » (Ellert et Bettany, 1995). Ils sont présentés par le Tableau 1-2. Pour l'horizon équivalent à 0-20 cm, le stockage annuel de C sous SCV varie de 0,55 à 1,01 Mg C .ha⁻¹.an⁻¹ pour les systèmes du dispositif 1, de 1,53 à 1,60 Mg C .ha⁻¹.an⁻¹ pour ceux de dispositif 2 et de 3,05 Mg C .ha⁻¹.an⁻¹ pour ceux du dispositif 3. La forte variabilité des teneurs en C des sols sur le dispositif 4 induit des évolutions de stocks contradictoires et non significatives par rapport à l'effet SCV obtenu sur les autres dispositifs. Pour l'horizon équivalent à 0-40 cm, il n'y a aucun effet SCV observés pour les dispositifs 1, 2 et 4 alors que le dispositif 3 conduit à un stockage annuel de C très élevé (5,27 Mg C .ha⁻¹.an⁻¹).

Tableau 1-2 : Stock de C exprimé à masse équivalente des horizons de référence, en Mégagramme de carbone par hectare (MgC.ha⁻¹). (Moyenne ± écart-type, n=3).

	Equiv. 0-20 cm				Equiv. 0-40 cm			
	M sol réf* Mg sol.ha ⁻¹	Stock C			M sol réf* Mg sol.ha ⁻¹	Stock C		
		MgC.ha ⁻¹		Mg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹		Mg C.ha ⁻¹		
(1) Andranomanelatra								
CT1 m/s	1411	47,35 ± 1,24	a	-	3157	92,06 ± 7,32	a	
NT1 m/s	1411	55,02 ± 2,18	b	0,70	3157	89,70 ± 4,00	a	
NT1 m/m-d	1411	58,47 ± 1,84	b	1,01	3157	97,98 ± 3,87	a	
NT1 h/s-k	1411	53,41 ± 4,13	ab	0,55	3157	89,16 ± 5,35	a	
(2) Bemasoandro								
CT2 r/s	1447	40,43 ± 6,37	ab	-	3108	72,91 ± 13,29	a	
NT2 r/s	1447	50,02 ± 2,08	b	1,60	3108	82,80 ± 5,65	a	
CT2 m/p	1447	35,40 ± 2,75	a	-	3108	68,06 ± 8,66	a	
NT2 m/p	1447	44,60 ± 4,30	b	1,53	3108	81,14 ± 5,67	a	
(3) Ibity								
CT3 m/p**	2401	16,57 ± 6,31	a	-	4027	29,31 ± 16,23	a	
NT3 m/p	2401	34,88 ± 9,37	b	3,05	4027	60,92 ± 17,87	b	
(4) Betafo								
CT4 r/s**	1233	86,15 ± 7,81	a	-	2401	158,15 ± 31,04	a	
NT4 r/s	1233	72,40 ± 17,80	a	-	2401	127,13 ± 39,22	a	
CT4 m/p	1233	77,29 ± 14,84	a	-	2401	142,08 ± 27,60	a	
NT4 m/p	1233	79,76 ± 18,69	a	-	2401	145,36 ± 40,16	a	

* "M sol réf" est la masse de sol de l'horizon 0-20 cm ou 0-40 cm de l'horizon de référence présentant la plus faible masse de sol à 0-20 et à 0-40 cm.

** Ces systèmes ne présentent qu'une seule parcelle de répétition, les écart-types présentés ici sont calculés à partir des répétitions intra-parcelle.

1.3.3. Stabilité des agrégats

Elle a été faite sur les échantillons de sol 0-5 et 5-10 cm, sur tous les systèmes des dispositifs 1 à 4. Les teneurs en macroagrégats stables (MA, 200-2000 μm) les plus élevées, sont observés au niveau des dispositifs 1 et 2. Les teneurs en MA les plus faibles sont observées sur le dispositif 4 (Tableau 1-3). Ces teneurs sont inversement proportionnelles aux teneurs en mésoagrégats (ME, 20-200 μm). D'une manière générale, il n'y a pas de différence de stabilité des MA entre 0-5 et 5-10 cm.

Si, les systèmes SCV montrent des teneurs en MA significativement plus élevées pour les dispositifs 1 et 4, aucune différence significative n'est observée pour les dispositifs 2 et 4, aussi bien à 0-5 qu'à 5-10 cm de profondeur.

Pour tous les dispositifs, la diminution de la teneur en MA s'accompagne d'une augmentation de la teneur en ME sans aucun changement de la teneur en microagrégats ($< 20 \mu\text{m}$) ; on en déduit que la différence entre NT et CT est due à une désagrégation des MA en ME.

Pour le dispositif 4, la teneur en MA est indépendante des teneurs en C. Pour les dispositifs 1, 2 et 3, on observe que la stabilité des agrégats du sol tend à augmenter avec la teneur en C du sol (Figure 1-3).

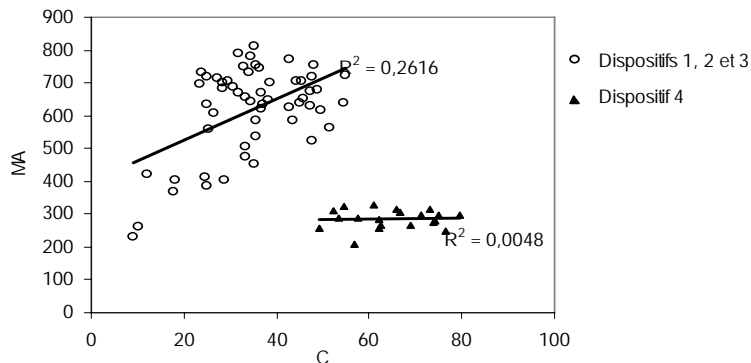
Tableau 1-3 : Teneurs en macroagrégats stables (MA, 200-2000 µm), mésoagrégats (20-200 µm) et microagrégats (< 20 µm) sur les différents dispositifs étudiés exprimé par rapport au sol total (g.kg⁻¹ sol) et sol total sans sables grossiers (g.kg⁻¹ sol-SG).

	SG	MA	ME	MI	MA/sol-SG	ME/sol-SG	MI/sol-SG
		g.kg ⁻¹ sol				g.kg ⁻¹ sol-SG	
0-5 cm							
(1) Andranomanelatra							
NT1 m/s	127,5 ± 20,7 Aa	691,3 ± 26,1 Ab	150,3 ± 27,0 Aa	30,8 ± 8,3 Aa	792,7 ± 36,0 Ac	172,1 ± 28,8 Aa	35,2 ± 8,6 Aa
CT1 m/s	138,8 ± 71,1 Ba	521,5 ± 55,7 Aa	301,1 ± 43,0 Ac	38,6 ± 2,3 Aa	605,8 ± 37,8 Aa	349,3 ± 38,5 Ac	44,8 ± 1,3 Aa
NT1 m/m-d	150,7 ± 49,7 Aa	567,6 ± 46,4 Aa	248,2 ± 68,9 Abc	33,5 ± 7,7 Aa	669,5 ± 61,6 Aab	290,9 ± 71,4 Ab	39,7 ± 9,8 Aa
NT1 h/s-k	129,5 ± 24,6 Aa	643,2 ± 6,8 Aab	187,5 ± 3,4 Aab	39,9 ± 15,4 Aa	739 ± 12,8 Abc	215,5 ± 4,0 Aa	45,5 ± 16,1 Aa
(2) Bemasoandro							
NT2 r/s	61,7 ± 5,4 Aa	725,7 ± 24,3 Ab	182,9 ± 34,0 Aa	29,7 ± 4,5 Aa	773,6 ± 30,5 Ab	194,8 ± 35,2 Aa	31,7 ± 5,0 Aa
CT2 r/s	65,2 ± 22,0 Aa	714,6 ± 33,8 Ab	195,7 ± 15,1 Aab	24,6 ± 6,7 Aa	764,2 ± 19,1 Ab	209,5 ± 18,9 Aab	26,3 ± 7,6 Aa
NT2 m/p	87,7 ± 11,8 Aa	653,8 ± 27,0 Aab	231,9 ± 18,4 Aab	26,5 ± 6,3 Aa	716,8 ± 27,3 Aab	254,1 ± 20,3 Aab	29,1 ± 7,0 Aa
CT2 m/p	84,8 ± 18,3 Aa	626,6 ± 62,1 Aa	257,1 ± 51,0 Ab	31,5 ± 5,6 Aa	684,4 ± 62,5 Aa	281,1 ± 57,2 Ab	34,4 ± 6,0 Aa
(3) Ibity							
NT3 m/p	375,2 ± 20,7 Aa	397,9 ± 12,1 Ab	183,4 ± 17,0 Aa	43,5 ± 17,3 Aa	637,7 ± 39,7 Ab	293,2 ± 18,0 Aa	69,1 ± 25,2 Aa
CT3 m/p	322,8 ± 0,0 Aa	261,5 ± 0,0 Aa	318,1 ± 0,0 Ab	97,5 ± 0,0 Bb	385,8 ± 0,0 Aa	469,7 ± 0,0 Ab	144,5 ± 0,0 Bb
(4) Betafo							
NT4 r/s	279,4 ± 33,1 Aa	281,3 ± 15,7 Aa	360,4 ± 15,3 Aa	78,9 ± 12,3 Aa	390,2 ± 3,7 Aab	500,4 ± 16,7 Aa	109,4 ± 15,3 Aab
CT4 r/s	225,0 ± 0,0 Aa	295,4 ± 0,0 Aab	374,2 ± 0,0 Aa	105,5 ± 0,0 Ab	381,0 ± 0,0 Aab	482,8 ± 0,0 Aa	136,2 ± 0,0 Abc
NT4 m/p	272,0 ± 35,6 Aa	312,7 ± 12,1 Aa	337,9 ± 41,2 Aa	77,4 ± 7,4 Aa	430,5 ± 34,9 Ab	463,2 ± 33,6 Aa	106,3 ± 8,7 Aa
CT4 m/p	278,8 ± 34,5 Aa	240,4 ± 27,9 Aa	384,6 ± 4,5 Aa	96,2 ± 17,6 Ab	332,6 ± 25,5 Aa	534,4 ± 32,5 Aa	133,0 ± 19,6 Ac
5-10 cm							
(1) Andranomanelatra							
NT1 m/s	111,7 ± 13,4 Aa	683,9 ± 32,8 Ab	176,6 ± 23,8 Aa	27,8 ± 2,8 Aa	769,8 ± 28,2 Ab	198,9 ± 29,3 Aa	31,3 ± 2,7 Aa
CT1 m/s	86,6 ± 26,8 Aa	543 ± 95,3 Aa	338,7 ± 72,0 Ab	31,7 ± 2,7 Aa	593,1 ± 90,6 Aa	372,1 ± 86,8 Ab	34,8 ± 3,8 Aa
NT1 m/m-d	110,3 ± 30,3 Aa	661,8 ± 96,6 Bb	206,2 ± 81,7 Aa	21,6 ± 7,1 Aa	743,2 ± 101,1 Ab	232,4 ± 93,2 Aa	24,3 ± 8,0 Aa
NT1 h/s-k	116,1 ± 39,8 Aa	679,4 ± 86,0 Bb	173,7 ± 49,3 Aa	30,8 ± 6,6 Aa	771,2 ± 64,0 Ab	193,8 ± 58,7 Aa	35,0 ± 7,2 Aa
(2) Bemasoandro							
NT2 r/s	69,9 ± 13,9 Aa	760,8 ± 24,8 Ab	138,1 ± 28,5 Aa	31,3 ± 15,5 Aa	818,2 ± 37,9 Aa	148,4 ± 29,3 Aa	33,4 ± 16,0 Aa
CT2 r/s	73,9 ± 20 Aa	718,8 ± 12,9 Aab	184,0 ± 14,7 Aa	23,3 ± 5,5 Aa	776,1 ± 8,1 Aa	198,7 ± 13,9 Aa	25,2 ± 6,1 Aa
NT2 m/p	86,6 ± 8,2 Aa	727,6 ± 79,2 Aab	166,4 ± 67,6 Aa	19,4 ± 8,4 Aa	796,3 ± 83,4 Ba	182,3 ± 74,1 Aa	21,3 ± 9,3 Aa
CT2 m/p	102,4 ± 5,7 Aa	677,5 ± 64,0 Aa	191,2 ± 57,5 Aa	28,9 ± 2,2 Aa	754,5 ± 67,6 Aa	213,3 ± 65,1 Aa	32,2 ± 2,6 Aa
(3) Ibity							
NT3 m/p	355,4 ± 9,6 Aa	399,7 ± 29,3 Ab	212,4 ± 25,8 Aa	32,5 ± 7,2 Aa	620,3 ± 48,1 Ab	329,3 ± 38,8 Ba	50,5 ± 10,7 Aa
CT3 m/p	299,8 ± 0,0 Aa	230,6 ± 0,0 Aa	425 ± 0,0 Ab	44,6 ± 0,0 Aa	326,3 ± 0,0 Aa	609,9 ± 0,0 Bb	63,7 ± 0,0 Aa
(4) Betafo							
NT4 r/s	288,1 ± 37,3 Aa	273,8 ± 29,4 Aa	343,4 ± 8,7 Aa	94,7 ± 19,6 Ab	384,5 ± 30,0 Aa	482,7 ± 16,4 Aa	132,8 ± 24,3 Ab
CT4 r/s	238,0 ± 0,0 Aa	276,8 ± 0,0 Aa	378,4 ± 0,0 Aa	106,8 ± 0,0 Ab	363,5 ± 0,0 Aa	496,2 ± 0,0 Aa	140,3 ± 0,0 Ab
NT4 m/p	281,8 ± 38,2 Aa	317,6 ± 8,1 Aa	329,9 ± 36,6 Aa	70,8 ± 5,9 Aa	442,9 ± 24,6 Aa	458,6 ± 28,7 Aa	98,6 ± 6,8 Aa
CT4 m/p	253,8 ± 10,2 Aa	285,0 ± 3,5 Aa	370,3 ± 9,4 Aa	91,0 ± 2,5 Ab	382,1 ± 2,5 Aa	496,0 ± 6,7 Aa	121,9 ± 4,5 Ab

Les valeurs suivies d'une lettre majuscule différente d'une profondeur à l'autre pour un même traitement sont significativement différentes (p < 0,05).

Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente, pour une même profondeur, et pour un même dispositif, sont significativement différentes (p < 0,05).

Figure 1-3 : Relations entre teneurs en MA (g.kg⁻¹ sol) et la teneur en C (g.kg⁻¹ sol) du sol sur les dispositifs d'Andranomanelatra, Bemasoandro et Ibity (Dispositifs 1, 2 et 3) et le dispositif de Betafo (Dispositif 4).



1.3.4. Caractérisation morphologique, physico-chimiques et minéralogique des profils pédologiques

A) Le sol du dispositif 1 (Andranomanelatra)

La caractérisation détaillée de la morphologie, de la minéralogie et des propriétés physico-chimiques du profil effectué sur ce dispositif sera abordée dans le paragraphe 231 du chapitre 2 (Tableau 2-3, Tableau 2-4, Figure 2-2). Nous donnons seulement ici un résumé des caractéristiques de ce site.

Le profil observé est composé d'une superposition de 2 sols nommés I et II. Le sol I s'est développé sur un dépôt de sédiments assez récents, l'horizon I C/R. L'horizon sus-jacent I (B) comporte encore des lithoreliques de ces sédiments originels. Les horizons I A et I (B) sont de texture argileuse et l'horizon II C/R est sablo-argileux. Les transitions entre les horizons du sol I sont graduelles. Le sol II commence brutalement à partir de l'horizon II A. Il est plus humide, de couleur plus foncée que le sol I, et très argileux jusque dans l'horizon II C/R. Les horizons II (B) et II C/R contiennent, des matériaux très hétérogènes, bariolés, de couleurs rouge, marron et noir, résultant de l'altération de la roche ou des sédiments originels.

Les différentes analyses effectuées sur les horizons supérieurs du sol I (horizons I A₁₁, I A₁₂ et I (B)) montrent des pH et des taux de saturation du complexe d'échange (TS) relativement bas, et la CEC exprimée par kilogramme d'argile est de l'ordre de 14 cmol. Toutefois, ce sol ne peut être considéré parmi les Oxisols (ou Ferralsols dans la classification FAO) du fait de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile, et de l'enrobage des lithoreliques par des sesquioxydes de fer. Ce qui nous conduit à considérer ce sol comme un Inceptisol. Les valeurs d'oxalfe (légèrement supérieures à 1 %) et de la densité apparente (systématiquement inférieure à l'unité), permettent de classer ce sol dans un sous-groupe andique. Il s'agit donc d'un andic Dystrustept dans la Soil Taxonomy. Rappelons que ce sol a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) (classification française, CPCs) comme un sol

ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide et par Raunet (1981), comme sols ferrallitiques gibbsitiques fortement désaturés rouge ou ocre sur alluvions volcano-lacustres.

B) Le sol du dispositif 2 (Bemasoandro)

Le profil type présenté sur la Figure 1-4 et résumé au Tableau 1-4, a été effectué sur une jachère proche du terrain d'expérimentation. Le profil observé est composé d'une superposition de 4 sols nommés I, II, III, IV, du plus récent au plus ancien. La coupe présente des successions de dépôts ayant conduit à la formation de ces 4 sols. Le sol I est de texture argileuse et de bonne macro- et microporosité. Il est formé de 2 horizons (A et B). Le sol II est brusquement de texture sablo-argileuse, et ne présente aucun signe particulier permettant éventuellement de l'envisager comme étant l'altérite du sol I. Le sol III est de texture argileuse et de porosité moyenne. Il comporte 2 horizons, l'un légèrement humifié (III A/(B)), l'autre discontinu d'altérite III (B)/C, caractérisé par un litage de matériau de couleur jaune, rouge orange, plus marqué vers la base de l'horizon. Le sol IV, dont l'horizon A a disparu, ne présente qu'un horizon B très argileux et presque plastique, très peu poreux et avec de nombreuses taches vertes.

Les analyses physico-chimiques et minéralogiques données au Tableau 1-7a concernent uniquement les horizons I A, I (B) et II (B). D'une façon générale, ce sol est acide, possède des valeurs élevées ($> 16 \text{ cmol.kg}^{-1}$ argile) de capacité d'échange cationique (CEC), et présente encore des traces de minéraux primaires comme le feldspath. Il n'est pas très différencié et ne présente pas d'horizon d'accumulation d'argile. Ce qui nous permet de le classer comme étant un Inceptisol dans la classification américaine (Soil taxonomy). La densité apparente est inférieure à 1 et la valeur de oxalfe est supérieure à 1, seuils utilisés par la Soil taxonomy pour définir les caractères andiques. Le sol étudié est donc classé comme andic Dystrustept (Soil Taxonomy). Ce sol a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère sur matériau volcano-lacustre, et par Raunet (1981), comme sols ferrallitiques gibbsitiques fortement désaturés rouge ou ocre sur alluvions volcano-lacustres.

C) Le sol du dispositif 3 (Ibity).

Deux profils ont été observés sur le dispositif de Ibity (Figure 1-5, Tableau 1-5) dans une des parcelles en semis direct (NT3 m/p) située en amont du dispositif et dans une parcelle labourée située sur la pente du dispositif. Le profil observé sous (NT3 m/p) comprend trois horizons de texture argilo-sableuse. De l'horizon A humifié à structure grumeleuse, on passe d'une manière graduelle à un horizon plus compact (B1), de structure massive, puis à un horizon (B2), également de structure massive, mais moins compact. Les transitions entre ces différents horizons sont très progressives. Le profil observé sur le profil labouré sous CT3 m/p est

tout à fait différent de celui sous NT3 m/p. Il est composé d'un horizon labouré très faiblement humifère (A), de texture argilo-sableuse et de structure polyédrique subanguleuse, et dont la transition avec l'horizon B est très brutale. L'horizon B est encore de texture argilo-sableuse mais de structure massive, très bariolé et présentant de nombreuses lithoreliques. L'horizon d'altérite C sous jacente est de structure massive, très friable et composé de roches complètement décomposées, où apparaissent des résidus de quartz.

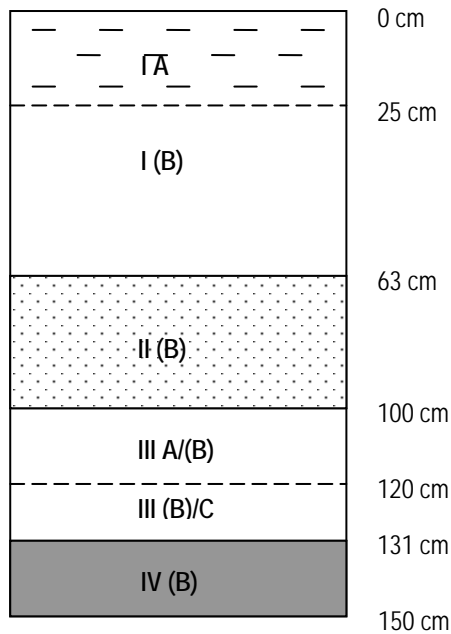
Les analyses physico-chimiques et minéralogiques, effectués sur les 3 horizons observés sur chaque profil pédologique (Tableau 1-7b) montrent des CEC (par kg d'argile) faibles de l'ordre de 9 à 13 cmol.kg⁻¹ argile. Le pH est relativement bas et l'examen de la teneur en argile le long des profils ne laisse pas percevoir l'existence d'un horizon d'accumulation d'argile. Ce sol est donc aussi un Inceptisol suivant la Soil Taxonomy (2003). Toutefois, le fait que pH_{eau} soit inférieur au pH_{KCl} sur le profil NT3 m/p, au niveau de l'horizon B2, est indicateur d'une présence d'oxydes, voire même des gibbsites. C'est donc un oxic Dystrustept selon la Soil Taxonomy (2003), et un sol ferrallitique fortement désaturé gibbsitique à surface I (Fini-Crétacé) disséquée d'après Raunet (1981).

D) Le sol du dispositif 4 (Betafo).

A Betafo, ou région à volcanisme récent, trois profils ont été effectués au niveau de 3 parcelles dont 1 (Profil 1) effectué sur une parcelle en labour (CT4 m/p) et 2 (Profils 2 et 3) sur des parcelles en SCV (NT4 m/p) (Figure 1-6, Tableau 1-6). Les 3 profils présentent en général une superposition de 2 sols (I et II), dont les dispositions et les épaisseurs varient d'un profil à l'autre. Le sol I est composé d'un horizon humifère I A, très noir et de texture limoneuse. L'épaisseur de l'horizon I A, varie de 20 à 60 cm. Sur le profil 3, le sol est recouvert par une couche supplémentaire de 5 cm de ponces volcanique (I A'). Le sol II est tronqué, et ne présente pas d'horizon A. L'horizon II (B1) est de couleur jaune et de texture limono-argileuse et l'horizon II (B2) est rouge et de même texture. Ces deux horizons proviennent de l'altération de cendres volcaniques II (C). La Figure 1-6 montre la grande variabilité au niveau des horizons II (B1) et II (C) des profils 1 et 2 alors que ces profils ne sont éloignés que de 10 m. L'examen de ces profils confirme donc la forte hétérogénéité spatiale du dispositif.

Les analyses physico-chimiques et minéralogiques donnés au Tableau 1-7c concernent les horizons I A, II (B1) et II (B2) et II C, des profils 1 et 2. Les valeurs de pH observées sont élevées, ainsi que les CEC. Par ailleurs, la rétention en P est supérieure à 85 %, la valeur d'oxalfe est supérieure à 2, et les densités apparentes sont comprises entre 0,6 et 0,7. Toutes ces propriétés confèrent à ce sol les caractéristiques d'un Andisol (Soil Taxonomy). Comme le régime climatique présente une saison sèche marquée, ce sol est donc un Ustand, selon la Soil Taxonomy. Rappelons que ce sol a été classé par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme un andosol peu différencié, désaturé, mélaniques sur matériaux pyroclastiques basiques.

Figure 1-4 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 2 (Bemasoandro).



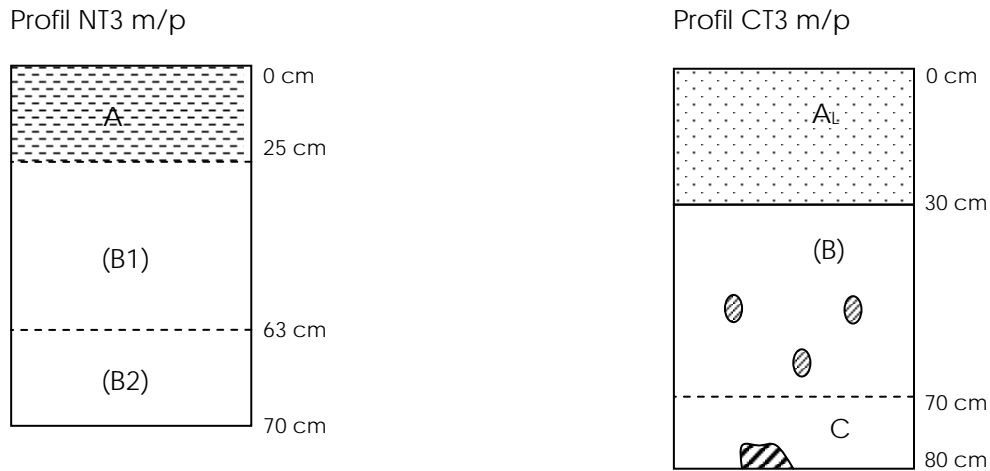
Trait continu : Transition brutale
Trait discontinu : Transition graduelle

Tableau 1-4 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 2 (Bemasoandro).

Horizon	Profondeur (cm)	Couleur (humide)	Texture	Structure	Racines	Porosité	Particularités
I A	0-25	2,5 YR 3/4	Argileuse	Grumeleuse	+++	+++	Transition nette avec I (B)
I (B)	25-63	2,5 YR 4/6	Argileuse	Polyédrique fine de l'ordre de 2 cm	++	++	Transition distincte avec II (B)
II (B)	63-100	2,5 YR 3/6	Sablo argileuse	Massive à débit polyédrique de 3-5 cm	+	+++	
III A/(B)	100-120	7,5 YR 4/4	Argileuse	Massive à débit polyédrique de 3-5 cm	+	++	Présence de nombreuses taches et concrétions ferromanganifères
III (B)/C	120-131	2,5 YR 6/6 (jaune olive) 10 R 5/8 (rouge) 5 YR 5/8 (orange)	Argileuse	Massive	-	+	Horizon discontinu, de couleur très bariolée avec alternance de litage jaune, rouge et orange Présence de concrétions ferromanganifères discontinues assez fortement indurées
IV (B)	131-150	7,5 YR 6/4	Très argileuse	Massive	-	-	Présence de tache verte Horizon presque plastique

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Figure 1-5 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 3 (Ibity).



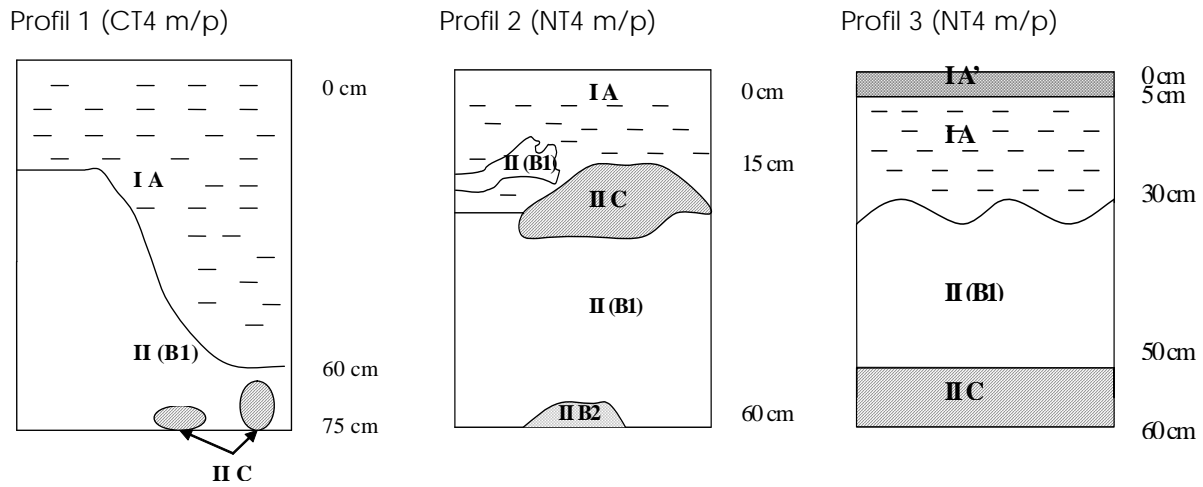
Trait continu : Transition brutale
Trait discontinu : Transition graduelle

Tableau 1-5 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 3 (Ibity).

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Couleur	Texture	Structure	Racines	Porosité	Particularités
CT3 m/p	AL	0-30	nd	Argilo-sableuse	Polyédrique subanguleuse de 1 cm, friable	+++	+++	Transition brutale avec (B)
	(B)	30-70	nd	Argilo-limoneuse	Massive, à débit prismatique, puis sous débit polyédrique anguleuse de 5 à 10 cm	+	++	Horizon argilisé et bariolé avec présence de lithoreliques
	C	70-80	nd	Sableuse	Massive et friable	-	+++	Composé de roche (granite) complètement décomposée, où il ne reste plus que le quartz
NT3 m/p	A	0-25	nd	Argilo-sableuse	Grumeleuse, microagrégée	+++	+++	Transition progressive avec (B1)
	(B1)	25-63	nd	Argilo-sableuse	Massive, à débit polyédrique fine subanguleuse	++	+	Transition progressive avec (B2)
	(B2)	63-70	nd	Argilo-sableuse	Massive, à débit polyédrique fine pas très anguleux	++	+++	Horizon moins compact que (B1)

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Figure 1-6 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 4 (Betafo).



Trait continu : Transition brutale
 Trait discontinu : Transition graduelle

Tableau 1-6 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 4 (Betafo).

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Couleur	Texture	Structure	Racines	Porosité	Particularités
Profil 1	IA	0 à 40-60	Noire	Limoneuse	Massive à débit polyédrique de 2 cm, très friable	+++	+	Transition brutale avec II (B1)
	II (B1)	40-60 à 75	Jaune	Limono-argileuse	Massive à débit prismatique, sous débit polyédrique anguleux de 1 cm, très friable	++	+	
	II (C)	Poches à 70	Noire	Sableuse	Friable	-	+++	Pas d'horizon défini, se trouve sous forme de poches entourées par l'horizon II (B1)
	II (B2)	A partir 70	Rouge	Limono-argileuse	Massive à débit prismatique, sous débit polyédrique anguleux de 1 cm, très friable			Présente les mêmes caractéristiques que II (B1) mais de couleur + rouge
Profil 2	IA	0-15 à 20	Noire	Limoneuse	Massive à débit polyédrique de 2 cm, très friable	+++	+	Transition brutale avec II (B1)
	II (B1)	5-20 cm (incursion) et de 20 à 50-60	Jaune	Limono-argileuse	Massive à débit prismatique, sous débit polyédrique anguleux de 1 cm, très friable	++	+	Horizon pénétrant dans l'horizon IA
	II (C)	Poches de 15 à 30	Noire	Sableuse	Friable	-	+++	Pas d'horizon défini, se trouve sous forme de poche (plus grande que sur Profil 1) entouré ensuite par l'horizon II (B1)
	II (B2)	50 à 60	Rouge	Limono-argileuse	Massive à débit prismatique, sous débit polyédrique anguleux de 1 cm, très friable			Sous forme d'une voûte pénétrant l'horizon II (B1)
Profil 3	IA'	0-5	Gris	Sableuse	-			Couche de ponces centimétriques en cours d'altération
	IA	5 à 20	Noire	Limoneuse	Massive à débit polyédrique de 2 cm, très friable	+++	+	Transition brutale avec II (B1)
	II (B1)	20-40	Jaune	Limono-argileuse	Massive à débit prismatique, sous débit polyédrique anguleux de 1 cm, très friable	++	+	Horizon pénétrant dans l'horizon IA
	II (C)	40-60	Noire	Sableuse	Friable	-	+++	

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

1.4. DISCUSSION

Dans cette discussion, nous ne visons pas à une interprétation détaillée de tous les résultats, mais nous cherchons à raisonner le choix d'un ou plusieurs dispositifs qui permettront de répondre le mieux possible à la question de l'effet des systèmes SCV sur le stockage de C dans le sol. Rappelons que le choix initial de ces situations a été simplement commandé par l'existence de dispositifs expérimentaux (SCV vs conventionnel) dans la région et permettant de tester des effets à moyen terme (8 à 12 ans).

Nous avons donc plusieurs systèmes en SCV mis en place sur 4 dispositifs implantés sur 3 types de sol différents :

- dispositif 1 et 2 : sol ferrallitique argileux à caractères andiques,
- dispositif 3 : sol ferrallitique argilo-sableux,
- dispositif 4 : andosol.

Les niveaux de stocks de C sur ces dispositifs (1 et 2, 3, 4) sont très différents. Il serait alors intéressant d'étudier l'effet SCV pour 3 types de sol contrastés. Toutefois, sur le dispositif 4 (Betafo), la variabilité des teneurs en C est beaucoup trop forte, masquant complètement l'effet SCV. L'observation des profils sous CT et NT montre que, bien que l'on observe partout les mêmes horizons, leur succession ainsi que leur épaisseur sont très variables pour un profil donné (Profil 1, Figure 1-6), et d'un profil à un autre (Profils 1, 2 et 3, Figure 1-6), et ceci indépendamment des systèmes étudiés. Ces variabilités sont probablement dues à différents remaniements survenant lors de la mise en place des différents matériaux d'origine volcanique, et constituent ainsi une limite quant à son utilisation pour une étude de l'effet SCV.

Par ailleurs, sur le dispositif 3 (Ibity), la comparaison entre NT et CT est impossible car l'état initial n'est pas le même. En effet, le profil des teneurs en C (Figure 1-2), contrairement aux autres systèmes des autres dispositifs, sont parallèles et ne se rejoignent pas, les valeurs de densité apparente sont totalement différentes. L'observation des profils sous les deux systèmes (Figure 1-5) confirme l'idée qu'on se trouve en présence de deux situations complètement différentes. Le sol sous labour (CT3 m/p, une seule parcelle), se trouvant dans la pente et à un niveau plus bas que le système sous semis direct, est moins épais et se trouve beaucoup plus proche de l'altérite que le sol sous NT3 m/p, plus évolué avec des horizons graduels. Ce qui nous permet de conclure que la parcelle CT3 m/p est située dans une partie qui a été fortement érodée au cours de la mise en place du paysage actuel. Les sols sous ces deux traitements ne sont alors pas comparables, et leur différence en stocks de C ne pourra être attribuée à l'effet des systèmes étudiés.

Les dispositifs 1 et 2, mis en place sur le même type de sol, ferrallitique argileux à caractères andiques, présentent des teneurs en C élevées mais possèdent des profils de teneurs cohérentes, avec une variabilité satisfaisante. Seuls ces dispositifs nous permettent alors de

tester un effet SCV. Toutefois, le dispositif 1 (Andranomanelatra), présente un certain nombre d'avantages : (i) il est plus ancien, et (ii) comporte plus de systèmes à comparer, en particulier, des SCV avec ou sans plantes de couverture.

D'autres arguments, comme le niveau de stockages annuels sous SCV, trop élevés et en désaccord avec les quantités de résidus restitués sur le dispositif 2, ou la relation MA-C, mais que nous ne discuterons pas ici, sont aussi en faveur du choix de Andranomanelatra dans le cadre spécifique de cette thèse.

1.5. CONCLUSION

Au vu de ces résultats, bien qu'au départ divers types de sol ont été considérés, finalement, l'étude ne sera effectuée que sur le dispositif d'Andranomanelatra, puisque c'est le dispositif le plus cohérent autant du point de vue variabilité spatiale et valeurs de teneurs observées. Dans la suite de cette étude, les systèmes sur ce dispositif seront alors nommés respectivement, CT m/s, NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k au lieu de CT1 m/s, NT1 m/s, NT1 m/m-d et NT1 h/s-k.

Tableau 1-7 : Caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques des horizons des profils pédologiques étudiés.

Tableau 1-7a. Bemasoandro

Bemasoandro		CT2 r/s (c)				NT2 r/s (c)			
		IA	I (B)	II (B)	IIB	IA	I (B)	II (B)	II (B)
		0-25 cm	25-55 cm	55-80 cm	>80 cm	0-22 cm	22-49 cm	49-67 cm	> 67 cm
pH eau		5,08	4,68	4,52	4,62	5,07	4,62	4,66	4,82
pH KCl		4,18	4,20	4,20	4,15	4,08	4,30	4,19	4,11
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	86,68	80,36	71,15	82,14	67,32	82,22	82,71	93,21
C	g.kg ⁻¹ sol	20,82	19,56	3,34	4,43	25,71	13,30	7,89	3,46
C/N		13,2	15,2	8,9	10,1	15,0	17,1	11,2	9,3
Granulométrie									
Argile	g.100g ⁻¹ sol	78,91	72,38	38,98	38,62	71,86	77,85	38,25	48,92
Limons fins	g.100g ⁻¹ sol	9,87	13,25	32,36	37,94	15,43	10,59	27,08	18,65
Limons grossiers	g.100g ⁻¹ sol	2,24	3,52	11,88	12,39	4,15	3,76	11,37	7,20
Sables fins	g.100g ⁻¹ sol	3,98	5,31	10,65	6,75	4,60	4,22	10,95	8,22
Sables grossiers	g.100g ⁻¹ sol	5,00	5,54	6,13	4,30	3,96	3,58	12,35	17,01
Ca éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,95	0,13	0,09	0,10	1,29	0,14	0,12	0,28
Mg éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,73	0,16	0,10	0,15	1,06	0,15	0,13	0,20
K éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,42	0,13	0,11	0,06	0,35	0,08	0,32	0,27
Na éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,03	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,06	0,06
Somme (Ca,Mg,K,Na)	cmol.kg ⁻¹ sol	2,13	0,45	0,32	0,35	2,71	0,41	0,63	0,81
Al éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	1,82	1,78	2,31	3,35	2,09	1,55	1,75	4,69
H éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,52	0,51	0,65	0,85	0,64	0,35	0,55	1,24
CEC	cmol.kg ⁻¹ sol	17,00	14,85	12,49	14,51	19,73	14,97	13,46	23,72
CEC par kg d'argile	cmol.kg ⁻¹ argile	21,54	20,52	32,04	37,57	27,46	19,23	35,19	48,49
TS	cmol.kg ⁻¹ sol	12,54	3,01	2,57	2,41	13,76	2,71	4,64	3,39
Densités apparentes	g.cm ⁻³	0,88	0,93	-	-	0,79	0,90	-	-
Teneur en eau	g.100g ⁻¹ sol	26,30	26,80	23,42	25,03	23,59	26,94	25,50	29,46
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	86,68	80,36	71,15	82,14	67,32	82,22	82,71	93,21
Dissolution selective									
Extraction citrate-bicarbonate-dithionite									
Fe	g.kg ⁻¹ sol	45,57	46,71	43,93	42,03	48,03	50,25	52,95	214,32
Al	g.kg ⁻¹ sol	12,30	11,63	8,95	8,62	13,74	13,92	10,66	18,00
Si	g.kg ⁻¹ sol	2,95	3,10	4,10	5,13	3,54	2,97	4,23	11,28
Extraction oxalate d'ammonium pH 3.0									
Fe _{ox}	g.kg ⁻¹ sol	5,83	4,36	5,79	4,57	8,90	9,20	8,36	12,49
Al _o	g.kg ⁻¹ sol	8,38	6,83	8,49	7,35	8,93	10,74	7,31	7,51
Si _o	g.kg ⁻¹ sol	0,99	1,13	1,08	1,51	1,26	1,25	1,71	1,68
Oxalfe (Al _{ox} + ½ Fe _{ox})	g.100g ⁻¹ sol	1,00	0,78	1,00	0,82	1,34	1,46	1,20	1,62
Allophane	g.100g ⁻¹ sol	0,70	0,80	0,77	1,07	0,89	0,89	1,21	1,19
Extraction pyrophosphate de sodium									
Fe _p	g.kg ⁻¹ sol	2,74	1,37	0,34	0,20	3,43	1,86	0,22	0,43
Al _p	g.kg ⁻¹ sol	3,25	2,53	1,83	1,92	4,10	3,14	1,66	2,16
Si _p	g.kg ⁻¹ sol	0,24	0,01	< 0,01	0,06	0,81	0,34	< 0,01	< 0,01
CoAl _M	g.100g ⁻¹ sol	3,90	3,04	2,20	2,30	4,92	3,77	1,99	2,59
CoAl _m	g.100g ⁻¹ sol	2,44	1,90	1,37	1,44	3,08	2,36	1,25	1,62
Diffraction par rayon X									
Quartz						+	+	+	+
Gibbsite						+	+	+	+
Kaolinite						+++	+++		
Halloysite 7								+++	++ ou kaol
Hematite						tr	tr	tr	+
Goethite						tr	tr		++
Feldspath K						+	+	+	+
Plagioclase						+			
Magnetite						tr	tr	tr	

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Tableau 1-7b. Ibity

Ibity		CT3 m/p (a)			NT3 m/p (a)		
		AL 0-30 cm	B 30-70 cm	C >70 cm	A 0-25 cm	B1 25-63 cm	B2 >63 cm
pH eau		5,14	5,27	4,96	5,32	5,10	4,55
pH KCl		4,39	4,61	4,51	4,46	4,45	4,99
C	g.kg ⁻¹ sol	10,06	5,09	0,69	14,10	13,55	8,23
C/N		12,96	11,97	7,28	13,75	18,64	20,19
Granulométrie							
Argile	g.100g ⁻¹ sol	33,76	34,10	22,06	43,02	48,42	46,25
Limons fins	g.100g ⁻¹ sol	12,26	24,85	21,95	10,88	6,08	6,73
Limons grossiers	g.100g ⁻¹ sol	3,42	8,29	7,81	4,25	4,54	6,61
Sables fins	g.100g ⁻¹ sol	8,63	5,86	7,63	8,06	8,86	9,41
Sables grossiers	g.100g ⁻¹ sol	41,93	26,91	40,55	33,79	32,11	31,01
Ca éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,56	0,44	0,07	0,78	0,03	0,08
Mg éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,24	0,23	0,05	0,38	0,02	0,06
K éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,12	0,02	0,02	0,08	0,15	0,04
Na éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03
Somme (Ca,Mg,K,Na)	cmol.kg ⁻¹ sol	0,94	0,72	0,16	1,25	0,21	0,21
Al éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,67	0,60	0,81	0,68	0,77	0,49
H éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
CEC	cmol.kg ⁻¹ sol	4,88	4,60	3,87	7,06	6,13	4,37
CEC par kg d'argile	cmol.kg ⁻¹ argile	14,45	13,49	17,54	16,41	12,66	9,45
TS	cmol.kg ⁻¹ sol	19,22	15,57	4,06	17,65	3,39	4,81
Densités apparentes	g.cm ⁻³	1,29	--	-	1,08	-	-
Teneur en eau	g.100g ⁻¹ sol	12,32	18,97	11,68	14,73	14,35	17,27
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	23,70	25,09	20,75	46,04	49,45	64,78
Dissolution sélective							
Extraction citrate-bicarbonate-dithionite							
Fe	g.kg ⁻¹ sol	38,27	26,56	46,62	39,13	42,53	46,38
Al	g.kg ⁻¹ sol	4,38	4,68	3,99	11,13	12,80	12,65
Si	g.kg ⁻¹ sol	1,60	1,27	1,53	1,50	1,43	1,51
Extraction oxalate d'ammonium pH 3.0							
Fe _o	g.kg ⁻¹ sol	0,48	0,80	0,53	1,64	1,91	1,48
Al _o	g.kg ⁻¹ sol	2,17	2,31	1,53	4,43	5,33	5,52
Si _o	g.kg ⁻¹ sol	0,41	0,33	0,36	0,38	0,43	0,49
Oxalfe (Al _{ox} + ½ Fe _{ox})	g.100g ⁻¹ sol	0,24	0,27	0,18	0,53	0,63	0,63
Allophane	g.100g ⁻¹ sol	0,29	0,23	0,26	0,27	0,31	0,35
Extraction pyrophosphate de sodium							
Fe _p	g.kg ⁻¹ sol	0,04	0,67	0,03	2,13	2,99	0,32
Al _p	g.kg ⁻¹ sol	0,65	1,47	0,51	3,64	3,74	1,71
Si _p	g.kg ⁻¹ sol	0,03	0,32	0,07	0,46	0,26	< 0,01
CoAl _M	g.100g ⁻¹ sol	0,78	1,76	0,61	4,37	4,49	2,05
CoAl _m	g.100g ⁻¹ sol	0,49	1,10	0,38	2,73	2,81	1,28
Diffraction par rayon X							
Quartz					+++	+++	+++
Gibbsite					++	++	++
Kaolinite					++	++	++
Hematite					tr	tr	tr

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Tableau 1-7c. Betafo

		CT4 m/p (a)				NT4 m/p (b)			
		IA 0-20 0-60 cm	II (B1) 60-75 cm	IIB (B2) >75	IIC Poches	IA 0-15 cm	II (B1) 30-60 cm	IIB (B2) 20-40 cm	IIC 15-20 cm
pH eau		5,77	6,10	6,05	6,49	6,05	6,57	6,13	6,86
pH KCl		4,99	5,57	5,98	5,09	5,29	5,63	5,69	5,45
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	62,92	98,18	99,39	65,80	98,64	97,81	98,14	61,12
C	g.kg ⁻¹ sol	55,11	28,66	21,92	4,64	38,40	15,62	16,56	5,02
C/N		14,12	13,77	12,67	12,57	14,15	10,46	12,34	12,56
Ca éch	cmol.kg ⁻¹ sol	3,14	2,60	1,77	3,66	3,04	6,02	1,66	4,95
Mg éch	cmol.kg ⁻¹ sol	1,64	1,83	1,76	1,48	2,15	2,10	0,93	1,59
K éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,18	0,05	0,04	0,08	0,39	0,06	0,09	0,24
Na éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,05	0,25	0,08	0,16	0,03	0,39	0,05	0,14
Somme (Ca,Mg,K,Na)	cmol.kg ⁻¹ sol	5,01	4,73	3,65	5,37	5,60	8,57	2,73	6,91
CEC	cmol.kg ⁻¹ sol	30,58	23,73	21,33	16,26	29,59	28,54	26,16	22,09
TS	cmol.kg ⁻¹ sol	16,37	19,91	17,09	33,04	18,94	30,04	10,42	31,27
Densités apparentes	g.cm ⁻³	0,70	-	-	-	0,75	-	0,74	-
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	62,92	98,18	99,39	65,80	98,64	97,81	98,14	61,12
Dissolution sélective									
Extraction citrate-bicarbonate-dithionite									
Fe	g.kg ⁻¹ sol	53,25	67,23	61,56	21,25	55,89	82,88	55,39	19,37
Al	g.kg ⁻¹ sol	23,39	28,30	27,62	9,19	26,19	32,46	22,80	8,02
Si	g.kg ⁻¹ sol	7,57	10,28	10,74	8,54	9,42	14,62	9,85	8,95
Extraction oxalate d'ammonium pH 3.0									
Fe _o	g.kg ⁻¹ sol	22,82	26,52	24,84	22,45	24,32	34,59	26,38	25,35
Al _o	g.kg ⁻¹ sol	38,54	31,61	48,18	18,03	42,39	34,39	35,71	19,46
Si _o	g.kg ⁻¹ sol	16,05	14,14	24,81	13,92	18,08	21,11	18,83	17,33
Oxalfe (Al _{ox} + ½ Fe _{ox})	g.100g ⁻¹ sol	5,00	4,49	6,06	2,93	5,46	5,17	4,89	3,21
Allophane	g.100g ⁻¹ sol	11,40	10,04	17,62	9,88	12,84	14,99	13,37	12,30
Extraction pyrophosphate de sodium									
Fe _p	g.kg ⁻¹ sol	2,06	1,80	1,10	0,61	2,06	0,79	1,14	0,53
Al _p	g.kg ⁻¹ sol	6,97	4,35	4,40	1,47	6,78	2,80	3,67	1,12
Si _p	g.kg ⁻¹ sol	0,37	0,41	0,14	0,32	0,34	0,30	0,17	0,38
CoAl _M	g.100g ⁻¹ sol	8,36	5,22	5,28	1,76	8,14	3,36	4,40	1,34
CoAl _m	g.100g ⁻¹ sol	5,23	3,26	3,30	1,10	5,09	2,10	2,75	0,84
Diffraction par rayon X									
Quartz						+++	+++	+++	+++
Gibbsite						+	+	+	tr
Halloysite 7							+		
Plagioclase						++	++	+++	+++
Olivine						+	++	+	
Augite							+		+
Magnetite						+		+	
Chlorite ou vermiculite						tr	tr	tr	tr
Amphibole						tr		tr	tr

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

Chapitre 2. Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar

Article soumis à Etude et Gestion du Sol

Soil organic carbon storage in no-tillage systems in a clayey soil, Madagascar

Razafimbelo Tantely¹, Albrecht Alain¹, Basile Isabelle², Borschneck Daniel², Bourgeon Gerard³, Feller Christian⁴, Ferrer Henri¹, Michellon Roger^{5,6}, Moussa Narcisse⁶, Muller Bertrand³, Oliver Robert³, Razanamparany Celestin⁶, Raunet Michel³, Seguy Lucien³

¹ IRD - UR 179 SeqBio, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

² CEREGE-CNRS-Université Paul Cezanne-Aix-Marseille III, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, B.P. 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4, France

³ CIRAD, TA 40/01, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France

⁴ IRD, Route d'Ambohipo, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar

⁵ CIRAD, Ampandrianomby, BP 853, 101 Antananarivo - Madagascar

⁶ ONG TAFA, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar

RESUME

Stocker du carbone (C) dans le sol permet d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et de réduire la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère. L'effet des systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur le stockage de C dans le sol est étudié sur un dispositif agronomique de longue durée (11 ans) à Antsirabe, Madagascar (16° C, 1300 mm). Quatre systèmes sont étudiés : un système en labour conventionnel [CT m/s, rotation maïs (*Zea mays L.*)-soja (*Glycine max. L.*)], et trois systèmes en SCV sans travail du sol (No-tillage, NT) [NT m/s, rotation maïs-soja ; NT m/m-d, rotation maïs-maïs avec une couverture végétale de *Desmodium uncinatum* ; et NT h/s-k, rotation haricot (*Phaseolus vulgaris*)-soja avec une couverture de *Pennisetum clandestinum*]. Les résidus de récoltes sont exportés de la parcelle pour CT m/s alors qu'ils sont restitués pour les SCV. Le sol étudié est très argileux, à faible capacité d'échange cationique mais possédant des propriétés andiques pouvant influencer les teneurs en C du sol. A 0-5 cm, les teneurs en C sont plus élevées sous SCV (NT m/s, NT m/m-d et NT h/s) que sous labour (CT m/s), et à 5-10 cm, elles sont plus élevées sous NT m/m-d et NT m/s que sous NT h/s-k et CT m/s. Le stockage annuel de C à masse équivalente, est alors de 0,69 et 1,01 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, sous NT m/s et NT m/m-d pour l'horizon équivalent à 0-20 cm, alors qu'il n'y a pas d'effet SCV pour l'horizon équivalent à 0-40 cm, à cause d'une variabilité initiale des teneurs en C dans les horizons de profondeur. Les teneurs en macroagrégats stables (MA, 200-2000 µm) sont plus élevées sous NT m/s, NT h/s-k et NT m/m-d que sous CT m/s à 0-5 cm et à 5-10 cm. Cette teneur en MA est corrélée positivement (R = 0,408, p < 0,05) avec la teneur en C du sol, ce qui pourrait induire (i) une amélioration de l'agrégation en fonction de l'augmentation de la teneur en C du sol et (ii) une protection du C se trouvant à l'intérieur de ces agrégats contre la minéralisation microbienne. La respirométrie montre une protection physique de C plus importante sous NT m/s que sous CT m/s (200 et 50 µg C-CO₂.g⁻¹ sol, respectivement). Ces niveaux de protection étant assez faibles, le C stocké dans cette étude pourrait être protégé contre la minéralisation par d'autres processus comme l'adsorption sur les colloïdes du sol ou la récalcitrance biochimique de la matière organique du sol.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) storage can improve soil properties and reduce agriculture's contribution to CO₂ emissions. The long term (11 years) effects of no-tillage systems on soil C storage is studied in a clayey subtropical (16°C, 1200 mm.y⁻¹) soil in Antsirabe (Madagascar). Four treatments were studied: (i) control (CT m/s): annual rotation of maize (*Zea mays L.*) and soybean (*Glycine max*) with conventional tillage (hand ploughing), (ii) the same rotation with no tillage (NT m/s), (iii) a maize/maize rotation with legume (*Desmodium uncinatum*) permanent cover crop, and no-tillage (NT m/m-d), (iv) and a common bean (*Phaseolus vulgaris*)/soybean rotation with kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) permanent cover

crop, and no-tillage (NT h/s-k). Residues were exported for the CT m/s and not removed for the NT m/s, NT m/m-d and NT h/s-k plots. The studied soil was very clayey, with low cationic exchange capacity and andic properties. SOC content was generally high and was significantly greater in no-tillage systems (NT m/s, NT m/m-d and NT h/s-k) than in CT m/s at 0-5 cm depth, and significantly greater in NT m/m-d and NT m/s than in NT h/s-k and CT m/s at 5-10 cm depth. The rate of SOC storage for NT m/s and NT m/m-d were respectively 0.69 and 1.01 Mg C.ha⁻¹.year⁻¹ at 0-20 cm (in equivalent soil mass). No differences of C stocks between CT and NT treatments were found below 20 cm depth, and were mainly attributed to initial spatial variation. Water-stable macroaggregates (MA, 200-2000 µm) were significantly greater in NT m/s, NT h/s-k and NT m/m-d than in CT m/s at 0-5 cm depth and 5-10 cm depth and were positively correlated with SOC content ($R = 0.408$, $p < 0.05$). This correlation supposed (i) that soil aggregate stability increased with the increasing of soil C content, and (ii) water-stable aggregates protected physically C inside aggregate structure against microbial mineralization. The C protected inside aggregates was greater in NT m/s than in CT m/s (200 and 50 µg C-CO₂.g⁻¹ soil, respectively). However, this small protection level suggested that C stored in no-tillage systems might be protected from mineralization by its adsorption on colloid surface or its biochemical recalcitrance.

2.1. INTRODUCTION

La nécessité d'améliorer les stocks de matière organique (MO), et donc du carbone (C), dans le sol est souvent évoquée pour des raisons agricoles. En effet, la MO du sol, de par sa relation étroite avec la fertilité, est devenu un des facteurs important pour la maîtrise d'une productivité végétale durable. Aussi, de nombreuses recherches concernent l'effet de différents modes de gestion des terres sur les stocks organiques (ou stocks de C) des sols. Par ailleurs, stocker du C d'origine atmosphérique, via les restitutions végétales, dans le sol répond aussi à une problématique environnementale : la lutte contre l'effet de serre. On sait que la contribution de l'agriculture et du changement d'usage des terres aux émissions de CO₂ est loin d'être négligeable avec 34 % des émissions (IPCC, 2001) et les régions intertropicales participent pour 50 % de ces dernières. Aussi, une gestion raisonnée des agroécosystèmes prenant en compte une diminution des émissions des gaz à effet de serre (GES) ou leur séquestration est indispensable. Parmi les alternatives de gestion permettant de stocker du C d'origine atmosphérique dans le système sol-plante, les pratiques de non-labour associées à des systèmes de culture impliquant des couvertures végétales, paraissent intéressantes tant pour les milieux tempérés (Balesdent et al., 2000 ; Halvorson et al., 2002; Six et al., 2002b) que tropicaux (Bayer et al., 2000; Sà, 2001a; Six et al., 2002b).

Ces systèmes sont installés en milieu paysan depuis une dizaine d'années sur les pentes des collines (appelées localement « tanety ») des Hautes Terres malgaches, traditionnellement consacrées essentiellement aux cultures pluviales et aux pâturages extensifs. Les systèmes

SCV sont des systèmes de culture qui ne comportent pas de travail de sol (no-tillage, NT), le sol est recouvert en permanence par une couverture végétale morte (résidus de culture) ou vivante (plante de couverture) et le semis est alors effectué directement à travers cette couverture (Raunet et al., 1998b). Ces systèmes pourraient conduire à une augmentation des stocks de C organique des sols, grâce à : (i) la quantité importante de résidus organiques restitués, et à (ii) la diminution des pertes en C par minéralisation par l'absence de travail du sol. En effet, le labour favorise l'oxygénation du sol, ce qui accélère la minéralisation de la MO en la rendant plus accessible à la flore microbienne (Balesdent et al., 2000). Il est donc important d'évaluer l'effet de ces systèmes sur le stockage de C dans le sol, en comparaison avec des systèmes traditionnels impliquant des pratiques de travail du sol (conventional tillage, CT).

Toutefois, le stockage de C dans le sol ne devient intéressant que si le C stocké est relativement stabilisé. On parle alors de « protection » du C dans le sol vis-à-vis de la minéralisation. Cette protection dépend de trois processus (Six et al., 2002a) :

- une protection dite physico-chimique due à l'association des MO avec les colloïdes minéraux du sol,
- une protection dite biochimique, ou récalcitrance, liée à la composition chimique des MO stockées,
- une protection dite physique due à la localisation de ces MO à l'intérieur ou à l'extérieur des agrégats stables du sol. Concernant cette dernière, des corrélations positives et significatives entre la stabilité des agrégats et la teneur en C du sol ont été signalées, laissant supposer l'existence de ce processus de protection (Feller et al., 1996; Albrecht et al., 1998; Amézketa, 1999; Golchin et al., 1994a) et cette protection a été mise en évidence directement dans divers travaux (Gupta et Germida, 1988; Hassink et al., 1993; Beare et al., 1994a; Chevallier et al., 2004).

L'étude présentée ici concerne des sols argileux des Hautes Terres de Madagascar. Après une caractérisation générale des sols, l'effet des systèmes SCV sur le stockage du C et la stabilité de l'agrégation seront étudiés, ainsi que le niveau de protection physique du C du sol vis-à-vis de la minéralisation.

2.2. MATERIELS ET METHODES

2.2.1. Présentation du milieu

L'étude a été menée dans la région d'Antsirabe, au centre des Hautes Terres malgaches, à une altitude de 1600 m. Le climat de la région est du type subtropical avec deux saisons distinctes : une saison sèche et froide, de mai à septembre, et une saison humide, d'octobre à avril. La température moyenne annuelle est de 16°C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche, et maximales de 31°C

pendant la saison humide. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1300 mm et la pluviométrie mensuelle n'excède pas 50 mm de mai à septembre.

La région, située dans une région de volcanisme ancien (datant du Pliocène) et récent (moins de 10 000 ans), comprend des sols minéraux bruts, des sols peu évolués, des andosols, des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979), selon la classification française (CPCS, 1967). Toutefois, depuis 1979, et la réalisation de l'étude de Zebrowski et Ratsimbazafy (1979), certains sols des zones tropicales d'altitude considérés antérieurement comme ferrallitiques humifères se sont avérés être des sols à caractère andique même en absence d'allophanes (Caner et al., 2000). L'identification de ces sols nécessite donc des analyses chimiques spécifiques sur les formes amorphes ou cristallisées du fer, de l'aluminium et de la silice.

2.2.2. Présentation du site expérimental et prélèvements de sol

L'essai étudié est localisé à Andranomanelatra, au nord-est de la ville d'Antsirabe. Il a été mis en place en 1991 par une organisation non gouvernementale malgache Tany sy Fampandrosoana (TAFA) avec l'appui du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), mais les systèmes que nous allons étudier ont été mis en place en 1992. Ce dispositif comprend des parcelles de surface variant de 30 à 200 m². Ce dispositif comporte quatre systèmes de culture, chacun étant répété 3 fois sur des parcelles élémentaires en randomisation totale (Figure 2-1) :

- un système en labour conventionnel (CT m/s) où le labour est effectué par traction animale avec une charrue à soc jusqu'à une profondeur de 20 cm sur une culture de maïs (m, *Zea mays* L.) en rotation annuelle avec du soja (s, *Glycine max* L.),
- un système SCV avec couverture végétale morte, sans travail du sol (NT m/s) et avec présence d'un mulch permanent constitué des résidus de culture, en rotation maïs-soja,
- un système SCV à couverture végétale vivante de graminée, sans travail du sol (NT h/s-k), en rotation annuelle de haricot (h, *Phaseolus vulgaris* L.) suivie d'une culture de soja, le sol sous ces deux cultures est recouvert par une plante de couverture, le kikuyu (k, *Pennisetum clandestinum*),
- un système SCV à couverture végétale vivante de légumineuse, sans travail du sol (NT m/m-d), en culture continue de maïs (m). Le sol est recouvert par une plante de couverture, le desmodium (d, *Desmodium uncinatum*).

Le dispositif comporte 3 niveaux de fertilisation F1, F2 et F3. Seul le niveau F2, dit moyen, est étudié ici. Il consiste en une association de fumier de bovin (à raison de 5 Mg.ha⁻¹) et d'engrais minérale (NPK). Le soja et le haricot sont fertilisés chimiquement à 30, 30 et 40 kg.ha⁻¹ et le maïs à 100, 30 et 40 kg.ha⁻¹ de N, P et K, respectivement. Pour le système CT m/s, les résidus sont exportés, par contre, ils sont restitués pour les traitements NT m/s,

NT m/m-d et NT h/s-k leur quantité est estimée, par ajustement à partir des rendements en grains, à 54, 81 et 77 Mg MS.ha⁻¹ en 11 ans (Tableau 2-1, colonne 2).

L'essai est mis en place sur des sols développés sur des alluvions volcano-lacustres : ces sols ont été décrits par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme des sols ferrallitiques fortement désaturés humifères. Des échantillons de sol ont été prélevés en avril-mai 2003, juste avant la période de récolte (Tableau 2-2). Sur chaque parcelle de répétition, 4 prélèvements élémentaires ont été effectués : deux sur les lignes et deux sur les interlignes, à 5 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm, à l'aide de cylindres de 250 cm³ (8 cm de diamètre et 5 cm de hauteur) pour 0-5 et 5-10 cm, et de 500 cm³ (8 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) pour 10-20, 20-30 et 30-40 cm. Chaque échantillon a donné lieu à la détermination de la densité apparente et des teneurs en C et N totaux. Pour la détermination de la stabilité des agrégats et de la respirométrie, un échantillon composite de chaque profondeur sur chaque parcelle a été constitué à partir des quatre prélèvements élémentaires de la parcelle. Les analyses physico-chimiques (exceptés les C et N totaux), minéralogiques et la teneur en eau sont effectuées sur une des parcelles de répétition du traitement NT m/s aux profondeurs 0-10, 20-30 et 30-40 cm.

Tableau 2-1 : Moyennes et écart-types (n=3) des biomasses aériennes et racinaires restituées au sol par chaque système, et exprimées en matière sèche (MS) et en Mégagramme (Mg) de carbone (C). Andranomanelatra, Madagascar.

	Aérienne	Racinaire	Aérienne et racinaire ⁶		Δ biomasse	C théorique stocké 15 % ⁷		C théorique stocké 7 % ⁸	
	Mg MS.ha ⁻¹	Mg MS.ha ⁻¹	Mg MS.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹	Mg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹
CT m/s ¹	0 ± 0	16,1 ± 0,9 a	16,1 ± 0,9 a	8,0 ± 0,5 a					
NT m/s ²	54,1 ± 4,0 a	26,7 ± 3,5 b	80,8 ± 5,3 b	40,4 ± 2,7 b	32,4 ± 2,7 a	4,85 ± 0,40 a	0,44 ± 0,04 a	2,27 ± 0,43 a	0,21 ± 0,04 a
NT m/m-d ³	80,5 ± 2,1 c	59,5 ± 1,6 d	140,1 ± 2,5 d	70 ± 1,3 d	62,0 ± 1,3 c	9,29 ± 0,20 c	0,84 ± 0,02 c	4,34 ± 0,31 b	0,39 ± 0,03 b
NT h/s-k ⁴	77,0 ± 0,5 b	46,2 ± 0,2 c	123,1 ± 0,5 c	61,6 ± 0,2 c	53,5 ± 0,5 b	8,03 ± 0,08 b	0,73 ± 0,01 b	3,75 ± 0,19 a	0,34 ± 0,02 a

¹ CT m/s : conventional tillage, rotation maïs-soja.

² NT m/s : No-tillage, rotation maïs/soja.

³ NT m/m-d : No-tillage, rotation maïs/maïs avec une couverture végétale de desmodium.

⁴ NT h/s-k : No-tillage, rotation haricot/soja avec une couverture végétale de kikuyu.

⁶ Le facteur de conversion de MS en C est de 0,5.

⁷ C théorique stocké estimé à 15% du C total restitué (Rasmussen et Collins, 1991).

⁸ C théorique stocké estimé à 7% du C total restitué (Kong et al., 2005).

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, p < 0,05).

Tableau 2-2 : Description des différents traitements étudiés et des différentes analyses pratiquées sur les échantillons prélevés. Andranomanelatra, Madagascar.

Traitements	Travail du sol	Rotation	Couverture végétale	Fertilisation	Nombre de parcelles	Teneurs en C et densités apparentes		Stabilité des agrégats		Respirométrie	
						Horizons	Echantillons dosés	Horizons	Echantillons dosés	Horizons	Echantillons dosés
CT m/s	"Conventional Tillage"	maïs/soja	Sans	F2 ⁽¹⁾	3	0-5 cm 5-10 cm 10-20 cm 20-30 cm 30-40 cm	4 points élémentaires par parcelle	0-5 cm 5-10 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires	0-5 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires
NT m/s	"No-Tillage"	maïs/soja	Résidus de récoltes	F2	3	0-5 cm 5-10 cm 10-20 cm 20-30 cm 30-40 cm	4 points élémentaires par parcelle	0-5 cm 5-10 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires	0-5 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires
NT m/m-d	"No-Tillage"	maïs/maïs	Desmodium (<i>Desmodium uncinatum</i>)	F2	3	0-5 cm 5-10 cm 10-20 cm 20-30 cm 30-40 cm	4 points élémentaires par parcelle	0-5 cm 5-10 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires	-	-
NT h/s-k	"No-Tillage"	haricot/soja	Kikuyu (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	F2	3	0-5 cm 5-10 cm 10-20 cm 20-30 cm 30-40 cm	4 points élémentaires par parcelle	0-5 cm 5-10 cm	Composite par parcelle des 4 points élémentaires	-	-

(1) Apport de fumier 5 Mg.ha⁻¹ et de la fertilisation minérale (N-P-K) à raison de 30-30-40 kg.ha⁻¹ pour soja et haricot et 100-30-40 kg.ha⁻¹ pour le maïs.

2.2.3. Méthodes analytiques

Analyses physico-chimiques

- Les pH eau et KCl 1M ont été mesurés sur un mélange sol/solution selon le rapport 1/2,5.
- Le carbone et l'azote total ont été mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Les sols n'étant pas carbonatés, le C total représente le C organique.
- La granulométrie a été réalisée selon la méthode de la pipette (méthode sur sol séché à l'air) après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à chaud et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. L'argile (0-2 µm) et les limons fins (2-20 µm) ont été prélevés à la pipette de Robinson et les autres fractions, sables grossiers (200-2000 µm), sables fins (50-200 µm), limons grossiers (20-50 µm) obtenues par tamisage (AFNOR, 2004b).
- Les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et la capacité d'échange cationique (CEC) ont été déterminées par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH7. L'aluminium échangeable a été extrait par KCl 1M. Tous les dosages ont été réalisés à l'ICP-AES (inductive coupled plasma - atomic emission spectroscopy).
- La densité apparente est mesurée sur du sol non perturbé prélevé au cylindre de 250 et 500 cm⁻³.
- La teneur en eau à pF 4,2 a été déterminée par la méthode des plaques poreuses sur des échantillons tamisés à 2 mm (AFNOR, 2004a).
- La rétention en phosphore a été déterminée suivant la méthode décrite par Blakemore et al. (1987).
- Les formes du fer, de l'aluminium et de la silice ont été extraits à l'aide de réactifs sélectifs : (i) le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD), ou réactif de Mehra et Jackson (1960), qui permet d'extraire les formes cristallisées et amorphes, notées Fe_o, Al_o, Si_o, (ii) l'oxalate d'ammonium tamponné à pH3 (McKeague et Day, 1966; Blakemore et al., 1987) qui extrait les formes amorphes et microcristallines, notées Fe_o, Al_o, Si_o, et (iii) le pyrophosphate de sodium (Wada et Higachi, 1976) qui concerne les formes liées à la matière organique (complexes organo-métalliques) notées Fe_p, Al_p, Si_p.

A partir de ces résultats, divers indices sont calculés :

- l'indice 'oxalfe', (Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 1 :

$$\text{« oxalfe \% = Al}_o + 1/2 \text{ Fe}_o \text{ », (g.100 g}^{-1} \text{ sol)} \quad (1)$$

- la quantité des produits allophaniques (Parfitt et Wilson, 1988; Poulenard et Herbillon, 2000), par l'équation 2 :

$$\text{« Allophanes \% = 7,1 Si}_o \text{ », (g.100 g}^{-1} \text{ sol)} \quad (2)$$

- les quantités de complexes organo-aluminiques (CoAl) pour 2 extrêmes du rapport molaire C/Al_p : une valeur minimum (CoAl_m) et une valeur maximum (CoAl_M), (Poulenard et Herbillon, 2000) selon les équations 3 et 4 :

- pour C/Al_p molaire = 13 « CoAl_M = 12 Al_p », (g.100 g⁻¹ sol) (3)

- pour C/Al_p molaire = 7 « CoAl_m = 7,5 Al_p », (g.100 g⁻¹ sol) (4)

Diffraction des rayons X sur poudre de sol

L'analyse minéralogique est effectuée sur des échantillons finement broyés à une granulométrie inférieure à 50 µm. Les données permettant d'identifier et de quantifier les minéraux cristallins du sol sont obtenues à l'aide d'un diffractomètre Philips MPD 3710 équipée d'une anticathode de cobalt.

Mesure de la stabilité des agrégats

La stabilité structurale du sol est étudiée suivant une méthode dérivée de Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de sol séché à l'air préparé et tamisé 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 µm) est séchée à 105°C pendant 16 h puis pesée. Cette fraction est composée de macroagrégats stables (MA, > 200 µm) et de sables grossiers (SG). Les SG sont extraits en tamisant la fraction > 200 µm dans de la soude diluée, puis séchés à 105°C. La teneur en MA est alors calculée par différence entre la fraction > 200 µm et SG. La fraction < 200 µm 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 µm, ou microagrégats (MI, < 20 µm), est pipetée, séchée pendant 16 h à 105°C, puis pesée. Les mésoagrégats (ME, 20-200 µm) sont calculés par l'équation 5 :

$$ME = \text{Sol total} - (\text{SG} + \text{MA} + \text{MI}) \quad (5)$$

Mesures respirométriques

La respirométrie est un test de minéralisation du C effectué dans des conditions standard (28°C, 28 jours) de laboratoire. Il est appliqué ici pour 2 modes de préparation des échantillons de sol en vue d'évaluer le niveau de protection physique du C vis-à-vis de la minéralisation : des échantillons de sol total 0-2 mm, non broyés et des échantillons de sol total 0-2 mm broyés à 0,2 mm (agrégats détruits, matière organique déprotégée). La différence, entre les deux modes de préparation, des quantités de C-CO₂ émis par le sol permet d'évaluer la protection du C dans les conditions expérimentales choisies. On opère

de la façon suivante : 10 g de sol total 0-2 mm, broyé ou non broyé et 20 g de sable inerte sont mis dans une coupelle d'incubation de 44 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. Le tout est mélangé de façon homogène, tassé à une même densité apparente et porté à une humidité équivalente à 80% de l'humidité à la capacité au champ ($pF = 2$) du mélange sol+sable. La coupelle est mise dans un flacon étanche d'incubation de 1000 ml mis à incuber à l'étuve à 28°C. Le C-CO₂ dégagé dans le flacon est dosé aux 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 15, 18, 21 et 28^{ème} jours par chromatographie en phase gazeuse (CPG MTI Agilent M 200). L'atmosphère du flacon est renouvelée après chaque dosage. Il y a 3 répétitions d'incubation par échantillon.

Les vitesses de minéralisation (C-CO₂ minéralisé par jour) ont été modélisées suivant une fonction de double exponentielle (équation 6) à deux compartiments avec un compartiment labile (L) et un compartiment résistant (R).

$$v_t = A_L e^{-k_L t} + A_R e^{-k_R t} \quad (6)$$

avec v_t la vitesse de minéralisation à l'instant t (jour, j), A_L et k_L , la vitesse initiale de minéralisation ($\text{mgC-CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{C sol} \cdot \text{j}^{-1}$) et le taux de décomposition (j^{-1}) du compartiment labile, et A_R et k_R , la vitesse initiale de minéralisation et le taux de décomposition du compartiment résistant. Les quantités de C-CO₂ minéralisées sont alors modélisées suivant les équations 7, 8 et 9 :

$$Q_t = CP_L (1 - e^{-k_L t}) + CP_R (1 - e^{-k_R t}) \quad (7)$$

$$CP_L = \frac{A_L}{k_L} \text{ et } CP_R = \frac{A_R}{k_R} \quad (8)$$

$$CP_T = CP_L + CP_R \quad (9)$$

avec Q_t , la quantité de C-CO₂ minéralisé ($\text{mgC-CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{C sol}$) à l'instant t , CP_L et CP_R , les potentiels de minéralisation des compartiments labile et résistant, et $CP_L + CP_R$ ou CP_T , le potentiel de minéralisation total des deux compartiments.

Traitement statistique

Les données sont comparées entre elles par le test t de Student de comparaison de moyennes. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

2.3. RESULTATS

2.3.1. Profil type, description, analyses et classification

Le profil type montré sur la Figure 2-2 et décrit dans le Tableau 2-3 a été effectué sur une jachère proche du terrain d'expérimentation. Le profil en place est composé principalement

de deux sols superposés, dénommés sol I et sol II. Le sol I, de couleur rouge à rouge jaunâtre, s'est développé sur un dépôt de sédiments assez récent, avec un horizon I C/R dont les lithoreliques des sédiments originels sont encore observables dans l'horizon sus-jacent I (B). Les horizons A et B sont de texture argileuse et l'horizon II C/R est sablo-argileux. La porosité (macro- et microporosité) est assez bonne sur l'ensemble des horizons du sol I, même si une couche un peu compactée est observée au niveau de l'horizon I (B). Les transitions entre horizons sont généralement graduelles. Le sol II commence brutalement à partir de l'horizon II A. Il est plus humide, de couleur plus foncée que le sol I, et très argileux jusque dans l'horizon II C/R. L'horizon II A est discontinu à certains endroits du profil, probablement décapé lors du dépôt du sédiment I C/R, alors que l'horizon II B est continu et présente des traces d'activité biologique, notamment des galeries de vers de terre. Les horizons II (B) et II C/R contiennent, des matériaux très hétérogènes, bariolés, de couleurs rouge, marron et noir, résultant de l'altération de la roche ou des sédiments originels. La porosité (macro- et microporosité) est assez bonne sur l'ensemble des horizons du sol II.

Les différentes analyses effectuées sur les horizons supérieurs du sol I (horizons I A₁₁, I A₁₂ et I (B), Tableau 2-4) montrent des pH et des taux de saturation du complexe d'échange (TS) relativement bas, et la CEC exprimée par kilogramme d'argile est de l'ordre de 14 cmol. Toutefois, dans la classification américaine (Soil Survey Staff, 2003), ce sol ne peut être considéré parmi les Oxisols (ou Ferralsols dans la classification FAO) du fait de l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile, et de l'enrobage des lithoreliques par des sesquioxydes de fer. Ce qui nous conduit à considérer ce sol comme un Inceptisol. Les valeurs d'oxalfe (légèrement supérieures à 1 % dans la plupart des horizons) et de la densité apparente (systématiquement inférieure à l'unité), permettent de classer ce sol dans un sous-groupe andique. Il s'agit donc d'un andic Dystrustept dans la Soil Taxonomy. Rappelons que Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) l'avait classé (classification française, CPCS) comme Sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide.

Tableau 2-3 : Caractéristiques morphologiques du profil pédologique. Andranomanelatra, Madagascar.

Horizon	Profondeur (cm)	Couleur (humide)	Texture	Structure	Racines	Porosité	Particularités
I A11	0-22	5 YR 4/6	Argileuse	Grumeleuse	+++	+++	
I A12	22-25	2,5 YR 3/6	Argileuse	Polyédrique fine, de l'ordre de 1cm	+++	+++	Horizon plus organique que I A11
I (B)	25-80 à 88	2,5 Y/R 4/6 (30 cm)	Argileuse	25-30 cm: Polyédrique grossière, de l'ordre de 5 cm	++	++	Couleur graduelle
		5 YR 4/6 (70 cm)	Argileuse	50- 65 cm : massive et prismatique	+	+	A 65-88 cm : présence de petites lithoreliques blanches et concrétions ferromanganifères
			Argileuse	65-88 cm : prismatique peu compact	++	++	
I C/R	80 à 88-117	10 YR 5/6	Sablo-argileuse	Friable	+	+++	Présence de lithoreliques grossières de 5 cm contenant des concrétions ferro-manganifères
II A	110-117 à 122	7,5 YR 4/4	Argileuse	Polyédrique grossière, de l'ordre de 5 cm	+	++	Horizon discontinu
II (B)	122-146	7,5 YR 4/4 à 4/6	Argileuse	Sur-structure prismatique et structure polyédrique grossière	+	++	Horizon très hétérogène (plages rouge, marron, et noir) Présence de revêtements d'argile, de cutanes ferromanganifères, et de traces d'activité biologique
II C/R	143-150	7,5 YR 5/6 à 4/6	Argileuse	Idem que II (B)	tr	++	Horizon plus homogène

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

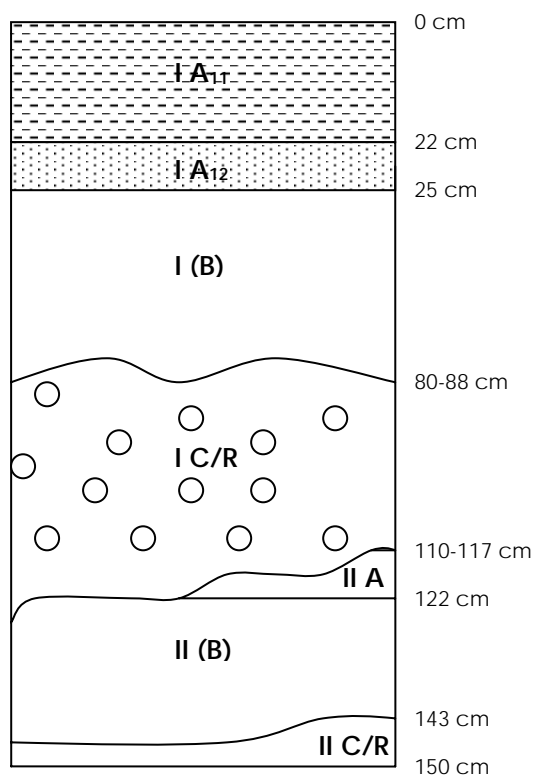


Figure 2-2 : Profil pédologique du sol. Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2-4 : Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des horizons étudiés (profil sous NT). Andranomanelatra, Madagascar.

		I A ₁₁ (0-10 cm)	I A ₁₂ (20-30 cm)	I (B) (30-40 cm)
pH eau		5,72	4,96	4,84
pH KCl		4,90	4,60	5,08
C	g.kg ⁻¹ sol	45,6	20,9	13,5
C/N		14,8	17,5	16,0
Granulométrie				
Argile	g.100g ⁻¹ sol	61,90	69,70	65,40
Limons fins	g.100g ⁻¹ sol	10,40	6,60	7,00
Limons grossiers	g.100g ⁻¹ sol	8,40	3,80	4,50
Sables fins	g.100g ⁻¹ sol	7,50	7,10	8,10
Sables grossiers	g.100g ⁻¹ sol	11,80	12,80	14,90
Ca éch	cmol.kg ⁻¹ sol	4,24	0,30	0,22
Mg éch	cmol.kg ⁻¹ sol	2,82	0,20	0,15
K éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,56	0,16	0,23
Na éch	cmol.kg ⁻¹ sol	0,02	0,02	0,02
Somme (Ca,Mg,K,Na)	cmol.kg ⁻¹ sol	7,64	0,68	0,62
Al éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,58	0,59	0,48
H éch KCl	cmol.kg ⁻¹ sol	0,01	0,01	0,01
CEC	cmol.kg ⁻¹ sol	17,32	10,24	8,63
	cmol.kg ⁻¹			
CEC par kg d'argile	argile	27,98	14,69	13,20
TS	g.100g ⁻¹ sol	44,13	6,66	7,21
Densités apparentes	g.cm ⁻³	0,76	0,95	1,00
Teneur en eau (pF 4,2)	g.100g ⁻¹ sol	23,36	22,02	22,55
Rétention en P (Blakemore)	g.100g ⁻¹ sol	57,90	70,95	73,15
Dissolution sélective				
Extraction au citrate- bicarbonate-dithionite				
Fe	g.kg ⁻¹ sol	46,62	44,86	42,11
Al	g.kg ⁻¹ sol	16,83	15,17	12,60
Si	g.kg ⁻¹ sol	3,07	3,37	2,92
Extraction à l'oxalate d'ammonium pH 3.0				
Fe _o	g.kg ⁻¹ sol	3,48	3,85	4,53
Al _o	g.kg ⁻¹ sol	11,99	11,78	11,53
Si _o	g.kg ⁻¹ sol	1,18	1,26	1,61
Oxalfe (Al _o + ½ Fe _o)	g.100g ⁻¹ sol	1,37	1,37	1,38
Allophane	g.100g ⁻¹ sol	0,84	0,89	1,14
Extraction au pyrophosphate de sodium				
Fe _p	g.kg ⁻¹ sol	3,04	1,11	0,39
Al _p	g.kg ⁻¹ sol	5,72	3,38	2,67
Si _p	g.kg ⁻¹ sol	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CoAl _M	g.100g ⁻¹ sol	6,86	4,06	3,20
CoAl _m	g.100g ⁻¹ sol	4,29	2,54	2,00
Diffraction des rayons X				
Quartz		++	++	++
Gibbsite		++	++	+++
Kaolinite ou Halloysite		++	++	++
Hématite		tr	tr	tr
Feldspath K		tr	tr	+
Magnétite			tr	

+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible, tr : trace.

2.3.2. Densités apparentes, teneurs et stocks de carbone selon les traitements

Ces résultats concernent la couche de sol entre 0 et 40 cm. On confirme (Tableau 2-5) les faibles valeurs de densité apparente (D_a) variant, toutes profondeurs confondues, de 0,71 à 1,04 g.cm⁻³ avec une augmentation générale avec la profondeur. D_a est plus élevée ($p < 0,05$) sous CT m/s que sous NT m/m-d, NT h/s-k et NT m/s à 0-5 cm de profondeur (0,89 contre 0,71, 0,77, 0,78 g.cm⁻³, $p < 0,05$) mais il n'y a plus de différence entre les différents systèmes à partir de 5-10 cm de profondeur. Une différence entre les deux types de plante de couverture, NT h/s-k et NT m/m-d, est observée à 10-20 cm, avec une D_a plus élevée ($p < 0,05$) sous NT h/s-k que sous NT m/m-d (0,89 g.cm⁻³ et 0,77 g.cm⁻³, respectivement) ; il n'y a toutefois pas de différence entre ces deux systèmes et NT m/s.

Les teneurs en C (Tableau 2-5) sont relativement élevées en surface (30 à 50 g C.kg⁻¹ sol entre 0 et 20 cm) et restent élevées en profondeur (14 g C.kg⁻¹ sol). A 0-5 cm, elles sont plus élevées ($p < 0,05$) sous NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k (50,2, 49,6 et 48,4 g C.kg⁻¹ sol) que sous CT m/s (34,0 g C.kg⁻¹ sol). On ne note pas de différence entre NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k.

Les systèmes NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k ont permis une augmentation de la teneur en C du sol de 48, 46 et 42 % à 0-5 cm, alors qu'à 20-30 et 30-40 cm, les teneurs en C sous ces systèmes sont légèrement plus faibles, par rapport à CT m/s ($p > 0,05$).

Comme les valeurs de D_a ne sont pas identiques, pour un même horizon, entre les différents systèmes étudiés, le stock de C ne peut être calculé sur une base « volumique » (stricte addition des stocks de chaque horizon considéré), mais sur une base de « masse équivalente » (Ellert et Bettany, 1995). Pour cela, on choisit comme horizons de référence, ceux du traitement présentant les masses de sol les plus faibles. Ceci correspond ici au traitement NT m/m-d avec des masses de 1411 Mg sol.ha⁻¹ pour la couche 0-20 cm (equiv 0-20 cm) et de 3157 Mg sol.ha⁻¹ pour 0-40 cm (equiv 0-40 cm).

Tous traitements confondus, les stocks de C (Tableau 2-6) varient de 47 à 58 Mg C.ha⁻¹ dans les couches equiv 0-20 cm et de 90 à 98 Mg sol.ha⁻¹ pour les couches equiv 0-40 cm. Pour equiv 0-20 cm, les stocks de C sont plus élevés ($p < 0,05$) sous NT m/s et NT m/m-d (55,0 et 58,5 Mg C.ha⁻¹) que sous CT m/s (47,4 Mg C.ha⁻¹), correspondant à des stockages annuels respectifs de 0,69 et 1,01 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ sur 11 ans pour les 2 traitements. Pour la couche equiv 0-40 cm, les stocks de C sous NT ne sont pas différents ($p > 0,05$) de ceux sous CT m/s.

Tableau 2-5 : Densités apparentes (Da) et teneurs en carbone (C) du sol. Andranomanelatra, Madagascar. (moyenne \pm écart-type, n=3).

Horizon (cm)	CT m/s		NT m/s		NT m/m-d		NT h/s-d	
	Da	C	Da	C	Da	C	Da	C
0-5	0,89 \pm 0,02 b	34,0 \pm 1,2 a	0,78 \pm 0,06 a	50,2 \pm 4,0 b	0,71 \pm 0,03 a	49,6 \pm 1,9 b	0,77 \pm 0,07 a	48,4 \pm 5,3 b
5-10	0,87 \pm 0,09 a	35,2 \pm 0,5 a	0,86 \pm 0,05 a	40,9 \pm 4,0 ab	0,78 \pm 0,07 a	44,6 \pm 2,5 b	0,86 \pm 0,04 a	38,1 \pm 4,2 ab
10-20	0,87 \pm 0,06 ab	32,0 \pm 3,4 ab	0,84 \pm 0,05 ab	30,8 \pm 0,8 a	0,77 \pm 0,04 a	35,2 \pm 1,3 b	0,89 \pm 0,03 b	31,2 \pm 2,7 ab
20-30	0,92 \pm 0,06 a	26,8 \pm 4,8 a	0,95 \pm 0,02 a	20,9 \pm 3,1 a	0,92 \pm 0,05 a	24,2 \pm 2,4 a	0,98 \pm 0,03 a	20,5 \pm 1,1 a
30-40	0,98 \pm 0,04 a	19,3 \pm 3,2 ab	1,00 \pm 0,07 a	13,5 \pm 3,6 ab	1,01 \pm 0,01 a	19,0 \pm 1,1 b	1,04 \pm 0,04 a	14,6 \pm 2,5 a

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même profondeur, sont différentes significativement ($p < 0,05$).

Tableau 2-6 : Stocks de C exprimés pour une masse équivalente des couches 0-20 cm et 0-40 cm (1411 et 3157Mg sol. ha⁻¹). Andranomanelatra, Madagascar. (moyenne \pm écart-type, n=3).

	C (Mg C.ha ⁻¹ sol)	
	1411 Mg sol. ha ⁻¹ (1)	3157 Mg sol. ha ⁻¹ (1)
	Equiv. 0-20 cm	Equiv. 0-40 cm
Stocks de C		
CT m/s	47,4 \pm 1,2 a	92,1 \pm 7,3 a
NT m/s	55,0 \pm 2,2 b	89,7 \pm 4,0 a
NT m/m-d	58,5 \pm 1,8 b	98,0 \pm 3,9 a
NT h/s-k	53,4 \pm 4,1 ab	89,2 \pm 5,3 a
Stockage annuel de C		
NT m/s	0,69 \pm 0,23 a	-
NT m/m-d	1,01 \pm 0,20 a	-
NT h/s-k	0,55 \pm 0,39 a	-

(1) La couche de référence est celle du traitement NT m/m-d.

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).

Pour l'abréviation des traitements, cf Tableau 2-1

2.3.3. Stabilité des agrégats de sol selon les traitements

En général, la teneur en macroagrégats stables (MA) varie de 521 à 691 g.kg⁻¹ sol, indiquant une bonne stabilité structurale pour ce type de sol (Tableau 2-7). Cette teneur est plus élevée ($p < 0,05$) sous NT m/m-d, NT h/s-k et NT m/s (606, 643 et 691 g.kg⁻¹ sol, respectivement) que sous CT m/s (521 g.kg⁻¹ sol) à 0-5 cm, alors qu'aucune différence n'est observée à 5-10 cm. Pour les trois systèmes en SCV, la teneur en MA est plus élevée sous NT m/s que sous NT m/m-d et/ou NT h/s-k à 0-5 cm. Pour les mésoagrégats (ME), une tendance inverse à celle de MA est observée, avec, à 0-5 cm, des teneurs plus élevées ($p < 0,05$) pour CT m/s (301 g.kg⁻¹ sol) que pour NT h/s-k et NT m/s (188 et 150 g.kg⁻¹ sol, respectivement). La teneur en ME sous NT m/m-d n'est toutefois, pas différente de celle sous CT m/s. Les microagrégats (MI) sont en

très faibles quantités ($< 46 \text{ g.kg}^{-1} \text{ sol}$) et aucune différence significative entre les traitements n'a été détectée. La dispersabilité de ce sol est donc faible.

Tableau 2-7 : Teneurs en sables grossiers SG, macroagrégats stables à l'eau MA (200-2000 μm), mésoagrégats ME (20-200 μm) et microagrégats MI ($< 20 \mu\text{m}$) pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Résultats exprimés par rapport au sol total (colonnes 3 à 5) ou par rapport au sol-SG (colonnes 6 à 8). (moyenne \pm écart-type, $n=3$).

	SG ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol}$)	MA ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol}$)	ME ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol}$)	MI ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol}$)	MA ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol-SG}$)	ME ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol-SG}$)	MI ($\text{g.kg}^{-1} \text{ sol-SG}$)
0-5 cm							
CT m/s	138,8 \pm 71,1 a	521,5 \pm 55,7 c	301,1 \pm 43,0 a	38,6 \pm 2,3 ab	605,8 \pm 37,8 b	349,3 \pm 38,5 a	44,8 \pm 1,3 ab
NT m/s	127,5 \pm 20,7 a	691,3 \pm 26,1 a	150,3 \pm 27,0 b	30,8 \pm 8,3 b	792,7 \pm 36,0 a	172,1 \pm 28,8 b	35,2 \pm 8,6 b
NT m/m-d	130,0 \pm 49,7 a	606,1 \pm 46,4 abc	238,6 \pm 68,9 ab	25,2 \pm 7,7 a	695,4 \pm 61,6 ab	275,4 \pm 71,4 ab	29,2 \pm 9,8 a
NT h/s-k	129,5 \pm 24,6 a	643,2 \pm 6,8 b	187,5 \pm 3,4 a	39,9 \pm 15,4 ab	739,0 \pm 12,8 b	215,5 \pm 4,0 a	45,5 \pm 16,1 ab
5-10 cm							
CT m/s	86,6 \pm 26,8 a	543 \pm 95,3 a	338,7 \pm 72,0 a	31,7 \pm 2,7 a	593,1 \pm 90,6 b	372,1 \pm 86,8 a	34,8 \pm 3,8 a
NT m/s	111,7 \pm 13,4 a	683,9 \pm 32,8 b	176,6 \pm 23,8 b	27,8 \pm 2,8 a	769,8 \pm 28,2 a	198,9 \pm 29,3 b	31,3 \pm 2,7 a
NT m/m-d	110,3 \pm 30,3 a	661,8 \pm 96,6 ab	206,2 \pm 81,7 ab	21,6 \pm 7,1 a	743,2 \pm 101,1 ab	232,4 \pm 93,2 ab	24,3 \pm 8,0 a
NT h/s-k	116,1 \pm 39,8 a	679,4 \pm 86,0 a	173,7 \pm 49,3 a	30,8 \pm 6,6 a	771,2 \pm 64,0 b	193,8 \pm 58,7 a	35,0 \pm 7,2 a

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, et pour une même profondeur, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).

2.3.4. Respirométrie

L'étude a porté sur les seuls échantillons 0-5 cm des traitements CT m/s et NT m/s. En 28 jours, le C minéralisé (C-CO₂) sous NT m/s est toujours plus élevé ($p < 0,05$) que celui minéralisé sous CT m/s, que ce soit pour les échantillons broyés ou non broyés (Tableau 2-8). L'effet du broyage n'est toutefois pas significatif ($p > 0,05$), bien que les valeurs de C-CO₂ minéralisé des échantillons broyés soient systématiquement plus élevées que celles des échantillons non broyés. Sur la totalité des 28 jours, l'effet broyage reste significatif pour NT m/s mais ne l'est plus pour CT m/s.

Le C potentiellement minéralisable (CP_T) est significativement ($p < 0,05$) plus élevé pour NT m/s (de l'ordre de 50 mg C-CO₂.g⁻¹C sol) que pour CT m/s (de l'ordre de 23 mg C-CO₂.g⁻¹C sol) ; et ne diffère pas significativement entre les échantillons broyés et non broyés d'un même traitement (Tableau 2-9). La même tendance est observée pour le C potentiellement minéralisable du compartiment résistant (CP_R), alors qu'au niveau du compartiment labile, CP_L est significativement plus élevé sous NT m/s que sous CT m/s, avec des valeurs plus élevées ($p < 0,05$) pour les échantillons broyés.

Tableau 2-8 : C minéralisé sous NT m/s et CT m/s. Couche 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar (moyenne ± écart-type, n=3).

a) Exprimés en $\mu\text{g C-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ sol}$

		0-4 jours	4-15 jours	15-28 jours	0-28 jours	C protégé
CT m/s	Non broyé	195,3 ± 26,0 a	206,8 ± 25,9 a	143,3 ± 14,4 a	545,4 ± 66,3 a	48,7 ± 105,4 a
CT m/s	Broyé	231,7 ± 36,0 a	219,0 ± 41,1 a	143,5 ± 19,7 a	594,1 ± 96,7 a	
NT m/s	Non broyé	622,5 ± 52,2 b	515,3 ± 66,6 b	372,0 ± 68,8 b	1509,8 ± 184,3 b	198,4 ± 365,1 a
NT m/s	Broyé	779,0 ± 140,0 b	577,1 ± 134,9 b	352,1 ± 70,0 b	1708,2 ± 324,6 b	

b) Exprimés en $\text{mg C-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ C sol}$

		0-4 jours	4-15 jours	15-28 jours	0-28 jours	C protégé
CT m/s	Non broyé	5,89 ± 0,74 a	6,23 ± 0,73 a	4,32 ± 0,40 a	16,44 ± 1,87 a	1,25 ± 3,3 a
CT m/s	Broyé	6,90 ± 1,19 a	6,52 ± 1,34 a	4,27 ± 0,68 a	17,69 ± 3,20 a	
NT m/s	Non broyé	12,58 ± 0,71 b	10,41 ± 1,15 b	7,51 ± 1,26 b	30,50 ± 3,09 b	5,59 ± 6,9 a
NT m/s	Broyé	16,42 ± 2,19 c	12,17 ± 2,43 b	7,49 ± 1,77 b	36,09 ± 5,99 b	

Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).

Tableau 2-9 : Potentiels (CP) et taux (k , j^{-1}) de minéralisation du C du sol des compartiments labiles (L), résistants (R) et total (T) du sol pour une durée d'incubation de 28 jours. (moyenne ± écart-type, n=3).

a) Exprimés en $\mu\text{g C-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ sol}$

		CP_L	k_L	CP_R	k_R	CP_T
CT m/s	Non broyé	99,1 ± 15,0 a	0,75 ± 0,08 b	665,0 ± 62,2 a	0,04 ± 0,00 b	764,1 ± 76,7 a
CT m/s	Broyé	141,5 ± 14,2 b	0,68 ± 0,09 b	668,3 ± 86,2 a	0,04 ± 0,00 b	809,9 ± 100,4 a
NT m/s	Non broyé	498,4 ± 59,4 c	0,50 ± 0,05 a	1947,8 ± 456,2 b	0,03 ± 0,00 a	2446,0 ± 501,1 b
NT m/s	Broyé	671,7 ± 127,3 c	0,49 ± 0,06 a	1821,3 ± 401,0 b	0,03 ± 0,01 ab	2492,7 ± 445,4 b

b) Exprimés en $\text{mg C-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ C sol}$

		CP_L	k_L	CP_R	k_R	CP_T
CT m/s	Non broyé	2,99 ± 0,45 a	0,75 ± 0,08 b	20,05 ± 1,73 a	0,04 ± 0,00 b	23,04 ± 2,16 a
CT m/s	Broyé	4,21 ± 0,52 b	0,68 ± 0,09 b	19,90 ± 2,97 a	0,04 ± 0,00 b	24,12 ± 3,48 a
NT m/s	Non broyé	10,06 ± 0,85 c	0,50 ± 0,05 a	39,31 ± 8,30 b	0,03 ± 0,00 a	49,38 ± 8,87 b
NT m/s	Broyé	14,15 ± 1,90 d	0,49 ± 0,06 a	38,91 ± 0,94 b	0,03 ± 0,01 ab	53,06 ± 11,71 b

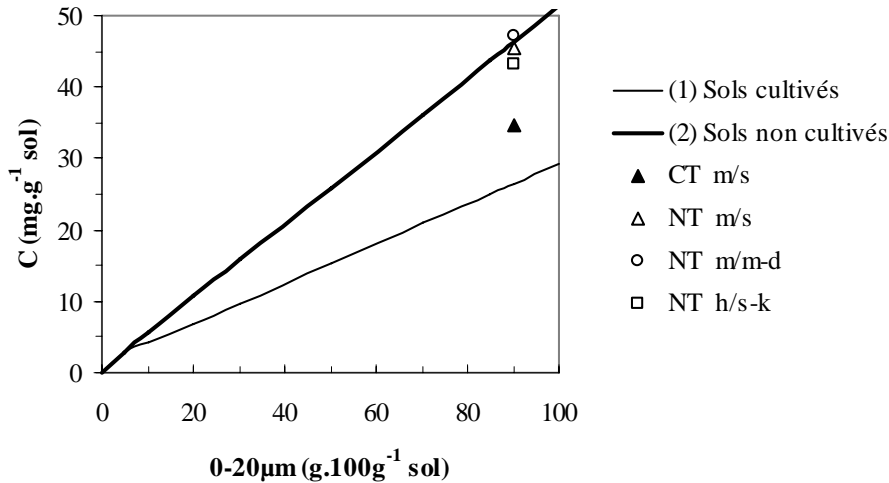
Les valeurs suivies par une lettre minuscule différente d'un traitement à l'autre, pour une même colonne, sont significativement différentes (Test t-Student, $p < 0,05$).
Pour l'abréviation des traitements, cf Tableau 2-1.

2.4. DISCUSSION

2.4.1. Type de sol et teneur en C

De la minéralogie dépend le niveau de stockage de C dans le sol, et les sols à caractère andique présentent généralement, pour une même texture, des stocks plus élevés que les sols à argiles cristallisées de type 1:1 ou 2:1 (Feller et Beare, 1997). Le sol étudié ici est argileux et présente quelques caractéristiques andiques. Ce caractère andique est dû à la fois à la présence de produits allophaniques (de l'ordre de 1%) et de complexes organo-métalliques (2 à 6 % pour les complexes organo-aluminiques). Ceci s'explique par l'existence à faible distance de sites de volcanisme récent à pyroclastite, le sol étudié, développé sur colluvions volcano-lacustre, ayant pu incorporer des projections à caractère vitreux. Tout concourt donc à ce que ce sol présente des teneurs en C élevées : texture argileuse, propriétés andiques, climat sub-tropical. Feller et al. (1991c) ont montré pour les sols tropicaux bien drainés à argile cristallisée (de type 1 :1 ou 2 :1) que les stocks de C dépendent fortement de la texture (teneur en argile + limon fin, Al+Lf), tant en milieu naturel que cultivé.

Les échantillons étudiés ici appartiennent bien au domaine de C décrit par Feller et al. (1991c) (Figure 2-3), entre la droite 1 des « sols cultivés » (à faible niveau de restitution organique) et la droite 2 des « sols non cultivés » (sols sous végétation pérenne à forts niveaux de restitution organique). On constate toutefois que la valeur du traitement CT m/s (à faible niveau de restitution) est nettement au dessus de la droite 1 (35 gC.kg⁻¹ sol au lieu de 25 gC.kg⁻¹ sol) pour l'horizon 0-10 cm. Cette différence (ΔC) de l'ordre de 10 gC.kg⁻¹ sol, entre la valeur mesurée et la valeur « théorique », pourrait représenter l'effet additionnel dû à la fois au climat subtropical frais et au caractère andique du sol. De même, les valeurs mesurées de NT, qui sont proches de la droite 2, apparaissent élevées par rapport aux prédictions de Feller et al. (1991c) qui les situeraient à égale distance des droites 1 et 2.



Pour l'abréviation des traitements, cf Tableau 2-1.

Figure 2-3 : Teneurs en C en fonction de la teneur en éléments fins (argile + limons fins, 0-20 μm) du sol selon Feller et al. (1991c). Couche de sol : 0-10 cm.

2.4.2. Systèmes SCV et stocks de C du sol

Les stocks de C sous NT et CT ne sont significativement différents que pour la couche équivalente 0-20 cm.

Par rapport au système labouré (CT m/s), les accroissements des stocks de C sous systèmes NT sont respectivement de l'ordre de 0,69 et 1,01 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ sous couverture végétale morte (NT m/s) et vivante (NT m/m-d) pour la couche équivalente 0-20 cm. Ce stockage est relativement élevé par rapport aux valeurs publiées dans la littérature de l'ordre de 0,35 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour les systèmes semis direct en régions tropicales (Six et al., 2002) à 0,71 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ (Bayer et al., 2000).

Pour la couche équivalente 0-40 cm, les différences entre systèmes NT et CT m/s ne sont plus significatives. Ceci est dû au fait que entre 20 et 30 cm, les teneurs en C pour CT m/s sont plus élevées que celles des trois autres systèmes NT. Ceci pourrait provenir, d'une variabilité initiale des teneurs en C car dans cette étude, le labour n'est effectué qu'à 20 cm de profondeur.

Ces valeurs élevées de stockage de C sous NT, de 0,7 à 1,0 Mg C.ha⁻¹, peuvent s'expliquer par trois facteurs : (i) une quantité de carbone restitué au sol plus élevée que dans les expérimentations de la littérature, (ii) une protection du C contre la minéralisation particulièrement importante dans ce type de sol, mais aussi (iii) un contrôle des pertes de C par érosion. Les restitutions de C (Tableau 2-1) ont été estimées, durant les 11 ans d'expérimentation, à 8 Mg C.ha⁻¹ pour CT m/s (restitutions racinaires uniquement), et à respectivement 40, 70, et 62 Mg C.ha⁻¹ pour NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k (restitutions aériennes et racinaires), soit un surplus de biomasse restituée par les systèmes SCV de 32, 62

et 54 Mg C.ha⁻¹. Avec l'hypothèse que 15% du C restitué est stocké dans le sol au cours de l'année (Rasmussen et Collins, 1991), on obtiendrait un niveau de stockage théorique supplémentaire sur les trois systèmes SCV de 0,44 et 0,84 et 0,73 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, respectivement pour NT m/s, NT m/m-d et NT h/s-k. Ces valeurs sont sensiblement plus faibles que celles mesurées dans cette étude pour NT m/s et NT m/m-d qui sont respectivement de 0,69 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ et 1,01 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, et un peu plus élevée pour le traitement NT h/s-k (0,55 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹). Le niveau des restitutions expliquerait donc déjà un large part des différences de stocks de C. D'autres auteurs (Kong et al., 2005) considèrent que seulement 7 % du C restitué est susceptible d'être stocké dans le sol. Dans ces conditions, les écarts entre les valeurs théoriques et valeurs réelles de C stocké deviennent encore plus importants, laissant supposer l'existence d'un autre phénomène explicatif : cela pourrait être une perte de C par érosion sous CT m/s. En effet, une perte en terre annuelle de 20 Mg.ha⁻¹, estimée suivant la relation établie par Barthès et al. (2000) entre perte en terres et teneur en MA dans les horizons de surface de CT m/s, occasionnerait une perte en C de 0,60 MgC.ha⁻¹, soit l'équivalent des différences de stocks observées entre CT m/s et les 3 traitements NT. Toutefois, dans les deux scénarios, l'ordre de variation des stocks mesurés : NT m/m-d > NT m/s > NT h/s-k (Tableau 2-6), ne varie pas dans le même sens que celui des stocks théoriques : NT m/m-d > NT h/s-k > NT m/s (Tableau 2-1). D'autres facteurs seraient donc à prendre en considération, comme la qualité des restitutions (non étudiée ici), et la protection physique du C dans les agrégats de sol (un point discuté ci-dessous).

2.4.3. Systèmes SCV, stabilité de l'agrégation et protection physique du C

Tous échantillons considérés, la stabilité structurale du sol étudié apparaît naturellement élevée avec une teneur en macroagrégats stables (MA) comprise entre 606 et 770 g.kg⁻¹ sol-SG. Ceci est du, tout à la fois, à la texture argileuse, aux teneurs élevées en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Bronick et Lal, 2005) et en MO (Feller et al., 1996), mais peut être aussi aux activités microbiennes et fauniques (Amézketa, 1999; Blanchart et al., 2004; Bronick et Lal, 2005).

Même avec cette stabilité naturellement élevée, 11 années de traitement NT ont permis, par rapport au traitement CT, une augmentation d'environ 16 à 33 % du taux de macroagrégats stables. Cette teneur en MA, tous traitements et profondeurs confondus (0-5 et 5-10 cm), est corrélée positivement ($R = 0,41$; $p < 0,05$) à la teneur en C du sol (Figure 2-4). De nombreux travaux en milieu tropical ont montré l'existence de corrélations positives et significatives entre la teneur en C et la stabilité des agrégats du sol (Beare et al., 1994b; Feller et al., 1996; Six et al., 2000b; Razafimbelo et al., 2003; Mikha et Rice, 2004). Si les agrégats sont plus stables sous l'effet des pratiques SCV, on peut aussi faire l'hypothèse que le C sera plus intensément

protégé physiquement contre la minéralisation au sein de ces agrégats par la limitation de l'activité des microorganismes par manque d'eau et d'oxygène (Balesdent et al., 2000). C'est ce que nous avons testé par la respirométrie sur échantillons non broyés (intacts) et broyés à 200 µm, ce qui correspond, en première approximation, à une destruction des MA. On observe une tendance générale de protection physique du C par les MA puisque, pour tous les échantillons (CT et NT), le C minéralisé du sol broyé est plus élevé que celui du sol non broyé (Tableau 2-8a). Toutefois, les différences ne sont pas significatives. Les quantités de C protégé sont plus importantes sous NT (environ 200 µg C-CO₂.g⁻¹ sol) que sous CT (50 µg C-CO₂.g⁻¹ sol). Le niveau de C protégé ne représente que 15 g C.100 g⁻¹ du C total minéralisé, une valeur faible par rapport à celle observée dans la littérature. Ainsi, Chevallier et al. (2004) pour un vertisol sous prairie à la Martinique trouvent des valeurs de C protégé supérieures à 35 g C.100g⁻¹ du C total minéralisé. Les taux de minéralisation du C (Tableau 2-8b) et le C potentiellement minéralisable (Tableau 2-9), bien que faibles par rapport à la littérature (Chevallier et al., 2004), sont plus importants sous NT que sous CT, ce qui indiquerait la présence d'un compartiment labile plus important de MO stockée sous NT en même temps qu'un compartiment aussi plus important, en valeur absolue, sous NT que sous CT. Le niveau de protection physique du C dans cette étude est faible. Compte tenu du protocole opératoire, broyage à 200 µm, il ne concerne toutefois que les MA. Il est donc possible que des sites de protection efficaces existent dans ce sol, mais au niveau des méso- et microagrégats, un point qui est en cours d'étude. Enfin, la matière organique pourrait aussi être protégée contre la minéralisation par d'autres processus non étudiés ici, comme la protection physico-chimique par adsorption sur les colloïdes minéraux du sol et/ou la récalcitrance biochimique selon la composition des MO du sol.

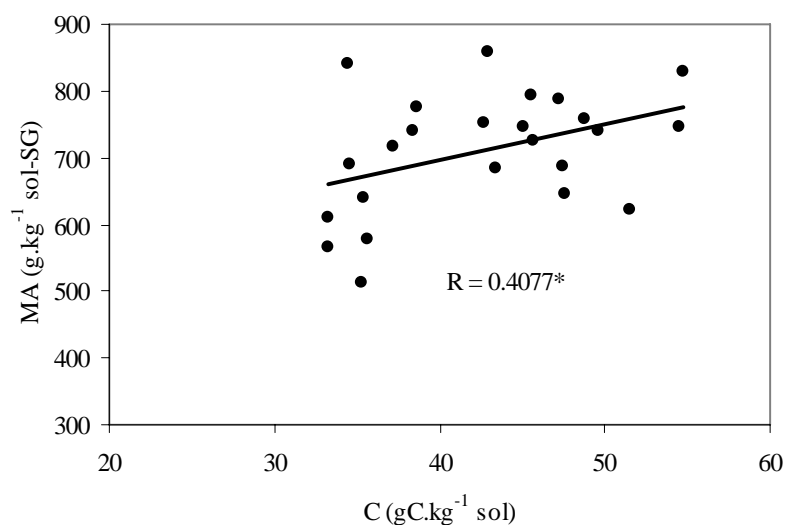


Figure 2-4 : Relation entre teneurs en C et en MA pour les couches de sol 0-5 et 5-10cm (n=24, p < 0,05).

2.5. CONCLUSION

Les systèmes SCV étudiés, grâce à la quantité élevée de biomasse qu'ils restituent au sol, ont permis de stocker des quantités importantes de C dans le sol variant de 0,69 à 1,01 t C.ha⁻¹.an⁻¹. Ces valeurs élevées s'expliquent en partie par le niveau des restitutions, mais aussi probablement par un contrôle plus marqué des pertes par érosion du C sous systèmes SCV. Ce stockage de C induit une augmentation de la stabilité structurale, déjà naturellement élevée dans ce type de sol, et en retour, celle-ci pourrait conduire à une protection physique du C contre la minéralisation. Cette protection a été mise en évidence dans cette étude pour les sites de tailles supérieure à 200 µm mais n'apparaît pas très importante. Il se pourrait que d'autres sites de tailles plus petites soient concernées ainsi que les deux autres processus de protection : physico-chimique et biochimique.

2.6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 2004a - Détermination de la caractéristique de la rétention en eau. Méthode de laboratoire (ISO 11274:1998). In: Evaluation de la qualité des sols. Volume 2 : Méthodes d'analyses physique et biologique. AFNOR (Ed.). Paris.
- AFNOR, 2004b - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol (NF X 31 107). In: Evaluation de la qualité des sols. Volume 1 : Méthodes d'analyse chimique. AFNOR (Ed.). Paris.
- Albrecht A., Angers D. A., Beare M. H. et 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.
- Amézketa E., 1999 - Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, 83-151.
- Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 2000 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53, 215-230.
- Barthès B., Azontondé A., Boli B. Z., Prat C. et Roose E., 2000 - Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*, 51, 485-495.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L. et Fernandes S. V., 2000 - Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54, 101-109.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795.

- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 777-786.
- Blakemore L. C., Searle P. L. et Daly B. K., 1987 - Methods for chemical analysis of soils. Lower Hutt, New Zealand Society of Soil Science, 44-45.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G., Decaens T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L. et Roose E., 2004 - Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 303-315.
- Bronick C. J. et Lal R., 2005 - Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Caner L., Bourgeon G., Toutain F. et Herbillon A. J., 2000 - Characteristics of non-allophanic Andisols derived from low-activity clay regoliths in the Nilgiri Hills (Southern India). *European Journal of Soil Science*, 51, 553-563.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et 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.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Document ronéoté, 96p.
- Ellert B. H. et Bettany J. R., 1995 - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 529-538.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Feller C., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Carter M. R. et Stewart B. A. (Eds). CRC Press, New York.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., 1991c - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 26, 25-36.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994a - Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1043-1068.
- Gupta V. V. S. R. et Germida J. J., 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 A. D., Wienhold B. J. et Black A. L., 2002 - Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 906-912.
- Hassink J., Bouwman L. A., Zwart K. B., Bloem J. et Brussaard L., 1993 - Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57, 105-128.

- IPCC, 2001 - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding V., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P., X. D. et Maskell K. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- Kemper W. D. et Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs. Klute A. (Ed.). Madison, WI.
- Kong A. Y. Y., Six J., Bryant D. C., Denison R. F. et Van Kessel C., 2005 - The relationship between carbon input, aggregation and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1078-1085.
- McKeague J. A. et Day J. H., 1966 - Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 46, 13-22.
- Mehra P. et Jackson M. L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, 317-327.
- Mikha M. M. et Rice C. W., 2004 - Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 809-816.
- Parfitt R. L. et Wilson A. D., 1988 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: *Volcanic soils, weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt*. Caldas E. F. et Yaalon D. H. (Eds). *Catena (Suppl. 7)*.
- Poulenard J. et Herbillon A. J., 2000 - Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris*, 331, 651-657.
- Rasmussen P. E. et Collins H. P., 1991 - Long-term impacts of tillage fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 45, 93-134.
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., 1998 - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. In: *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.
- Razafimbelo T., Barthes B., De Luca E. F., Larré-Larrouy M.-C., Laurent J.-Y., Cerri C. C. et Feller C., 2003 - Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. *Etude et Gestion des Sols*, 10, 191-200.
- Sà J. C. d. M., 2001a - *Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto*. Escola superior de Agricultura Luiz de Quieroz Universidade de Sao Paulo. Piracicaba, Universidade de Sao Paulo, 141.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.

- Six J., Paustian K., Elliott E. T. et Combrink C., 2000 - Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681-689.
- Soil Survey Staff, 2003 - Keys to Soil Taxonomy. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Wada K. et Higachi T., 1976 - The categories of aluminium- and iron-humus complexes in ando soils determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*, 27, 357-368.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100.000. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

Chapitre 3. Distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar selon différents systèmes SCV

Article soumis à Etude et Gestion des Sols

Distribution of soil organic matter among particle-size and density fractions in no tillage systems of a clayey soil of Madagascar Highlands

Grandière Ivan¹, Razafimbelo Tantely¹, Barthès Bernard¹, Blanchart Eric¹, Louri Joële¹, Ferrer Henri¹, Chenu Claire³, Wolf Nelly⁴, Albrecht Alain¹, Feller Christian²

Institutions et adresses

¹ IRD – UR 179 SeqBio, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France.

² IRD, Route d'Ambohipo, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar.

³ INAPG-INRA, Département AGER, Bâtiment EGER, 78850 Thiverval, Grignon, France.

⁴ INRA Science du Sol, RD 10 Route de St Cyr, 78026 Versailles Cedex, France.

RESUME

Le semis direct, en particulier sous couvert végétal (SCV), permet de stocker de la matière organique (MO), donc du carbone (C) dans les sols tropicaux, d'où son intérêt agronomique (fertilité) et environnemental (atténuation du changement climatique). L'objectif du travail présenté est d'étudier l'effet de trois systèmes SCV sur le contenu en C du sol total et de ses fractions granulo-densimétriques, sur un dispositif agronomique de longue durée (11 ans) installé sur sol argileux à Antsirabe, Madagascar (16°C, 1300 mm an⁻¹).

Les systèmes SCV testés comportent un traitement à couverture végétale morte [NT m/s, rotation maïs (*Zea mays*)/soja (*Glycine max*)] et deux traitements à couverture végétale vivante [NT m/m-d, rotation maïs/maïs avec une couverture végétale de *Desmodium uncinatum*; et NT h/s-k, rotation haricot (*Phaseolus vulgaris*)/soja avec une couverture de *Pennisetum clandestinum*]. Ils sont comparés à un système avec travail conventionnel [CT m/s, rotation maïs/soja]. Par rapport au sol sous CT, les sols sous SCV présentent des teneurs en C significativement plus élevées à 0-5 cm (+13,3 mgC.g⁻¹ sol en moyenne) et à 5-10 cm (+5,8 mgC.g⁻¹ sol en moyenne) de profondeur. Dans les systèmes SCV, les plantes de couverture ne permettent pas d'augmenter significativement les teneurs en C du sol. La distribution de C dans les fractions granulo-densimétriques diffère selon les systèmes et selon la profondeur. A 0-5 cm, le C stocké sous NT est principalement localisé : (i) dans les MO particulières internes aux agrégats (> 50 µm), où il est protégé physiquement, et (ii) dans la fraction fine du sol (< 50 µm), où il est protégé physico-chimiquement par adsorption sur les particules minérales. A 5-10 cm, le C stocké sous NT est localisé essentiellement dans la fraction fine du sol. Pour l'ensemble de l'horizon 0-10 cm, le stockage de C sous SCV est dû pour 17 à 27% aux MO particulières internes aux agrégats > 50 µm, et pour 46 à 60% aux fractions fines < 50 µm.

MOTS-CLES : Sol tropical argileux, semis direct sous couvert végétal, stockage et protection de C, fractions physiques de la MO.

ABSTRACT

No-till (NT) systems can increase soil organic carbon (SOC) content in tropical soils. The long term (11 years) effects of no-till systems on SOC content and SOC distribution among particle size and density fractions are studied on a clayey (60 % clay) subtropical soil (16°C, 1300 mm) at 0-5 and 5-10 cm-depths in Antsirabe, Madagascar. Three no-till systems were studied: (i) NT m/s, annual rotation of maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*); (ii) NT m/m-d, maize/maize rotation with legume (*Desmodium uncinatum*) permanent cover crop and (iii) NT h/s-k, annual rotation of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and soybean with kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) permanent cover crop. These systems were compared with a conventional tillage (CT m/s, maize/soybean rotation). NT systems increased SOC content greatly at 0-5 cm and slightly at 5-10 cm depth (in average, +13.3 and +5.8 mgC g⁻¹ soil more

than under CT, respectively). In NT systems, permanent cover crop did not led to a significant increase of SOC content. Carbon (C) distributions were different between NT and CT management at 0-5 and 5-10 cm depth. At 0-5 cm depth, NT systems increased C amount (i) in particulate organic matter ($> 50 \mu\text{m}$) within aggregates through physical protection, and (ii) in fine fractions ($< 50 \mu\text{m}$) through adsorption and then physico-chemical protection on mineral particles (clay+silt). At 5-10 cm, NT systems mainly increased C amount in fine fractions ($< 50 \mu\text{m}$). At 0-10 cm, SOC storage under NT compared to CT was due for 17-27% to particulate organic matter within aggregates, and for 46 to 60% to SOC associated with fine fractions ($< 50 \mu\text{m}$).

KEYWORDS: clayey tropical soil, no-tillage, SOC storage and protection, particle size and densimetric fractions

3.1. INTRODUCTION

Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES ; CO_2 , N_2O et CH_4), de nouvelles stratégies et des politiques appropriées pour la gestion de l'agriculture et de la sylviculture doivent être développées. Pour l'agriculture, la mise en œuvre d'un mode de gestion raisonnée des agrosystèmes, conduisant à une diminution des émissions de GES ou à leur séquestration, peut être envisagée. C'est le cas des systèmes de semis direct avec couverture végétale (SCV), à fortes restitutions organiques, et capables d'augmenter, à travers le stockage de matière organique (MO), le stockage de C dans les sols. Les systèmes SCV se caractérisent par : (i) le non travail du sol, (ii) l'utilisation d'une couverture végétale sous forme de mulch (couverture morte) ou de couverture végétale vivante, et (iii) le semis à travers la couverture (Raunet et al., 1998). Des travaux menés en milieux tropicaux ont montré que ces systèmes SCV permettent de stocker du C dans le sol (Machado et Silva, 2001 ; Sà et al., 2001 ; Six et al., 2002b). Toutefois, ces systèmes sont d'autant plus performants que l'enrichissement du sol en C affecte des compartiments organiques à turn-over lent. Différents mécanismes de protection sont proposés dans la littérature pour expliquer cette stabilisation de la MO (Six et al., 2002a) : une protection physique, selon sa localisation dans les agrégats du sol ; une protection physico-chimique, du fait de son association ou non aux colloïdes minéraux du sol ; et une protection biochimique, liée à sa composition chimique. Les protections physique et physico-chimique peuvent être abordées à l'aide de fractionnements physiques du sol, soit en agrégats, soit en fractions densimétriques et/ou granulométriques de particules de sol dispersées (sables, limons, argiles).

Concernant la protection physico-chimique, différents auteurs tels que Feller et Beare (1997), ont montré que la MO du sol présente des dynamiques différentes suivant sa localisation dans les fractions granulométriques : les MO associées aux argiles et limons fins sont fortement

adsorbées sur les fractions minérales et se renouvellent moins vite que celles associées aux fractions plus grossières du sol, de la taille des sables et souvent appelées matières organiques particulaires (MOP). Parmi les MOP, on considère que les MOP internes aux agrégats (MOPi) sont plus fortement protégées physiquement que celles situées à l'extérieur des agrégats (MOPe) (Besnard et al., 1996 ; Six et al., 1998 ; Puget et al., 2000).

Diverses études effectuées en milieu tropical ont montré que pour des sols argileux, lorsque le sol n'est pas travaillé et que les résidus de cultures sont laissés en mulch, la MO séquestrée dans le sol se localise principalement dans les fractions fines du sol (Peixoto et al., 1999 ; Freixo et al., 2002 ; Razafimbelo et al., 2003) et y est donc relativement stabilisée par protection physico-chimique.

Dans ce travail, nous étudierons le cas des systèmes SCV installés sur un sol argileux des Hautes Terres malgaches. Des travaux en cours (Razafimbelo et al., soumis) ont déjà montré un effet positif des systèmes SCV sur le stockage de C dans le sol par rapport au système en travail conventionnel, et cette étude a donc pour objectif d'étudier l'effet de ces mêmes systèmes sur : (i) la distribution des MOP de tailles supérieures à 50 µm à l'intérieur (MOPi) et à l'extérieur (MOPe) des agrégats, et (ii) la distribution de la MO dans les fractions granulométriques de tailles inférieures à 50 µm.

3.2. MATERIELS ET METHODES

3.2.1. Site expérimental et prélèvements de sol

Le site expérimental se situe à Andranomanelatra (19°47'S ; 47°06'E), au nord-est de la ville d'Antsirabe, à 1600 m d'altitude. La température moyenne annuelle est de 16°C et la pluviométrie annuelle moyenne de 1300 mm. Le sol étudié est argileux (60% d'argile) à argile de type 1:1 mais présente des caractères andiques. Il a été classé comme Sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) ou comme un andic Dystrustept selon la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003) par Razafimbelo et al. (soumis).

Le dispositif expérimental étudié a été mis en place par l'ONG TAFE avec l'appui du CIRAD en 1991. C'est un dispositif complètement randomisé, comprenant trois répétitions (nommées a, b et c) par traitement avec des parcelles de 30 à 200 m². Les traitements étudiés sont les suivants :

- **CT m/s** : système en travail conventionnel (CT) où le travail du sol est effectué par traction animale avec une charrue à soc jusqu'à une profondeur de 20 cm, sur une culture de maïs (m, *Zea mays* L.) en rotation annuelle avec du soja (s, *Glycine max* L.) ;

- **NT m/s** : système SCV (NT) avec couverture végétale morte, sans travail du sol, avec un mulch permanent constitué des résidus de culture, en rotation maïs-soja ;
- **NT h/s-k** : système SCV (NT) à couverture végétale vivante, sans travail du sol, associant une rotation annuelle de haricot (h, *Phaseolus vulgaris* L.) et soja avec une graminée de couverture, le kikuyu (k, *Pennisetum clandestinum*) ;
- **NT m/m-d** : un système SCV (NT) à couverture végétale vivante, sans travail du sol, associant une culture continue de maïs (m) et une légumineuse de couverture, le desmodium (d, *Desmodium uncinatum*).

Les apports comprennent un amendement organique (fumier de bovin) à raison de 5 Mg MS.ha⁻¹.an⁻¹ et une fertilisation minérale NPK à raison de 30-30-40 kg.ha⁻¹.an⁻¹ sur soja et haricot, et de 100-30-40 kg.ha⁻¹.an⁻¹ sur maïs.

Les résidus de récolte sont exportés de la parcelle pour le traitement CT m/s mais ils sont laissés en mulch pour les systèmes SCV. Avant chaque semis, les plantes de couverture sont rabattues avec des herbicides.

Des échantillons de sol ont été prélevés avec un cylindre de 250 cm³ en avril-mai 2003, juste après la récolte du soja pour les systèmes CT m/s, NT m/s et NT h/s-k et celle du maïs pour le système NT m/m-d, à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Sur chaque parcelle, quatre prélèvements élémentaires sont effectués, dont deux sur les lignes de culture et deux sur les interlignes. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Un échantillon composite des prélèvements de chaque parcelle est ensuite constitué à partir des quatre prélèvements élémentaires, pour chaque profondeur.

Les fractionnements physiques de la MO sont effectués sur l'échantillon composite de chaque parcelle élémentaire.

La variabilité des résultats de laboratoire pour le fractionnement physique est évaluée à partir de trois répétitions de fractionnement effectuées sur l'une des parcelles CT m/s (CT m/s c) pour l'échantillon 5-10 cm.

L'analyse granulométrique conventionnelle (analyse mécanique), après destruction de la MO est effectuée sur un « super-composite » constitué à partir des trois parcelles de chaque traitement.

3.2.2. Fractionnement physique de la MO du sol

Le fractionnement de la MO mis en œuvre associe densimétrie et granulométrie (FGDMO, fractionnement granulo-densimétrique de la matière organique). Il est schématisé sur la Figure 3-1.

Le principe général et les étapes du fractionnement sont les suivants :

- 1) Après contact du sol dans l'eau sans agitation, on sépare par flottation la fraction légère, qui est ensuite tamisée à 200 µm et à 50 µm pour extraire les MOP externes aux agrégats stables à l'eau (MOPe),

2) La fraction lourde est ensuite dispersée par agitation mécanique en présence de billes, dispersion chimique (hexamétaphosphate de sodium, HMP), et pour partie, par ultrasonication. La suite du fractionnement est inspirée de Gavinelli et al. (1995) et Razafimbelo et al. (2003).

On sépare les fractions suivantes : MOPi200-2000 et MOPi50-200 (MOP > 50 µm internes aux agrégats), F20-50, F2-20 et F0-2, fractions associées respectivement aux limons grossiers, limons fins et argiles, ainsi que la fraction W solubilisée au cours du fractionnement.

Détail de la séparation des fractions MOPe > 50µm

Vingt grammes de chaque échantillon sont mis dans une allonge de 500 mL contenant 200 mL d'eau permutée. L'eau imbibe le sol pendant une heure ce qui permet aux MOPe (externes aux agrégats stables à l'immersion dans l'eau) de flotter. Le surnageant contenant ces MOPe est aspiré dans une fiole et tamisé à 200 µm puis à 50 µm de manière à récupérer les MOPe de tailles 200-2000 µm (MOPe200-2000) et 50-200 µm (MOPe50-200). Le liquide surnageant est ensuite restitué dans l'allonge et celle-ci est retournée, complètement et de manière régulière, trois fois en quinze secondes et une fois à moitié pour récupérer au fond de l'allonge les particules fixées sur le bouchon et les parois de l'allonge. L'allonge est alors laissée dix minutes au repos après les retournements, puis le surnageant est aspiré et tamisé de nouveau à 200 µm et 50 µm. Cette opération est réalisée à trois reprises. Les fractions de même taille sont ensuite regroupées et séchées à 40°C.

Détails de l'obtention des fractions MOPi50-200

Le sol étudié ayant naturellement une forte agrégation (teneurs élevées en MO, argiles et sesquioxydes métalliques), la fraction MOPi50-200 n'est pas totalement désagrégée par le protocole de Gavinelli et al. (1995). Pour améliorer la dispersion de cette fraction déjà extraite, on sépare d'abord par battée selon Balesdent et al. (1991) la fraction légère Fli50-200 (débris organiques) de la fraction lourde FLi50-200 (agrégats et sables). Sur FLi50-200, on applique des ultrasons à l'aide d'une sonde pendant trois minutes avec une énergie de 195 J.mL⁻¹ puis on tamise la suspension à 50 µm. La fraction lourde ultrasoniquée < 50 µm est jointe à la suspension totale F0-50 µm, tandis que la fraction lourde ultrasoniquée > 50 µm et la fraction légère Fli50-200 sont regroupées pour constituer la fraction MOPi50-200.

Parallèlement aux fractionnements granulo-densimétriques, des analyses mécaniques sont réalisées sur un échantillon « super-composite » de 10 g de sol par traitement. Après destruction de la MO par H₂O₂, le même protocole de dispersion que celui utilisé pour la partie 2 du fractionnement est appliqué (Gavinelli et al., 1995).

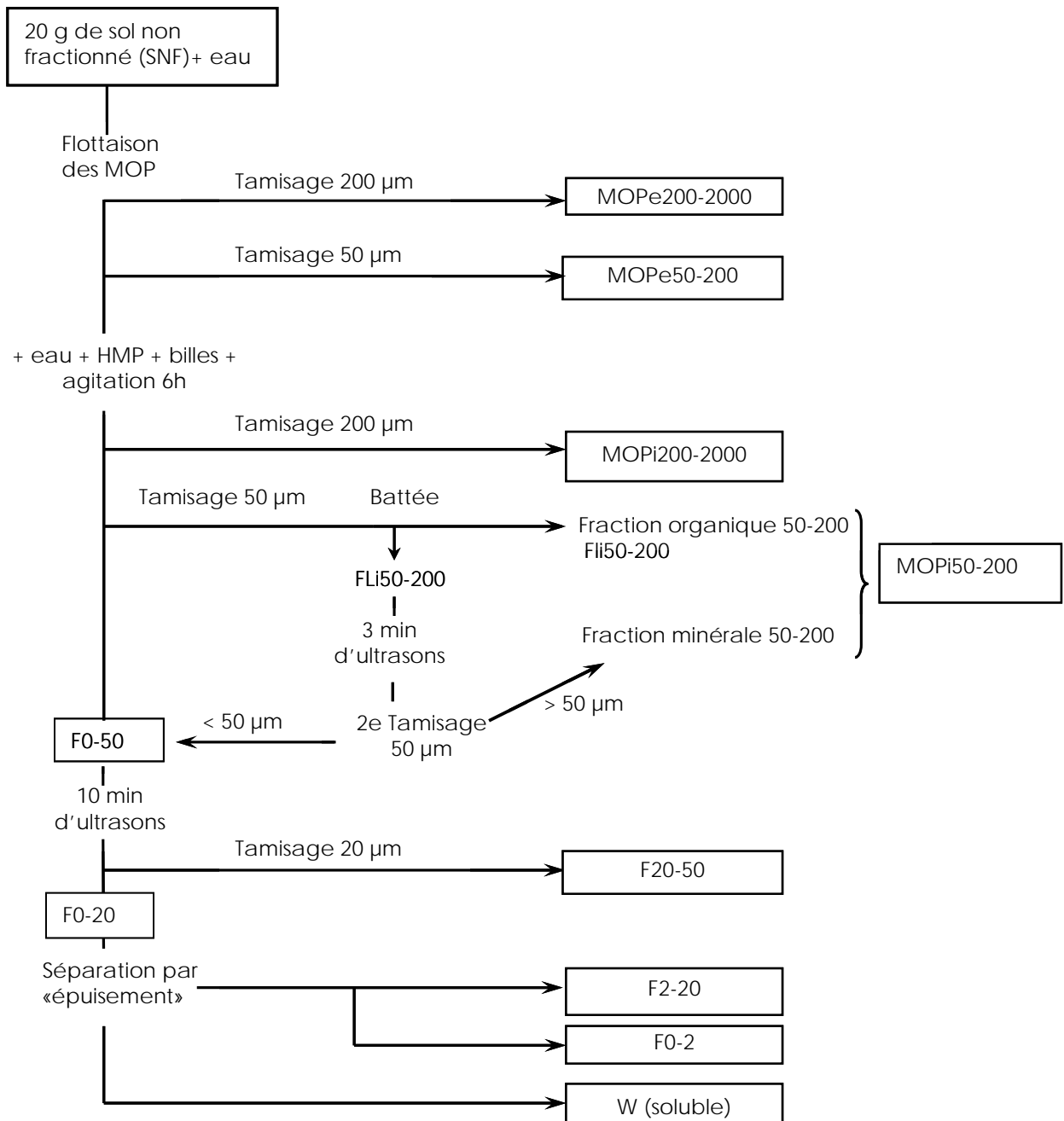


Figure 3-1 : Méthode de fractionnement granulo-densimétrique utilisée.

3.2.3. Dosages de C et azote (N)

Les concentrations en C et N des sols totaux ($\text{mgC,N.g}^{-1}\text{sol}$) et des fractions ($\text{mg C,N.g}^{-1}\text{fraction}$) sont déterminées par combustion avec un microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Les sols n'étant pas carbonatés, le C total de l'échantillon dosé représente le C organique.

Les concentrations en C soluble sont déterminées par chromatographie en phase liquide avec un microanalyseur Shimadzu TOC 5000, sur une aliquote de 50 mL de la suspension $< 20\ \mu\text{m}$ (avant séparation de F0-2 et F2-20) filtrée sur filtre millipore ($0,22\ \mu\text{m}$). La

concentration obtenue (mgC.L⁻¹) est corrigée de la teneur en C de l'eau déminéralisée utilisée.

3.2.4. Microscopie électronique à balayage

Des aliquotes des différentes fractions de l'échantillon CT m/s 0-5 cm (parcelle a) séchée à 40°C ont été montées sur des plots en cuivre, recouvertes d'une couche de carbone et observées avec un microscope électronique à balayage (MEB) Philips 525 SM, équipé d'un système de microanalyse X dispersif en énergie (PCX A Link).

3.2.5. Analyse statistique des résultats

Les données sont comparées entre elles par le test *t* de Student de comparaison de moyennes. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

3.3. RESULTATS

3.3.1. Teneurs en C des sols totaux

Les teneurs en C des sols sous les trois types de SCV (NT) sont comparées à celle du témoin labour CT (Figure 3-2). A 0-5 cm, la teneur moyenne en C des SCV (n=9) est significativement plus importante que pour la situation CT (n=3), avec une différence absolue de 13,3 mgC.g⁻¹ sol. A 5-10 cm, la différence des teneurs moyennes en C n'est plus que de 5,8 mgC.g⁻¹ sol mais reste néanmoins significative ($p < 0,05$).

Individuellement (n=3), et pour la couche 0-5 cm, la teneur en C sous chaque traitement SCV (NT m/s, NT h/s-k, NT m/m-d) est significativement plus élevée que celle sous labour (CT m/s). A 5-10 cm, les teneurs en C sous NT m/m-d et NT m/s sont significativement supérieures à celles sous NT h/s-k et CT m/s. Les teneurs en C ne diffèrent pas significativement entre les trois types de SCV à 0-5 cm, alors qu'à 5-10 cm, la teneur en C est significativement plus faible sous NT h/s-k que sous NT m/m-d.

La teneur moyenne en C sous SCV est plus élevée à 0-5 cm (48,5 mgC.g⁻¹ sol) qu'à 5-10 cm (40,6 mgC.g⁻¹ sol, n=9), mais ce n'est pas le cas sous labour CT (35,3 et 34,8 mgC.g⁻¹ sol, respectivement à 0-5 et 5-10 cm).

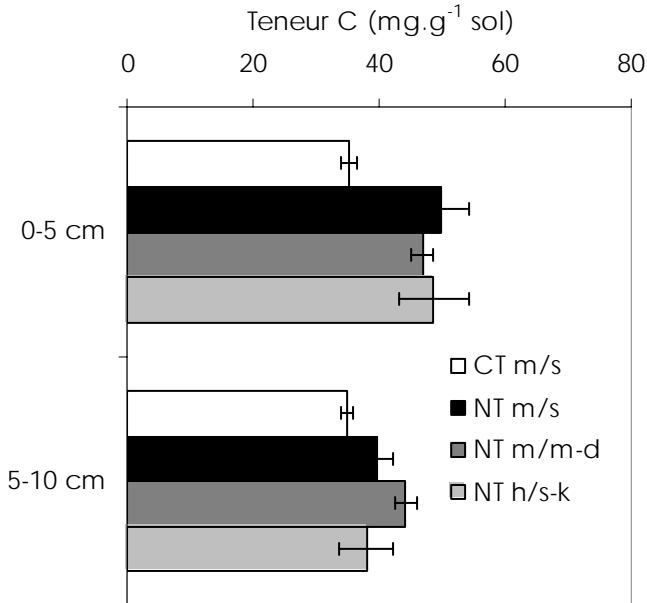


Figure 3-2 : Teneurs en C des sols totaux non fractionnés, à 0-5 et 5-10 cm (moyenne \pm écart-type, n=3).

3.3.2. Fractionnement de la matière organique : résultats méthodologiques

Résultats méthodologiques

Bilans. Les bilans du fractionnement (somme des fractions en % du sol non fractionné, SNF) varient de 99 à 101% pour les masses, de 95 à 102% pour les contenus en C et de 83 à 101% pour les contenus en N (mgC,N.g⁻¹ sol). Les bilans en N sont ici sous-estimés car le contenu en N soluble n'a pas été mesuré. Ces bilans sont satisfaisants pour les masses et le carbone.

Niveau de dispersion des éléments fins. La qualité de la dispersion est évaluée par comparaison, pour chaque fraction homologue, des résultats en masse du fractionnement granulo-densimétrique de la matière organique (dont on a déduit par calcul la masse des MO) à ceux de l'analyse mécanique, dont la dispersion est considérée comme complète. On constate (Figure 3-3) que la dispersion est incomplète pour l'ensemble des fractions supérieures à 20 μ m et en particulier pour les fractions 2-20 μ m et 20-50 μ m. On note aussi qu'il reste toujours des matières minérales associées aux fractions MOPe200-2000 et MOPe50-200. Par ailleurs, les faibles écarts-types présentés à la Figure 3-3 indiquent que les échantillons analysés possèdent une granulométrie très proche.

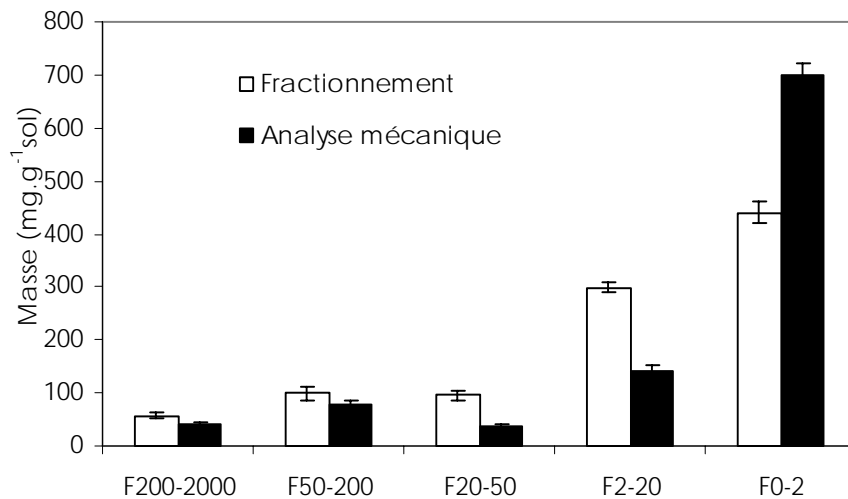


Figure 3-3 : Comparaison des masses moyennes des fractions issues du fractionnement granulométrique et de l'analyse mécanique pour l'ensemble des échantillons traités (moyenne \pm écart-type).

Variabilité de laboratoire et variabilité de terrain. Pour la variabilité induite par la méthode de fractionnement au laboratoire (Tableau 3-1), les coefficients de variation (CV) des contenus en C (mgC.g⁻¹ sol) des fractions sont inférieurs à 10%, excepté pour les fractions MOPI50-200 et MOPI200-2000 qui se situent entre 10 et 20%. Les CV des rapports C/N sont inférieurs à 8% sauf pour MOPI200-2000 (14%). Pour la variabilité induite par l'hétérogénéité spatiale de terrain (Tableau 3-2), les contenus en C ont des CV variant de 6 à 78% pour les fractions grossières et F20-50 et de 4 à 18% pour F2-20, F0-2 et W. Les CV des C/N des répétitions de terrain sont inférieurs ou égaux à 23%. La variabilité de terrain est nettement plus élevée que la variabilité de laboratoire.

Tableau 3-1 : Coefficients de variation (CV, en %) des résultats du fractionnement granulo-densimétrique sur les trois répétitions de laboratoire. Echantillon CT m/s c 5-10 cm, Andranomanelatra, Madagascar.

Fractions	Masse	Concentration C	Contenu C	C/N
MOPe200-2000	17,7	8,9	6,3	7,3
MOPe50-200	8,7	6,7	0,7	2,1
MOPI200-2000	4,9	12,4	15,8	14,0
MOPI50-200	0,3	15,8	16,9	3,6
F20-50	1,6	3,7	5,0	3,4
F2-20	1,3	0,1	1,0	1,3
F0-2	1,8	4,9	7,0	2,8
W	-	-	8,7	-

Tableau 3-2 : Coefficients de variation (CV, en %) minima et maxima des résultats du fractionnement granulo-densimétrique sur les 3 répétitions des quatre traitements, pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

Profondeur	Fractions	Masse	Concentrations C	Contenu C	C/N
0-5 cm	MOPe200-2000	26,3 à 57,7	4,6 à 12,5	6,5 à 50,7	8,2 à 20,7
	MOPe50-200	22,1 à 74,9	5,9 à 21,9	11,0 à 67,4	4,5 à 18,0
	MOPI200-2000	5,5 à 25,5	21,8 à 26,4	20,7 à 44,6	4,7 à 19,7
	MOPI50-200	10,2 à 35,2	2,7 à 23,8	12,7 à 51,7	1,6 à 16,8
	F20-50	16,2 à 80,5	3,6 à 13,0	9,5 à 59,0	1,9 à 10,2
	F2-20	1,2 à 10,3	3,3 à 5,6	5,7 à 12,1	2,0 à 16,8
	F0-2	7,7 à 18,0	4,6 à 13,3	11,1 à 17,2	1,0 à 23,0
	W	-	-	5,4 à 16,9	-
5-10 cm	MOPe200-2000	4,9 à 73,0	2,9 à 6,7	15,9 à 78,0	5,1 à 21,5
	MOPe50-200	8,9 à 91,5	0,5 à 9,5	13,4 à 73,1	4,9 à 7,9
	MOPI200-2000	2,1 à 28,7	17,6 à 53,2	20,7 à 66,5	10,9 à 21,2
	MOPI50-200	1,8 à 24,0	9,3 à 24,2	14,0 à 39,1	0,2 à 6,3
	F20-50	7,5 à 38,2	4,2 à 27,0	9,5 à 48,8	1,3 à 8,1
	F2-20	5,5 à 11,6	3,4 à 9,4	7,6 à 14,1	0,8 à 4,8
	F0-2	2,5 à 14,2	2,1 à 10,0	5,7 à 11,8	1,7 à 4,3
	W	-	-	4,4 à 17,1	-

Caractéristiques générales des fractions

Concentrations, et rapports C/N des fractions (Tableau 3-3). Les concentrations en C des fractions suivent des tendances similaires pour les échantillons 0-5 cm et 5-10 cm. Les fractions MOPe (> 50 µm) ont un caractère organique avec des concentrations élevées en C : 270 à 310 mgC.g⁻¹ fraction pour MOPe200-2000 et 120 à 160 mgC.g⁻¹ fraction pour MOPe50-200. Les fractions MOPI > 50 µm ont un caractère plus minéral (10-60 mgC.g⁻¹ fraction). Les concentrations en C diminuent ensuite de F20-50 (34 à 59 mgC.g⁻¹ fraction) à F0-2 (23 à 30 mgC.g⁻¹ fraction).

Hormis pour les fractions MOPe, les rapports C/N diminuent généralement des fractions grossières aux fractions fines aussi bien pour les échantillons 0-5 cm que 5-10 cm, avec des valeurs de 15-20 pour MOPI200-2000 passant à 11-12 pour F0-2 (Tableau 3-3). Les rapports C/N des fractions externes MOPe200-2000 (15-18) sont du même ordre que ceux des fractions internes MOPI200-2000, mais ceux des fractions externes MOPe50-200 (11-13) sont plus faibles que ceux des fractions internes MOPI50-200 (14-15). Les C/N tendent souvent à être un peu plus élevés pour les échantillons à 0-5 que pour 5-10 cm. Pour une même fraction, les différences de rapport C/N entre traitements sont souvent faibles.

Morphologies des fractions. Des observations au microscope électronique à balayage ont été faites pour CT m/s 0-5 cm parcelle a. Les photos (Planche 1) montrent que la fraction MOPe200-2000 est constituée principalement d'un mélange de débris végétaux allongés, peu décomposés, et de débris plus décomposés, plus arrondis et moins facilement reconnaissables ; ces deux types de débris, les seconds en particulier, sont recouverts

partiellement de matière minérale. La fraction MOPe50-200 est constituée principalement de débris végétaux peu reconnaissables, polyédriques, arrondis et encroûtés dans une matière minérale. Les fractions MOPi200-2000 et MOPi50-200, sont composées d'un mélange de débris organiques souvent recouverts de particules de kaolinite et d'agrégats organo-minéraux. La fraction F20-50 est dominée par des granules organo-minéraux parfois cylindriques entourés de particules de kaolinite ou de gibbsite. Les fractions F2-20 et F0-2 sont sous forme de micro-agrégats et l'on ne distingue plus de particules organiques.

Contenus en C (mg.g⁻¹ sol) des fractions selon les différents systèmes et traitements

Les contenus en C des fractions MOPe200-2000, MOPe50-200 et MOPi200-2000 sont globalement faibles, chacun inférieurs à 3 mgC.g⁻¹ sol en général, ceux des fractions MOPi50-200, F20-50 et W sont moyens, compris entre 3 et 6 mgC.g⁻¹ sol, et ceux des fractions F2-20 et F0-2 sont élevés, compris entre 9 et 16 mgC.g⁻¹ sol (Tableau 3-3, Figure 3-4).

Comme il a été montré à la Figure 3-3 que les fractions 20-50 et 2-20 µm avaient été insuffisamment dispersées, on a rassemblé par calcul l'ensemble des fractions < 50 µm en une seule fraction F 0-50. Par ailleurs, on a aussi regroupé les fractions MOPe200-2000 et MOPe50-200 en une fraction unique notée MOPe > 50, d'une part, et les fractions MOPi200-2000 et MOPi50-200 en une fraction MOPi > 50, d'autre part.

Sur la Figure 3-5 sont présentées les différences (Δ) de contenus en C entre les trois traitements NT et le traitement CT pour les quatre fractions MOPe > 50, MOPi > 50, F 0-50 et la fraction W. Pour la couche 0-5 cm, ΔC est associé prioritairement à la fraction F 0-50 (de +5,5 à +6,8 mgC.g⁻¹ sol), puis à MOPi > 50 (+3,1 à +4,9 mgC.g⁻¹ sol), et enfin faiblement à MOPe > 50 (+0,4 à +1,0 mgC.g⁻¹ sol). Pour la couche 5-10 cm, ΔC n'est pratiquement associé qu'à la fraction F 0-50 (+2,3 à +6,0 mgC.g⁻¹ sol). Il n'y a pas de différences significatives de contenu en C dans la fraction W entre semis direct et travail conventionnel. Pour la couche 0-10 cm, ΔC est associé pour 46 à 60% à la fraction F 0-50, et pour 17 à 27% à la fraction MOPi > 50.

La comparaison des ΔC entre les trois systèmes NT ne fait pas apparaître de différences au niveau des fractions MOPe > 50 et MOPi > 50, à 0-5 et 5-10 cm, alors que pour la fraction F 0-50, ΔC est légèrement plus élevé, mais pas significativement ($p > 0,05$) sous NT m/m-d que sous NT h/s-k et NT m/s à 5-10 cm.

Tableau 3-3 : Masses, concentrations (mg.g⁻¹ fraction) et contenus (mg.g⁻¹ sol) en C et rapport C/N des différentes fractions granulométriques pour les profondeurs a) 0-5 cm et b) 5-10 cm (b). Andranomanelatra, Madagascar. (moyenne ± écart-type, n=3).

Tableau 3-3a) 0-5 cm

	Masse (mg.g ⁻¹ sol)	Concentration C (mg.g ⁻¹ fraction)	Contenu C (mg.g ⁻¹ sol)	C/N
CT m/s				
MOPe200-2000	3,5 ± 1,3 a	304,2 ± 14,1 a	1,1 ± 0,3 a	15,8 ± 1,6 a
MOPe50-200	2,0 ± 0,6 a	135,0 ± 18,0 a	0,3 ± 0,1 a	11,0 ± 0,8 a
MOPI200-2000	60,0 ± 3,8 b	13,4 ± 3,2 a	0,8 ± 0,2 a	17,8 ± 1,6 a
MOPI50-200	103,1 ± 10,6 a	30,0 ± 0,8 a	3,1 ± 0,4 a	15,3 ± 0,6 b
F20-50	124,9 ± 20,4 a	34,0 ± 3,0 a	4,3 ± 0,9 a	14,2 ± 1,4 a
F2-20	310,2 ± 4,4 a	36,3 ± 1,6 a	11,3 ± 0,6 a	13,3 ± 0,6 a
F0-2	403,0 ± 31,7 a	23,7 ± 1,1 a	9,6 ± 1,1 a	12,1 ± 0,1 a
W	-	-	4,3 ± 0,3 a	-
Somme	1006,7 ± 0,7		34,6 ± 1,4 a	
Sol non fractionné	1000	35,3 ± 1,3 a	35,3 ± 1,3 a	13,8 ± 0,4 a
NTm/s				
MOPe200-2000	6,6 ± 2,6 a	302,5 ± 37,7 a	2,1 ± 1,0 a	17,0 ± 1,4 a
MOPe50-200	1,8 ± 0,3 a	162,0 ± 35,4 a	0,3 ± 0,0 a	13,1 ± 0,6 b
MOPI200-2000	62,3 ± 16 ab	48,9 ± 12,9 b	3,2 ± 1,4 b	15,1 ± 0,9 a
MOPI50-200	95,0 ± 37,8 a	56,8 ± 2,0 b	5,4 ± 2,0 ab	14,2 ± 0,2 a
F20-50	93,4 ± 75,6 a	58,4 ± 2,1 b	5,4 ± 0,9 a	13,8 ± 0,4 a
F2-20	295,1 ± 14,6 a	48,0 ± 1,6 b	14,2 ± 1,7 ab	13,1 ± 0,3 a
F0-2	405,8 ± 46,2 a	27,2 ± 3,6 ab	11,0 ± 1,4 a	12,0 ± 0,3 a
W	-	-	3,8 ± 0,2 a	-
Somme	1003,3 ± 4,5		45,3 ± 4,1 b	
Sol non fractionné	1000	50,0 ± 4,2 b	50,0 ± 4,2 b	14,0 ± 0,1 a
NTm/m-d				
MOPe200-2000	5,0 ± 0,8 a	276,1 ± 32,5 a	1,4 ± 0,1 a	14,7 ± 1,6 a
MOPe50-200	2,4 ± 1,2 a	155,4 ± 36,9 a	0,3 ± 0,1 a	12,1 ± 0,7 ab
MOPI200-2000	46,7 ± 3,8 a	34,6 ± 13,5 ab	1,6 ± 0,7 a	15,9 ± 0,8 a
MOPI50-200	87,9 ± 20,4 a	62,2 ± 6,6 b	5,4 ± 0,7 b	13,8 ± 0,2 a
F20-50	81,9 ± 7,4 a	56,6 ± 9,5 b	4,8 ± 0,5 a	14,4 ± 0,3 a
F2-20	327,8 ± 12,8 a	46,5 ± 2,4 b	15,3 ± 1,0 b	14,8 ± 2,5 a
F0-2	404,6 ± 71,3 a	29,2 ± 2,1 b	11,7 ± 1,4 a	10,6 ± 2,4 a
W	-	-	4,3 ± 0,7 a	-
Somme	1002,8 ± 3,6		44,8 ± 2,3 b	
Sol non fractionné	1000	46,9 ± 1,7 b	46,9 ± 1,7 b	13,4 ± 1,0 a
NTh/s-k				
MOPe200-2000	7,0 ± 3,5 a	301,0 ± 22,9 a	2,1 ± 0,9 a	16,6 ± 3,4 a
MOPe50-200	1,8 ± 1,3 a	160,6 ± 9,5 a	0,3 ± 0,2 a	13,2 ± 2,4 ab
MOPI200-2000	57,5 ± 2,8 b	44,1 ± 11,4 b	2,5 ± 0,7 b	15,9 ± 3,1 a
MOPI50-200	115,1 ± 37,9 a	51,8 ± 12,3 b	6,2 ± 3,2 ab	14,6 ± 2,5 ab
F20-50	79,3 ± 21,9 a	59,2 ± 7,7 b	4,6 ± 0,8 a	14,3 ± 1,2 a
F2-20	323,6 ± 14,2 a	47,9 ± 2,7 b	15,5 ± 1,5 b	13,1 ± 0,9 a
F0-2	410,6 ± 50,3 a	28,6 ± 1,6 b	11,8 ± 2,0 a	12,0 ± 1,1 a
W	-	-	4,7 ± 0,5 a	-
Somme	995 ± 7,1		47,7 ± 3,2 b	
Sol non fractionné	1000	48,7 ± 5,6 b	48,7 ± 5,6 b	14,0 ± 0,4 a

CT m/s : Labour conventionnel, rotation mais-soja.

NT m/s : semis direct, rotation mais/soja, en mulch.

NT m/m-d : semis direct, rotation mais/mois, en couverture vivante de desmodium.

NT h/s-k : semis direct, rotation haricot/soja, en couverture vivante de kikuyu.

Les lettres minuscules différentes, pour une même fraction et une même profondeur, indiquent une différence significative entre les traitements ($p < 0,05$).

Tableau 3-3b) 5-10 cm

b) 5-10 cm	Masse (mg.g ⁻¹ sol)	Concentration C (mg.g ⁻¹ fraction)	Contenu C (mg.g ⁻¹ sol)	C/N
CT m/s				
MOPe200-2000	3,6 ± 0,4 b	286,6 ± 19,2 ab	1,0 ± 0,2 a	15,9 ± 1,3 a
MOPe50-200	2,3 ± 0,2 b	140,0 ± 12,6 ab	0,3 ± 0 a	11,7 ± 0,6 a
MOPI200-2000	52,4 ± 3,4 b	11,9 ± 2,1 a	0,6 ± 0,1 a	18,3 ± 2,1 a
MOPI50-200	105,6 ± 12,6 a	31,8 ± 3,0 a	3,4 ± 0,6 a	15,2 ± 1,0 a
F20-50	133,4 ± 9,7 b	35,0 ± 1,7 a	4,7 ± 0,4 a	14,6 ± 1,2 a
F2-20	294,3 ± 18,2 a	36,2 ± 1,2 a	10,7 ± 0,8 a	13,5 ± 0,4 a
F0-2	417,5 ± 12,2 a	23,3 ± 1,1 a	9,7 ± 0,7 a	12,3 ± 0,2 a
W	-	-	4,5 ± 0,2 a	-
Somme	1009,1 ± 2,9		35,0 ± 0,4 a	
Sol non fractionné	1000	34,8 ± 1,0 a	34,8 ± 1,0 a	14,8 ± 0,5 a
NTm/s				
MOPe200-2000	3,2 ± 2,4 ab	284,8 ± 6,3 a	0,9 ± 0,7 a	16,8 ± 0,9 a
MOPe50-200	1,6 ± 0,7 ab	121,4 ± 0,7 a	0,2 ± 0,1 a	12,6 ± 0,7 a
MOPI200-2000	54,5 ± 15,7 ab	13,9 ± 5,0 a	0,8 ± 0,4 a	18,2 ± 2,6 a
MOPI50-200	103,4 ± 25,0 a	37,2 ± 3,3 a	3,7 ± 1,1 a	14,8 ± 0,6 a
F20-50	94,6 ± 36,2 ab	45,9 ± 1,0 b	4,4 ± 1,6 a	14,2 ± 0,9 a
F2-20	265,3 ± 30,5 a	44,7 ± 0,6 c	12,0 ± 1,5 a	13,1 ± 0,6 a
F0-2	479,9 ± 66,0 ab	25,7 ± 1,3 ab	12,0 ± 1,3 ab	12,3 ± 0,5 a
W	-	-	4,9 ± 0,6 a	-
Somme	1002,6 ± 2,3		40,5 ± 6,4 b	
Sol non fractionné	1000	39,8 ± 2,3 b	39,8 ± 2,3 b	14,3 ± 0,5 a
NTm/m-d				
MOPe200-2000	2,4 ± 0,3 a	311,1 ± 14,7 b	0,7 ± 0,1 a	17,2 ± 0,9 a
MOPe50-200	1,3 ± 0,5 a	159,7 ± 15,2 b	0,2 ± 0,1 a	12,6 ± 1,0 a
MOPI200-2000	44,8 ± 0,9 a	18,2 ± 5,6 a	0,8 ± 0,3 a	17,4 ± 1,9 a
MOPI50-200	90,2 ± 1,3 a	40,2 ± 5,3 a	3,6 ± 0,5 a	14,9 ± 0,3 a
F20-50	82,3 ± 12,4 a	45,1 ± 1,9 n	3,7 ± 0,6 a	14,7 ± 0,2 a
F2-20	284,5 ± 16,1 a	44,4 ± 3,3 bc	12,7 ± 1,4 a	13,6 ± 0,1 a
F0-2	497,3 ± 26,2 b	29,6 ± 3,1 b	14,7 ± 1,3 b	12,2 ± 0,3 a
W	-	-	5,4 ± 0,7 a	-
Somme	1002,7 ± 0,7		41,8 ± 2,9 b	
Sol non fractionné	1000	44,2 ± 1,8 b	44,2 ± 1,8 b	14,3 ± 0,2 a
NTh/s-k				
MOPe200-2000	1,8 ± 1,0 a	285,6 ± 16,6 ab	0,5 ± 0,3 a	17,6 ± 3,8 a
MOPe50-200	1,9 ± 1,6 ab	122,0 ± 16,5 a	0,2 ± 0,2 a	12,5 ± 0,9 a
MOPI200-2000	48,0 ± 2,5 ab	13,9 ± 3,0 a	0,7 ± 0,2 a	19,5 ± 4,1 a
MOPI50-200	89,2 ± 4,8 a	30,7 ± 3,2 a	2,7 ± 0,4 a	15,1 ± 0,0 a
F20-50	87,2 ± 31,6 ab	40,1 ± 5,2 ab	3,6 ± 1,8 a	14,7 ± 0,7 a
F2-20	315,5 ± 23,8 a	39,9 ± 1,7 b	12,6 ± 1,4 a	13,4 ± 0,5 a
F0-2	450,8 ± 68,4 ab	26,1 ± 1,4 ab	11,7 ± 1,4 a	12,3 ± 0,3 a
W	-	-	4,5 ± 0,8 a	-
Somme	994,3 ± 7,6		36,5 ± 3,3 ab	
Sol non fractionné	1000	38,0 ± 4,3 ab	38,0 ± 4,3 ab	13,8 ± 0,6 a

CT m/s : Labour conventionnel, rotation maïs-soja.

NT m/s : semis direct, rotation maïs/soja, en mulch.

NT m/m-d : semis direct, rotation maïs/maïs, en couverture vivante de desmodium.

NT h/s-k : semis direct, rotation haricot/soja, en en couverture vivante de kikuyu.

Les lettres minuscules différentes, pour une même fraction et une même profondeur, indiquent une différence significative entre les traitements (p < 0,05).

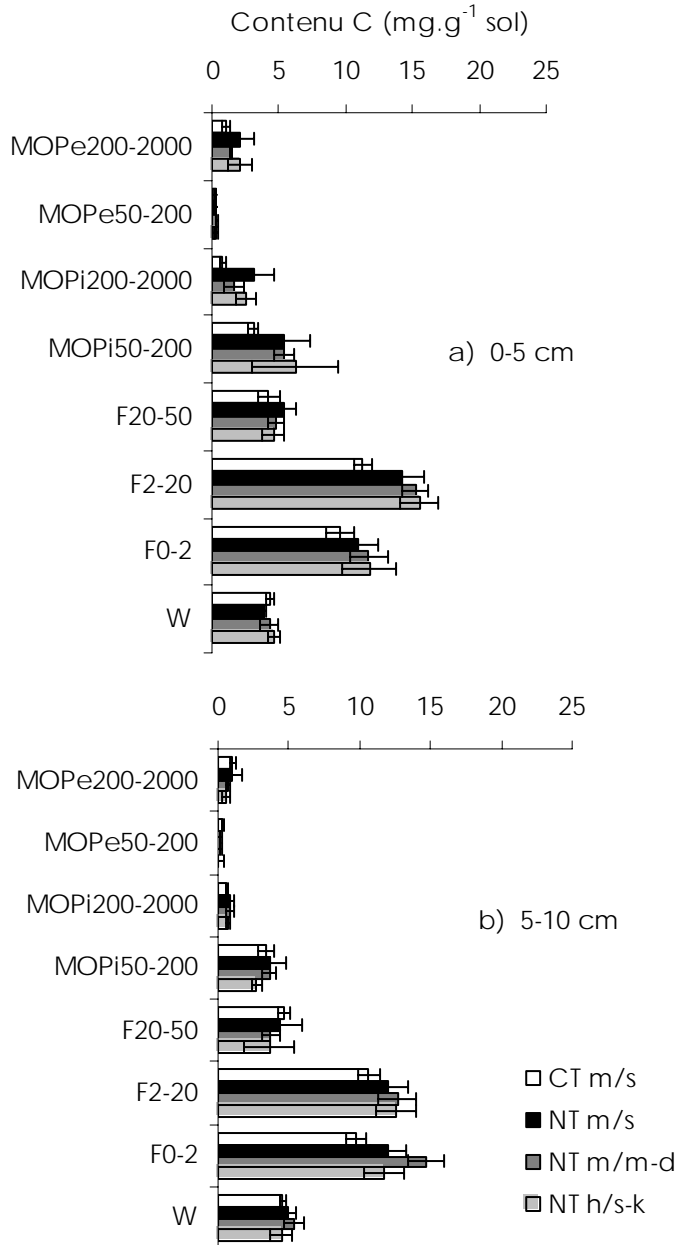
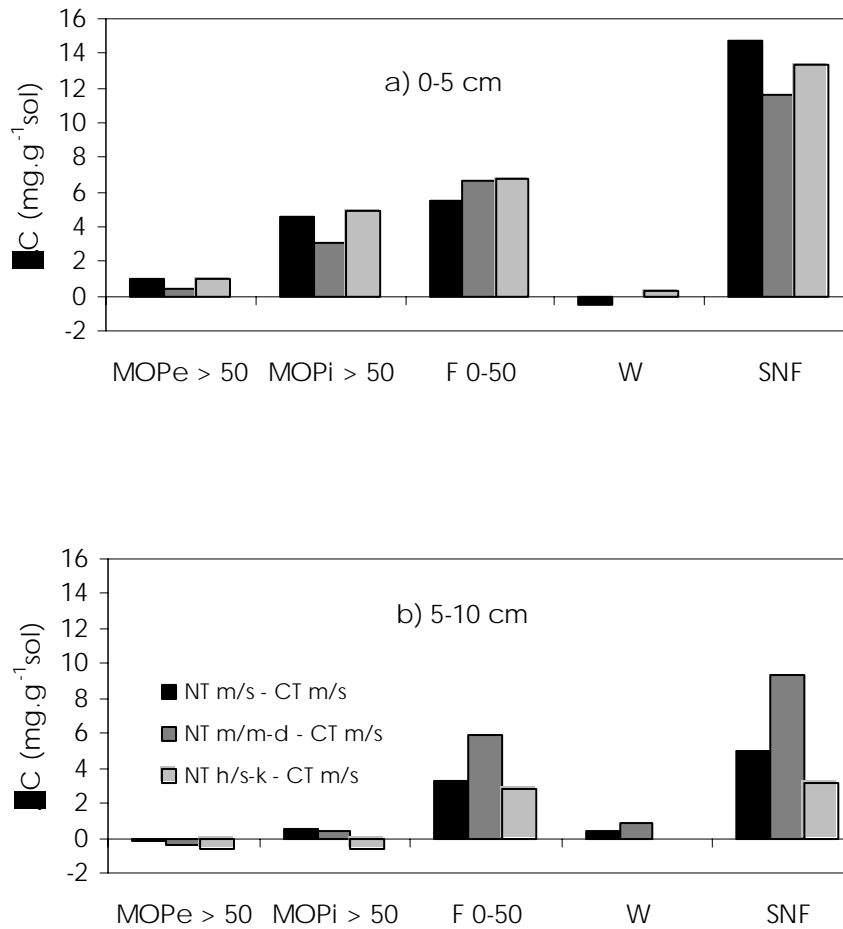


Figure 3-4 : Comparaison des contenus en C des fractions entre les trois types de semis direct (NT) et le labour (CT) pour les couches a) 0-5 cm et de b) 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (moyenne et écart-type).



SNF : sol non fractionné

Figure 3-5 : Différence de contenu en C (ΔC) entre sols sous semis direct (NT) et sous labour conventionnel (CT) des matières organiques particulières externes (MOPe > 50) et internes (MOPi > 50) aux agrégats, des fractions fines (F 0-50) du sol et de la fraction soluble (W), pour les couches a) 0-5 cm et b) 5-10 cm Andranomanelatra, Madagascar.

3.4. DISCUSSION

3.4.1. Teneurs et stocks en C des sols totaux : rappel des résultats antérieurs

Les teneurs en C du sol observées dans cette étude sont élevées, supérieures à 30 mg.g⁻¹ sol). Elles sont attribuées à la texture argileuse et aux caractéristiques andiques du sol étudié (Razafimbelo et al., soumis). Elles sont plus élevées sous les trois systèmes NT que sous CT à 0-5 cm, et plus élevée sous NT m-m-d et NT m/s que sous CT m/s et NT h/s à 5-10 cm. Pour les systèmes NT, le fait d'inclure une plante de couverture ne permet pas d'augmenter significativement la teneur en C du sol. D'après Razafimbelo et al. (soumis), les différences de teneurs entre NT et CT sont essentiellement attribuées à une biomasse restituée au sol plus importante sous NT (résidus aériens et racinaires, plante de couverture éventuelle) que sous CT (racines seules). Cet avantage pour le stockage de C dans le sol du semis direct sur le labour est très largement observé en milieu tropical (Bayer et al., 2000 ; Sà et al., 2001). Le fractionnement granulo-densimétrique permet de préciser les compartiments affectés par ce stockage.

3.4.2. Qualité du fractionnement et variabilité

Les bilans de masse et de C sont satisfaisants, mais les bilans de N sont déficitaires par l'absence du dosage de N dans la fraction soluble ; aussi le bilan N n'est-il pas discuté ici et seuls les rapports C/N seront pris en considération. Les quelques bilans de masse supérieurs à 100% peuvent s'expliquer par la fixation d'une partie des ions PO₄³⁻ de HMP sur les sesquioxides de fer et d'aluminium et sur les argiles (Christensen, 1992).

L'obtention d'une dispersion optimale n'a pas été aisée avec les échantillons étudiés. De manière générale, les sols ferrallitiques argileux sont difficiles à disperser car ils ont une agrégation très stable, du fait notamment des interactions entre MO, argile et oxydes métalliques (Six et al., 2002a). De plus, le sol étudié possède des propriétés andiques, ce qui accentue encore la résistance à la dispersion par la formation de complexes organo-minéraux très stables (Martin et Haider, 1986). La dispersion de ce sol étant difficile, il était nécessaire de trouver un compromis entre une dispersion acceptable des éléments fins et une altération minimum de la MO (Pansu et Gautheyrou, 2003). C'est pourquoi, comme préconisé par Balesdent et al. (1991) et par Feller et al. (1991a), les ultrasons ne sont jamais appliqués sur le sol total pour éviter une division artificielle des débris organiques > 50 µm et leur transfert dans les fractions < 50 µm. De même, pour améliorer la désagrégation des fractions MO_{Pi}50-200, les ultrasons n'ont été appliqués sur cette fraction qu'après qu'elle ait été débarrassée, par battée, de l'essentiel de ses débris végétaux grossiers. Finalement, la

dispersion du sol est restée incomplète pour les fractions 20-50 et 2-20 μm , et c'est la raison pour laquelle nous avons considéré une seule fraction 0-50 μm au lieu des trois fractions 20-50, 2-20 et 0-2 μm . La Figure 3-3 montre que les fractions $> 50 \mu\text{m}$ sont aussi légèrement contaminées par des particules fines, ce que confirme la microscopie électronique. Cependant utiliser une énergie supérieure aurait risqué d'altérer fortement la composante organique de ces fractions. La méthodologie choisie est donc un compromis, mais n'empêche pas de tester l'effet du mode de gestion sur la distribution du C dans les différents compartiments organiques du sol.

Les variabilités de laboratoire sur les trois répétitions du même échantillon ne sont pas très importantes par rapport aux variabilités de terrain. Les seuls coefficients de variation (CV) élevés sont ceux des fractions aux masses et contenus en C les plus faibles, MO_{Pe} et MO_{Pi}. L'essentiel de la variabilité pour les différentes fractions provient de la variabilité spatiale de terrain. Et on constate une variabilité plus élevée en semis direct qu'en travail conventionnel. On peut penser que l'action mécanique du labour homogénéise la distribution des MO dans le sol alors que le semis direct, avec des apports variables de MO par unité de surface et un mélange dû uniquement à la bioturbation, est créateur de variabilité horizontale (Shuster et al., 2001). Finalement, la variabilité totale considérée ici est celle donnée dans le Tableau 3-2, qui inclut variabilité de terrain et de laboratoire.

3.4.3. Caractéristiques des fractions

Les concentrations en C des différentes fractions sont très variables. Les fractions MO_{Pe}, constituées essentiellement de matières organiques légères externes aux agrégats, sont très organiques. Les concentrations en C des fractions MO_{Pe} dans cette étude sont légèrement plus élevées que celles observées par Feller et al. (1995) sur des fractions organiques légères de 20-2000 μm de sols ferrallitiques argileux des Antilles (Ferrisols) et du Brésil (Latosols), de 90 et de 260 $\text{mgC}\cdot\text{g}^{-1}$ fraction, respectivement. Dans notre étude, ces valeurs élevées de concentration en C des MO_{Pe} pourraient être attribuées à une moindre contamination par des matières minérales.

Les fractions MO_{Pi}, comprenant les débris organiques internes aux agrégats, possèdent des concentrations en C inférieures à celles des fractions MO_{Pe} et plus ou moins équivalentes aux concentrations en C des fractions $< 50 \mu\text{m}$. Les concentrations en C de MO_{Pi}200-2000 sont par ailleurs faibles. Ceci est dû à une dilution des débris organiques internes aux agrégats (riches en C mais en très faible quantité) par les sables grossiers et sables fins (pauvre en C mais en grande quantité) présents dans ces fractions. Les concentrations en C des MO_{Pi} dans cette étude ne sont toutefois pas comparables avec les données de Feller (1995), puisque ne correspondent pas à une fraction physique bien dispersée. C'est un ensemble de débris organiques de taille $> 50 \mu\text{m}$ emprisonnés dans des agrégats, mélangés avec des sables minéraux fins et grossiers.

Les concentrations en C des limons (F20-50 et F2-20) sont légèrement plus élevées que celle des argiles (F0-2). Selon Christensen (1992), l'enrichissement en C de ces fractions est inversement proportionnel avec leur masse (en %) dans le sol. Les facteurs d'enrichissement (EF) en C des fractions limoneuses et argileuses étudiés ici ont été calculés et comparés aux données de sols tempérés (Christensen, 1992) et tropicaux (Feller, 1995) (Figure 3-6). Pour les sols étudiés ici, l'enrichissement en C des fractions limoneuses est sensiblement plus élevé que celui des fractions argileuses (de l'ordre de 1,0 et de 0,6, respectivement), et les EF de ces deux fractions sont proches des courbes d'enrichissement en C des fractions argileuses des sols tropicaux (Feller, 1995). Les sols étudiés ici sont dans un contexte climatique subtropical, mais du point de vue de l'enrichissement en C des fractions, ils se rapprochent beaucoup plus des sols tropicaux que des sols tempérés.

Dans cette étude, les rapports C/N des fractions diminuent des fractions grossières aux fractions fines, comme les cas généralement observés dans la littérature (Christensen, 1992 ; Feller, 1995 ; Razafimbelo et al., 2003). En effet, d'après Feller et Beare (1997), les fractions grossières ($F > 50 \mu\text{m}$), ont des rapports C/N élevés du fait de leur richesse en MO d'origine végétale (débris végétaux, riche en C), alors que les fractions plus fines (F20-50, F2-20, et F0-2) ont des rapports C/N plus faibles, du fait de leur taux d'humification plus important et de leur richesse en MO d'origine microbienne, plus humifiée et plus riche en N. Les faibles valeurs des rapports C/N au niveau des fractions MOPe50-200 sont probablement dues à une contamination de cette fraction par des particules d'argiles (F0-2). D'une manière générale, les rapports C/N ne sont pas affectés par le mode de gestion du sol (NT ou CT).

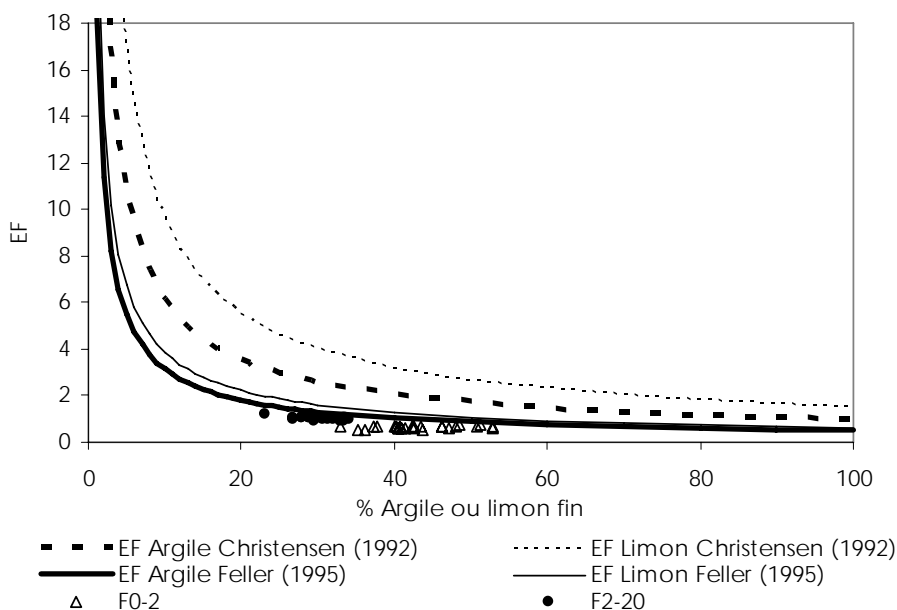


Figure 3-6 : Facteur d'enrichissement en C (Enrichment factor, EF) des fractions argileuses (F0-2) et limoneuses fines (F2-20).

3.4.4. Effet du semis direct sur la distribution du carbone dans les fractions

Par rapport au travail conventionnel CT, et pour la couche 0-5 cm, les systèmes NT permettent principalement une augmentation des contenus en C dans la fraction fine (F 0-50) et secondairement de la fraction organique grossière interne aux agrégats (MOPi > 50 μ m). Pour la couche 5-10 cm, l'augmentation est uniquement associée à la fraction fine (F 0-50 μ m).

Si les fractions MOPe > 50 μ m sont composées de débris végétaux libres, les fractions MOPi > 50 μ m sont composées de débris végétaux emprisonnés dans des agrégats > 50 μ m. Des travaux de la littérature ont montré que ces MOP internes peuvent être protégées de l'action minéralisatrice des microorganismes du sol par isolation physique à l'intérieur des agrégats (Elliott, 1986 ; Beare et al., 1994b ; Golchin et al., 1994 ; Six et al., 2000 ; Chevallier et al., 2004). Par contre, les MOP externes ne sont pas protégées et sont fortement exposées à la minéralisation microbienne (Christensen, 1992 ; Six et al., 1999 ; Solomon et al., 2000). Ceci peut expliquer à la fois la faible accumulation sous NT de C sous forme de fractions légères externes aux agrégats, non protégées (MOPe > 50), et la forte augmentation sous forme de fractions légères internes protégées dans les agrégats MOPi > 50.

Cette accumulation des MOP internes a déjà été mise en relation avec l'augmentation de la stabilité des agrégats du sol, sous systèmes NT (Beare et al., 1994a) et sous pâturages (Carter et al., 1994). En effet, Razafimbelo et al. (soumis), pour les systèmes étudiés ici, ont trouvé des teneurs en macroagrégats (> 200 μ m) stables à l'eau plus élevées sous NT que sous CT. Ceci est confirmé par d'autres résultats de la littérature sur les sols tropicaux (Six et al., 2002b ; Bronick et Lal, 2005). Les contenus en C des fractions MOPi > 50 μ m ne sont pas différents entre les trois systèmes NT étudiés, ce qui indique que la dynamique des MOP intra-agrégats y est relativement similaire.

Dans les deux couches superficiels (0-5 et 5-10 cm), les systèmes NT présentent des accroissements élevés des contenus en C des fractions fines (F 0-50) par rapport à CT. Cette fraction constitue 40 à 90% de la différence en C entre NT et CT. Freixo et al. (2002) et Bayer et al. (2002), pour des situations brésiliennes, rapportent également que le contenu en C des fractions < 50 μ m est plus élevé sous NT que sous CT. Cet accroissement de MO dans les fractions < 50 μ m peut résulter de divers processus : (i) d'un apport important de MO sous forme particulaire < 50 μ m ou amorphe, (ii) d'une protection physico-chimique des MO stockées, par adsorption sur les colloïdes du sol, et (iii) d'une protection physique des MO par emprisonnement au sein des microagrégats 2-50 μ m.

Concernant d'éventuels apports sous une forme $< 50 \mu\text{m}$, d'autres publications sur les systèmes à mulch (Razafimbelo et al., 2003 ; Metay et al., soumis), ont mentionné le rôle probablement très important de la faune du sol pour enfouir et transformer les débris végétaux grossiers ($> 50 \mu\text{m}$) en fractions fines ($< 50 \mu\text{m}$) ou amorphes, l'activité de cette faune se développant en général très fortement en présence d'un mulch (Mele et Carter, 1999 ; Brown et al., 2003 ; Blanchart et al., soumis). Ceci est confirmé aussi par les travaux de Rabary et al. (en cours) sur ces systèmes, qui montrent une biomasse de vers de terre plus importante sous NT m/s que sous CT (168 et 5 indiv.m⁻², respectivement), en milieu de saison de pluie.

La fixation et la protection des MO par adsorption sur les colloïdes du sol sont confirmées par d'autres travaux, notamment ceux de Feller et al. (1991b) et de Bayer et al. (2002), qui ont montré une corrélation positive entre C associé aux fractions $< 50 \mu\text{m}$ et les teneurs en argile et/ou en oxyde de fer. De plus, le sol étudié ici présente des caractères andiques, et comporte donc un nombre important de charges variables permettant la constitution de complexes organo-métalliques. Quant à la protection des MO au sein des microagrégats 2-50 μm , elle résulte en particulier de leur porosité très fine, qui rend inaccessibles aux microorganismes les MO qui s'y trouvent (Sollins et al., 1996). Feller et al. (1991b) rapportent que la MO associée à ces fractions fines du sol est plus humifiée et se renouvelle moins vite que les MO associées aux fractions plus grossières et plus labiles. Aussi, le C additionnel contenu dans les fractions fines du sol sous les systèmes NT étudiés est relativement stabilisé et protégé contre la minéralisation microbienne.

Par ailleurs, les contenus en C des fractions fines $< 50 \mu\text{m}$, mais également ceux des fractions grossières (MOPi > 50 et MOPe > 50) sous systèmes NT à couverture végétale vivante (NT m/m-d et NT h/s-k) ne sont pas significativement différents de ceux sous systèmes NT à couverture végétale morte ou mulch (NT m/s). Aussi, dans notre étude, l'introduction des plantes de couverture, ne conduisent pas à un enrichissement en C des fractions granulo-densimétriques du sol par rapport aux systèmes SCV à couverture morte.

3.5. CONCLUSION

Les sols sous systèmes SCV présentent des teneurs en C élevées par rapport au sol sous travail conventionnel CT pour ce sol ferrallitique argileux des Hautes Terres malgaches. Ce C stocké se localise :

- à 0-5 cm : dans les MO particulières internes aux agrégats (MOPi > 50) et dans les fractions fines du sol ($< 50 \mu\text{m}$) ;
- à 5-10 cm : dans les fractions fines du sol.

Cette MO stockée est relativement stabilisée car protégée contre la minéralisation microbienne (i) physiquement, dans les agrégats du sol, pour les MOP internes aux agrégats

(MOPi > 50 µm) et (ii) physico-chimiquement, par liaison forte avec les particules minérales du sol, pour les fractions fines (F 0-50 µm).

Dans cette étude, le fait d'inclure une plante de couverture n'induit pas une augmentation significative de la teneur en C du sol total et du contenu en C de ses fractions granulo-densimétriques par rapport aux systèmes SCV à couverture morte.

Remerciements:

Les auteurs tiennent à adresser leurs sincères remerciements à l'équipe de terrain qui a fortement contribué à la réalisation de ce travail, notamment l'ONG TAFA, pour avoir mis à disposition son dispositif agronomique de longue durée, et l'équipe URP SCIRD d'Antsirabe, regroupant le CIRAD, le FOFIFA et l'Université d'Antananarivo, pour son appui et assistance durant les périodes d'échantillonnage.

3.6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Balesdent J., Pétraud J. P. et Feller C., 1991 - Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du Sol*, 29, 95-106.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L. et Fernandes S. V., 2000 - Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54, 101-109.
- Bayer C., Mielniczuk J., Martin-Neto L. et Ernani P. R., 2002 - Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. *Plant and Soil*, 238, 133-140.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795.
- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 777-786.
- Besnard E., Chenu C., Balesdent J., Puget P. et Arrouays D., 1996 - Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*, 47, 495-503.
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontondé A. et Feller C. - Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *Soumis à European Journal of Soil Biology*.
- Bronick C. J. et Lal R., 2005 - Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Brown G. G., Benito N. P., Pasini A., Sautter K. D., de F Guimaraes M. et Torres E., 2003 - No-tillage greatly increases earthworm populations in Parana state, Brazil: The 7th

- international symposium on earthworm ecology, Cardiff, Wales, 2002. *Pedobiologia*, 47, 764-771.
- Carter M. R., Angers D. A. et Kunelius H. T., 1994 - Soil structure and organic matter fractions under perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1376-1382.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et 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 B. T., 1992 - Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: *Advances in Soil Science*. Steward B. A. (Ed.). Springer-Verlag, New York.
- Elliott E. T., 1986 - Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 627-633.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Feller C., 1995 - La matière organique des sols tropicaux à argile 1:1. Recherche des compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèses et documents microfichés. Orstom Editions. France, Université Louis Pasteur, 393.
- Feller C., Burtin G., Gerard B. et Balesdent J., 1991a - Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. *Science du Sol*, 29, 77-94.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J., Toutain F. et Morel J., 1991b - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris*, 12, Sér. 2, 1491-1497.
- Freixo A. A., Machado P. L. O. D., dos Santos H. P., Silva C. A. et Fadigas F. D., 2002 - Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 64, 221-230.
- Gavinelli E., Feller C., Larré-Larrouy M.-C., Bacye B., Djegui N. et Nzila J. D., 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.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994b - Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 285-309.
- Machado P. L. O. D. et Silva C. A., 2001 - Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 119-130.
- Martin J. M. et Haider K., 1986 - Influence of mineral Colloids on turnover rates of soil organic carbon. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. In: *Interactions of*

- Soil Minerals with Natural Organics and Microbes. Huang P. M. et Schnitzer M. (Eds). Science Society American Special Publication, Madison, Wisconsin.
- Mele P. M. et Carter M. R., 1999 - Impact of crop management factors in conservation tillage farming on earthworm density, age structure and species abundance in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research*, 50, 1-10.
- Metay A., Moreira J. A. M., Bernoux M., Boyer T., Douzet J.-M., Feigl B., Feller C., Maraux F. et Oliver R., soumis - Effect of no-tillage under cover crops on storage and forms of organic carbon in a clayey Oxisol (Cerrados, Brazil). Submitted to *Soil and Tillage Research*.
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003 - L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale. France, Springer-Verlag.
- Peixoto R. T. G., Stella L. M., Machulek Junior A., Mehl H. U. et Batista E. A., - 1999. Distribuição das frações granulométricas da matéria orgânica em função do manejo do solo. 3º Encontro Brasileiro Sobre Substância Húmicas, Santa Maria-RS, Rio Grande do Sul.
- Puget P., Chenu C. et 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.
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., 1998 - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. In: Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Raunet M. et Séguy L., soumis - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres de Madagascar. Soumis à *Etude et Gestion des Sols*.
- Razafimbelo T., Barthes B., De Luca E. F., Larré-Larrouy M.-C., Laurent J.-Y., Cerri C. C. et Feller C., 2003 - Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. *Etude et Gestion des Sols*, 10, 191-200.
- Sà J. C. d. M., Cerri C. C., Dick W. A., Lal R., Filho S. P. V., Piccolo M. C. et Feigl B. E., 2001b - Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1486-1499.
- Shuster W. D., Subler S. et McCoy E. L., 2001 - Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 983-996.
- Six J., Conant T., Paul A. et Paustian K., 2002a - Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.

- Six J., Paustian K., Elliott E. T. et Combrink C., 2000b - Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681-689.
- Six J., Elliott E. T. et Paustian K., 1999 - Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1350-1358.
- Six J., Elliott E. T., Paustian K. et Doran J. W., 1998 - Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1367-1377.
- Soil Survey Staff, 2003 - Keys to Soil Taxonomy. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sollins P., Homann P. et Caldwell B. A., 1996 - Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74, 65-105.
- Solomon D., Lehmann J. et Zech W., 2000 - Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78, 203-213.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100.000. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

Chapitre 4. Distribution et protection physique de la matière organique dans les différentes classes d'agrégats d'un sol argileux des Hautes Terres malgaches sous systèmes SCV

Ce chapitre a été rédigé en anglais en vue d'une soumission prochaine à une revue internationale.



Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under conventional and no-tillage systems (Highlands of Madagascar)

Razafimbelo T.¹, Oliver R.², Grandière I.¹, Albrecht A.^{2,3}, Feller C.³

¹ IRD - UR 179 SeqBio, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

² CIRAD, TA 40/01, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France

³ IRD, Route d'Ambohipo, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar

RESUME

La structure du sol peut influencer le stockage du carbone (C) dans le sol, par la protection physique de C à l'intérieur des agrégats stables du sol contre la décomposition microbienne. La distribution du C associé dans les macro- (MA, 200-2000 μm) et mésoagrégats (ME, 20-200 μm) stables à l'eau, ainsi que la protection physique du C au niveau de ces classes d'agrégats sont étudiés sur des systèmes en semis direct (NT, NT m/s) et en labour conventionnel (CT, CT m/s) d'un sol argileux (60 % argile) des Hautes Terres malgaches (Antsirabe, 16°C, 1300 mm). Les résultats montrent une teneur en MA significativement plus élevée sous NT que sous CT, et inversement une teneur en ME plus élevée sous CT que sous NT. Le C associé aux macroagrégats constitue la majorité de la différence de teneurs en C observée entre CT m/s et NT m/s, et est 1,8 fois plus élevé sous NT m/s que sous CT m/s (31.9 et 17.9 gC g^{-1} sol, respectivement). La quantité de C minéralisé au bout de 28 jours est systématiquement plus élevée sous NT m/s que sous CT m/s pour chaque classe d'agrégats et plus élevée pour les ME que pour les MA. La destruction des MA et ME par déprotection de C (broyage) ne conduit pas à une augmentation du C minéralisé. Le C protégé physiquement, pour CT m/s et NT m/s, est en très faible quantité aussi bien pour MA (54 et 37 $\mu\text{g g}^{-1}$ sol) que pour ME (26 et 27 $\mu\text{g g}^{-1}$ sol). Le C potentiellement minéralisable ne représente que 0,8 à 2,4 % du C total du sol. Des travaux antérieurs ayant montré que les matières organiques particulières se trouvant à l'intérieur des agrégats sont entourées de particules minérales fines qui les protègent physico-chimiquement contre la minéralisation, la forme de protection de C contre la minéralisation la plus prépondérante pour le sol étudié serait la protection physico-chimique sur les particules minérales fines du sol (limon+argile).

ABSTRACT

Soil aggregate stability can influence soil organic carbon storage (SOC) by its protection from microbial decomposition. The carbon associated with water stable macro- (MA, 200-2000 μm) and mesoaggregates (ME, 20-200 μm) and their physical protection were studied in long term no-tillage (NT, NT m/s) and conventional tillage (CT, CT m/s, hand ploughing) management of a clayey (60% clay) subtropical soil (16°C, 1300 mm) in Antsirabe, Highlands of Madagascar. Results showed MA content significantly higher in NT than in CT management and ME content significantly higher in CT than in NT management. Macroaggregates associated-C made up the largest percentage of the difference of SOC content between NT m/s and CT m/s management, and were 1.8 time higher in NT m/s than in CT m/s (31.9 and 17.9 gC g^{-1} soil, respectively). The amount of mineralized C during 28 days was systematically higher in NT than in CT management, and higher in ME than in MA. However, crushing aggregates did not affect the amount of mineralized C in MA and ME for both NT and CT management. The MA protected-C was very low about 37 and 54 $\mu\text{g g}^{-1}$ soil in NT m/s and CT m/s and ME protected-C about 27 and 26 $\mu\text{g g}^{-1}$ soil, respectively. The

potentially mineralizable C in each aggregate class was only about 0.8 to 2.4 percent of total SOC content. However, recent studies showed that organic matter internal aggregates were strongly surrounded by fine mineral particles. Hence, the major protection process of SOC under NT management in this clayey soil of Madagascar with andic properties was not physical one, but a physico-chemical process by sorption of SOM on clay+silt particles.

4.1. INTRODUCTION

Tillage systems resulted in decrease of soil organic matter (SOM) content and soil aggregate stability. Tillage enhances SOM decomposition by mixing crop residues into soil and increasing soil aeration and water fluctuation (Balesdent et al., 2000). Tillage also disrupts soil aggregates and exposes to microbial decomposition the physically protected carbon (C). Conversely, no-tillage (NT) management, where plant residues were accumulated in soil surface as a mulch, reduces soil mixing and soil disturbance. Several studies in temperate (Beare et al., 1994b; Six et al., 2000b) and tropical (Feller et al., 1996; Six et al., 2002b) regions reported that NT management increases considerably SOM storage and improves soil aggregate stability.

Organic matter is considered as a major binding agent that stabilizes soil aggregates (Tisdall et Oades, 1982). In tropical soils, oxides and 1:1 clay may also influence aggregate stabilization by mineral-mineral interaction, and close relationship between SOC and aggregate stability were found in both temperate and tropical areas (Six et al., 2002b). Furthermore, soil aggregation can increase soil C storage by reducing the C lost with erosion and protecting SOM from microbial mineralization. SOM can be physically protected from microbial mineralization through its sorption to clay minerals (Hassink et al., 1993) and trapping within soil macroaggregates (Tisdall et Oades, 1982). Mineralization studies of C in intact versus crushed aggregates revealed the existence of a physically protected C pools in macroaggregates, in native vegetation and no-tillage management (Gupta et Germida, 1988; Hassink et al., 1993; Beare et al., 1994a).

In Highlands of Madagascar, several years (11) of no-tillage compared to conventional tillage management conducted to a relevant increase in SOC stocks and soil aggregation (Razafimbelo et al., submitted data, Chapitre 2). This increase could be the result of (i) the increase of C inputs (by residues inputs) and (ii) the decrease of C lost by mineralization and erosion. If the first hypothesis was studied in Razafimbelo et al. (submitted, Chapitre 2), the second one is mainly attributed to the increase of aggregate stability effect. This study aimed (i) to evaluate the carbon distribution among soil aggregate classes in conventional tillage (CT) and no-tillage (NT) managements and (ii) to measure by mineralization studies the C physically protected in macro and meso- water-stable aggregates (WSA).

4.2. MATERIALS AND METHODS

4.2.1. Site description and soil samples

Soil samples were collected from a long term experiment, on maize (m, *Zea mays* L.) and soybean (s, *Glycine max* L) annual rotation, of conventional tillage (CT m/s, with share plough, 20 cm-depth) and no-tillage (NT m/s, direct-drilled with mulch) plots at Andranomanelatra (near Antsirabe, Madagascar). Annual averages rainfall and temperature are 1300 mm and 16°C, respectively. The soil at this site is an andic Dystrustept (Soil Survey Staff, 2003), with 60 % of clay. Soil physical and chemical properties are given in Razafimbelo et al. (submitted, Chapitre 2). Treatments were established in 1992, on replicated plots (n = 3) of 30 to 200 m², assigned in a randomized design.

In NT m/s, crop residues were returned into plots, and in CT m/s they were removed. Samples were taken from the replicate NT m/s and CT m/s plots on april 2003, just before the harvest. Four replicates of soil samples were collected from each plot with cylinders at 0-5 cm depth, two located on row and two on inter-row. Samples were air-dried on ambient air and sieved (2 mm). The four replicates from each plot were recombined as a plot-composite sample, used for aggregate stability, and C-aggregate mineralization analysis. Subsamples of plot replicates were finely ground for total soil organic carbon (SOC) and nitrogen (N) analyses.

4.2.2. Water-stable aggregates

WSA were determined by wet sieving, using a method and equipment derived from Kemper and Rosenau (1986). Four grams of 2-mm sieved air-dried soil were rapidly immersed into deionized water for 2 h, then wet-sieved through a 200 µm sieve for 6 min. The fraction > 200 µm, composed by free light fractions (F-LF) and macroaggregates (MA, 200-2000 µm), was transferred into a 500 ml-test tube and shaken by hand (3 end-over-end tumbings) and left to stand during 10 min. F-LF was suspended, siphoned and filtered. The same procedure was repeated two times as described above. The three subfractions of F-LF were joined. MA and F-LF were oven-dried at 40°C and weighed. The < 200 µm fraction, composed by mesoaggregates (ME, 20-200 µm) and microaggregates (MI, F < 20 µm), was sieved manually through a 20 µm sieve. Then, the < 20 µm fraction (MI) was centrifuged. Separated-ME and MI were oven-dried at 40°C and weighed. All aggregate fractions (F-LF, MA, ME, MI) were finely grounded and stored for C and N analysis.

Aggregate fractionation was carried out on four laboratory replicates per plot-composite sample.

4.2.3. Aggregate mineralization experiment

Aggregate-C mineralization was measured as respired CO₂-C in closed chambers (28°C, in an incubator) during 28 days. Four aggregate treatments were conducted for each plot replicate of NT m/s and CT m/s systems: (i) intact MA, (ii) crushed MA (to pass a 50 µm screen), (iii) intact ME and (iv) crushed ME (to pass a 50 µm screen). Aggregates used in this experiment were separated by the above-mentioned method.

Aggregate treatments samples (10 g) were mixed in vials with 20 g of pre-ashed sand (500°C, 12 h) and tapped. Deionized water was added to achieve 80 % water holding capacity (WFP). Vials were incubated in 1000 ml sealed flask. CO₂ concentration accumulated into the flask was measured by Microgas Chromatograph M 200, on days 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 17, 21 and 28, and at each measure date, water was added to maintain soil moisture at 80 % WFP.

4.2.4. Organic carbon and nitrogen contents of soil and aggregates

Total SOC and N contents, aggregate organic carbon (AOC) and N contents were determined by dry-combustion, with a Carlo Erba NA 2000 Elemental Analyzer. In the absence of carbonates, the whole carbon was assumed to be organic.

4.2.5. Calculation and statistical analysis

The amount of protected C was calculated as the difference of C mineralized by crushed and non-crushed aggregates (Beare et al., 1994a).

The results of the aggregate mineralization were computed by asymptotic parameters of a nonlinear regression fitting of C mineralization, using the following second-order model:

$$C \text{ min } (t) = CP_L (1 - e^{-k_L t}) + CP_R (1 - e^{-k_R t}) \quad (1)$$

where, C min (µgC g⁻¹ aggregate) was the cumulative C-aggregate mineralized at time t (days, d), CP_L and CP_R (µgC g⁻¹ aggregate) were the C mineralization potentials of labile and resistant pools, k_L and k_R (d⁻¹) were the rate constants of CP_L and CP_R, respectively. Rates constants of mineralization were used to define the C pools: pool with low value of k was defined as the resistant C pool, and pool with high value of k was defined as the labile C pool. The C mineralization potential (C_P) of each aggregate treatment was calculated as follows:

$$CP_T = CP_L + CP_R \quad (2)$$

Statistical analysis

Statistical differences were determined with *t* Student test using Statistica software. Asymptotic parameters of C mineralization were estimated by using Simfit software.

4.3. RESULTS

4.3.1. Soil aggregate stability

The distribution of soil among the different size classes of WSA was different between CT m/s and NT m/s (Figure 4-1). F-LF fraction was very low, only about 1 g 100g⁻¹ soil and not different between NT m/s and CT m/s. The rate of MA was significantly higher ($p < 0.05$) in NT m/s than in CT m/s (72.4 and 61.1 g 100 g⁻¹ soil, respectively). Conversely, the ME content was significantly higher in CT m/s than in NT m/s (19.4 and 30.0 g 100 g⁻¹ soil, respectively). No differences in MI were found between CT and NT.

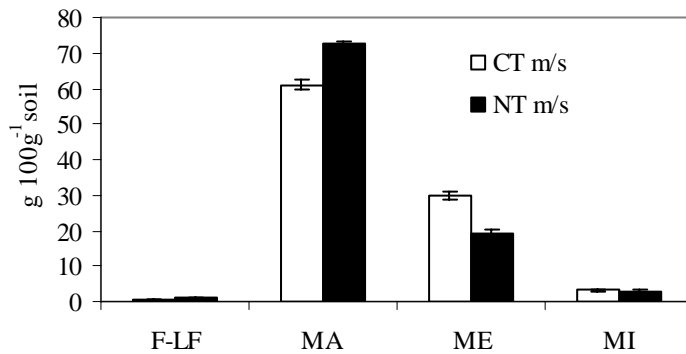


Figure 4-1 : Aggregate size distribution in conventional-tillage (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils, 0-5 cm layer. (Andranomanelatra, Madagascar). F-LF = Free-light fraction; MA, ME and MI = macro-(200-2000 μm), meso-(20-200 μm) and micro-(0-20 μm) aggregates, respectively.

Table 4-1: Aggregate and C distribution among aggregate classes in CT and NT systems. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar (mean ± standard deviation, n=3).

	Mass	C			N			C/N
	g 100g ⁻¹ soil	mgC g ⁻¹ aggregate	mgC g ⁻¹ soil	gC 100g ⁻¹ C soil	mgN g ⁻¹ aggregate	mgN g ⁻¹ soil	g 100g ⁻¹ N soil	
CT m/s								
F-LF	0.6 ± 0.2 Aa	259.0 ± 11.5 Ad	1.5 ± 0.6 Aa	4.5 ± 2.0 Aa	15.7 ± 1.4 Ad	0.1 ± 0.0 Aa	3.8 ± 1.5 Aa	16.5 ± 1.4 Ab
MA (200-2000 µm)	61.1 ± 1.4 Ad	29.3 ± 0.4 Aa	17.9 ± 0.6 Ac	55.7 ± 1.7 Ac	2.1 ± 0.1 Aa	1.3 ± 0.1 Ac	57.7 ± 5.1 Ac	13.7 ± 0.3 Ba
ME (20-200 µm)	30 ± 1.1 Bc	34.4 ± 1.4 Ab	10.3 ± 0.6 Bb	32.1 ± 1.8 Bb	2.6 ± 0.1 Ab	0.8 ± 0.0 Bb	34.7 ± 0.9 Bb	13.1 ± 0.2 Aa
MI (0-20 µm)	3.2 ± 0.3 Ab	38.4 ± 1.0 Ac	1.2 ± 0.1 Aa	3.9 ± 0.5 Ba	2.9 ± 0.1 Ac	0.1 ± 0.0 Aa	4.1 ± 0.4 Ba	13.2 ± 0.2 Aa
Sum	94.8 ± 0.2 A		30.9 ± 1.2 A	96.2 ± 2.1 A		2.3 ± 0.1 A	100.3 ± 4.0 A	
SOC (Whole soil)			32.1 ± 0.9 A	100		2.3 ± 0.2 A	100	
NT m/s								
F-LF	1.0 ± 0.2 Aa	274.8 ± 14.2 Ab	2.7 ± 0.6 Ab	5.9 ± 1.3 Ab	16.2 ± 0.6 Ab	0.2 ± 0.0 Ab	4.5 ± 1.3 Ab	17.0 ± 1.2 Ab
MA (200-2000 µm)	72.4 ± 0.9 Bd	44.0 ± 2.7 Ba	31.9 ± 2.3 Bd	69.2 ± 0.9 Bd	3.4 ± 0.2 Ba	2.5 ± 0.2 Bd	69.4 ± 0.6 Bd	12.8 ± 0.3 Aa
ME (20-200 µm)	19.4 ± 1.0 Ac	44.3 ± 1.9 Ba	8.6 ± 0.1 Ac	18.6 ± 1.3 Ac	3.5 ± 0.1 Ba	0.7 ± 0.0 Ac	19 ± 1.6 Ac	12.6 ± 0.4 Aa
MI (0-20 µm)	2.7 ± 0.5 Ab	46.8 ± 3.6 Ba	1.3 ± 0.2 Aa	2.7 ± 0.4 Aa	3.7 ± 0.4 Ba	0.1 ± 0.0 Aa	2.8 ± 0.3 Aa	12.6 ± 0.7 Aa
Sum	95.5 ± 0.6 A		44.4 ± 2.3 B	96.4 ± 1.2 A		3.4 ± 0.2 B	95.7 ± 2.4 A	
SOC (Whole soil)			46.1 ± 2.8 B	100		3.6 ± 0.2 B		

F-LF, Free light fraction; MA, stable macroaggregate (200-2000 µm); ME, mesoaggregate (20-200 µm); MI, microaggregate (0-20 µm); SOC, soil organic carbon.

CT m/s: conventional tillage, maize/soybean rotation

NT m/s: no-tillage, maize/soybean rotation

Different capital letters indicate significant differences between management systems (t Student test, p < 0.05)

Different lower-case letters indicate significant differences between aggregate fractions (t Student test, p < 0.05) in a same management system

4.3.2. SOC content and C distribution among aggregate class

According to Table 4-1, SOC content was higher in NT m/s than in CT m/s and was about 46.1 and 32.1 mgC g⁻¹ soil, respectively. In CT m/s, C concentrations of MI, ME and MA increased significantly ($p < 0.05$) with aggregate size, 38, 34 and 29 mgC g⁻¹ aggregate for MI, ME and MA, respectively. However in NT m/s, C concentrations of MA, ME and MI were not significantly different ($p < 0.05$). The C concentration (mgC g⁻¹ fraction) of F-LF was high (about 260 mgC g⁻¹ fraction) and not significantly different in NT m/s and CT m/s (Table 4-1 and Figure 4-2). However, C concentration of aggregate fractions (MA, ME and MI) were significantly affected by tillage, they were systematically higher in NT m/s than in CT m/s ($p < 0.05$). Table 4-1 showed that up to 50 % of C of soil was associated to MA, and MA associated C was greater (69 %, 31.9 gC g⁻¹ soil) in NT m/s than in CT m/s (56 %, 17.9 gC g⁻¹ soil). Inversely, ME associated C was higher for CT m/s than for NT m/s, (10.3 and 8.6 gC g⁻¹ soil, respectively). MI and F-LF associated C, were not significantly different between CT m/s and NT m/s and made up only 8 % of C soil.

In general, C/N rates (Table 4-1) of F-LF, MA, ME and MI in CT m/s was slightly higher, but non significant, than those to NT m/s, and were about 16 for F-LF and, 13 for MA, ME and MI.

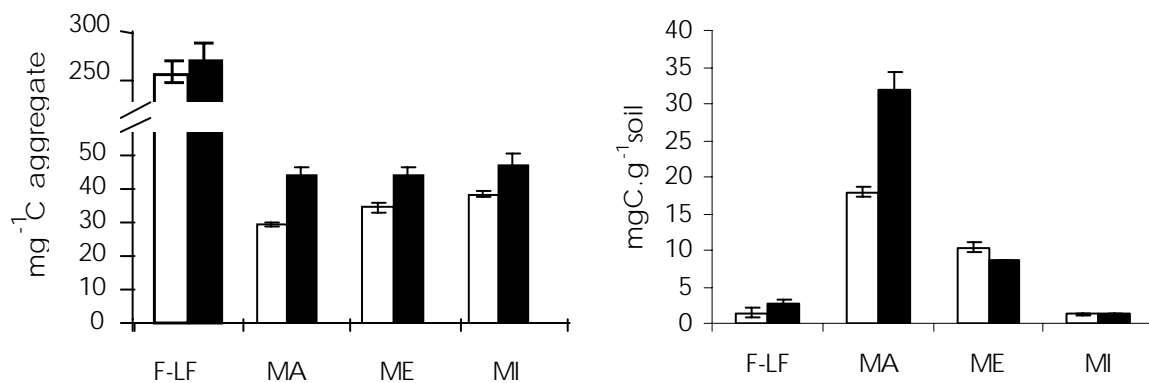


Figure 4-2: a) Carbon concentration (mgC g⁻¹ aggregate), and b) distribution (mgC g⁻¹soil) ,for MA (200-2000 μm), ME (20-200 μm) and MI (< 20 μm) in conventional (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils. Soil layer 0-5 cm. (Andranomanelatra, Madagascar)

4.3.3. C mineralization

The amount and the quality of mineralized C (C_{min}) during 28-d incubation was expressed as a cumulative respired CO_2 in 0-4, 4-14, 14-28 and 0-28 days. The C_{min} quantity was expressed on an aggregate or soil basis ($\mu gC-CO_2 g^{-1}$ aggregate or soil) and the quality expressed on an aggregate C or soil C basis ($gC-CO_2 g^{-1}$ C aggregate or C soil).

Amount of C_{min} ($\mu gC g^{-1}$ aggregate or soil)

In general, 30 to 40 % of C_{min} was mineralized in the first days of incubation (0-4 days), 35 to 37 % in 4-14 days, and 23 to 30 % in 14-28 days. Results revealed significant effects ($p < 0.05$) of no-tillage on C_{min} amount (Table 4-2). C_{min} was always higher ($p < 0.05$) for aggregates from NT m/s as compared to CT m/s and ranged from 1160.0 to 1598.1 $\mu g C g^{-1}$ aggregate in NT m/s and 472.7 to 729.7 $\mu g C g^{-1}$ aggregate in CT m/s.

For the 0-28 day incubations and for both CT m/s and NT m/s, C_{min} amount from ME was higher than from MA. However, when C_{min} was expressed on a soil basis (Table 4-2a, $\mu gC g^{-1}$ soil), C_{min} from MA was higher than ME, slightly for CT m/s and, but greatly for NT m/s.

Crushing MA and ME resulted in a small but no-significant increase in C_{min} for NT m/s and CT m/s. The MA-protected C fraction (Table 4-2a) was only 19 % of C_{min} in CT m/s and 4 % in NT m/s, and ME-protected C fraction was 14 % of C_{min} in CT m/s and 10 % in NT m/s.

In general, the potentially mineralizable C of resistant C pool (CP_R) was 3 to 10 times higher than of labile C pool (CP_L), and in all aggregate treatments, CP_L, CP_R and CP_T of MA and ME were significantly higher in NT m/s than in CT m/s. However, no-tillage did not affect the C mineralization rates (k_L, k_R) of labile and resistant pools.

Quality of C_{min} ($gC g^{-1}$ C aggregate or C soil)

The C_{min} quality followed the same trend than C_{min} amount (Tables 2b and 3b). The only difference is that for NT m/s (Table 4-2a), the protected-C was slightly higher, but not significant, in MA (3.18 $mgC g^{-1}$ aggregate) than in ME (1.84 $mgC g^{-1}$ aggregate) (Table 4-2b).

Table 4-3: Carbon mineralization potentials (CP_L, CP_R and CP_T) and rate constants (k_L and k_R, d⁻¹) of water-stable aggregate classes in conventional-tillage (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (mean ± standard deviation, n=3)

	Resistant-C		Labile-C		Total-C
	CP _R	k _R	CP _L	k _L	CP _T
a) In µgC_{min} g⁻¹ aggregate					
CT m/s					
MA (200-2000 µm)	582.9 ± 56.5 Aa	0.0434 ± 0.0042 Aa	54.9 ± 14.9 Aa	1.0363 ± 0.3134 Ab	637.7 ± 70.9 Aa
Crushed MA	631.8 ± 33.4 Aa	0.0480 ± 0.0122 Aa	96.6 ± 26.5 Aa	0.5914 ± 0.1301 Ab	728.4 ± 43.0 Aa
ME (20-200 µm)	760.1 ± 98.1 Aa	0.0420 ± 0.0062 Aa	116.7 ± 47.4 Aab	0.5909 ± 0.1777 Aab	876.7 ± 143.0 Aab
Crushed ME	719.0 ± 51.3 Aa	0.0461 ± 0.0246 Aa	208.5 ± 43.7 Ab	0.3742 ± 0.1163 Aa	927.4 ± 469.9 Ab
NT m/s					
MA (200-2000 µm)	1348.1 ± 205.1 Ba	0.0424 ± 0.0056 Aa	229.6 ± 76.9 Ba	0.7086 ± 0.0613 Ab	1577.7 ± 257.4 Ba
Crushed MA	1458.9 ± 580.5 Ba	0.0473 ± 0.0172 Aa	210.6 ± 7.0 Ba	0.7475 ± 0.1205 Ab	1669.3 ± 576.9 Ba
ME (20-200 µm)	1477.3 ± 317.9 Ba	0.0468 ± 0.0052 Aa	386.0 ± 150.2 Ba	0.4919 ± 0.0937 Aa	1863.3 ± 463.3 Ba
Crushed ME	1514.5 ± 319.0 Ba	0.0519 ± 0.0321 Aa	428.4 ± 116.1 Ba	0.4858 ± 0.3109 Aab	1943.0 ± 959.1 Ba
b) In mgC_{min} g⁻¹ C aggregate					
CT m/s					
MA (200-2000 µm)	18.50 ± 1.57 Aa	0.0432 ± 0.0047 Aa	1.72 ± 0.44 Aa	1.0392 ± 0.3159 Ab	20.23 ± 2.00 Aa
Crushed MA	20.58 ± 2.50 Aa	0.0495 ± 0.0113 Aa	3.07 ± 0.60 Ab	0.6060 ± 0.1491 Aab	23.65 ± 2.11 Aab
ME (20-200 µm)	20.96 ± 2.84 Aa	0.0423 ± 0.0057 Aa	3.15 ± 1.13 Ab	0.5873 ± 0.1454 Aab	24.11 ± 3.88 Aab
Crushed ME	20.38 ± 1.29 Aa	0.0441 ± 0.0061 Aa	5.95 ± 1.33 Ac	0.3718 ± 0.0115 Aa	26.32 ± 2.54 Ab
NT m/s					
MA (200-2000 µm)	30.81 ± 6.87 Ba	0.0378 ± 0.0095 Aa	3.93 ± 0.49 Ba	0.6645 ± 0.0666 Aa	34.74 ± 6.49 Ba
Crushed MA	27.93 ± 5.67 Aa	0.0520 ± 0.0101 Aa	5.39 ± 1.10 Bab	0.7937 ± 0.0352 Ab	33.32 ± 6.62 Aa
ME (20-200 µm)	33.28 ± 7.94 Aa	0.0465 ± 0.0056 Aa	8.70 ± 3.57 Aab	0.4905 ± 0.0947 Aa	41.98 ± 11.40 Aa
Crushed ME	32.70 ± 6.08 Ba	0.0522 ± 0.0142 Aa	9.33 ± 3.05 Ab	0.4859 ± 0.1925 Aab	42.03 ± 6.96 Ba

CP_L and k_L are carbon mineralization potential and rate constant of the labile pool of C aggregate.

CP_R and k_R are carbon mineralization potential and rate constant of resistant pool of C aggregate.

CP_T is the carbon mineralization potential of aggregate class based on non-linear regression fitting of the second-order model as following:

$$C_{\min}(t) = CP_L (1 - e^{-k_L t}) + CP_R (1 - e^{-k_R t}), \text{ and } CP_T = CP_L + CP_R.$$

Different capital letters indicate significant differences between management systems (t Student test, p < 0.05).

Different lower-case letters indicate significant differences between aggregate fractions (t Student test, p < 0.05).

Table 4-3 bis: Carbon mineralization potentials (CP_L , CP_R and CP_T) and rate constants (k_L and k_R , d⁻¹) of water-stable aggregate classes in conventional-tillage (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (mean ± standard deviation, n=3)

	Resistant-C		Labile-C		Total-C
	CP_R	k_R	CP_L	k_L	CP_T
a) In $\mu\text{gC}_{\text{min}} \text{g}^{-1}$ soil					
CT m/s					
MA (200-2000 μm)	356.2 ± 37.2 Ab	0.0434 ± 0.0042 Aa	33.5 ± 9.2 Aa	1.0363 ± 0.3134 Ab	389.6 ± 45.9 Ab
Crushed MA	386.0 ± 25.4 Ab	0.0480 ± 0.0122 Aa	59.0 ± 16.4 Aab	0.5914 ± 0.1301 Ab	445.1 ± 31.6 Ab
ME (20-200 μm)	228.0 ± 34.6 Aa	0.0420 ± 0.0062 Aa	35.0 ± 14.5 Aab	0.5909 ± 0.1777 Aab	263.0 ± 47.8 Aa
Crushed ME	215.7 ± 23.1 Aa	0.0461 ± 0.0246 Aa	62.6 ± 14 Ab	0.3742 ± 0.1163 Aa	278.2 ± 142.7 Aab
NT m/s					
MA (200-2000 μm)	976.0 ± 150.5 Bb	0.0424 ± 0.0056 Aa	166.2 ± 55.8 Bb	0.7086 ± 0.0613 Ab	1142.3 ± 188.5 Bb
Crushed MA	1056.2 ± 421.1 Bb	0.0473 ± 0.0172 Aa	152.5 ± 6.3 Bb	0.7475 ± 0.1205 Ab	1208.6 ± 418.8 Bb
ME (20-200 μm)	286.6 ± 66.6 Aa	0.0468 ± 0.0052 Aa	74.9 ± 29.9 Aa	0.4919 ± 0.0937 Aa	361.5 ± 95.3 Aa
Crushed ME	293.8 ± 67.0 Aa	0.0519 ± 0.0321 Aa	83.1 ± 23.7 Aa	0.4858 ± 0.3109 Aab	376.9 ± 189.0 Aa
b) In $\text{mgC}_{\text{min}} \text{g}^{-1}$ C soil					
CT m/s					
MA (200-2000 μm)	10.30 ± 1.02 Ab	0.0432 ± 0.0047 Aa	0.96 ± 0.25 Aa	1.0392 ± 0.3159 Ab	11.27 ± 1.25 Ab
Crushed MA	11.46 ± 1.51 Ab	0.0495 ± 0.0113 Aa	1.71 ± 0.35 Ab	0.606 ± 0.1491 Aab	13.17 ± 1.35 Ab
ME (20-200 μm)	6.73 ± 1.08 Aa	0.0423 ± 0.0057 Aa	1.01 ± 0.37 Aab	0.5873 ± 0.1454 Aab	7.74 ± 1.42 Aa
Crushed ME	6.54 ± 0.71 Aa	0.0441 ± 0.0061 Aa	1.91 ± 0.46 Ab	0.3718 ± 0.0115 Aa	8.45 ± 1.10 Aa
NT m/s					
MA (200-2000 μm)	21.32 ± 4.81 Bb	0.0378 ± 0.0095 Aa	2.72 ± 0.35 Bab	0.6645 ± 0.0666 Aa	24.04 ± 4.56 Bb
Crushed MA	19.33 ± 3.98 Bb	0.0520 ± 0.0101 Aa	3.73 ± 0.77 Bb	0.7937 ± 0.0352 Ab	23.06 ± 4.64 Bb
ME (20-200 μm)	6.19 ± 1.57 Aa	0.0465 ± 0.0056 Aa	1.62 ± 0.68 Aa	0.4905 ± 0.0947 Aa	7.81 ± 2.22 Aa
Crushed ME	6.08 ± 1.25 Aa	0.0522 ± 0.0142 Aa	1.74 ± 0.59 Aa	0.4859 ± 0.1925 Aab	7.82 ± 1.46 Aa

CP_L and k_L are carbon mineralization potential and rate constant of the labile pool of C aggregate.

CP_R and k_R : are carbon mineralization potential and rate constant of resistant pool of C aggregate.

CP_T : is the carbon mineralization potential of aggregate class based on non-linear regression fitting of the second-order model as following:

$$C_{\text{min}}(t) = CP_L (1 - e^{-k_L t}) + CP_R (1 - e^{-k_R t}), \text{ and } CP_T = CP_L + CP_R.$$

Different capital letters indicate significant differences between management systems (t Student test, $p < 0.05$).

Different lower-case letters indicate significant differences between aggregate fractions (t Student test, $p < 0.05$).

4.4. DISCUSSION

4.4.1. Soil water stable aggregates and aggregate associated C

Eleven years of CT m/s management have resulted in decrease of SOC and WSA when comparing with NT m/s management. Slaking and wet sieving of NT m/s and CT m/s samples showed that MA (200-2000 μm) from CT m/s was much less stable than those from NT m/s. Other workers also reported that WSA is higher in no-tillage management compared to tillage and generally related to the decrease of SOC content (Beare et al., 1994b; Albrecht et al., 1998; Six et al., 1999). Other research showed that tillage, by soil disturbance, disrupted soil aggregates (Balesdent et al., 2000; Six et al., 2000a) and released protected SOM by the increasing of soil respiration. Tillage significantly reduced MA (200-2000 μm) and increased ME (20-200 μm) content. Similar findings were related by Mikha and Rice (2004) who attributed this to the physical disruption of macroaggregates and the reduced aggregate stability in CT. The aggregate associated C (AOC) concentration in MA (200-2000 μm) class was less (CT m/s) or equal (NT m/s) to ME (20-200 μm) and MI (< 20 μm) AOC concentrations. Tisdall and Oades (1982), reported that MA (250-2000 μm) were generally formed by soil particles held together mainly by organic residue (roots and hyphae), highly concentrated in C. Therefore, the general trend was that AOC concentration decreased with aggregate size for aggregates smaller than 2 mm (Six et al., 2000b; Mikha et Rice, 2004). But in these studies, organic free-light fractions were not removed from each aggregate class, and they increased largely C concentrations of 250-2000 and 50-200 μm aggregates. In the present study, free-light fraction of organic matter was removed from whole soil before fractionation. Hence, MA and ME fractions were then composed by a larger fraction of clay and silt with a small fraction of intra-aggregate particulate organic matter, and this could explain the C concentration values observed. Similar trends were found by Beare et al. (1994b).

Similar to aggregate distribution, AOC distribution was affected significantly by tillage management. MA associated-C represented only 56 % of whole soil C in CT m/s but 70 % in NT m/s. An opposite trend was found in ME associated-C (32 and 18 % of whole soil C in CT m/s and NT m/s, respectively). Our results showed a high quantity of MA associated-C and a small quantity of ME associated-C in NT management, when comparing with CT management. In this study, the difference of AOC associated within MA between NT and CT (about 14 mgC g⁻¹ soil), represented approximatively the whole of the difference of total C between NT and CT (14 mgC g⁻¹ soil). Hence, tillage reduced the proportion of MA, inducing probably to a loss of SOC by mineralization and erosion, which could explained the lower SOC content under CT. Other studies also reported a greater macroaggregate associated-C in NT management than in CT (Beare et al., 1994b; Six et al., 2000b; Wright et Hons, 2005). According to several workers (Balesdent et al., 2000; Six et al., 2000a) soil disturbance (by

enhancing soil aeration and wettability) and disruption of MA caused by the tillage action, were the mainly cause of the decrease of MA associated-C in CT.

4.4.2. AOC Mineralization of aggregate-associated C

Amount ($\mu\text{g C}_{\text{min}}\cdot\text{g}^{-1}$ aggregate) of AOC mineralized in intact or crushed MA was smaller than in ME (Table 4-2a). This could be explained by a greater lability of AOC in ME than in MA. ME resulted in disrupting of unstable MA, which contained less humified, and more labile SOM (Table 4-2b). Furthermore, Balabane et al. (2004) found that aggregates larger than $200\ \mu\text{m}$ contained more C associated with clay fractions than smaller aggregates ($20\text{-}50$ and $50\text{-}200\ \mu\text{m}$) and Feller et al. (1991b) reported a great stabilization of C associated with clay fractions. NT management increased significantly C_{min} in MA and ME. Similar to the present studies, other workers reported that SOM in NT soils was often more labile and susceptible to microbial mineralization than those to CT management (Gupta et Germida, 1988; Six et al., 2002a), and Nierop et al. (2001), using pyrolysis techniques, found that SOM in pasture soil was composed by a relatively little decomposed, mainly plant-derived materials comprising polysaccharides, lignin, aliphatic compounds and proteins, resulting from fresh plant residue, and then more decomposable than SOM from arable soil, which was mainly composed by strongly humified plant material and microbially altered proteineous material.

Crushing aggregates increased slightly C mineralized from MA and ME classes, in both NT and CT management. Crushing aggregates lead to a deprotection of AOC which was physically protected within aggregates. In the present study, crushing aggregates lead only to a slightly higher C deprotection in MA (54 and $37\ \mu\text{g g}^{-1}$ soil in CT m/s and NT m/s respectively), than in ME (26 and $27\ \mu\text{g g}^{-1}$ soil in CT m/s and NT m/s respectively). However, for each aggregate class no differences between CT and NT management were observed. In Razafimbelo et al. (submitted, Chapitre 2), crushing whole soil ($0\text{-}2\ \text{mm}$), resulted in an increase of total C mineralization greater in NT m/s than in CT m/s (Table 4-4). So, there is a difference between the effect of crushing on NT and CT treatments when MA or whole soil are considered. But, for the whole soil, the organic free light fractions (F-LF) were not removed and were crushed with aggregates whereas F-LF was eliminated in the mineralization study of MA and ME. Then, F-LF fractions were readily available for microbial decomposition and increased the C_{min} amount in crushed soil. This was supported by the findings of Grandière et al. (submitted, Chapitre 2, Figure 4-3) on the same soil who reported a greater free light fractions named MOPe200-2000 in NT m/s than in CT m/s. Results found in the present study were at the same level than those published by Elliot (1986) and Gupta and Germida (1988) (macroaggregate protected C of 44 and $73\ \mu\text{g g}^{-1}$ soil, in native sod and native soil, respectively). However, SOC physically protected in proportion of total AOC (Table 4-2b) was smaller than some values in the litterature (Chevallier et al., 2004). In the present study, MA protected C was 0.35 and $0.32\ \%$

of total macroaggregate-C in CT m/s and NT m/s, and accounted for 23 and 14 %, of the mineralizable C from MA, respectively. Beare et al. (1994a) found a macroaggregate protected-C of 0.9 % of total aggregate-C, which accounted also for 23% of the mineralizable C from macroaggregates in no-tillage management. But, in contrast with the present results, these authors found a significant decrease of protected C within macroaggregates in CT management, and attributed this to higher turnover of macroaggregates in CT. The present study showed that the percent of C protected inside MA and ME were very low (Table 4-2b), slightly higher in macro- than in mesoaggregate, and no different between CT and NT management.

Fitting the C_{min} data during 28-days of mineralization (Table 4-3) showed that (i) the resistant C pool accounted for 80 % of the total potentially mineralizable C (CP_T), and (ii) CP_T of MA accounted approximatively for 1 % and 2 % of total soil C for CT and NT, respectively, and CP_T of ME was about 0.8 % of total soil C. These values were largely lower than those found by Chevallier et al. (2004) for a Vertisol, who found CP_T values more than 6.6 % of total soil C under pasture. Hence, the CP_T amount in the present study can be considered as very small. Therefore, despite of the large SOC and MA contents, physically protected AOC is relatively low at the MA and ME scales (protection at a scale $> 50 \mu m$). The results of Grandière et al. (submitted, Chapitre 3) on the same treatments revealed that NT management resulted in increase of (i) internal particulate organic matter in coarse (MOPi200-2000) and fine (MOPi50-200) sandy fraction of aggregates $> 50 \mu m$ and (ii) SOM associated to silt+clay particles (0-20 μm). MOPi200-2000 and MOPi50-200 exhibit C concentrations values of 50 mg g⁻¹ fraction, relatively similar to the C concentration of SOM associated to silt+clay fraction (41 mg g⁻¹ fraction). Furthermore, microscopic observations of these fractions showed a recognizable plant derived-OM, but surrounded by a layer of clay particles. Thus, these fractions were not exposed to microbial mineralization when the aggregates were crushed, because they were highly humified or strongly adsorbed on clay+silt fractions (0-20 μm) where they were physico-chemically protected (Feller et al., 1991b). This could explain the low C_{min} level and the low crushing effects of aggregates on C mineralization.

One confirmation of that physico-chemically protection of SOM in 0-20 μm fraction is that a large part of SOC stored in NT treatment is associated to the 0-20 μm fraction (Figure 4-3b, Grandière et al., submitted, Chapitre 3). This storage could be due to the andic properties of the studied soil, conferring to it a high SOM adsorption capacity (Duchaufour, 2001).

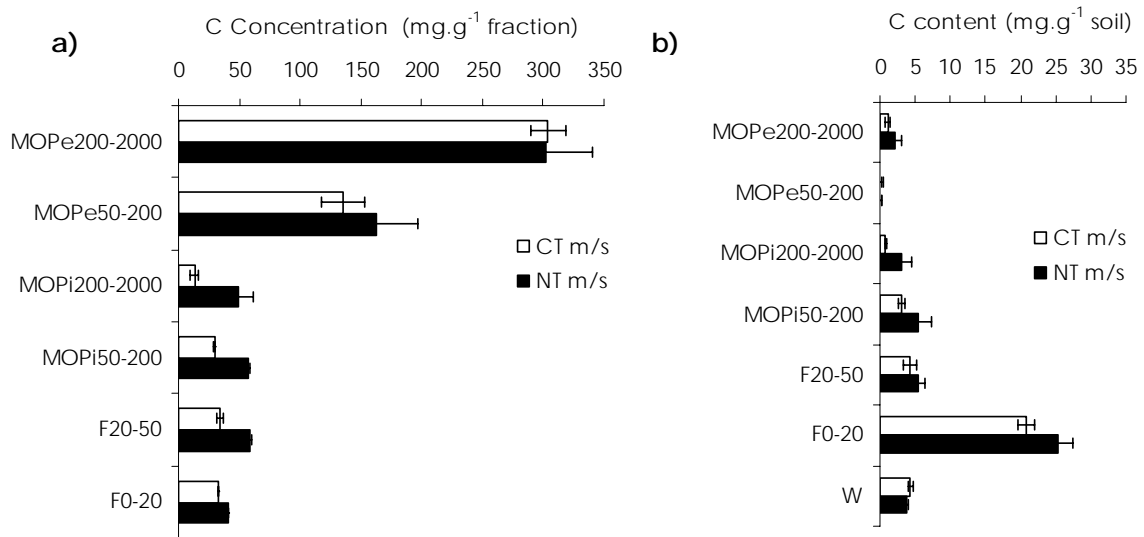
In the present study, chemically protection of SOM, due to its chemical composition could also occur in NT management. The chemical recalcitrance of SOM is inherent to residue quality or is attained during the SOM decomposition by condensation and complexation of residue (Six et al., 2002a). But this third type of SOM protection was not studied here.

Table 4-4 : Amount of C mineralized (in 28 days) and protected-C in macroaggregates MA (200-2000 μm), mesoaggregates ME (20-200 μm) and whole soil (0-2000 μm). Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

	CT m/s		NT m/s	
	$\mu\text{g C g}^{-1}$ soil			
Amount C mineralized				
MA (200-2000 μm)	288,8 \pm 49,0	a	839,8 \pm 146,7	b
Crushed MA	342,8 \pm 60,1	a	876,5 \pm 127,8	b
ME (20-200 μm)	192,7 \pm 32,9	a	282,9 \pm 67,9	a
Crushed ME	218,9 \pm 39,36	a	310,0 \pm 76,8	a
Whole soil (0-2000 μm)*	545,4 \pm 66,3	a	1509,8 \pm 184,3	b
Crushed whole soil*	594,1 \pm 96,7	a	1708,2 \pm 324,6	b
Protected-C				
Protected-C MA	54,0 \pm 77,5	a	36,7 \pm 194,5	a
Protected-C ME	26,2 \pm 51,3	a	27,2 \pm 102,4	a
Protected-C Whole soil*	48,7 \pm 105,4	a	198,4 \pm 365,1	a

* Data of Razafimbelo et al. (submitted, chapitre 2).

Different lower-case letters indicate significant differences between CT m/s and NT m/s (t Student test, $p < 0.05$)



MOPe200-2000: Particulate organic matter external of aggregates, size 200-2000 μm
MOPe50-200: Particulate organic matter external of aggregates, size 50-200 μm
MOPi200-2000: Particulate organic matter internal of aggregates, size 200-2000 μm
MOPi50-200: Particulate organic matter internal of aggregates, size 50-200 μm
F20-50: Organic matter associated with coarse silt, size 20-50 μm
F0-20: Organic matter associated with fine silt and clay particles, size 0-20 μm

Figure 4-3 : C concentrations (a) and contents of particle size and density fractions at 0-5 cm depth. Andranomanelatra, Madagascar. (Grandière et al., submitted, Chapitre 3).

4.5. CONCLUSION

Eleven years of NT management showed a potential for C storage in Madagascar Highlands. Significant increase of SOC was found in surface soil (0-5 cm) in NT when comparing with CT management. NT system also increased the proportion of MA when comparing with CT, and decreased the proportion of ME. AOC of MA and ME were not different, and macroaggregate AOC constituted the greater part of the difference in SOC storage between NT and CT management. However, comparison of C mineralization in intact and crushed MA and ME did not result in a large release of physically protected C in NT and CT management. Moreover, mineralization potentials of the studied MA and ME were very low. So, physical protection is not the dominant protection process in the studied soil. These results lead to the hypothesis that the main protection process could be a phyco-chemical one, with sorption of SOC on the 0-20 µm fraction. That is in agreement with the andic properties of the studied soil and the increase in SOC storage observed for the NT treatments in this fraction.

4.6. REFERENCES

- Albrecht A., Angers D. A., Beare M. H. et 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.
- Balabane M. et Plante F. A., 2004 - Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. *European Journal of Soil Science*, 55, 415-427.
- Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 2000 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53, 215-230.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795.
- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 777-786.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et 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.
- Duchaufour P., 2001 - Introduction à la science du sol. Paris, Dunod.
- Elliott E. T., 1986 - Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 627-633.

- Feller C., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: Structure and organic matter storage in agricultural soils. Carter M. R. et Stewart B. A. (Eds). CRC Press, New York.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J., Toutain F. et Morel J., 1991b - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris*, 12, Sér. 2, 1491-1497.
- Grandière I., Razafimbelo T., Barthès B., Blanchart E., Louri J., Ferrer H., Chenu C., Wolf N., Albrecht A. et Feller C., submitted, Chapitre 3 - Effet de différents systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. Soumis à *Etude et Gestion des Sols*.
- Gupta V. V. S. R. et Germida J. J., 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.
- Hassink J., Bouwman L. A., Zwart K. B., Bloem J. et Brussaard L., 1993 - Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57, 105-128.
- Kemper W. D. et Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs*. Klute A. (Ed.). Madison, WI.
- Mikha M. M. et Rice C. W., 2004 - Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 809-816.
- Nierop K. G. J., Pulleman M. M. et Marinissen J. C. Y., 2001 - Management induced organic matter differentiation in grassland and arable soil: a study using pyrolysis techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 755-764.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Raunet M. et Séguy L., submitted, Chapitre 2 - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres de Madagascar. Soumis à *Etude et Gestion des Sols*.
- Six J., Conant T., Paul A. et Paustian K., 2002a - Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Six J., Elliott E. T. et Paustian K., 2000a - Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.

- Six J., Paustian K., Elliott E. T. et Combrink C., 2000b - Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681-689.
- Six J., Elliott E. T. et Paustian K., 1999 - Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1350-1358.
- Soil Survey Staff, 2003 - *Keys to Soil Taxonomy*. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Wright A. L. et Hons F. M., 2005 - Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 141-147.

CONCLUSIONS, LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE



Les performances agronomiques des systèmes SCV par rapport au système de labour conventionnel ont été déjà mises en évidence à Madagascar par Michellon et al. (2003) et par les rapports de fin de campagne de l'ONG TAFE. Dans ce travail, nous avons cherché : (i) à évaluer leur potentialité environnementale, notamment, leur effet sur le niveau et les formes de stockage de C dans les sols des Hautes Terres malgaches, ainsi que (ii) à appréhender le mode de protection de ce C stocké contre la minéralisation microbienne.

1- SCV, TENEURS ET STOCKS DE C

Divers travaux dans la littérature rapportent une augmentation significative des teneurs et des stocks de C dans les sols, quand ceux-ci ne sont pas labourés (Bayer et al., 2000 ; Sà et al., 2001a; Sà et al., 2001b ; Six et al., 2002b). C'est aussi le cas observé dans la présente étude pour un sol ferrallitique argileux à caractère andique du dispositif d'Andranomanelatra sur les Hautes Terres malgaches (Chapitre 2). Pour les systèmes SCV étudiés, les teneurs en C du sol de la couche 0-5 cm sont significativement élevées (50 mg.g⁻¹ sol) par rapport au système de labour conventionnel CT (30 mg.g⁻¹ sol). Les différences entre NT et CT sont déjà moins marquées pour la couche de 5-10 cm. Les valeurs des stocks de C calculés à masse de sol équivalente suivent la même tendance que celles des teneurs avec des valeurs plus élevées pour SCV que pour CT sur l'ensemble de la couche 0-20 cm. Toutefois, les différences de stocks ne sont plus significativement différentes si l'on considère la couche 0-40 cm. Ceci a été attribué à la probable existence d'une variabilité initiale assez forte des teneurs en C des couches 20-40 cm, ne permettant donc pas de tester un effet traitement de faible amplitude.

Le stockage de C mesuré sous SCV, par rapport à CT, est élevé et varie de 6 à 11 MgC.ha⁻¹ en 11 ans, soit une variation annuelle de 0,55 à 1,01 MgC.ha⁻¹.an⁻¹, suivant les systèmes étudiés. Ces accroissements sont prioritairement attribués aux fortes quantités de résidus organiques restitués sous systèmes SCV, par rapport au système en labour conventionnel avec exportation de résidus (Bayer et al., 2000; Salinas-Garcia et al., 2001). Les rapports « R = C stocké dans le sol/C apporté par biomasse » sont égaux à 0,23 ; 0,18 et 0,11 pour les 3 systèmes SCV (Figure 5-1), soit un « taux d'humification » (selon Hénin) variant de 11 à 23 %. Si les valeurs de 0,11 et 0,18 apparaissent cohérentes, celle à 0,23 (système NT m/s) apparaît un peu élevée. Nous n'avons toutefois pas d'explication claire pour expliquer cette forte valeur pour ce système SCV, alors que les restitutions les plus importantes sont celles par le système NT m/m-d. A moins que la situation témoin « labour conventionnel » n'ait subi des processus d'érosion pendant la durée de l'étude, et donc perdu du C sous forme particulaire, ce qui augmenterait artificiellement toutes les valeurs apparentes de stockage de C sous SCV puisqu'elles sont estimées par différence entre SCV et CT.

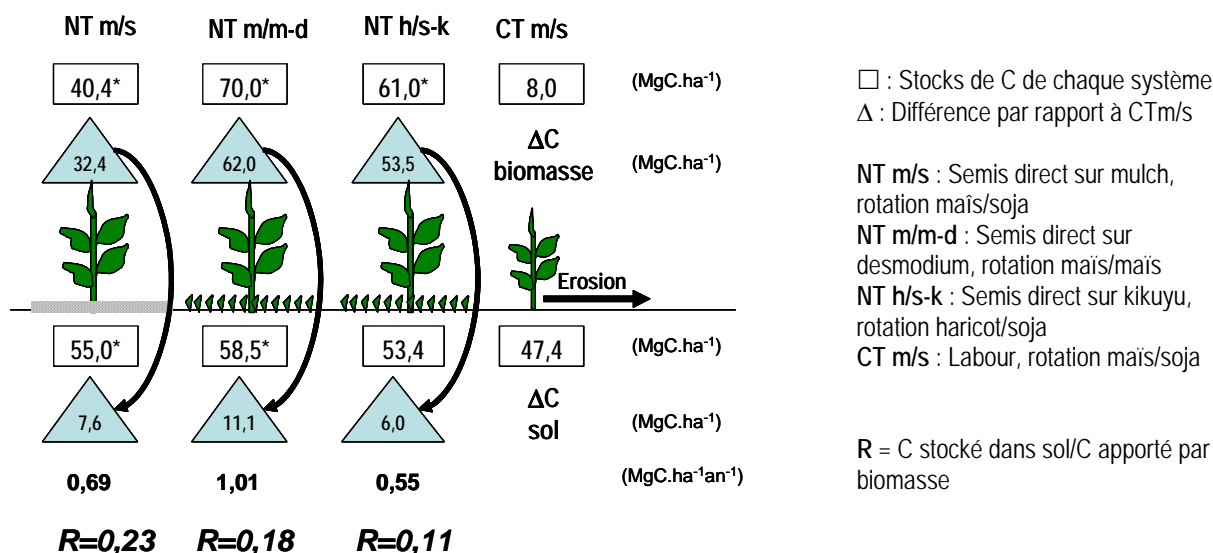


Figure 5-1 : Bilan de C sur 0-20 cm sur les systèmes en SCV et en labour conventionnel du dispositif d'Andranomanelatra.

Pour conclure, globalement, les différents traitements SCV mis en place sont tout à fait performants pour le stockage de C dans le sol avec des accroissements annuels compris entre 0,5 et 1,0 ce qui est nettement supérieur aux valeurs moyennes données dans la littérature, inférieures généralement à 0,5 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ (Six et al., 2002b), mais correspondant aussi à des niveaux de restitution de biomasse nettement inférieurs à ceux estimés dans la présente étude.

2- SCV ET STABILITE DES AGREGATS ET PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL

La structure du sol est un élément déterminant pour le stockage de C dans le sol. La stabilité des agrégats peut être influencée par le mode de gestion du sol (Chapitres 2 et 4). Dans la présente étude, la stabilité structurale du sol étudié est naturellement élevée, comme c'est souvent le cas des sols ferrallitiques argileux, riches en oxydes et hydroxydes de fer et d'argile kaolinite (Six et al., 2002b ; Razafimbelo et al., 2003) surtout si les teneurs en MO sont élevées et la texture très argileuse. Cette stabilité structurale naturellement élevée, même pour CT, n'empêche pas qu'elle soit encore améliorée par les systèmes SCV. Par rapport à CT, les SCV étudiés sont plus riches en macroagrégats MA (200-2000 μm) stables que CT dans les couches 0-5 et 5-10 cm. Cette teneur élevée en MA stables sous NT par rapport à CT, se fait aux dépens des mésoagrégats ME (20-200 μm), alors qu'il n'y a pas de différence aux niveaux des microagrégats MI (0-20 μm). Nos résultats ont montré une corrélation positive et significative (R=0,41, n=24) entre le taux de MA et la teneur en C du sol, ainsi qu'une distribution préférentielle du C (80 % de C total) dans les MA stables.

Quelques observations qualitatives de terrain (et des travaux en cours) indiquent qu'une proportion non négligeable des MA sont d'origine faunique. Or, l'on sait que les systèmes à

mulch, en milieu tropical, ont un effet rapide et souvent spectaculaire sur l'activité faunique du sol (Mele et Carter, 1999; De Luca, 2002; Brown et al., 2003) avec comme conséquences, entre autres, la fabrication de MA stables (si les teneurs en MO sont élevées), car enrichis en C par suite de l'activité de mélange des débris organiques et du sol par la faune (Blanchart, 1992; Ketterings et al., 1997; Marinissen et Didden, 1997 ; Blanchart et al., 2004). C'est le cas des situations SCV étudiées ici.

3- SCV ET DISTRIBUTION DE C DANS LES FRACTIONS GRANULO-DENSIMÉTRIQUES.

La localisation du C stocké dans les fractions granulo-densimétriques du sol est un bon indicateur de la stabilisation du C sous systèmes SCV, puisque, selon Feller et Beare (1997), le temps de renouvellement du C varie fortement selon la nature des fractions. Selon ces auteurs, et pour des sols tropicaux, les fractions grossières (200-2000 μm), possèdent un temps de demi-vie de l'ordre de 8 ans, tandis que celui des fractions fines 2-50 et 0-2 μm est respectivement de 18 et 22 ans. D'autre part, les matières organiques particulaires (MOP) externes (MOPe) aux agrégats sont plus facilement minéralisables que celles internes aux agrégats (MOPi) par suite d'une protection physique de ces dernières.

Dans la présente étude, les traitements SCV influent, de la manière suivante, sur la distribution de C dans les différentes fractions granulo-densimétriques (Chapitre 3) :

- Les MOP externes, sont en très faibles quantités et ces quantités ne diffèrent pas entre SCV et CT, malgré des niveaux de restitution de débris organiques très différents selon les traitements. Les différences de C entre SCV et CT, sont donc dues aux autres fractions,
- Pour la couche 0-5 cm, on note une augmentation à la fois, des MOP internes aux agrégats stables (MOPi > 50 μm) et des MO associées aux fractions fines (< 50 μm),
- Pour la couche 5-10 cm, seules les MO associées aux fractions fines augmentent sous SCV.

L'absence de différence entre traitements pour les MOPe, compte-tenu des grandes différences dans les niveaux de restitution peut s'expliquer par le fait que les MOPe ne sont pas du tout protégées ni physiquement, ni physico-chimiquement dans le sol, et donc, quelles que soient les entrées de C, les MOPe sont minéralisées.

Les MOP internes aux agrégats représentent environ 30 % de la différence entre SCV et CT et résultent, d'une part, d'un apport plus important de MO au sol et intégré par la faune ou les racines dans les MA stables, d'autre part, d'une protection physique plus importante de la MO à l'intérieur des MA stables sous SCV que sous CT. La dynamique de ces fractions est alors à mettre directement en relation avec celle de la stabilité des agrégats du sol.

L'accumulation de C dans les fractions fines du sol (< 50 μm) sous SCV est observée pour les deux couches 0-5 et 5-10 cm. Pour ces fractions, la MO est fortement adsorbée sur les particules minérales du sol, et devient inaccessible aux microorganismes (Feller et Beare,

1997). Elle y est alors relativement durablement protégée physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne. La nature (amorphe ou résiduelle) et l'origine même de cette MO (taille < 50 μm) est multiple et ont été discutées par Razafimbelo et al. (2003) pour des systèmes à mulch sous canne à sucre au Brésil. La MO amorphe associée aux colloïdes du sol, peut provenir : (i) de la fraction soluble des restitutions organiques elles-mêmes et qui vont s'adsorber sur les colloïdes du sol, (ii) des MO amorphes correspondant aux métabolites microbiens des exsudats (racinaires et microbiens) (Feller et al., 1991b), ou encore, (iii) des MO solubilisées lors du transit intestinal dans les organismes fauniques (Villénave et al., 1999). Les MO sous formes de particules inférieures à 50 μm sont, soit des débris très humifiés, soit des microagrégats organo-minéraux, les deux formes provenant de l'action de la faune par division des débris et constitutions de microagrégats.

La méthodologie utilisée dans cette étude, (séparation densimétrique à l'eau sans dispersion suivi d'un fractionnement granulométrique avec forte dispersion) a permis d'isoler des fractions externes et internes aux agrégats, et les résultats rappelés ci-dessus montrent que ces fractions ont des dynamiques très différentes.

Ceci nous a conduit à essayer de quantifier le processus de protection physique de la MO à l'intérieur des agrégats stables.

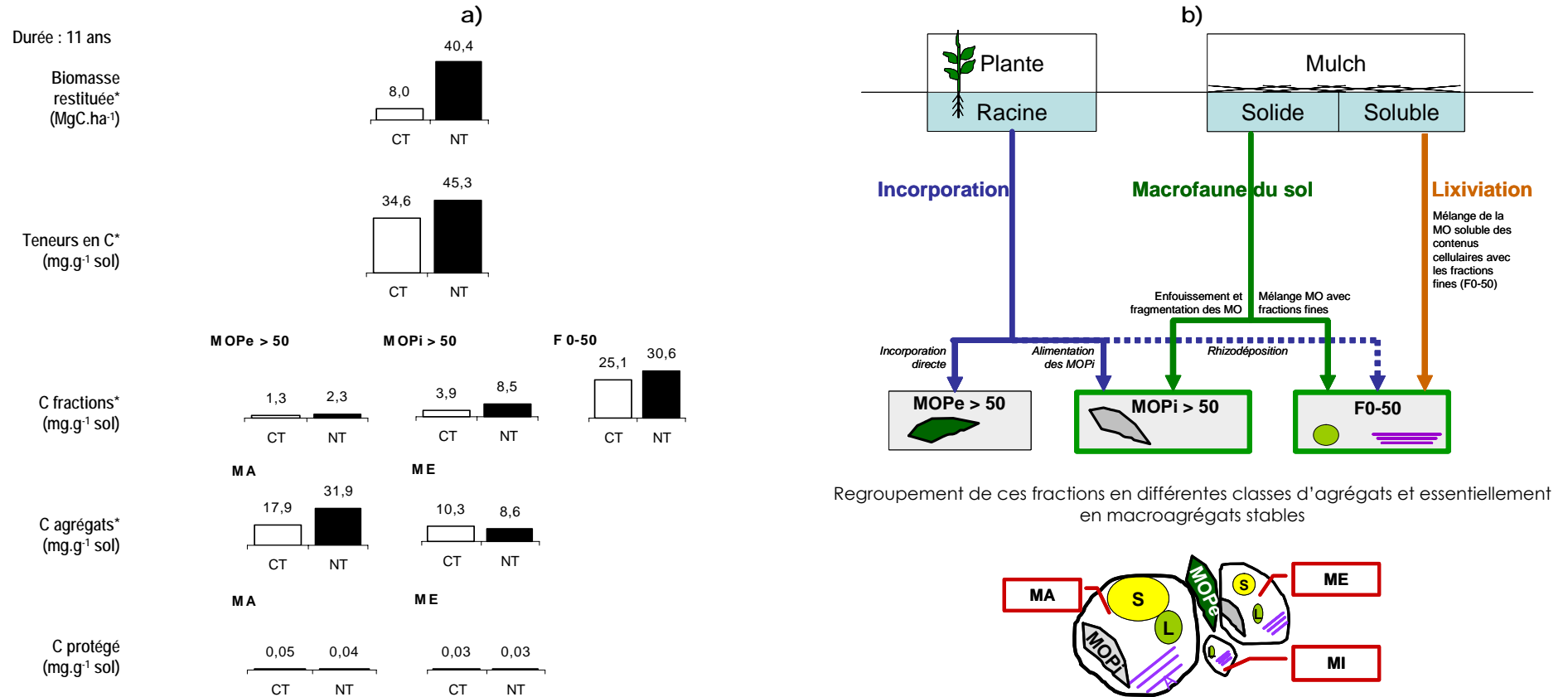
4- PROTECTION PHYSIQUE DU C CONTRE LA MINÉRALISATION MICROBIENNE DANS LES SYSTEMES SCV

Les MOP internes aux agrégats ($\text{MOP}_i > 50$) sont plus importants sous SCV par rapport à CT (Chapitre 3), laissant supposer l'existence d'une protection physique de la MO dans les agrégats stables > 50 μm . Cette protection a été quantifiée à 2 échelles, celle du sol 0-2 mm (Chapitre 2) et celle des agrégats > 50 μm (Chapitre 4). Pour mettre en évidence cette protection, on a comparé, dans des conditions standard de température et d'humidité, les quantités de C minéralisé C (C_{min}) de l'échantillon (sol 0-2 mm ou agrégat) non broyé (MO protégée) à celle du même échantillon broyé (MO déprotégée), la différence « broyée – non broyée » exprimant l'importance de la protection physique. D'une manière générale, les quantités de C_{min} ($\text{mg } C_{\text{min}} \cdot \text{g}^{-1}$ échantillon) et les taux de minéralisation ($\text{mg } C_{\text{min}} \cdot \text{g}^{-1} \text{C}$ échantillon) sont plus élevés sous SCV que sous CT. Ceci est dû au fait que : (i) les quantités de C total sont plus élevées sous SCV, et que (ii) les proportions de MOP_e et MOP_i (en % du C total), des fractions facilement minéralisables, sont plus importantes sous SCV. Il est connu (Nierop et al., 2001) que les sols labourés, cultivés intensément et avec de faibles niveaux de restitution ne contiennent que de faibles quantités de MOP et présentent donc souvent un faible taux de minéralisation. Toutefois, le niveau de protection physique mesuré est faible que ce soit pour le sol 0-2 mm ou pour les MA et ME, alors que la MO a été déprotégée par un broyage à 50 μm . En effet, le C labile protégé à l'intérieur des MA et ME varie de 27 à 54 $\mu\text{gC} \cdot \text{g}^{-1}$ sol sous les deux systèmes, soit seulement de 0,034 à 0,194 % du C total du sol, et

de 10 à 19 % du C total minéralisé, valeurs largement inférieures à celles données par la littérature.

Ce faible niveau de protection physique aux échelles $> 50 \mu\text{m}$, alors que plus de 80 % de la différence de C entre les systèmes SCV et CT sont localisés dans les MA stables (Chapitre 4), laisse supposer que la protection physique, si elle existe, l'est à des échelles $< 50 \mu\text{m}$. Les MO des agrégats de tailles supérieures à $50 \mu\text{m}$ sont constituées de MOPi ($\text{MOPi} > 50$) et d'une partie de la fraction granulométrique 0-50 μm . On s'attendrait à ce que les MOPi , une fois « déprotégées » soient facilement minéralisables, mais les observations en microscopie électronique nous ont montré qu'elles sont fortement entourées de particules d'argiles (Chapitre 3), ce qui pourrait expliquer le faible taux de minéralisation finalement observé pour les MA et ME broyés. Elles peuvent aussi présenter une récalcitrance biochimique à la minéralisation microbienne. Quant à la fraction F 0-50, elle est protégée physico-chimiquement par adsorption sur les colloïdes du sol, et ce, d'autant que le sol est très argileux et à caractère andique, mais aussi probablement protégés physiquement dans les microagrégats du sol.

Figure 5-2 : Synthèse des résultats obtenus sur le système NT m/s et système CT m/s pour la couche de 0-5 cm de profondeur, Andranomanelatra. (a), et schéma explicatif des agents et processus pouvant être mis en jeu lors du stockage de C sous SCV (b).



NT : système semis direct sur rotation maïs/soja ; CT : système labour sur rotation maïs/soja.

MOPe > 50 : Matière organique particulaire externes aux agrégats, de 50-2000 µm, obtenues par le fractionnement granulo-densimétrique (Chapitre 3).

MOPi > 50 : Matière organique particulaire internes aux agrégats, de 50-2000 µm, obtenues par le fractionnement granulo-densimétrique (Chapitre 3).

F 0-50 : Fraction organique associée aux fractions fines de 0-50 µm, obtenues par le fractionnement granulo-densimétrique (Chapitre 3).

MA : Macroagrégats stables à l'eau, de 200-2000 µm, obtenus par la méthode Kemper et Rosenau (1986), Chapitre 4.

ME : Mésoagrégats, de 20-200 µm, obtenus par la méthode Kemper et Rosenau (1986), Chapitre 4.

S : Sables

L : Limons

A : Argile

* Différence significative observée entre NT et CT (p < 0,05).

5- CONCLUSION GENERALE SUR L'ACCUMULATION DE C DANS LES SOLS PAR LES SYSTEMES SCV

Les résidus de culture et de couverture vivante laissés en mulch à la surface du sol sous systèmes SCV ainsi que les racines des plantes de couverture, constituent un apport de C supplémentaire (de 14,7 mgC.g⁻¹ sol pour la couche 0-5 cm) alimentant le pool de C stocké dans le sol (Figure 5-2), en comparaison avec le système labouré CT. Deux compartiments sont concernés par ce stockage : F < 50 µm suite à une protection de type physico-chimique, F > 50 µm suite à une protection de type physique.

Le C stocké dans la fraction fine < 50 µm du sol (5,5 mgC.g⁻¹ sol) et protégé physico-chimiquement, l'est selon deux processus : d'une part par la MO soluble, issue de la libération des contenus cellulaires lors de la décomposition de la MO fraîche par les microorganismes du sol, qui est adsorbée sur les fractions fines du sol (F 0-50) ; et d'autre part par l'action des vers de terre, plus importante sous SCV (Rabary et al., en cours), qui incorporent la MO au sein de la matière minérale lors du transit intestinal, conduisant à une alimentation de la MO associée à la fraction fine (F 0-50) du sol. La forte capacité d'adsorption des fractions fines observée dans cette étude, est renforcée par les propriétés andiques du sol étudiés.

Le C protégé physiquement l'est sous forme de MOP internes aux agrégats, (MOPi, 4,6 mgC.g⁻¹ sol), qui ont été incorporées au sol par l'action de la faune qui en les ingérant, les brassent avec la matière minérale, expliquant ainsi leur enrobage par des fractions minérales (Chapitre 3), et, qui plus est, les protégeant physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne lors de la destruction des agrégats. Ces MOPi sont aussi alimentées par les résidus racinaires, décomposées et entourées de fractions minérales fines.

6- LIMITES DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES

6.1. Les limites de la présente étude

Arrivée à la fin de cette thèse, je suis consciente d'un certain nombre de limites à ce travail, en particulier d'ordre méthodologique, ce que j'envisage d'approfondir à l'avenir, si mon parcours professionnel me le permet.

A. Synchronie versus Diachronie

Dans ce travail, nous n'avons traité des différences de stocks de C (ΔC) entre SCV et CT que « relativement », c'est à dire par simple comparaison de SCV et CT en faisant l'hypothèse que les valeurs plus élevées de SCV **par rapport** à CT seraient dues à une augmentation absolue de C par SCV et non à une diminution de C sous CT. Ceci provient du fait que, dans le contexte de terrain imposé, l'approche synchronique était la seule possible, c'est à dire la comparaison, au même instant t, d'une parcelle CT (qui sert de témoin) et supposée représentative de l'état de la parcelle SCV avant que celle-ci ne soit cultivée avec la nouvelle alternative de semis direct, à des parcelles SCV. Mais Bernoux et al. (2006b) ont bien montré tous les biais possibles, en terme de « séquestration

du C », qui pouvaient être induits par une telle approche. La séquestration du C, vue du côté du C du sol, est la fixation et la transformation, via la plante, de C-CO₂ de l'atmosphère par le sol après sa transformation en C organique. Or les ΔC mesurés par l'approche synchronique peuvent résulter, soit d'une augmentation de C du sol par « séquestration » sous l'effet positif des SCV, soit d'une perte de C sous CT par érosion hydrique, processus qui n'a aucun rapport avec les flux de CO₂ de la « séquestration », mais qui est seulement un transfert de C organique de l'amont vers l'aval du paysage, soit de l'addition de ces deux effets. Or, le transfert de C érodé n'est pas un phénomène négligeable en milieu tropical, en particulier sur les parcelles cultivées dont le sol reste nu à certaines époques du cycle cultural. Dans un ouvrage (à paraître, Roose et al., 2006, eds), il est montré que l'ordre de grandeur du C érodé à la parcelle pouvait être équivalent à celui du C « séquestré ». C'est d'ailleurs bien ce problème qui nous a fait éliminer (Chapitre 1) la situation d'Ibity originellement retenue pour cette thèse. Dans le cas du dispositif d'Andranonamelatra, on peut toutefois penser que l'effet « C érodé » n'est pas très important puisque, hormis un traitement SCV, il y a une bonne adéquation entre le supplément de C restitué au sol par les résidus de SCV (ΔC biomasse) et le C stocké dans le sol sous parcelles SCV (ΔC sol), le rapport ΔC sol / ΔC biomasse étant compris entre 0,1 et 0,2, soient des taux d'humification de 10 à 20 %, tout à fait logiques. Des taux d'humification plus faibles de certains travaux de la littérature (7 %) peuvent toutefois supposer l'existence de C érodé, deux scénarios sont alors possibles, les valeurs au temps t_0 n'étant pas connues (Figure 5-3) :

- Scénario 1 : L'état initial (temps t_0) est une situation dégradée, (proche de CT), et qui fut ensuite convertie en SCV. Dans ce cas, les différences observées au temps t_{11} (teneurs en C, MA stables, C des agrégats et C des fractions) seraient attribuées à des augmentations sous SCV, la situation labourée étant considérée comme stable ;
- Scénario 2 : L'état initial (t_0) est une situation naturelle (jachère) riche en C (teneurs en C > 50 mgC.g⁻¹sol), et qui fut ensuite convertie en système SCV ou système CT. Dans ce cas, les différences observées au temps t_{11} entre NT et CT (teneurs en C, MA stables, C des agrégats et C des fractions), seraient attribuées à des conservations sous SCV et à des pertes sous CT par minéralisation et par érosion.

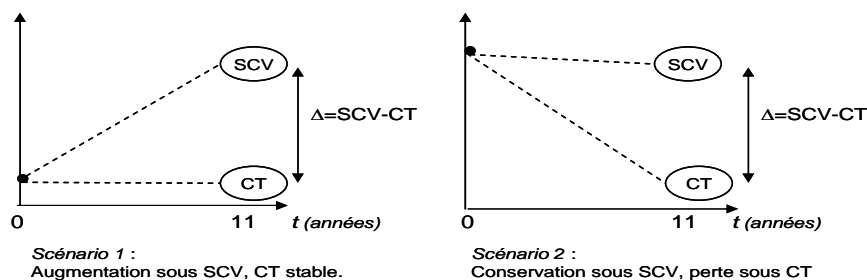


Figure 5-3 : Scénarios d'interprétation des différences observées entre systèmes SCV et CT.

Il n'en reste pas moins qu'il faudrait confirmer l'amplitude de ce ΔC sol sur des dispositifs diachroniques (prélèvements d'une même parcelle au temps zéro t_0 , puis au temps t_n n années plus tard), et donc vérifier que ΔC sol reste bien dans l'intervalle de 0,5 à 1,0 tC.ha⁻¹.an⁻¹ pour pouvoir assurer qu'il s'agit bien d'un C « séquestré » suite à l'installation des systèmes SCV. Un tel dispositif a été mis en place, il y a 2 ans environ (projet FFEM), dans le même contexte pédoclimatique, et a été échantillonné pour cet objectif au temps t_0 . Nous espérons pouvoir l'analyser au cours des prochaines années.

B. Quantités de biomasses restituées. Les restitutions aériennes et racinaires ont été simplement estimées à partir des résultats de rendements des cultures et des couvertures et diverses équations données dans la littérature. Une étude de quantification au champ reste à faire pour pouvoir confirmer les valeurs des taux d'humification mentionnées ci-dessus. Il reste aussi à analyser l'importance de la qualité de ces restitutions comme déterminant du stockage de C dans le sol (cf. 6.2).

C. Nature du C stocké

Compte-tenu de la forte stabilité structurale de ces sols, nous n'avons pu mettre au point une méthode de fractionnement physique de la MO qui permette une dispersion optimale des argiles du sol. Ceci nous a obligée à un regroupement des fractions limoneuses et argileuses en une seule fraction < 50 μm , et donc nous permettre difficilement de préciser la forme de stockage : argile ou limons ? alors que c'est bien dans ces compartiments que se fait l'essentiel du stockage de C.

D. Protection de la MO du sol

Initialement, nous avons prévu, pour l'étude de la protection de la MO dans le sol, les étapes séquentielles d'étude suivantes :

- a) Mise en évidence d'un effet de protection « physique » au niveau du sol total (0-2 mm) par tests respirométriques sur sol total broyé et non broyé,
- b) Mise en évidence d'un effet de protection « physico-chimique » au niveau du sol total (0-2 mm) par fractionnement physique de la MO et localisation du C stocké,
- c) Localisation des sites de protection « physique » au niveau de différentes classes d'agrégats par tests respirométriques sur agrégats broyés et non broyés,
- d) Nature des formes protégées au sein des agrégats et processus concernés (« physique », « physico-chimique » ou « biochimique ») par couplage de fractionnements physiques des MO de chaque classe d'agrégat, caractérisation chimique et spectroscopique des différentes fractions et tests de respirométrie sur les fractions séparées.

Si les trois premiers points ont été abordés dans cette thèse, le temps nous a manqué pour aborder le point d).

6.2. Quelques perspectives

Elles sont de deux ordres :

- améliorer et compléter la présente étude dans le sens indiqué en 6.1.,
- ouvrir de nouvelles pistes de recherche concernant les SCV à Madagascar et concernant la séquestration du C.

Ces nouvelles pistes sont au nombre de trois.

A. Sur les processus de protection du C

Comme mentionné en 6.1 .D.d), nous n'avons pas abordé l'ensemble des trois types de protection du C, en particulier ce qui concerne la « récalcitrance », protection contre la minéralisation due à la nature chimique même de certaines fractions organiques du sol elle-même dépendante de la qualité des restitutions organiques au sol. Aborder ce point-là nécessitera la recherche de collaborations à l'extérieur de Madagascar en analyses biochimiques et spectroscopiques des apports végétaux et des MO du sol.

B. Sur la diversité des systèmes sol-SCV existant à Madagascar

Dans cette thèse, nous n'avons étudié qu'une seule situation pédoclimatique, mais nous avons mentionné l'existence de nombreuses situations, parcelles agronomiques (sites SCV de TAFA/CIRAD, dans le Sud Est, Sud Ouest et Centre Est de Madagascar) ou paysannes, dans des contextes pédo-climatiques très contrastés, et qui mériteraient d'être étudiées.

C. Modélisation de la dynamique du C sous SCV

Il est nécessaire, de caler des modèles existants de dynamique du C du sol (RothC, Century, etc.) aux situations SCV de Madagascar, dans le cas où cette pratique se développe dans les prochaines années. Et si l'on veut renseigner les décideurs sur le bénéfice attendu à l'échelle nationale pour la séquestration du C, il faut pouvoir utiliser l'outil modélisation. Ce calage ne peut se faire que sur des « chronoséquences » : situations SCV identiques, mais d'âges d'implantation différents. Ces dispositifs sont à chercher.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- AFNOR, 2004a - Détermination de la caractéristique de la rétention en eau. Méthode de laboratoire (ISO 11274:1998). In: Evaluation de la qualité des sols. Volume 2 : Méthodes d'analyses physique et biologique. AFNOR (Ed.). Paris.
- AFNOR, 2004b - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol (NF X 31 107). In: Evaluation de la qualité des sols. Volume 1 : Méthodes d'analyse chimique. AFNOR (Ed.). Paris.
- Albrecht A., Angers D. A., Beare M. H. et 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.
- Amézketa E., 1999 - Soil aggregate stability: A review. Journal of Sustainable Agriculture, 14, 83-151.
- Balabane M. et Plante F. A., 2004 - Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. European Journal of Soil Science, 55, 415-427.
- Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 2000 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil and Tillage Research, 53, 215-230.
- Balesdent J., Pétraud J. P. et Feller C., 1991 - Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. Science du Sol, 29, 95-106.
- Barthès B., Azontondé A., Boli B. Z., Prat C. et Roose E., 2000 - Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). European Journal of Soil Science, 51, 485-495.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L. et Fernandes S. V., 2000 - Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. Soil and Tillage Research, 54, 101-109.
- Bayer C., Mielniczuk J., Martin-Neto L. et Ernani P. R., 2002 - Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. Plant and Soil, 238, 133-140.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. Soil Science Society of America Journal, 58, 787-795.
- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. Soil Science Society of America Journal, 58, 777-786.
- Bernoux M., Cerri C. C., Cerri C. E. P., Siqueira Neto M., Metay A., Perrin A.-S., Scopel E., Blavet D., Piccolo M. d. C., Pavei M. et Milne E., 2006a - Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. Accepted for publication in Agronomy for Sustainable Development.

- Bernoux M., Feller C., Cerri C. C., Eschenbrenner V. et Cerri C. E. P., 2006b - Soil Carbon Sequestration. In: Soil erosion and carbon dynamics. Roose E., Lal R., Feller C., Barthes B. et Stewart B. A. (Eds). Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, Floride, sous presse.
- Blakemore L. C., Searle P. L. et Daly B. K., 1987 - Methods for chemical analysis of soils. Lower Hutt, New Zealand Society of Soil Science, 44-45.
- Blanchart E., 1992 - Restoration by earthworms (megascolecidae) of the macroaggregate structure of a destructured savanna soil under field conditions. Soil Biology and Biochemistry, 24, 1587-1594.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G., Decaens T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L. et Roose E., 2004 - Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. Agriculture, Ecosystems & Environment, 104, 303-315.
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontondé A. et Feller C. - Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. Soumis à European Journal of Soil Biology.
- Bronick C. J. et Lal R., 2005 - Soil structure and management: a review. Geoderma, 124, 3-22.
- Brown G. G., Benito N. P., Pasini A., Sautter K. D., de F Guimaraes M. et Torres E., 2003 - No-tillage greatly increases earthworm populations in Parana state, Brazil: The 7th international symposium on earthworm ecology, Cardiff, Wales, 2002. Pedobiologia, 47, 764-771.
- Caner L., Bourgeon G., Toutain F. et Herbillon A. J., 2000 - Characteristics of non-allophanic Andisols derived from low-activity clay regoliths in the Nilgiri Hills (Southern India). European Journal of Soil Science, 51, 553-563.
- Carter M. R., Angers D. A. et Kunelius H. T., 1994 - Soil structure and organic matter fractions under perennial grasses. Soil Science Society of America Journal, 61, 1376-1382.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et 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 B. T., 1992 - Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: Advances in Soil Science. Stewart B. A. (Ed.). Springer-Verlag, New York.
- Corazza E. J., Silva J. E., Resk D. V. S. et Gomes A. C., 1999 - Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. Revista Brasileira de Ciência do solo, 23, 425-432.
- CPCS, 1967 - Classification des sols, Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Document ronéoté, 96p.

- De Luca E. F., 2002 - Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar. CENA. Piracicaba, CENA, 101.
- Derpsch R. - 1998a. Historical review of No-tillage cultivation of crops. Proceedings of the International Workshop on Conservation Tillage for Sustainable Agriculture, Harare, Zimbabwe, FAO, GTZ, ZFU, FARMESA, ARC (<http://www.rolf-derpsch.com>).
- Derpsch R. - 1998b. Frontiers in conservation tillage and advances in conservation practice. Proceedings of the International Workshop on Conservation Tillage for Sustainable Agriculture, Harare, Zimbabwe, FAO, GTZ, ZFU, FARMESA, ARC (<http://www.rolf-derpsch.com>).
- Dounias I., 2001 - Synthèse bibliographique des SCV. (<http://agroecologie.cirad.fr/>)
- Duchaufour P., 2001 - Introduction à la science du sol. Paris, Dunod.
- Ellert B. H. et Bettany J. R., 1995 - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. Canadian Journal of Soil Science, 75, 529-538.
- Elliott E. T., 1986 - Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 50, 627-633.
- Erickson H., Keller M. et E.A. D., 2001 - Nitrogen oxide fluxes and nitrogen cycling during postagricultural succession and forest fertilization in humid tropics. Ecosystems, 4, 67-84.
- Feller C., Albrecht A., Blanchart E., Cabidoche Y. M., Chevallier T., Eschenbrenner V., Hartmann C., Larré-Larrouy M. C. et N'Dandou J. F., 2001 - 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. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. Geoderma, 79, 69-116.
- Feller C., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: Structure and organic matter storage in agricultural soils. Carter M. R. et Stewart B. A. (Eds). CRC Press, New York.
- Feller C., 1995 - La matière organique des sols tropicaux à argile 1:1. Recherche des compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèses et documents microfichés. Orstom Editions. France, Université Louis Pasteur, 393.
- Feller C., Burtin G., Gerard B. et Balesdent J., 1991a - Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. Science du Sol, 29, 77-94.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J., Toutain F. et Morel J., 1991b - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Paris, 12, Sér. 2, 1491-1497.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., 1991c - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 26, 25-36.

- Freixo A. A., Machado P. L. O. D., dos Santos H. P., Silva C. A. et Fadigas F. D., 2002 - Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 64, 221-230.
- Gavinelli E., Feller C., Larré-Larrouy M.-C., Bacye B., Djegui N. et Nzila J. D., 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.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994a - Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1043-1068.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994b - Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 285-309.
- Graham M. H., Haynes R. J. et Meyer J. H., 2002 - Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 93-102.
- Grandière I., Razafimbelo T., Barthès B., Blanchart E., Louri J., Ferrer H., Chenu C., Wolf N., Albrecht A. et Feller C., submitted, Chapitre 3 - Effet de différents systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la distribution granulo-densimétrique de la matière organique d'un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. Soumis à Etude et Gestion des Sols.
- Gupta V. V. S. R. et Germida J. J., 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 A. D., Wienhold B. J. et Black A. L., 2002 - Tillage, nitrogen and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 906-912.
- Hassink J., Bouwman L. A., Zwart K. B., Bloem J. et Brussaard L., 1993 - Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57, 105-128.
- IPCC, 2001 - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding V., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P., X. D. et Maskell K. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones M. J., 1973 - The organic matter content of the savanna soils of West Africa. *Journal of Soil Science*, 24, 42-53.
- Kemper W. D. et Rosenau R. C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods - Agronomy monographs*. Klute A. (Ed.). Madison, WI.

- Ketterings Q. M., Blair J. M. et Marinissen J. C. Y., 1997 - Effects of earthworms on soil aggregate stability and carbon and nitrogen storage in a legume cover crop agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 401-408.
- Kong A. Y. Y., Six J., Bryant D. C., Denison R. F. et Van Kessel C., 2005 - The relationship between carbon input, aggregation and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1078-1085.
- Kushwaha C. P., Tripathi S. K. et Singh K. P., 2000 - Variations in soil microbial biomass and N availability due to residue and tillage management in a dryland rice agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 56, 153-166.
- Lepsch I. F., Menk J. R. F. et Oliveira J. B., 1994 - Carbon storage and other properties of soils under agriculture and natural vegetation in Sao Paulo State, Brazil. *Soil Use and Management*, 10, 34-42.
- Machado P. L. O. D. et Silva C. A., 2001 - Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61, 119-130.
- Marinissen J. C. Y. et Didden W. A. M., 1997 - Influence of the Enchytraeid worm *Buchholzia appendiculata* on aggregate formation and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 387-390.
- Martin J. M. et Haider K., 1986 - Influence of mineral Colloids on turnover rates of soil organic carbon. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. In: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. Huang P. M. et Schnitzer M. (Eds). Science Society American Special Publication, Madison, Wisconsin.
- McKeague J. A. et Day J. H., 1966 - Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 46, 13-22.
- Mehra P. et Jackson M. L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, 317-327.
- Mele P. M. et Carter M. R., 1999 - Impact of crop management factors in conservation tillage farming on earthworm density, age structure and species abundance in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research*, 50, 1-10.
- Metay A., Moreira J. A. M., Bernoux M., Boyer T., Douzet J.-M., Feigl B., Feller C., Maraux F. et Oliver R., soumis - Effect of no-tillage under cover crops on storage and forms of organic carbon in a clayey Oxisol (Cerrados, Brazil). Submitted to *Soil and Tillage Research*.
- Michellon R., Rakotondralambo P., Razanamparany C., Moussa N. et Séguy L., - 2003. Cropping systems on permanent soil cover for Madagascar highlands. IInd World Congress on Conservation Agriculture, Iguaçu, Brazil.
- Mikha M. M. et Rice C. W., 2004 - Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 809-816.

- Millar N. et Baggs E. M., 2004 - Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 935-943.
- Minten B. et Ralison E., 2003 - Environnement, agriculture et pauvreté. In: *Agricultures, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar*. Randrianarison L. (Ed.). Antananarivo.
- Nierop K. G. J., Pulleman M. M. et Marinissen J. C. Y., 2001 - Management induced organic matter differentiation in grassland and arable soil: a study using pyrolysis techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 755-764.
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003 - *L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale*. France, Springer-Verlag.
- Parfitt R. L. et Wilson A. D., 1988 - Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: *Volcanic soils, weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt*. Caldas E. F. et Yaalon D. H. (Eds). *Catena* (Suppl. 7).
- Paustian K., Six J., Elliott E. T. et Hunt H. W., 2000 - Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48, 147-163.
- Peixoto R. T. G., Stella L. M., Machulek Junior A., Mehl H. U. et Batista E. A., - 1999. Distribuição das frações granulométricas da matéria orgânica em função do manejo do solo. 3^o Encontro Brasileiro Sobre Substância Húmicas, Santa Maria-RS, Rio Grande do Sul.
- Poulenard J. et Herbillon A. J., 2000 - Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*. Paris, 331, 651-657.
- Puget P., Chenu C. et 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.
- Randrianarison L., 2003 - Bénéfices et contraintes dans l'adoption des techniques de conservation des sols sur les Hautes-Terres malgaches. In: *Agricultures, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar*. Minten B., Randrianarisoa J. C. et Randrianarison L. (Eds). Antananarivo.
- Rasmussen P. E. et Collins H. P., 1991 - Long-term impacts of tillage fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 45, 93-134.
- Raunet M., - 1998. Agrobiological approach and direct sowing: Challenges for the future of intertropical small farming. *Proceedings of the International Workshop on Conservation Tillage for Sustainable Agriculture*, Harare, Zimbabwe, FAO, GTZ, ZFU, FARMESA, ARC.
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., 1998 - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. In: *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.

- Raunet M., 1981 - Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra - Vakinankaratra - Itasy (Madagascar). Aptitude à la culture du Blé pluvial. Antananarivo, Ministère du Développement Rural et de la Réforme Agraire, 64p.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Raunet M. et Séguy L., soumis - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres de Madagascar. Soumis à Etude et Gestion des Sols.
- Razafimbelo T., Barthes B., De Luca E. F., Larré-Larrouy M.-C., Laurent J.-Y., Cerri C. C. et Feller C., 2003 - Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. Etude et Gestion des Sols, 10, 191-200.
- Roederer P. et Bourgeat F., 1971 - Atlas de Madagascar. Tananarive, BDPA, Bureau pour le Développement de la Production Agricole, IGN, Institut Géographique National.
- Roose E., Lal R., Feller C., Barthès B. et Stewart B. A., Eds. 2006 - Soil erosion and carbon dynamics. Advances in Soil Science, Boca Raton, Floride, CRC Press (sous presse).
- Sà J. C. d. M., 2001a - Dinamica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto. Escola superior de Agricultura Luiz de Quieroz Universidade de Sao Paulo. Piracicaba, Universidade de Sao Paulo, 141.
- Sà J. C. d. M., Cerri C. C., Dick W. A., Lal R., Filho S. P. V., Piccolo M. C. et Feigl B. E., 2001b - Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. Soil Science Society of America Journal, 65, 1486-1499.
- Salinas-Garcia J. R., Baez-Gonzalez A. D., Tiscareno-Lopez M. et Rosales-Robles E., 2001 - Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. Soil and Tillage Research, 59, 67-79.
- Scopel E., Douzet J. M., Macena da Silva F. A., Cardoso A., Moreira J. A. A., Findeling A. et 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.
- Séguy L. et Bouzinac S., 2005 - Rapport synthétique CIRAD Brésil 2002 - 2004. Brésil, CIRAD, 26p.
- Séguy L., Bouzinac S. et Maronezzi A. C., 2001 - Systèmes de culture et dynamique de la matière organique. Brésil, CIRAD-CA - AGRONORTE PESQUISAS - GROUPE MAEDA - ONG TAF/FOFIFA/ANAE.
- Shuster W. D., Subler S. et McCoy E. L., 2001 - Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil. Soil Biology and Biochemistry, 33, 983-996.
- Six J., Conant T., Paul A. et Paustian K., 2002a - Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, 241, 155-176.

- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Six J., Elliott E. T. et Paustian K., 2000a - Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- Six J., Paustian K., Elliott E. T. et Combrink C., 2000b - Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681-689.
- Six J., Elliott E. T. et Paustian K., 1999 - Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1350-1358.
- Six J., Elliott E. T., Paustian K. et Doran J. W., 1998 - Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1367-1377.
- Soil Survey Staff, 2003 - Keys to Soil Taxonomy. Washington, USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sollins P., Homann P. et Caldwell B. A., 1996 - Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74, 65-105.
- Solomon D., Lehmann J. et Zech W., 2000 - Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78, 203-213.
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- UPDR-MAEP, 2003 - Monographie de la région de Vakinankaratra. Antananarivo, Madagascar, Ministère de l'Agriculture de l'Élevage et de la Pêche, 107.
- Villanave C., Charpentier F., Lavelle P., Feller C., Brussaard L., Pashanasi B., Barois I. et Albrecht A., 1999 - Effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics following earthworm inoculation in field experimental situations. In: *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. Lavelle P., Brussaard L. et Hendrix P. F. (Eds). Cabi Publishing, New York, USA.
- Wada K. et Higachi T., 1976 - The categories of aluminium- and iron-humus complexes in andosols determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*, 27, 357-368.
- Wright A. L. et Hons F. M., 2005 - Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 141-147.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100000. Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

ANNEXES



Annexe 1 : ESTIMATION DES BIOMASSES AERIENNES ET RACINAIRES

Les biomasses restituées dans cette étude, n'ayant pas été directement mesurées, elles ont été estimées à partir des ajustements entre rendement en grains (données de TAFa) et en biomasse, données par la littérature, suivant les équations ci-dessous :

Equation d'ajustement	Références
Maïs Biomasse aérienne (MS) = [1,3411 x Grains] – 0,0586 Biomasse racinaire (MS) = Biomasse aérienne (MS)	Albrecht et al. (non publiées)
Soja Biomasse aérienne (MS) = [2,5949 x Grains] + 0,1269 Biomasse racinaire (MS) = [0.3935 x Grains] - 0.1847	Ghosh et al., 2004a et Ghosh et al., 2004b
Haricot Biomasse aérienne (MS) [1,4202 x Grains] + 0,2281 Biomasse racinaire (MS) = 0,42 x Biomasse aérienne	Singh et al., 2003
Kikuyu Biomasse aérienne (MS) = 3,12 Mg.ha ⁻¹ Biomasse racinaire (MS) = Biomasse aérienne (MS)	Données CTAHR Estimation
Desmodium Biomasse aérienne (MS) = 3,70 Mg.ha ⁻¹ Biomasse racinaire (MS) = 0,5 x Biomasse aérienne	Données FAO Estimation

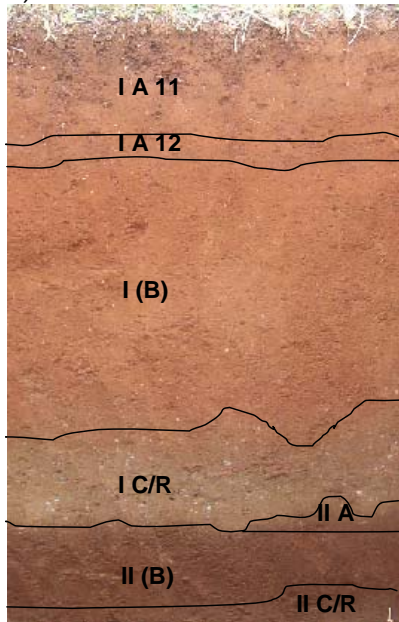
Références citées

- Albrecht - Données Projet Impala, ICRAF, Nairobi, Kenya.
- CTHAR (College of Tropical Agriculture and Human Resource), 2002a – The forage website. Grasses. Hosaka kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). (<http://www.ctahr.hawaii.edu>).
- FAO, Agriculture Departement. Crop and Grassland service. *Desmodium uncinatum* (Jacq.). (<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/DATA/Pf000030.HTM>).
- Ghosh P. K., Ajay, Bandyopadhyay K. K., Manna M. C., Mandal K. G., Misra A. K. et Hati K. M., 2004 - Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. II. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bioresource Technology*, 95, 85-93.
- Ghosh P. K., Ramesh P., Bandyopadhyay K. K., Tripathi A. K., Hati K. M., Misra A. K. et Acharya C. L., 2004b - Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer-NPK on three cropping systems in vertisols of semi-arid tropics. I. Crop yields and system performance. *Bioresource Technology*, 95, 77-83.
- Singh S. P., Teran H., Munoz C. G., Osorno J. M., Takegami J. C. et Thung M. D. T., 2003 - Low Soil Fertility Tolerance in Landraces and Improved Common Bean Genotypes. *Crop Science*, 43, 110-119.

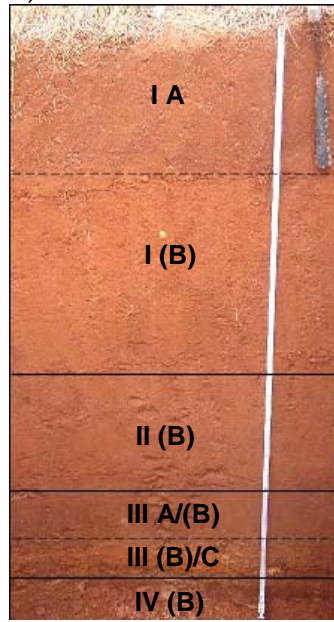
Annexe 2 : Photos des profils pédologiques observés dans cette étude

Profils sur Andranomanelatra (a) et Bemasoandro (b)

a) Andranomanelatra

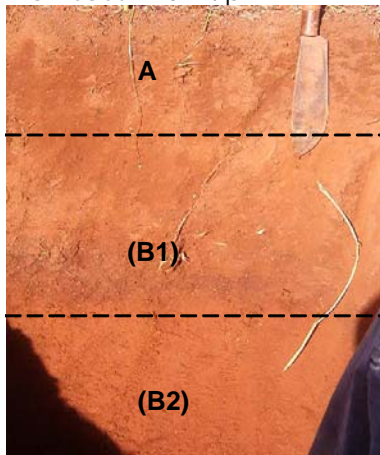


b) Bemasoandro

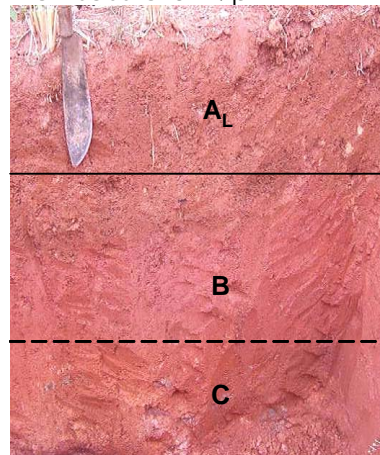


Profils sur Ibity

Profil sous NT3 m/p

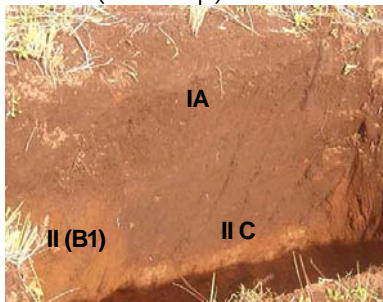


Profil sous CT3 m/p

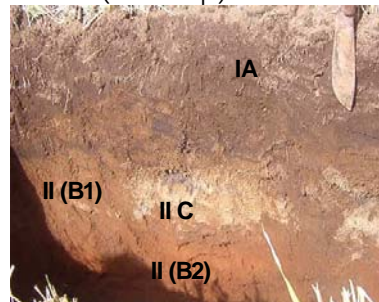


Profils sur Betafo

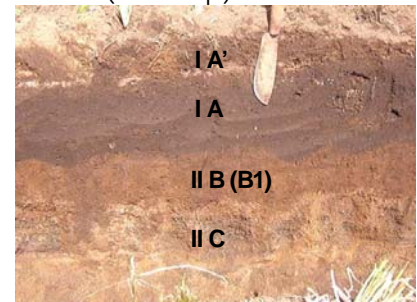
Profil 1 (CT4 m/p)



Profil 2 (NT4 m/p)



Profil 3 (NT4 m/p)



Annexe 3 : PROPRIETES DE SOL ANDIQUE, ET DES SOUS-GROUPES ANDIQUES SUIVANT LA SOIL TAXONOMY

a) Propriétés de sol andique 'andic soil properties' (Soil Taxonomy)

Pour avoir des propriétés andiques le (matériau) sol doit avoir l'une ou l'autre des combinaisons de caractéristiques suivantes :

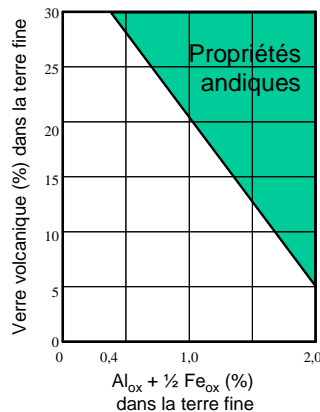
1 Dans la terre fine à la fois :

- une valeur $Al_{ox} + \frac{1}{2} Fe_{ox}$ dans la fraction terre fine de 2 % ou plus; *et*
- une densité apparente du sol à 33kPa inférieure à $0,9 \text{ g cm}^{-3}$; *et*
- une rétention des phosphates d'au moins 85 %;

ou

2 Dans la terre fine, une rétention des phosphates d'au moins 25 %, 30 % ou plus de particules de taille comprise entre 0,02 et 2,0 mm, et l'une ou l'autre des situations suivantes :

- a. un total $Al_{ox} + \frac{1}{2} Fe_{ox}$ de 0,40 % ou plus avec 30 % ou plus de verre volcanique dans la fraction 0,02 et 2,0 mm; **ou**
- b. un total $Al_{ox} + \frac{1}{2} Fe_{ox}$ de 2,0 % ou plus avec 5 % ou plus de verre volcanique dans la fraction 0,02 et 2,0 mm; **ou**
- c. un total $Al_{ox} + \frac{1}{2} Fe_{ox}$ compris entre 0,40 et 2,0 % ou plus avec un taux de verre volcanique tel que l'on se trouve dans la zone verte de la figure ci-dessous.



b) Les sous-groupes andiques de la Soil Taxonomy

Des sous-groupes andiques existent pour certains grands groupes des Oxisols, Aridisols, Ultisols, Mollisols, Alfisols, Inceptisols et Entisols. Ils correspondent très généralement à la combinaison des propriétés suivantes:

- $Al_{ox} + \frac{1}{2} Fe_{ox}$ de 1,0 % ou plus;
- densité apparente de $1,0 \text{ g/cm}^3$ ou moins.

On peut ainsi identifier des Andic Hapludox, des Andic Kandihumults, des Andic Dystrudepts ...

c) Ce que l'on pouvait attendre des différentes dissolutions réalisées dans cette étude (Rappel)

- Le réactif CBD est surtout utilisé pour quantifier les oxydes de fer, accessoirement, quand ces oxydes contiennent des impuretés (substitutions alumineuses dans la trame des oxydes de fer), il permet aussi de les estimer. Il est réputé peu actif sur les amorphes du type allophane.

- Le réactif oxalate est utilisé pour estimer les amorphes et il est réputé actif sur les matériaux du type allophane. Une teneur $Si_{ox} > 6 \text{ gk.g}^{-1}$ caractérise les horizons silandiques (allophaniques) dans le WRB.

- Le réactif pyro à pH10 est utilisé pour estimer les formes métalliques liées à la MO, un ratio Al_{py} / Al_{ox} supérieur à 0,5 caractérise les horizons aluandiques (non allophaniques) dans le WRB.

Annexe 4 : HUMIDITE APPLIQUEE AUX ECHANTILLONS BROYES LORS DES MANIPULATIONS D'INCUBATION

Introduction

Généralement, dans la littérature, on applique souvent la même humidité, c'est-à-dire l'humidité de l'échantillon non broyé, aux deux échantillons non broyés et broyés, lors des expériences de minéralisation (Beare et al., 1994; Chevallier et al., 2004). Toutefois, lors du broyage de l'échantillon, les particules grossières sont détruites et la texture de l'échantillon devient plus fine, ce qui pourrait induire un changement de l'humidité à pF₂, pour l'échantillon broyé, qu'on ne prend généralement pas en compte et qui pourrait avoir une influence sur la minéralisation de C cet échantillon broyé. Dans cette partie, nous allons (i) vérifier les humidités à la capacité au champ (pF=2) des échantillons non broyé (NB) et broyé (B) et (ii) déterminer l'effet sur la minéralisation de C de l'utilisation deux humidités pour l'échantillon B ; d'une part une humidité à la capacité au champ de l'échantillon non broyé, et d'autre part une humidité à la capacité au champ de l'échantillon broyé.

Matériels et méthodes

Cette étude a été effectuée sur l'horizon 0-5 cm des systèmes NT m/s et CT m/s du dispositif d'Andranomanelatra (sol FA), chacun avec leur 3 parcelles de répétitions.

Mesure d'humidité à pF = 2

La mesure de pF est effectuée suivant la méthode des bacs à sable, sur 10 g d'échantillon broyé (B) ou non broyé (NB) mélangé avec 20 g de sable.

Mesures respirométriques

Sur chacun des 3 parcelles élémentaires des traitements NT m/s et CT m/s, on a mis à incuber à 28°C pendant 28j, deux échantillons broyés à deux humidités différentes (i) l'un à 80% de l'humidité à la capacité au champ de l'échantillon NB (Humidité 1), et l'autre à 80% de l'humidité à la capacité au champ de l'échantillon B (Humidité 2). Pour chaque échantillon, on a effectué 3 répétitions d'incubation. Le carbone (C) minéralisé est mesuré par CPG aux jours 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 15, 18, 21 et 28.

Résultats

Humidité à pF = 2

La mesure des humidités à pF₂ montre une différence significative entre les échantillons NB et B, alors qu'ils sont déjà mélangés avec du sable.

Tableau a : Humidité à pF₂ des échantillons NB et B

Traitements	Humidité à pF ₂ (% sol sec)	Humidité de l'échantillon broyé
Echantillon non broyé (20g sable + 10g sol NB)	14,67 ± 0,26 a	Humidité 1
Echantillon broyé (20g sable + 10g sol B)	20,74 ± 1,13 b	Humidité 2

Mesures respirométriques

Les résultats de la Figure a montre que sur 5 parcelles des 6 étudiées, l'application de l'humidité 2 au lieu de l'humidité 1 sur l'échantillon broyé n'affecte pas la quantité de C minéralisé.

Conclusion

Comme il n'y a pas de différence de C minéralisé entre les deux humidités appliquées à l'échantillon broyé, nous avons appliqué l'humidité 1, équivalent à l'humidité à pF₂ de l'échantillon non broyé, sur les échantillons broyés, comme les cas généralement observés dans la littérature.

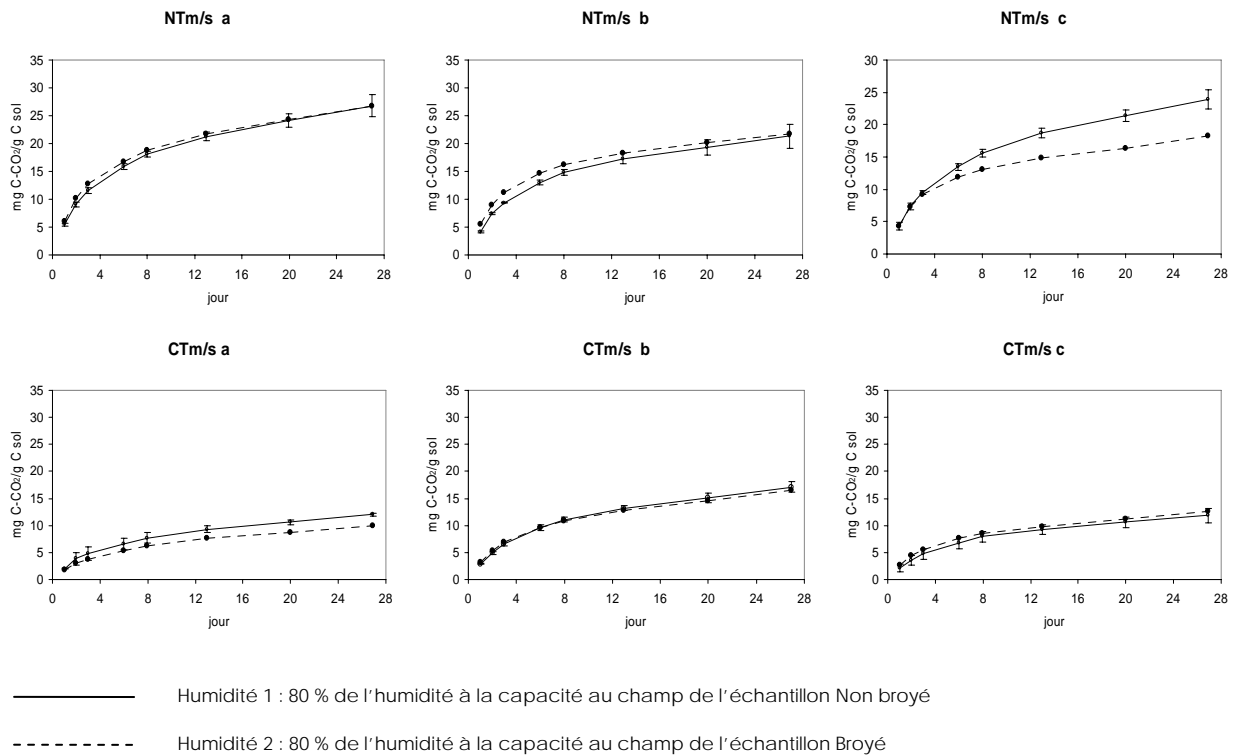
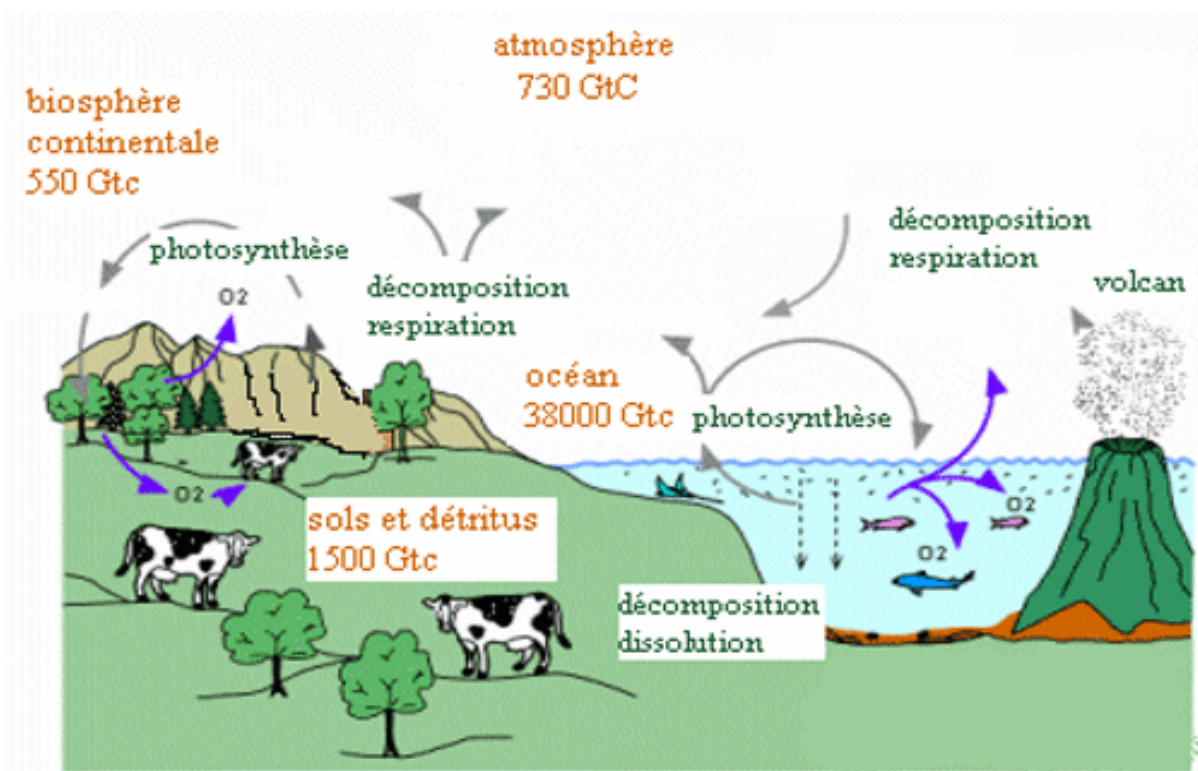


Figure a : C minéralisé sur des échantillons broyé à humidité à pF2 de l'échantillon non broyé (Humidité 1) et à humidité à pF de l'échantillon broyé (Humidité 2).

Références bibliographiques

- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994 - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et 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.

Annexe 5 : LE CYCLE DU CARBONE



Le cycle du carbone (<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/motscles/Images/cycleC.html>)

Annexe 6 : Valeurs de densité apparente, exprimées en g.cm⁻³, de chaque parcelle élémentaire (a, b, c) des différents traitements du dispositif d'Andranomanelatra.

Traitements	Profondeur (cm)	Rep a	Rep b	Rep c
CT m/s	0-5	0,87	0,90	0,90
CT m/s	5-10	0,81	0,82	0,97
CT m/s	10-20	0,93	0,84	0,83
CT m/s	20-30	0,99	0,88	0,90
CT m/s	30-40	1,03	0,95	0,95
NT m/s	0-5	0,71	0,82	0,79
NT m/s	5-10	0,80	0,89	0,90
NT m/s	10-20	0,83	0,89	0,79
NT m/s	20-30	0,93	0,97	0,96
NT m/s	30-40	1,00	1,08	0,94
NT m/m-d	0-5	0,72	0,74	0,68
NT m/m-d	5-10	0,71	0,79	0,84
NT m/m-d	10-20	0,76	0,74	0,82
NT m/m-d	20-30	0,97	0,89	0,89
NT m/m-d	30-40	1,00	1,02	1,01
NT h/s-k	0-5	0,77	0,69	0,84
NT h/s-k	5-10	0,89	0,81	0,88
NT h/s-k	10-20	0,92	0,86	0,88
NT h/s-k	20-30	1,02	0,97	0,96
NT h/s-k	30-40	1,04	1,00	1,08

Annexe 7 : Teneurs en carbone et azote organique totaux du sol, de chaque parcelle élémentaire (a, b, c) des traitements du dispositif d'Andranomanelatra.

Traitements	Profondeur (cm)	C (mg.g ⁻¹ sol)			N (mg.g ⁻¹ sol)		
		Rep a	Rep b	Rep c	Rep a	Rep b	Rep c
CT m/s	0-5	35,43	33,27	33,30	2,21	2,08	2,10
CT m/s	5-10	35,58	34,61	35,31	2,29	2,20	2,26
CT m/s	10-20	29,03	35,68	31,30	1,67	2,25	1,95
CT m/s	20-30	21,27	30,37	28,72	1,06	1,82	1,67
CT m/s	30-40	16,89	22,90	18,04	0,86	1,22	0,97
NT m/s	0-5	54,79	47,18	48,74	3,69	3,02	3,17
NT m/s	5-10	45,52	38,44	38,61	3,11	2,55	2,42
NT m/s	10-20	30,49	30,24	31,77	1,93	1,94	1,91
NT m/s	20-30	17,32	22,54	22,74	0,99	1,36	1,26
NT m/s	30-40	9,46	14,87	16,17	0,59	0,81	0,87
NT m/m-d	0-5	47,60	51,48	49,63	3,45	3,70	3,43
NT m/m-d	5-10	43,46	47,46	42,96	3,05	3,21	2,89
NT m/m-d	10-20	36,62	35,01	34,11	2,50	2,14	2,13
NT m/m-d	20-30	21,77	26,47	24,37	1,26	1,43	1,36
NT m/m-d	30-40	19,47	19,92	17,76	0,97	0,90	0,87
NT h/s-k	0-5	45,08	54,48	45,69	3,05	3,75	2,98
NT h/s-k	5-10	37,22	42,67	34,43	2,31	2,79	2,16
NT h/s-k	10-20	28,06	33,14	32,31	1,53	1,98	1,94
NT h/s-k	20-30	19,56	21,73	20,08	0,91	1,11	1,13
NT h/s-k	30-40	15,40	16,59	11,78	0,69	0,81	0,61

Annexe 8 : Teneurs en macro (MA, 200-2000 μm), méso (ME, 20-200 μm) et microagrégats (MI, 0-20 μm) du sol, isolés suivant la méthode Kemper et Rosenau (1986) du Chapitre 2, de chaque parcelle élémentaire (a,b,c) des traitements du dispositif d'Andranomanelatra.

Traitements	Profondeurs	Rep a	Rep b	Rep c
Sables				
grossiers	(cm)			
NT m/s	0-5	131,4	146,1	105,2
CT m/s	0-5	88,8	220,2	107,4
NT m/m-d	0-5	190,3	95,0	104,8
NT h/s-k	0-5	144,4	143,0	101,1
NT m/s	5-10	110,6	125,7	98,9
CT m/s	5-10	70,7	71,6	117,5
NT m/m-d	5-10	143,4	84,0	103,5
NT h/s-k	5-10	117,6	155,1	75,6
Macroagrégats				
NT m/s	0-5	721,3	673,7	678,9
CT m/s	0-5	583,8	476,6	504,2
NT m/m-d	0-5	523,3	563,7	731,2
NT h/s-k	0-5	639,0	639,5	651,0
NT m/s	5-10	706,8	646,3	698,5
CT m/s	5-10	536,7	641,3	451,1
NT m/m-d	5-10	586,0	628,9	770,7
NT h/s-k	5-10	633,7	626,0	778,6
Mésoagrégats				
NT m/s	0-5	121,8	153,7	175,6
CT m/s	0-5	286,7	267,2	349,4
NT m/m-d	0-5	257,6	311,8	146,5
NT h/s-k	0-5	183,8	188,3	190,4
NT m/s	5-10	155,6	202,5	171,7
CT m/s	5-10	360,1	258,5	397,5
NT m/m-d	5-10	246,7	259,7	112,2
NT h/s-k	5-10	210,5	192,9	117,7
Microagrégats				
NT m/s	0-5	25,5	26,6	40,3
CT m/s	0-5	40,7	36,1	39,0
NT m/m-d	0-5	28,8	29,5	17,5
NT h/s-k	0-5	32,8	29,3	57,5
NT m/s	5-10	27,0	25,5	31,0
CT m/s	5-10	32,5	28,7	33,9
NT m/m-d	5-10	23,8	27,4	13,6
NT h/s-k	5-10	38,3	26,0	28,2

Annexe 9 : Masses, concentrations (mg.g⁻¹ fraction) et contenus (mg.g⁻¹ sol) en carbone et azote des différentes classes d'agrégats isolé suivant la méthode Kemper et Rosenau modifié du Chapitre 4, de chaque parcelle élémentaire (a,b,c) des traitements CT m/s et NT m/s du dispositif d'Andranomanelatra.

	CT m/s			NT m/s		
	Rep a	Rep b	Rep c	Rep a	Rep b	Rep c
% sol sec						
F-LF	0,64	0,73	0,30	1,17	1,09	0,72
MA	62,32	59,62	61,23	73,35	71,50	72,49
ME	29,00	31,11	29,89	19,19	20,49	18,44
MI	2,87	3,55	3,26	2,28	2,58	3,19
Concentration en Carbone (mg.g ⁻¹ fraction)						
F-LF	259,04	270,38	247,43	272,37	262,00	290,07
MA	29,81	29,02	29,07	45,28	40,84	45,81
ME	35,00	35,48	32,85	45,15	42,11	45,60
MI	39,00	38,95	37,30	50,35	43,06	46,91
Contenus en Carbone (mg.g ⁻¹ sol)						
F-LF	1,65	1,98	0,73	3,20	2,86	2,08
MA	18,58	17,31	17,80	33,21	29,20	33,21
ME	10,15	11,02	9,83	8,65	8,62	8,41
MI	1,12	1,38	1,22	1,15	1,11	1,50
Sol total	32,99	32,17	31,27	47,88	42,85	47,47
Concentration en azote (mg.g ⁻¹ fraction)						
F-LF	17,34	15,28	14,60	16,91	15,88	15,74
MA	2,22	2,08	2,12	3,60	3,20	3,50
ME	2,73	2,69	2,48	3,67	3,37	3,51
MI	3,01	2,91	2,82	4,11	3,51	3,49
Contenus en azote (mg.g ⁻¹ sol)						
F-LF	0,11	0,11	0,04	0,20	0,17	0,11
MA	1,39	1,24	1,30	2,64	2,29	2,54
ME	0,79	0,84	0,74	0,70	0,69	0,65
MI	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,11
Sol total	2,35	2,39	2,09	3,77	3,33	3,67

F-LF : Matière organiques particulières externes aux agrégats stables de tailles > 200 µm.

Annexe 10 : Carbone minéralisé en 28 jours d'incubation, exprimé en $\mu\text{g Cmin.g}^{-1}$ agrégat, des macro (MA) et mésoagrégats (ME), broyés et non broyés, de chaque parcelle élémentaire des traitements CT m/s et NT m/s (Chapitre 4).

	Jours	CT m/s			NT m/s		
		Rep a	Rep b	Rep c	Rep a	Rep b	Rep c
MA Non Broyé							
	1	67,7	47,7	57,2	157,4	134,4	154,8
	2	110,4	73,6	92,5	262,4	214,0	249,7
	3	146,7	95,2	122,1	348,6	281,3	326,6
	4	177,4	114,2	142,1	416,8	336,7	388,9
	7	256,0	169,2	211,9	597,2	472,3	526,9
	9	296,2	197,1	245,7	698,1	542,2	596,4
	11	330,6	223,1	273,9	785,7	604,8	661,5
	14	379,2	260,6	315,8	910,0	695,9	749,4
	17	420,1	293,0	351,9	1022,2	780,0	826,1
	21	472,4	333,6	395,7	1159,7	879,5	913,9
	28	553,7	398,0	466,5	1391,4	1037,1	1051,5
MA Broyé							
	1	88,9	58,8	72,2	227,8	173,2	184,8
	2	150,0	94,6	123,2	363,3	274,0	290,3
	3	201,8	123,6	165,4	468,5	357,3	370,3
	4	237,8	143,6	198,1	531,0	408,8	432,2
	7	345,6	209,2	286,0	724,2	573,1	590,1
	9	395,5	243,2	327,5	822,4	657,8	665,4
	11	432,6	271,6	362,7	903,7	727,3	727,5
	14	486,2	313,7	409,4	1018,0	821,3	811,2
	17	530,1	351,7	449,9	1112,5	897,1	881,2
	21	579,9	396,0	495,4	1231,8	995,4	964,1
	28	657,2	465,5	560,5	1409,2	1137,2	1085,6
ME Non broyé							
	1	92,1	67,3	78,1	254,7	214,4	165,9
	2	156,5	111,7	133,0	435,8	360,9	279,3
	3	214,6	149,3	178,9	583,7	475,3	366,6
	4	260,9	178,3	203,3	703,8	567,8	433,0
	7	372,5	257,3	297,6	964,5	781,9	593,3
	9	428,2	298,3	342,8	1088,7	885,2	672,3
	11	474,6	333,7	380,9	1191,8	970,8	739,8
	14	537,5	384,5	433,9	1328,3	1087,9	829,6
	17	589,0	426,3	482,7	1445,4	1190,2	903,0
	21	650,7	476,6	537,3	1577,9	1302,5	992,1
	28	746,3	554,6	626,4	1775,9	1473,2	1125,2
ME Broyé							
	1	124,7	78,8	97,6	303,8	224,4	174,4
	2	215,5	139,8	168,5	505,6	400,0	302,8
	3	294,0	190,7	227,2	669,1	543,7	411,3
	4	345,4	226,5	271,2	774,1	636,0	479,1
	7	481,5	320,9	379,3	1085,3	893,5	670,1
	9	544,5	368,3	429,8	1242,1	1010,1	764,7
	11	596,2	408,3	470,8	1365,3	1101,3	836,6
	14	663,4	463,4	525,9	1519,5	1221,5	933,1
	17	715,4	509,6	572,1	1635,1	1314,7	1006,9
	21	774,5	557,7	621,7	1780,3	1420,8	1105,7
	28	860,0	631,8	697,4	1980,3	1572,3	1241,6

Annexe 11 : Carbone minéralisé en 28 jours d'incubation, exprimé en $\text{mg C}_{\text{min}} \cdot \text{g}^{-1} \text{C}$ agrégat, des macro (MA) et mésoagrégats (ME), broyés et non broyés, de chaque parcelle élémentaire des traitements CT m/s et NT m/s (Chapitre 4).

	Jours	CT m/s			NT m/s		
		Rep a	Rep b	Rep c	Rep a	Rep b	Rep c
MA Non Broyé							
	1	2,11	1,54	1,78	2,79	3,03	3,28
	2	3,44	2,38	2,88	4,65	4,83	5,28
	3	4,57	3,07	3,81	6,17	6,35	6,91
	4	5,53	3,69	4,43	7,38	7,60	8,22
	7	7,98	5,47	6,61	10,58	10,66	11,15
	9	9,23	6,37	7,67	12,37	12,24	12,61
	11	10,30	7,21	8,55	13,92	13,65	13,99
	14	11,82	8,42	9,85	16,12	15,70	15,85
	17	13,09	9,47	10,98	18,11	17,60	17,47
	21	14,72	10,78	12,35	20,54	19,85	19,33
	28	17,25	12,86	14,56	24,65	23,40	22,24
MA Broyé							
	1	2,74	2,22	2,23	4,84	4,11	3,90
	2	4,63	3,57	3,80	7,71	6,50	6,13
	3	6,23	4,66	5,10	9,95	8,47	7,82
	4	7,34	5,41	6,11	11,28	9,69	9,13
	7	10,66	7,89	8,83	15,38	13,59	12,47
	9	12,20	9,17	10,11	17,46	15,59	14,06
	11	13,35	10,24	11,20	19,19	17,24	15,37
	14	15,00	11,83	12,64	21,62	19,47	17,14
	17	16,35	13,27	13,89	23,62	21,27	18,62
	21	17,89	14,94	15,29	26,16	23,60	20,37
	28	20,28	17,56	17,30	29,93	26,96	22,94
ME Non broyé							
	1	2,55	1,81	2,21	5,76	4,91	3,58
	2	4,32	3,00	3,76	9,85	8,27	6,03
	3	5,93	4,01	5,05	13,20	10,89	7,92
	4	7,21	4,79	5,74	15,91	13,01	9,35
	7	10,29	6,91	8,41	21,81	17,91	12,81
	9	11,83	8,01	9,69	24,62	20,28	14,52
	11	13,11	8,96	10,76	26,95	22,24	15,98
	14	14,85	10,32	12,26	30,03	24,92	17,92
	17	16,27	11,44	13,64	32,68	27,26	19,50
	21	17,98	12,79	15,18	35,68	29,84	21,42
	28	20,62	14,89	17,70	40,15	33,75	24,30
ME Broyé							
	1	3,45	2,17	2,78	6,26	5,21	3,70
	2	5,96	3,85	4,81	10,42	9,29	6,43
	3	8,14	5,25	6,48	13,78	12,63	8,73
	4	9,56	6,23	7,73	15,95	14,78	10,17
	7	13,33	8,83	10,82	22,36	20,76	14,23
	9	15,07	10,14	12,26	25,59	23,47	16,24
	11	16,50	11,24	13,43	28,13	25,59	17,76
	14	18,36	12,75	15,00	31,30	28,38	19,81
	17	19,80	14,02	16,32	33,68	30,55	21,38
	21	21,43	15,35	17,73	36,68	33,02	23,48
	28	23,80	17,39	19,89	40,80	36,54	26,36

LISTE DES TABLEAUX

Introduction

Tableau 0-1 : Stockage de C ($\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) dans le sol sous différents systèmes SCV au Brésil

Chapitre 1

Tableau 1-1 : Densités apparentes du sol ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), sur les 4 dispositifs : Andranomanelatra, Bemasoandro, Ibity, et Betafo. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$)

Tableau 1-2 : Stock de C exprimé à masse équivalente des horizons de référence, en Mégagramme de carbone par hectare ($\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Tableau 1-3 : Teneurs en macroagrégats stables (MA, 200-2000 μm), mésoagrégats (20-200 μm) et microagrégats ($< 20 \mu\text{m}$) sur les différents dispositifs étudiés exprimé par rapport au sol total ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ sol) et sol total sans sables grossiers ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ sol-SG).

Tableau 1-4 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 2 (Bemasoandro).

Tableau 1-5 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 3 (Ibity).

Tableau 1-6 : Caractéristiques morphologiques des profils observés sur le dispositif 4 (Betafo).

Tableau 1-7 : Caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques des horizons des profils pédologiques étudiés.

Chapitre 2

Tableau 2-1 : Moyennes et écart-types ($n=3$) des biomasses aériennes et racinaires restituées au sol par chaque système, et exprimées en matière sèche (MS) et en Mégagramme (Mg) de carbone (C). Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2-2 : Description des différents traitements étudiés et des différentes analyses pratiquées sur les échantillons prélevés. Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2-3 : Caractéristiques morphologiques du profil pédologique. Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2-4 : Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des horizons étudiés (profil sous NT). Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2-5 : Densités apparentes (D_a) et teneurs en carbone (C) du sol. Andranomanelatra, Madagascar. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Tableau 2-6 : Stocks de C exprimés pour une masse équivalente des couches 0-20 cm et 0-40 cm (1411 et $3157\text{Mg sol}\cdot\text{ha}^{-1}$). Andranomanelatra, Madagascar. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Tableau 2-7 : Teneurs en sables grossiers SG, macroagrégats stables à l'eau MA (200-2000 μm), mésoagrégats ME (20-200 μm) et microagrégats MI ($< 20 \mu\text{m}$) pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Résultats exprimés par rapport au sol total (colonnes 3 à 5) ou par rapport au sol-SG (colonnes 6 à 8). (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Tableau 2-8 : C minéralisé sous NT m/s et CT m/s. Couche 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Tableau 2-9 : Potentiels (CP) et taux (k, j^{-1}) de minéralisation du C du sol des compartiments labiles (L), résistants (R) et total (T) du sol pour une durée d'incubation de 28 jours. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Chapitre 3

Tableau 3-1 : Coefficients de variation (CV, en %) obtenus sur les 3 répétitions de laboratoire. Echantillon 5-10 cm, Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 3-2 : Coefficients de variation (CV, en %) minima et maxima des quatre traitements, obtenus sur les 3 répétitions de terrain par traitement et pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 3-3 : Masses, concentrations (g.kg^{-1} fraction) et contenus (g.kg^{-1} sol) en C et rapport C/N des différentes fractions granulométriques pour les profondeurs 0-5 (a) et 5-10 cm (b). Andranomanelatra, Madagascar. (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Chapitre 4

Table 4-1: Aggregate and C distribution among aggregate classes in CT and NT systems. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar (Mean \pm standard deviation, $n=3$).

Table 4-2: C mineralized C (C_{min}) from intact and crushed macroaggregates (MA, 200-2000 μm) and mesoaggregates (ME, 20-200 μm), and protected C for no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) soils. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (Mean \pm standard deviation, $n=3$)

Table 4-3: Carbon mineralization potentials (CP_L , CP_R and CP_T) and rate constants (k_L and k_R , d^{-1}) of water-stable aggregate classes in conventional-tillage (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils. Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (Mean \pm standard deviation, $n=3$)

Table 4-4 : Amount of C mineralized (in 28 days) and protected-C in macroaggregates MA (200-2000 μm), mesoaggregates ME (20-200 μm) and whole soil (0-2000 μm). Soil layer 0-5 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

LISTE DES FIGURES

Introduction

Figure 0-1 : Cartes du relief et des différentes zones climatiques, Madagascar.

Figure 0-2 : Carte pédologique de Madagascar (Roederer et Bourgeat, 1971)

Figure 0-3 : Superficie des systèmes en semis direct dans différents pays (M ha) (Derpsch, 1998b, mis à jour)

Figure 0-4 : Adoption des systèmes SCV à Madagascar (Randrianarison, 2003)

Chapitre 1

Figure 1-1 : Courbe ombrothermique de Gaussen de la région d'Antsirabe. Données de 1961-1990, Service de la Météorologie, Antananarivo.

Figure 1-2 : Profils des teneurs en C des systèmes SCV (NT) et labour (CT) sur les 4 dispositifs étudiés : Andranomanelatra (1), Bemasoandro (2), Ibity (3) et Betafo (4).

Figure 1-3 : Relations entre teneurs en MA (g.kg^{-1} sol) et la teneur en C (g.kg^{-1} sol) du sol sur les dispositifs d'Andranomanelatra, Bemasoandro et Ibity (Dispositifs 1, 2 et 3) et le dispositif de Betafo (Dispositif 4).

Figure 1-4 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 2 (Bemasoandro).

Figure 1-5 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 3 (Ibity).

Figure 1-6 : Profils pédologiques observés sur le dispositif 4 (Betafo).

Chapitre 2

Figure 2-1 : Plan du dispositif d'Andranomanelatra, Madagascar (cf. Tableau 2-2) pour signification des traitements).

Figure 2-2 : Profil pédologique du sol. Andranomanelatra, Madagascar.

Figure 2-3 : Teneurs en C en fonction de la teneur en éléments fins (argile + limons fins, 0-20 μm) du sol selon Feller et al. (1991c). Couche de sol : 0-10 cm.

Figure 2-4 : Relation entre teneurs en C et en MA pour les couches de sol 0-5 et 5-10cm ($n=24$, $p < 0,05$).

Chapitre 3

Figure 3-1 : Méthode de fractionnement granulo-densimétrique utilisée.

Figure 3-2 : Teneurs en C des sols non fractionnés, à 0-5 et 5-10 cm (Moyenne \pm écart-type, $n=3$).

Figure 3-3 : Comparaison des masses moyennes des fractions de la MO à celles de l'analyse mécanique pour l'ensemble des échantillons traités. (Moyenne \pm écart-type).

Figure 3-4 : Comparaison des contenus en C des fractions entre les trois types de semis direct (NT) et le labour (CT) pour une profondeur de a) 0-5 cm et de b) 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar. (Moyenne et écart-type).

Figure 3-5 : Localisation du C stocké dans les fractions organiques externes ($\text{Fe}>50$) et internes ($\text{Fi}>50$) aux agrégats, dans les fractions fines ($\text{F}<50$) du sol et dans la fraction soluble (W). Andranomanelatra, Madagascar.

Figure 3-6 : Facteur d'enrichissement (Enrichment factor, EF) des fractions argileuses (F0-2) et limoneuses (F2-20)

Chapitre 4

Figure 4-1 : Aggregate size distribution in conventional-tillage (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils, 0-5 cm layer. (Andranomanelatra, Madagascar). F-LF = Free-light fraction; MA, ME and MI = macro-(200-2000 μm), meso-(20-200 μm) and micro-(0-20 μm) aggregates, respectively.

Figure 4-2 : Carbon concentration (mgC g^{-1} aggregate) (a), and distribution ($\text{mgC g}^{-1}\text{soil}$) (b), for MA (200-2000 μm), ME (20-200 μm) and MI (< 20 μm) in conventional (CT m/s) and no-tillage (NT m/s) soils. Soil layer 0-5 cm. (Andranomanelatra, Madagascar)

Figure 4-3 : C concentrations (a) and contents of granulo-densimetric fractions at 0-5 cm depth. Andranomanelatra, Madagascar. (Grandière et al., submitted, Chapitre 3).

Conclusion

Figure 1 : Bilan de C sur 0-20 cm sur les systèmes en SCV et en labour conventionnel du dispositif d'Andranomanelatra.

Figure 2 : Synthèse des résultats obtenus sur le système NT m/s et système CT m/s (a), et distribution du C stocké (ΔC) dans les différentes fractions du sol (b), sur la couche de 0-5 cm de profondeur. Andranomanelatra.

Figure 3 : Scénarios d'interprétation des différences observées entre systèmes SCV et CT.

TITRE : Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches

RESUME

Stocker du carbone (C) dans le sol représente à la fois des enjeux agronomiques (amélioration des propriétés physico-chimiques du sol) et environnementaux (réduction de la quantité de CO₂ atmosphérique). A Madagascar, le stockage et la protection de C dans le sol, sous systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sont étudiés sur un dispositif de longue durée (11 ans) de la région d'Antsirabe, Hautes Terres malgaches).

Quatre systèmes sont étudiés : un système en labour conventionnel (Conventional-tillage) [CT m/s, rotation maïs (*Zea mays* L.)-soja (*Glycine max.* L.)], et trois systèmes en SCV sans travail du sol (No-tillage, NT) [NT m/s, rotation maïs-soja ; NT m/m-d, rotation maïs-maïs avec une couverture végétale de *Desmodium uncinatum* ; et NT h/s-k, rotation haricot (*Phaseolus vulgaris*)-soja avec une couverture de *Pennisetum clandestinum*]. Les résidus de récoltes sont exportés de la parcelle pour CT m/s alors qu'ils sont restitués pour les NT.

Les résultats montrent des teneurs en C significativement plus élevées sous systèmes NT par rapport à CT à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Au-delà de 10 cm de profondeur, les deux modes de gestion ne sont plus différents. Les valeurs de stocks de C à masse équivalente indiquent des stockages annuels élevés pour les systèmes NT étudiés, de 0,7 à 1,0 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour la couche de 0-20 cm. Ce stockage annuel élevé sous systèmes NT est en grande partie attribué à l'importante quantité de biomasse restituée par ces systèmes, par rapport au système labouré.

Les teneurs en C élevées sous NT s'accompagnent d'une teneur élevée en macroagrégats (MA) stables à l'eau, de 16 à 33 % plus élevée par rapport à CT, à 0-5 et 5-10 cm. Ces macroagrégats stables contribuent à plus de 80 % à la différence de teneur en C entre systèmes NT et CT. Ceci pourrait induire une protection physique du C se trouvant à l'intérieur des agrégats contre la minéralisation microbienne.

Les fractionnements granulo-densimétriques effectués sur ces échantillons permettent de localiser le C stocké sous NT. A 0-5 cm, 30 à 40 % du C stocké sont associés aux matières organiques particulières internes aux agrégats stables (MOPi) de taille supérieure à 50 µm et 40 à 60 % aux fractions fines de taille inférieure à 50 µm. A 5-10 cm, 60 à 90 % du C stocké sont localisés dans les fractions fines (< 50 µm) du sol. Si la matière organique associée aux fractions fines du sol est protégée physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne par son adsorption sur les particules minérales du sol, les MOPi sont protégées physiquement par leur emprisonnement à l'intérieur des agrégats.

Par ailleurs, la déprotection de ces MOPi, par broyage grossier (< 200 µm) du sol total ou par broyage fin (< 50 µm) des macro- et mésoagrégats, ne révèle, qu'une faible quantité de C protégé physiquement (de 26,2 à 54,0 µgC.g⁻¹ sol). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces MOPi, comme le montrent les observations au microscope électronique à balayage, sont recouvertes et imprégnées de fractions fines qui les protègent physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne malgré la destruction des agrégats.

En conclusion, pour le sol argileux considéré ici, les systèmes SCV testés s'avèrent très efficaces pour stocker du C dans le sol. Ce C stocké est relativement stabilisé puisqu'il est protégé, au moins physico-chimiquement, contre la minéralisation microbienne.

MOTS CLES : Sol tropical argileux, semis direct sous couvert végétal, stockage et protection de C, stabilité des agrégats, fraction granulométrique, fraction densimétrique, minéralisation.

Titre en français

Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches

Résumé en français

Stocker du carbone dans le sol représente à la fois des enjeux agronomiques et environnementaux. A Madagascar, le stockage et la protection de C dans le sol, sous systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sont étudiés sur un dispositif de longue durée (11 ans) de la région d'Antsirabe, Hautes Terres malgaches.

Les systèmes SCV présentent des stocks de carbone significativement plus élevés par rapport au labour conventionnel pour l'horizon 0-20 cm, représentant des stockages de carbone dans le sol variant de 0,6 à 1,0 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹. Ce stockage est attribué en grande partie à la quantité importante de biomasse restituée au sol. Le carbone stocké est essentiellement localisé dans les fractions fines du sol où il est protégé physico-chimiquement contre la minéralisation microbienne, mais une autre partie est localisée dans les matières organiques particulaires du sol qui est également protégé puisque n'est pas minéralisé lors d'une déprotection physique des agrégats.

Résumé en anglais

Soil organic carbon (SOC) storage can improve soil physico-chemical properties and reduce atmospheric carbon dioxide content. Soil organic carbon storage and protection under no-tillage (NT) systems were studied in a long term (11 years) experiment at Antsirabe, Madagascar Highlands.

NT systems increased significantly SOC stocks at 0-20 cm depth. The annual rate of SOC storage in NT, in soil mass basis, was about 0.6 to 1.0 MgC ha⁻¹ yr⁻¹ and mainly attributed to the high quantity of residues input in NT systems. The stored carbon was mainly associated with fine fractions and was physico-chemically protected against microbial mineralization. Stored C was also located in particulate organic matter, which not mineralized by physical deprotection, and was then protected in soil.

Titre en anglais

Soil carbon storage and protection in no-tillage systems of a tropical soil in malagasy highlands.

Planche 1 : Photos des fractions granulo-densimétriques obtenues par microscopie électronique à balayage.

