

Stockage de carbone dans les sols sous systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar

T. Razafimbelo⁽¹⁾, A. Albrecht^{(1), (2)}, C. Feller⁽³⁾, H. Ravelojaona^{(1), (2)}, N. Moussa⁽⁴⁾, C. Razanamparany⁽⁴⁾, C. Rakotoarinivo⁽⁴⁾, H. Razafintsalama⁽⁴⁾, R. Michellon⁽⁴⁾, K. Naudin⁽⁴⁾ et L. Rabeharisoa⁽¹⁾

- 1) Laboratoire des Radio-Isotopes (LRI), Université d'Antananarivo, BP3383, Route d'Andraisoro, Antananarivo 101, Madagascar, tantely.razafimbelo@ird.fr
- 2) UMR 210 Eco&Sols, Institut de Recherche pour le Développement (IRD)/Laboratoire des Radio-Isotopes, Université d'Antananarivo, BP3383, Route d'Andraisoro, Antananarivo 101, Madagascar
- 3) UMR 210 Eco&Sols, Institut de Recherche pour le Développement (IRD) / SUPAGRO, Bâtiment 12, 2, Place Viala, 34060 Montpellier cedex 1, France
- 4) ONG TAFA, BP 266, 110, Antsirabe, Madagascar

RÉSUMÉ

Stocker du carbone dans le sol permet d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol mais aussi d'atténuer les effets de gaz à effet de serre. Une étude des stocks de carbone dans le sol sous différents systèmes en semis direct selon différents contextes pédoclimatiques a été menée à Madagascar dans 4 régions: le Sud-Est (Manakara, 3 types de sol, climat tropical humide), le Centre Nord-Est (Ambatondrazaka, 3 types de sol, climat tropical de moyenne altitude), le Sud (Tuléar, 2 types de sol, climat semi-aride) et sur les Hautes Terres (Antsirabe, 1 type de sol, climat tropical d'altitude). Les traitements étudiés comportent des systèmes en semis direct en couverture végétale (SCV) avec des modalités différentes de fertilisation suivant les dispositifs (sans fertilisation, fumier seul, fertilisation minérale seule, fumier + fertilisation minérale). Ils sont comparés à des systèmes de labour conventionnel ou à des jachères. D'une manière générale, les sols étudiés couvrent une gamme de texture allant des sols sableux aux sols très argileux (teneur en argile + limons fins variant de 13 à 78 mg.100g⁻¹ sol). Les stocks de C du sol pour l'horizon équivalent à 0-20 cm sont élevés pour les sols argileux (> 40 Mg C.ha⁻¹ sol) et faibles pour les sols sableux (< 24 Mg C.ha⁻¹ sol). Les stocks de C sont corrélés positivement avec: (i) le climat, notamment la pluviométrie (R = 0,47, n = 10, p = 0,028), (ii) la texture (R = 0,53, n = 26, p = 0,005) et (iii) la teneur en agrégats stables du sol (R = 0,81, n = 26, p = 0,0001). La fertilisation n'influe que très faiblement les niveaux de stocks de C du sol. Les systèmes en semis direct influent positivement sur les teneurs en C à 0-5 et 5-10 cm par rapport au labour conventionnel mais on observe peu d'effet en termes de stockage de C dans l'horizon équivalent à 0-20 cm. Toutes situations confondues, les taux de stockage mesurés varient de 0 à 1,8 MgC.ha⁻¹.an⁻¹.

Mots clés

Carbone, stock de C, semis direct avec couverture végétale, climat, texture, structure, fertilisation, sol tropical, Madagascar.

SUMMARY**SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN DIRECT SEEDING MULCH CROPPING (DMC) SYSTEMS FOR VARIOUS PEDOCLIMATIC AREAS IN MADAGASCAR**

Soil organic carbon (SOC) storage under direct seeding mulch cropping (DMC) systems in various pedoclimatic conditions was studied in Madagascar: in the South-East (Manakara, 3 soil types, tropical wet climate), in the Center North-East (Ambatondrazaka, 3 soil types, subtropical climate), in the South-West (Tuléar, 2 soil types, semiarid climate) and in the Highlands (Antsirabe, 1 soil type, subtropical climate). DMC systems were studied with different inputs (no fertilizer, manure, fertilizer, and manure + fertilizer) as available on each site. These systems have been compared with conventional tillage systems or fallows.

Soil texture had a large extent, clay + fine silt fraction contents ranged from 13 to 78 mg. g⁻¹ soil. SOC stocks at the equivalent mass for 0-20 cm depth were high for clayey soils (> 40 Mg C.ha⁻¹ soil) and low for sandy soils (< 24 Mg C.ha⁻¹ soil). In this study, SOC was positively correlated with (i) rainfall ($R = 0.47$, $n = 10$, $p = 0.028$), (ii) with soil texture ($R = 0.53$, $n = 26$, $p = 0.005$), and (iii) with soil aggregate stability ($R = 0.81$, $n = 26$, $p = 0.0001$).

There was no significant effect of fertilizer level on C stocks. DMC systems affected positively SOC content at 0-5 and 5-10 cm depth but with less impact on SOC stocks for the mass equivalent 0-20 cm layer. The rate of SOC storage under DMC system ranged from 0 to 1,816 Mg C.ha⁻¹ year⁻¹, compared to conventional tillage system.

Key-words

Carbon, carbon stock, direct mulch cropping system, climate, soil texture, soil structure, fertilization, tropical soil, Madagascar.

RESUMEN**ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN LOS SUELOS BAJO SISTEMAS DE CULTIVO EN SIEMBRA DIRECTA CON COBERTURA VEGETAL (SCV) EN DIFERENTES CONTEXTOS PEDOCLIMÁTICO EN MADAGASCAR**

Almacenar carbono en el suelo permite mejorar las propiedades físico-químicas del suelo pero también atenuar los efectos del gas con efecto de invernadero. Se hizo un estudio de los depósitos de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas con siembra directa bajo diferentes contextos pedoclimáticos en Madagascar en 4 regiones: Sur-Este (Manakara, 3 tipos de suelo, clima tropical lluvioso), centro Noreste (Ambatondrazaka, 3 tipos de suelo, clima tropical de media altitud), Sur (Tulear, 2 tipos de suelo, clima semiárido) y en las Altas Tierras (Antsirabe, 1 tipo de suelo, clima tropical de altitud). Los tratamientos estudiados comportan sistemas en siembra directa con cobertura vegetal (SCV) con diferentes modalidades de fertilización según los dispositivos (sin fertilización, estiércol solo, fertilización mineral sola, estiércol + fertilización mineral). Se comparan a sistemas con labranza convencional o a barbechos. De una manera general, los suelos estudiados cubren una gama de textura de los suelos arenosos a los suelos muy arcillosos (el contenido en arcilla + limos finos varía de 13 a 78 mg.100g⁻¹ de suelo). Los depósitos de C del suelo para el horizonte equivalente 0-20 cm están elevados en suelos muy arcillosos (> 40 Mg C.ha⁻¹) y pequeños en suelos arenosos (< 24 Mg C.ha⁻¹). Los depósitos de carbono están ligados positivamente con: (i) el clima, notablemente la pluviosidad ($R = 0.47$, $n = 10$, $p = 0.028$), (ii) la textura ($R = 0.53$, $n = 26$, $p = 0.005$) y (iii) el contenido en agregados estables del suelo ($R = 0.81$, $n = 26$, $p = 0.0001$). La fertilización influye muy ligeramente los niveles de depósitos de C del suelo. Los sistemas en siembra directa influyen positivamente los contenidos en C a 0-5 y 5-10 cm en comparación a la labranza convencional pero se observa poco efecto en términos de almacenamiento de C en el horizonte equivalente 0-10 cm. Todas situaciones confundidas, las tasas de almacenamiento medidas varían de 0 a 1,8 MgC.ha⁻¹.an⁻¹.

Palabras clave

Carbono, deposito de C, siembra directa con cobertura vegetal, clima, textura, estructura, fertilización, suelo tropical, Madagascar.

Depuis la révolution industrielle, la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (GES: notamment dioxyde de carbone ou CO₂, oxyde nitreux ou N₂O et méthane ou CH₄) augmente d'une façon exponentielle. Ces augmentations sont essentiellement d'origine anthropique et bien que 66 % de ces émissions proviennent de l'utilisation des combustibles fossiles, 14 % proviennent de l'usage et du changement d'usage des terres, et 20 % de l'agriculture (IPCC, 2007). Afin d'atténuer ces émissions, diverses alternatives sont proposées, mais dans le domaine de l'agriculture, une des solutions proposées est le stockage à moyen et long termes (20 à 40 ans) du carbone (C) atmosphérique dans le système sol-plante, soit par changement d'usage des terres (éviter la déforestation, augmenter la reforestation, la surface des plantations sylvicoles, et développer l'agroforesterie), soit, pour un agrosystème donné, par des modifications d'itinéraires techniques. Dans ce dernier cas, l'utilisation des systèmes en semis direct avec couverture végétale (SCV) peut s'avérer intéressante. Ces systèmes associent le non travail du sol avec l'utilisation d'une couverture du sol par un mulch ou une plante associée à forte production de biomasse. Cette couverture apporte une quantité importante de matières organiques (MO) au sol. Diverses études en milieu tropical ont souligné l'intérêt de tels systèmes pour stocker du C atmosphérique dans le sol (Razafimbelo, 2005; Bernoux *et al.*, 2006).

Les déterminants du stockage de C dans le sol sont nombreux, liés à la fois à des facteurs biophysiques (types de sol, climat) et agronomiques (itinéraires techniques). Pour un climat donné et pour des sols bien drainés, on peut retenir les déterminants suivants: (i) type de sol (texture et minéralogie), (ii) niveau, qualité et localisation des restitutions organiques, (iii) itinéraires techniques (fertilisation minérale et travail du sol). La texture du sol intervient fortement dans le stockage de C dans le sol. Un sol argileux possède un pouvoir de stockage plus élevé qu'un sol sableux (Jones, 1973; Lepsch *et al.*, 1994; Feller et Beare, 1997). L'effet de la minéralogie est relativement peu documenté (Feller *et al.*, 2001). Le niveau, la qualité et le mode des restitutions organiques peuvent aussi influencer sur le stockage à long terme de C dans le sol (Bayer *et al.*, 2000). Quant à la fertilisation minérale, selon son effet sur la productivité, elle peut induire des effets positifs ou négatifs, sur le stockage de C (Graham *et al.*, 2002). Les dynamiques de la structure du sol et de la matière organique (MO) sont généralement liées, les teneurs croissantes de MO induisant une stabilisation de l'agrégation, celle-ci, en retour, permettant une protection, contre la minéralisation, des MO situées à l'intérieur des agrégats et donc limitant les pertes de C sous forme CO₂ (Six *et al.*, 2004). Ainsi le labour est-il généralement considéré comme un facteur défavorable au stockage de C dans le sol, à la fois par son effet direct d'oxygénation du sol et donc d'accroissement de l'activité minéralisatrice microbienne, et indirect, par destruction physique des agrégats con-

duisant à une déprotection des MO intra-agrégats (Balesdent *et al.*, 2000; Paustian *et al.*, 2000).

Différents sites expérimentaux, localisés dans des conditions pédo-climatiques contrastées, comportant à la fois différents types de sols et différents types de systèmes de culture, ont été mis en place par l'ONG Tafa (TAny sy Ampandrosoana) depuis les années 1990. Cette étude a pour objectifs d'évaluer le stockage de C dans le sol par ces différents systèmes et de définir parmi les facteurs disponibles les déterminants du stockage de C sous systèmes SCV à Madagascar.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Sites expérimentaux et prélèvements de sol

Les sites expérimentaux (coordonnées géographiques, caractéristiques climatiques, classifications pédologiques et texture du sol) sont présentés au *tableau 1*. L'étude a été effectuée dans 4 régions de Madagascar aux contextes pédoclimatiques très différents (*tableau 1*): le Sud-Est, le Centre Nord-Est, le Sud-Ouest et les Hautes Terres.

Les dispositifs étudiés sont ceux de l'ONG Tafa (TAny sy Ampandrosoana). Ils comportent des systèmes de culture conduits en semis direct avec couverture végétale, nommés SD, qui sont comparés avec des systèmes de référence qui peuvent être (i) des systèmes conduits en labour conventionnel nommés LB, (ii) des systèmes à très faibles intrants comme les parcelles paysannes, et (iii) des systèmes de jachères de longue durée (Jachère). Les systèmes étudiés sont décrits dans le *tableau 2*.

Chaque dispositif comporte différentes modalités de fertilisation:

- utilisation d'engrais minéral seul (Fm),
- utilisation de fumier de bovin seul (Fu),
- association d'engrais minéral et de fumier de bovin (Fu + Fm),
- sans fertilisation (F0).

Les traitements sont répartis au hasard sur les dispositifs. Des échantillons de sol sont prélevés au cylindre sur chacune des 4 parcelles élémentaires. Les prélèvements sont effectués au cylindre à 5 profondeurs: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm de profondeur. Sur chaque parcelle, des échantillons composites par profondeur sont constitués à partir de 4 prélèvements élémentaires. Les échantillons sont séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm pour les analyses ultérieures.

Dosage de carbone organique total

Le C organique total a été mesuré par combustion en voie humide suivant la méthode Walkley et Black (1934) suite à une oxydation de la matière organique par le bichromate de potassium. Elle a été effectuée sur l'ensemble des traitements étudiés.

Tableau 1 : Caractéristiques des sites expérimentaux.
Table 1 : Site description.

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

* Hijmans et al., 2005

Analyse granulométrique ou texture du sol

10 g de sol sont additionnés de 50 ml H₂O₂ (50 vol.) à froid pendant une nuit, puis portés à 80 °C pendant 3 heures. La suspension est additionnée de 20 ml de pyrophosphate de sodium à 40 g/l et agitée pendant 4 heures. Les fractions sont ensuite séparées par tamisage (sable grossier, sable fin, limon grossier) et sédimentation-centrifugation (limon fin, argile). Cette caractérisation a été effectuée sur un échantillon composite formé à partir des 4 parcelles de répétition, à 0-5 cm de profondeur. Elle n'a été effectuée que sur quelques traitements, et non sur l'ensemble des situations décrites au tableau 2.

Densité apparente

La densité apparente qui est le poids spécifique d'un volume apparent de sol est obtenue à partir des prélèvements au cylindre. Le volume du sol prélevé est estimé à partir du volume V du cylindre (250 cm³ pour les cylindres de 5 cm de hauteur et 500 cm³ pour les cylindres de 10 cm de hauteur). Le sol contenu dans chaque cylindre est directement pesé, et une aliquote de 20 g est prélevée, mise à l'étuve 105 °C pendant 48 heures et ensuite pesée afin de calculer le poids sec P du volume de sol. La densité apparente est alors calculée selon la formule :

$$da = P/V$$

P étant le poids sec de l'échantillon et V le volume du cylindre de prélèvement.

Stabilité structurale du sol

La stabilité structurale du sol a été étudiée suivant une méthode dérivée de Kemper et Rosenau (1986). Elle est effectuée pour tous les échantillons prélevés à 0-5 cm de profondeur.

Quatre grammes de sol séchés à l'air, préparés et tamisés à 2 mm (sol

Tableau 2: Dénomination des systèmes de cultures.
Table 2: Detailed of studied treatments.

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

Tableau 2: Dénomination des systèmes de cultures. (suite).
Table 2: Detailed of studied treatments.

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

Tableau 2: Dénomination des systèmes de cultures. (suite et fin).
Table 2: Detailed of studied treatments.

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

F0: sans fertilisation.

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

Fm: fertilisation minérale à raison de 62,5 kg de N, 14,5 kg de P et 19,9 kg de K par hectare pour H, F1 et F2 et 102,0 kg de N, 29,0 kg de P et 39,8 kg de K par hectare pour FS et FU.

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 heures 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 heures 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), est pipetée, séchée pendant 16 heures à 105 °C, puis pesée. Les teneurs en mésoagrégats (ME, 20-200 µm) sont calculées par différence entre sol total, SG, MA et MI.

Dans cette étude, seules les teneurs en MA seront présentées.

Analyses statistiques

Les traitements sont comparés entre eux par des analyses de variances (ANOVA).

RÉSULTATS

Propriétés physiques: texture, densité apparente, agrégation

Les sols étudiés appartiennent à une large gamme de texture (tableau 3) avec des teneurs en éléments fins (Argile + Limons Fins; A + LF) qui varient de 12 à 78 %. Les teneurs en A + LF pour les différents types de sol suivent l'ordre suivant: FU < PE < Fr≈Ft2 < FS≈Fhy < H < Fhu < Ft1.

La densité apparente (Da) augmente globalement avec la profondeur, mais pour un

Tableau 3: Teneurs en argile + limons fins (A + LF, 0-20 µm) des différents types de sols.**Table 3:** Clay + fine silt (A + LF, 0-20 µm) contents of soils.

Sol	Traitement	A + LF (%)	Sol	Traitement	A + LF (%)
H	SD RS Fm	56,32	PE	LB Riz-leg/M-leg Fu	18,51
Ft1	SD RS Fm	77,82	PE	SD Riz-leg/M-leg Fu	25,65
Ft2	SD RS Fm	39,36	PE	LB Riz-leg/M-leg Fu + Fm	28,90
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	23,53	PE	SD Riz-leg/M-leg Fu + Fm	30,71
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	45,93	PE	Parcelle paysanne	27,28
Fr	LB M-leg/R-leg Fu + Fm	25,07	FS	SD MN Fm	55,20
Fr	SD M-leg/R-leg Fu + Fm	37,54	FS	SD MAP Fm	59,00
Fr	Jachère	40,74	FS	LB maïs	50,40
Fhy	LB Riz-leg/M-leg Fu	56,53	FS	Jachère	56,00
Fhy	SD Riz-leg/M-leg Fu	54,07	FU	SD MN Fm	12,50
Fhy	LB Riz-leg/M-leg Fu + Fm	60,03	FU	SD MAP Fm	19,20
Fhy	SD Riz-leg/M-leg Fu + Fm	57,20	FU	Parcelle paysanne	12,50
Fhy	abandonnée	61,98	FU	Jachère	23,40

sol et une couche donnés, pratiquement aucune différence significative n'apparaît selon les traitements. Les Da les plus élevées sont notées pour le sol ferrugineux FU avec 70 % de sables.

Les sols étudiés montrent également une très large gamme de teneurs en MA stables du sol (*tableau 4*). Les sols PE, FU sont les moins stables avec des teneurs en MA variant de 72 à 425 mg. g⁻¹ sol. Les sols Ft2, Fr et FS présentent des teneurs en MA équivalentes, variant de 230 à 412 mg. g⁻¹ sol. Les sols H, Ft1, Fhy et Fhu sont les plus stables et présentent des teneurs en MA variant de 369 à 730 mg. g⁻¹ sol. D'une manière générale, les traitements en semis direct présentent des teneurs en MA légèrement plus élevées, mais les différences observées entre labour et semis direct ne sont significatives que pour les sols H et PE.

Teneurs et stocks de C

Tous dispositifs et profondeurs confondus, les teneurs en C varient de 1 à 47 mg C.g⁻¹ sol. Ces teneurs sont faibles (< 20 mg C.g⁻¹ sol) pour le sol PE, moyennes (de 20 à 35 mg C.g⁻¹ sol) pour les sols H, Ft2, Fr, Fhy, FS et FU et élevées (> 35 mg C.g⁻¹ sol) pour Ft1 et Fhu. Elles diminuent avec la profondeur (*figure 1*). Pour un même type de sol et un même niveau de fertilisation, les teneurs en C sous systèmes SCV sont généralement significativement plus élevées ($p < 0,05$) par rapport à leurs homologues labourés, essentiellement pour la couche 0-5 cm.

Bien que les teneurs en C aient tendance à être un peu plus élevées pour un niveau plus élevé de fertilisation, les seules différences significatives observées sont :

- à 10-20 cm pour le traitement SD RS du sol Ft1, où la teneur en C est plus élevée sous SD RS Fm (29 mg C. g⁻¹ sol) que sous SD RS F0 (25 mg C. g⁻¹ sol),

- à 5-10 cm pour le traitement SD RS du sol Ft2, où la teneur en C est plus élevée sous SD RS Fm (23 mg C. g⁻¹ sol) que sous SD RS F0 (15 mg C. g⁻¹ sol),

Du fait de la différence de densité apparente entre les différents types du sol (*tableau 5*), les stocks de C ont été calculés pour une masse équivalente de sol 1479 Mg.ha⁻¹ qui correspond à la couche 0-20 cm du sol le moins dense (*tableau 6*).

D'une manière générale, les valeurs de stocks de C sont faibles pour les sols Fr, PE, FS et FU (de 8 à 26 Mg C.ha⁻¹), moyennes pour les sols Ft2 et Fhy (de 22 à 31 Mg C.ha⁻¹) et élevées pour les sols H, Ft1 et Fhu (de 26 à 62 Mg C.ha⁻¹).

Pour un même niveau de fertilisation, les stocks de C sous semis direct sont significativement plus élevés par rapport au labour pour les systèmes SD RS Fm du sol H, et SD R-leg/M-leg Fu du sol PE. Il n'y a pas de différences significatives entre semis direct et labour pour les autres systèmes.

L'effet fertilisation est évalué, pour un même système, par la comparaison des stocks de C sous les différents niveaux de fumure existants pour ce système (F0 vs Fm, ou Fu vs Fu + Fm selon les cas). Aucun effet significatif de la fertilisation n'est observé sur les stocks de C pour l'ensemble des traitements étudiés.

Le stockage annuel de C (calculé par différence de stocks entre traitement en semis direct et traitement labouré, rapporté au nombre d'années d'exploitation) varie de 0 à 1,8 Mg C.ha⁻¹ (*tableau 7*), mais les différences ne sont significatives que pour les situations H et PE.

Tableau 4: Teneurs en macroagrégats stables (mg. g⁻¹ sol). (Valeurs moyennes et écart-types, n=4).**Table 4:** Macroaggregate contents of soils in mg. g⁻¹ soil. (Mean values and standard deviation; n=4).

Sol	Traitement	MA		Sol	Traitement	MA	
H	LB RS F0	405,8	72,8 A	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu	526,0	29,5 AB
H	SD RS F0	572,1	26,1 B	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu	587,2	25,4 BC
H	SD RP F0	533,3	65,5 B	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu + Fm	489,4	73,3 A
H	LB RS Fm	368,9	50,4 A	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu + Fm	556,9	37,8 ABC
H	SD RS Fm	558,1	35,8 B				
H	SD RP Fm	510,3	63,7 B	FS	LB arachide	230,0	31,0 A
				FS	LB maïs	273,2	132,7 A
Ft1	Défriche Riz-manioc	680,5	34,4 A	FS	SD MN F0	361,8	37,1 A
Ft1	SD RS F0	713,0	31,3 A	FS	SD MAP F0	304,8	20,6 A
Ft1	SD RS Fm	729,8	46,0 A	FS	SD MN Fm	340,5	32,1 A
				FS	SD MAP Fm	347,5	39,1 A
Ft2	LB RS F0	368,6	46,0 A	FS	Jachère	330,6	29,3 A
Ft2	SD RS F0	412,8	21,3 A				
Ft2	LB RS Fm	340,0	27,5 A	FU	Paysan	72,2	35,0 A
Ft2	SD RS Fm	341,3	32,3 A	FU	SD MN F0	142,8	39,4 AB
				FU	SD MAP F0	110,9	15,3 A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	344,3	41,2 A	FU	SD MN Fm	132,9	32,5 AB
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	401,2	16,4 A	FU	SD MAP Fm	121,7	23,9 AB
Fr	LB M-leg/R-leg Fu + Fm	318,4	51,5 A	FU	Jachère	182,0	37,6 B
Fr	SD M-leg/R-leg Fu + Fm	393,1	50,7 A				
Fr	Jachère	391,0	15,0 A	Fhu	LB MS	521,5	55,7 A
				Fhu	SD MS	691,3	26,1 C
PE	Paysan	222,2	47,1 A	Fhu	SD MM-D	606,1	46,4 ABC
PE	LB R-leg/M-leg Fu	232,8	16,2 A	Fhu	SD HS-K	643,2	6,8 B
PE	SD R-leg/M-leg Fu	425,8	74,1 B				
PE	LB R-leg/M-leg Fu + Fm	263,0	43,1 A				
PE	SD R-leg/M-leg Fu + Fm	358,6	59,2 B				

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

Quelques relations statistiques entre les stocks de carbone du sol, le climat, la texture et la teneur en macroagrégats

Les stocks de C de la couche équivalente (Eq) 0-20 cm sont corrélés positivement avec la pluviométrie moyenne annuelle (Pmm, *figure 2*, $p = 0,030$) et la teneur en éléments fins (A + LF, *figure 3*, $p = 0,005$). La corrélation positive entre teneur en C et en macroagrégats (MA, *figure 5*, $p < 0,0001$) n'a pu être établie que pour la couche 0-5 cm, la seule caractérisée pour l'agrégation.

DISCUSSION

Cette étude tente de faire ressortir les principaux déterminants du stockage de C dans le sol à partir des nombreuses données disponibles. Ces déterminants peuvent être des déterminants naturels comme le climat et le type de sol (texture, minéralogie) ou des déterminants anthropiques comme l'agrégation du sol, le niveau de fertilisation ou le mode de gestion.

Figure 1: Profils des teneurs en carbone pour les différents types de sol.

Figure 1: SOC contents of soils.

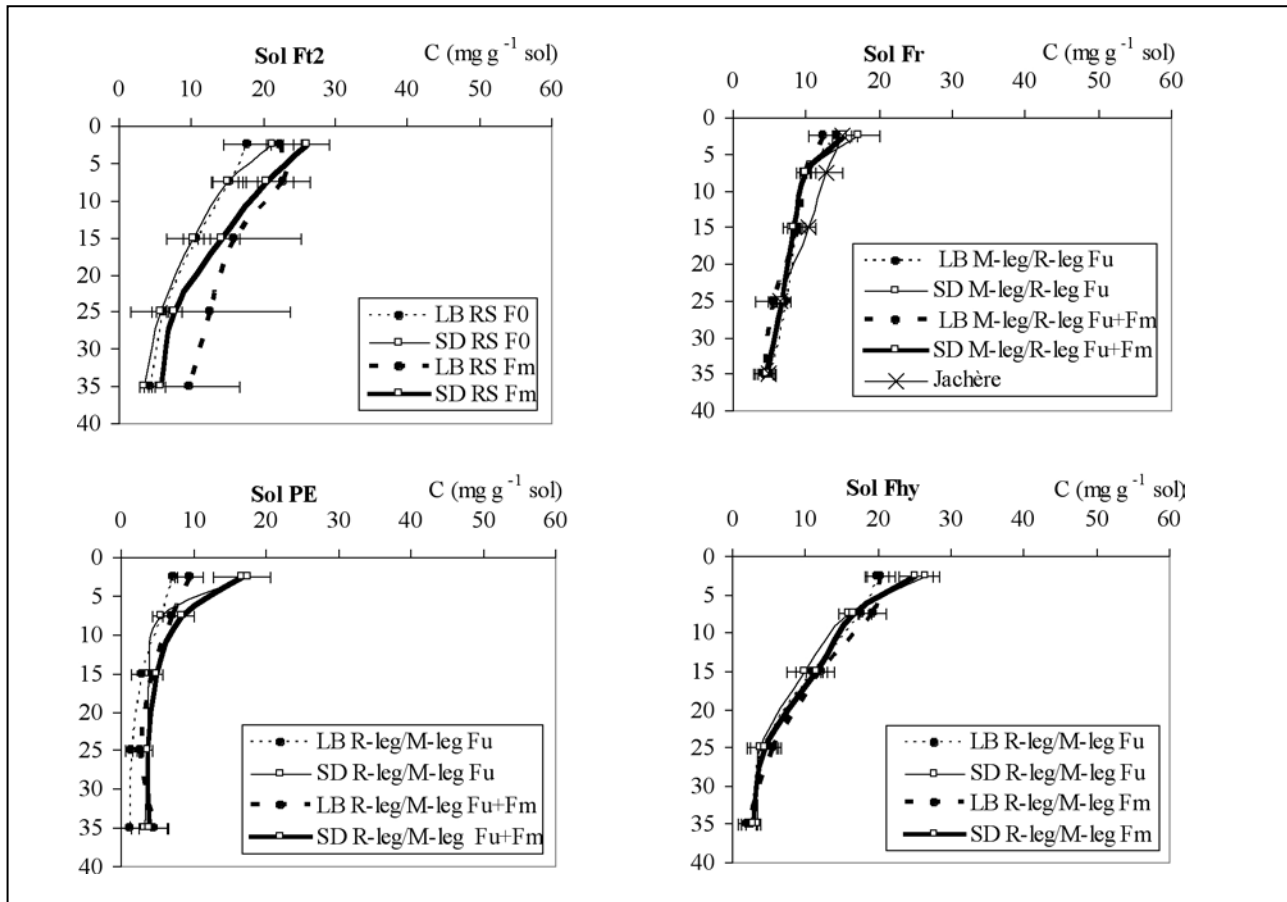


Figure 2: Relations entre stocks de C et pluviométrie (P).

Figure 2: Relationships between SOC stocks and rainfall.

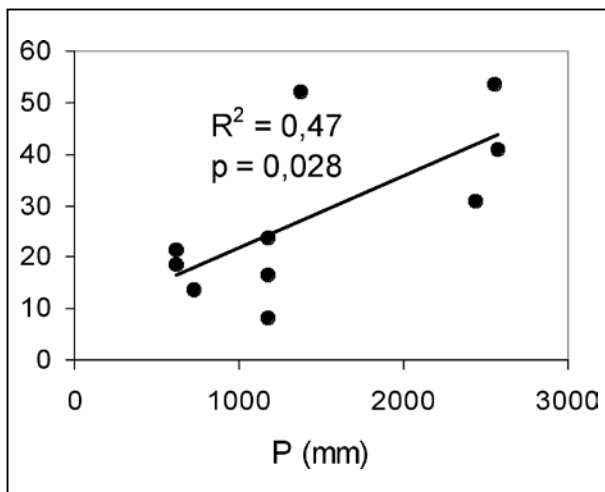


Figure 3: Relation entre stocks de C et texture (teneurs en argile + limons fins).

Figure 3: Relationships between SOC stocks and texture.

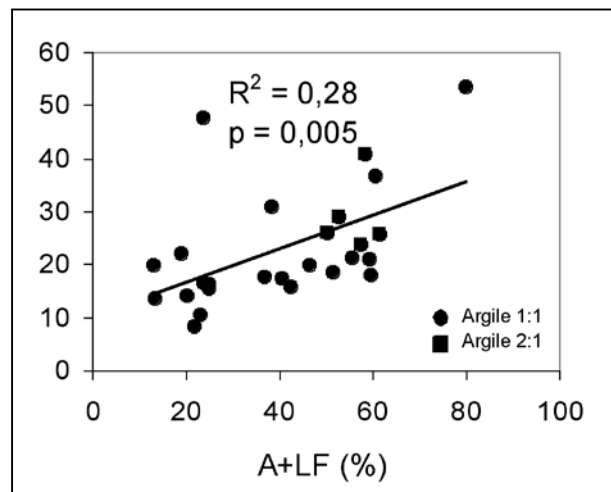


Figure 1: Profils des teneurs en carbone pour les différents types de sol.

Figure 1: SOC contents of soils.

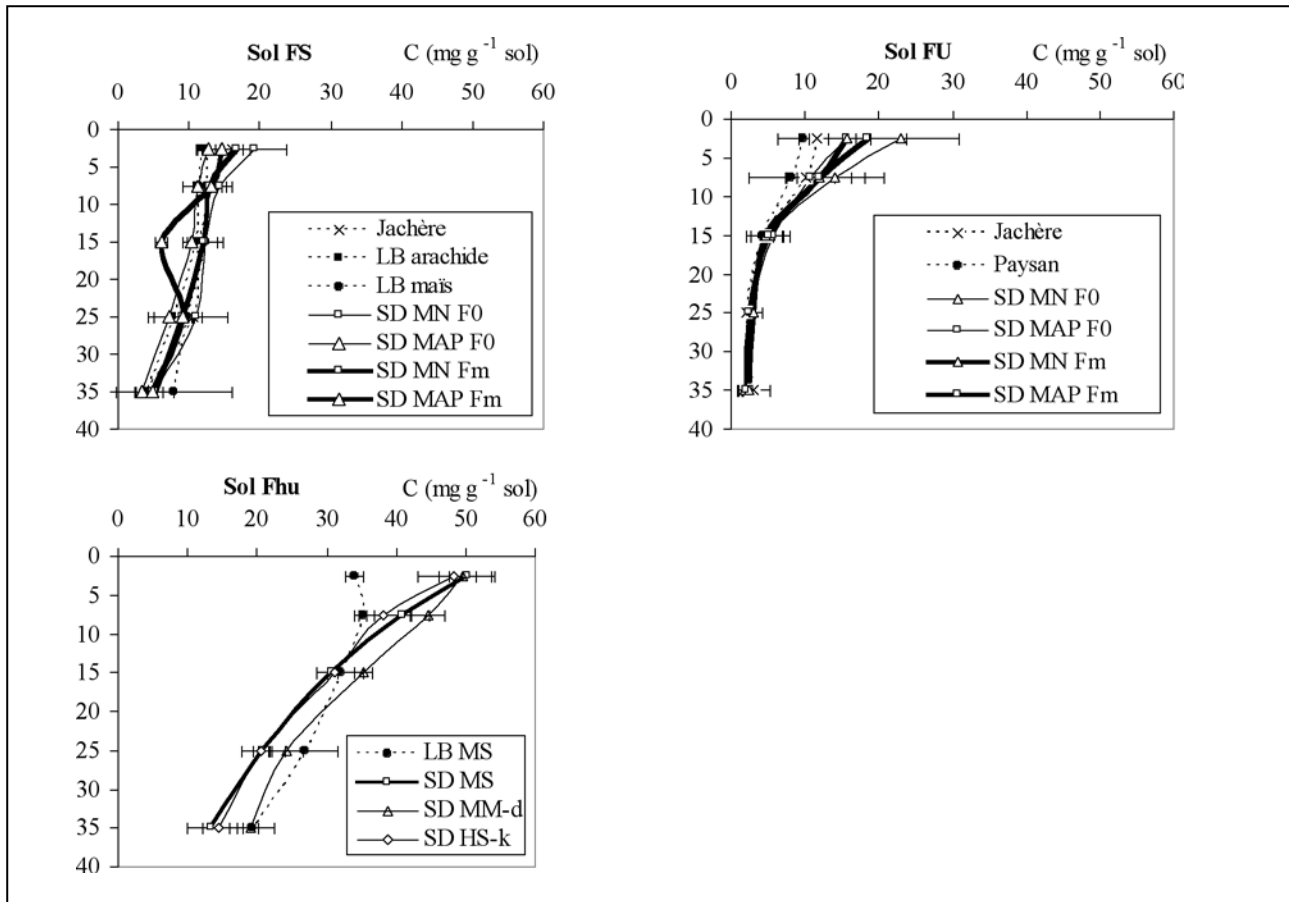
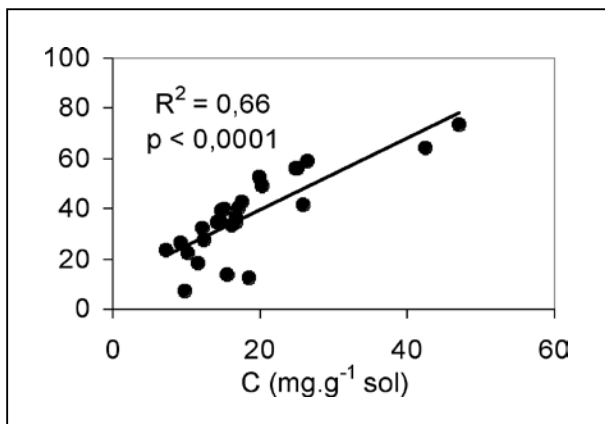


Figure 4: Relation entre stocks de C et stabilité des agrégats du sol.

Figure 4: Relationships between SOC stocks and soil stability.



Climat et stocks de carbone du sol

Dans cette étude, quatre types de climats sont recensés: climat tropical humide, tropical de moyenne altitude, tropical d'altitude et semi-aride. On observe qu'il y a une relation entre les stocks de carbone à 0-20 cm et la pluviométrie. Le climat influence ainsi les stocks de C du sol par la combinaison des actions de la température et de la pluviométrie sur la production primaire nette. En effet, une pluviométrie plus élevée entraîne une production végétale plus importante, et par conséquent une quantité de C restituée au sol plus importante (Girard *et al.*, 2005). La température agit plutôt sur le temps de résidence du C dans le sol. L'absence de relation entre température et stocks de C ici est due à la faible étendue des variations de températures moyennes annuelles entre les différents sites.

Type de sol et stocks de carbone du sol

Les sols étudiés ici regroupent à la fois des sols à argile 1 :1 (Ft1, Ft2, Fr, PE, FS, FU et Fhu) et des sols à argile 2 :1 (H, Fhy).

Tableau 5: Densités apparentes du sol (en g. cm⁻³; valeurs moyennes et écart-types; n=4).**Table 5:** Soil bulk density (in g. cm⁻³; mean values and standard deviation; n=4).

Sol	Traitement	0-5 cm			5-10 cm			10-20 cm			20-30 cm			30-40 cm		
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	1,11	0,11	B	1,07	0,07	A	1,22	0,13	AB	1,25	0,08	A	1,26	0,13	A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	0,99	0,01	A	1,06	0,11	A	1,15	0,07	A	1,23	0,05	A	1,31	0,09	A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu + Fm	1,18	0,05	B	1,13	0,03	AB	1,24	0,05	AB	1,24	0,07	A	1,29	0,08	A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu + Fm	1,15	0,04	B	1,21	0,09	AB	1,25	0,03	AB	1,27	0,04	A	1,27	0,05	A
Fr	Jachère	1,31	0,08	C	1,26	0,10	B	1,34	0,07	B	1,36	0,08	A	1,36	0,04	A
PE	LB R-leg/M-leg Fu	1,10	0,08	A	1,07	0,07	A	1,18	0,08	A	1,19	0,07	A	1,02	0,24	A
PE	SD R-leg/M-leg Fu	1,10	0,15	A	1,17	0,11	A	1,20	0,12	A	1,11	0,18	A	1,15	0,10	A
PE	LB R-leg/M-leg Fu + Fm	1,04	0,05	A	1,05	0,05	A	1,11	0,13	A	1,13	0,04	A	1,00	0,08	A
PE	SD R-leg/M-leg Fu + Fm	1,05	0,12	A	1,07	0,06	A	1,16	0,08	A	1,11	0,13	A	1,10	0,12	A
Fhy	LB R-leg/M-leg Fu	0,94	0,17	A	0,98	0,05	A	1,19	0,05	A	1,11	0,11	A	1,10	0,15	A
Fhy	SD R-leg/M-leg Fu	0,96	0,10	A	1,09	0,16	A	1,17	0,07	A	1,03	0,06	A	1,00	0,05	A
Fhy	LB R-leg/M-leg Fm	1,02	0,15	A	1,00	0,07	A	1,27	0,15	A	1,17	0,11	A	1,09	0,05	A
Fhy	SD R-leg/M-leg Fm	1,25	0,05	B	1,31	0,08	B	1,33	0,02	A	1,30	0,09	B	1,13	0,08	A

Sol	Traitement	0-5 cm			5-10 cm			10-20 cm			20-30 cm			30-40 cm		
H	LB RS F0	1,13	0,09	A	1,14	0,07	A	1,21	0,05	A	1,23	0,05	A	1,18	0,11	A
H	SD RS F0	1,12	0,10	A	1,17	0,04	A	1,20	0,09	A	1,21	0,03	A	1,25	0,02	AB
H	SD RP F0	1,09	0,11	A	1,24	0,07	A	1,23	0,08	A	1,36	0,10	A	1,38	0,06	A
H	LB RS Fm	1,07	0,04	A	1,16	0,07	A	1,20	0,08	A	1,25	0,08	A	1,17	0,07	A
H	SD RS Fm	1,14	0,07	A	1,19	0,05	A	1,22	0,09	A	1,23	0,04	A	1,28	0,08	AB
H	SD RP Fm	1,11	0,03	A	1,26	0,03	A	1,26	0,05	A	1,31	0,08	A	1,34	0,09	AB
Ft1	Défriche Riz-Manioc	0,96	0,05	A	0,99	0,03	A	1,02	0,02	A	1,09	0,06	A	1,11	0,04	A
Ft1	SD RS F0	1,06	0,12	A	1,07	0,02	B	1,11	0,04	B	1,17	0,02	A	1,21	0,05	A
Ft1	SD RS Fm	0,94	0,05	A	1,04	0,04	AB	1,04	0,05	A	1,12	0,03	A	1,19	0,08	A
Ft2	LB RS F0	1,25	0,17	A	1,20	0,12	A	1,42	0,03	A	1,48	0,02	A	1,51	0,01	A
Ft2	SD RS F0	1,21	0,05	A	1,38	0,08	A	1,42	0,04	A	1,48	0,03	A	1,50	0,01	A
Ft2	LB RS Fm	1,14	0,05	A	1,22	0,17	A	1,36	0,15	A	1,44	0,10	A	1,48	0,14	A
Ft2	SD RS Fm	1,21	0,01	A	1,36	0,03	A	1,40	0,02	A	1,43	0,06	A	1,48	0,09	A

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

Tableau 5: (Suite et fin).**Table 5:** Soil bulk density (in g. cm⁻³; mean values and standard deviation; n=4).

Sol	Traitement	0-5 cm			5-10 cm			10-20 cm			20-30 cm			30-40 cm		
FS	Jachère	1,21	0,04	A	1,34	0,08	A	1,40	0,03	C	1,30	0,03	B	1,28	0,05	A
FS	LB Arachide	1,25	0,07	A	1,20	0,04	A	1,15	0,10	B	1,19	0,03	AB	1,29	0,03	A
FS	LB maïs	1,25	0,01	A	1,33	0,28	A	1,27	0,06	BC	1,26	0,02	AB	1,29	0,05	A
FS	SD MN F0	1,12	0,03	A	1,21	0,06	A	1,26	0,09	BC	1,22	0,03	AB	1,28	0,02	A
FS	SD MAP F0	1,22	0,02	A	1,15	0,01	A	1,22	0,05	BC	1,19	0,02	AB	1,30	0,00	A
FS	SD MN Fm	1,20	0,07	A	1,25	0,05	A	1,16	0,04	B	1,26	0,07	AB	1,32	0,02	A
FS	SD MAP Fm	1,16	0,13	A	1,11	0,11	A	0,95	0,25	A	1,17	0,10	A	1,24	0,07	A
FU	Jachère	1,44	0,13	AB	1,64	0,17	A	1,70	0,05	C	1,67	0,12	A	1,61	0,18	A
FU	Paysan	1,60	0,02	B	1,59	0,06	A	1,63	0,04	B	1,66	0,03	A	1,69	0,09	A
FU	SD MN F0	1,42	0,12	AB	1,51	0,15	A	1,57	0,02	AB	1,63	0,06	A	1,66	0,04	A
FU	SD MAP F0	1,41	0,07	AB	1,49	0,03	A	1,54	0,04	A	1,59	0,03	A	1,65	0,07	A
FU	SD MN Fm	1,35	0,10	A	1,54	0,03	A	1,56	0,02	AB	1,62	0,09	A	1,63	0,07	A
FU	SD MAP Fm	1,41	0,06	AB	1,57	0,05	A	1,59	0,04	AB	1,63	0,06	A	2,04	0,71	A

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

Feller et Beare (1997) ont montré, pour une collection de sols tropicaux, que pour une même teneur en argile + limons fins, il n'y a pas de grandes différences de teneurs en C entre les sols à argile 1 :1 et argile 2 :1. C'est également ce que semble montrer cette étude, même si la répartition en nombre des situations (2 sols avec argile 2 :1 et 7 avec argile 1 :1) n'est pas très équilibrée.

La texture du sol peut influencer le niveau de C organique dans le sol. En effet, dans cette étude, les stocks de C sont corrélés positivement aux teneurs en argile + limons fins. Des études antérieures pour des sols tropicaux ont montré que les teneurs en C du sol augmentent avec les teneurs en éléments fins (argile + limons fins) (Feller *et al.*, 2001 ; Barthes *et al.*, 2007) et confortent l'importance de la texture comme déterminant du stockage de C dans le sol. En effet, les argiles et limons fins (A + LF) ont le pouvoir de se lier avec les polymères humiques du sol. La quantité de MO associée à la fraction A + LF est donc tributaire de la quantité de ces fractions dans le sol. Un sol sableux (FU, PE), pauvre en A + LF, présente alors un stock de C plus faible qu'un sol argileux (Fhu, H) riche en A + LF.

Stabilité des agrégats et teneurs en carbone du sol

Dans cette étude, la stabilité structurale du sol est corrélée positivement avec la teneur en C du sol. Cette relation positive a été déjà rapportée dans la littérature (Albrecht *et al.*, 1998 ; Barthes *et al.*, 2007) et peut être interprétée de deux manières : la MO du sol favorise la formation des agrégats stables du sol en jouant un rôle de ciment entre les différentes particules du sol (Tisdall et Oades, 1982). Dans ce cas, c'est la MO du sol qui est un déterminant de la formation des agrégats stables du sol. Toutefois, elle peut aussi être interprétée comme un effet de la protection physique de la matière organique du sol à l'intérieur des agrégats stables contre l'attaque des microorganismes du sol et la minéralisation du C (Beare *et al.*, 1994 ; Six *et al.*, 2002a). Cet effet de protection du C dans les agrégats stables est important dans les horizons de surface pour les systèmes en semis direct à mulch ou à couverture végétale (0-5 cm, 5-10 cm) car cette zone est sous influence racinaire avec une restitution organique importante due à la couverture ; elle est, de ce fait, soumise à une forte activité biologique (Razafimbelo *et al.*, 2006).

Tableau 6: Stocks de carbone du sol, en Mg C.ha⁻¹.sol, à masse de sol équivalente à 1479 Mg sol.ha⁻¹. (Valeurs moyennes et écart-types, n=4).

Table 6: Soil organic carbon stocks in soil mass equivalent of 1479 Mg soil.ha⁻¹ (in Mg C.ha⁻¹.soil; mean values and standard deviation; n=4).

Sol	Traitement	C		Sol	Traitement	C	
H	LB RS F0	29,6	1,9 A	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu	23,6	2,4 A
H	SD RS F0	36,0	4,8 AB	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu	25,9	1,8 AB
H	SD RP F0	30,1	8,1 AB	Fhy	LB R-leg/M-leg Fu + Fm	25,5	2,1 AB
H	LB RS Fm	26,3	4,9 A	Fhy	SD R-leg/M-leg Fu + Fm	29,0	1,8 B
H	SD RS Fm	40,8	5,0 B	FS	LB arachide	17,0	1,5 A
H	SD RP Fm	32,1	5,4 AB	FS	LB maïs	18,4	1,3 AB
Ft1	Défriche Riz-manioc	47,5	3,5 A	FS	SD MN F0	23,3	2,4 B
Ft1	SD RS F0	49,3	3,4 A	FS	SD MAP F0	17,4	2,5 A
Ft1	SD RS Fm	53,5	2,0 A	FS	SD MN Fm	21,2	2,9 AB
Ft2	LB RS F0	21,6	4,1 A	FS	SD MAP Fm	18,0	2,2 A
Ft2	SD RS F0	23,8	3,4 A	FS	Jachère	21,0	2,1 AB
Ft2	LB RS Fm	30,7	4,3 A	FU	Paysan	13,4	1,1 A
Ft2	SD RS Fm	30,2	6,6 A	FU	SD MN F0	26,2	7,8 A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu	16,5	1,5 AB	FU	SD MAP F0w	19,2	4,3 A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu	17,6	2,0 AB	FU	SD MN Fm	19,8	3,6 A
Fr	LB M-leg/R-leg Fu + Fm	15,6	0,9 A	FU	SD MAP Fm	22,1	5,9 A
Fr	SD M-leg/R-leg Fu + Fm	17,3	1,8 AB	FU	Jachère	16,2	8,6 A
Fr	Jachère	19,7	1,6 B	Fhu	LB MS	52,1	5,2 A
PE	Paysan	11,9	2,3 AB	Fhu	SD MS	55,7	3,7 AB
PE	LB R-leg/M-leg Fu	8,1	1,0 A	Fhu	SD MM-D	56,5	5,3 AB
PE	SD R-leg/M-leg Fu	13,9	3,9 B	Fhu	SD HS-K	61,6	0,8 B
PE	LB R-leg/M-leg Fu + Fm	10,5	1,5 AB				
PE	SD R-leg/M-leg Fu + Fm	15,3	1,8 B				

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

Niveau de fertilisation et stocks de carbone du sol

Dans cette étude, on ne distingue pas d'effet net de la fertilisation sur les stocks de C du sol. Sur l'ensemble des 14 situations, 2 seulement montrent une augmentation des stocks de C du sol, avec l'utilisation d'une fertilisation organo-minérale. Or, la littérature rapporte souvent des augmentations des stocks de C du sol suite à un fort apport de fertilisants (Graham *et al.*, 2002). Toutefois, Raun *et al.* (1998) ont trouvé, suite à un apport d'une dose croissante d'azote, qu'une augmentation du C du sol n'est observée que quand la quantité d'azote apportée dé-

passé la quantité d'azote nécessaire pour une production maximale en grains de blé. D'autre part, Michellon *et al.* (2003) ont remarqué, d'après une étude sur les mêmes systèmes, qu'il n'y a pas de différence de rendement (grains), et probablement de biomasse produite et, par conséquent, de biomasse restituée au sol entre deux niveaux de fertilisation (Fu et Fu + Fm), ce qui pourrait expliquer l'absence de différence au niveau des stocks de C du sol.

Tableau 7: Différences de stocks de carbone ($\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) entre traitement en semis direct et traitement témoin.**Table 7:** Annual differences in SOC stocks ($\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) between No-tillage systems and Controls.

Sol	Systèmes	$\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$
H	[SD RS F0 - LB RS F0]	0,803
H	[SD RS Fm -LB RS Fm]	1,816*
Ft1	[SD RS F0 - LB RS F0]	0,527
Ft2	[SD RS Fm - LB RS Fm]	0
Fr	[SD M-leg/Riz-leg Fu - LB M-leg/Riz-leg Fu]	0,137
Fr	[SD M-leg/Riz-leg Fm - LB M-leg/Riz-leg Fm]	0,220
Fhy	[SD R-leg/M-leg Fu - LB R-leg/M-leg Fu]	0,288
Fhy	[SD R-leg/M-leg Fu + Fm - LB R-leg/M-leg Fu + Fm]	0,440
PE	[SD R-leg/M-leg Fu - LB R-leg/M-leg Fu]	0,727*
PE	[SD R-leg/M-leg Fu + Fm - LB R-leg/M-leg Fu + Fm]	0,600
Fhu	[SD MS - LB MS]	0,324

* Stockage significatif de C

Mode de gestion, teneurs et stocks de carbone du sol

Les effets positifs des systèmes SCV sur les teneurs en C du sol sont visibles pour les couches de surface (0-5 et 5-10 cm). Ceci est souvent observé pour les systèmes à mulch où l'activité biologique est importante dans les couches superficielles du sol (Razafimbelo *et al.*, 2006). Toutefois, l'analyse des stocks de C dans l'horizon équivalent à 0-20 cm, pour les différents traitements étudiés, montre que quelques systèmes SCV seulement ont un effet significatif et positif par rapport au labour. Ceci peut être dû, d'une part, à la différence de densité apparente entre les traitements labourés et non labourés (les densités apparentes sont plus faibles pour les traitements labourés) et, d'autre part, à une absence de différence de teneurs en C entre traitements labourés et traitements en SCV pour les couches inférieures à 10 cm de profondeur. Les taux de stockage de C observés, de 0 à $1,8 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, avec une moyenne de $0,54 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, sont en accord avec ceux des sols tropicaux donnés par Six *et al.* (2002b) et Bernoux *et al.* (2006) pour des sols tropicaux. Dans la présente étude, les stockages les plus significatifs sont observés pour les systèmes d'âge supérieur à 8 ans. Aussi faudrait-il une durée minimale de pratique de SCV pour que le stockage de C dans le sol devienne significativement détectable.

CONCLUSIONS

Le taux annuel de stockage de C à 0-20 cm sous les systèmes SCV (semis direct + restitution de résidus) étudiés est de l'ordre de 0 à $1,8 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, mais ce stockage n'est significatif que sur très peu de systèmes à 0-20 cm. L'existence des différentes conditions pédo-climatiques et agronomiques a permis de définir les déterminants majeurs du stockage de C pour les cas étudiés, qui sont la texture, l'agrégation et la pluviométrie. Le niveau de fertilisation et le mode de gestion ne semblent pas à cette échelle être des déterminants très importants du stockage de C.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- 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.
- Barthes B., Kouakoua E., Larré-Larrouy M. C., Razafimbelo T., de Luca E. F., Azontondé A., Neves C., de Freitas P. L. et Feller C., 2007 - Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143, 14-25.
- 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., 1994 - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787-795.

- Bernoux M., Cerri C. C., Cerri C. E. P., Siqueira Neto M., Metay A., Perrin A.-S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M. d. C., Pavei M. et Milne E., 2006 - Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 26, 1-8.
- 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.
- Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J. et Morel J.-L., 2005 - *Sols et Environnement*. Paris, DUNOD.
- 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.
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra Juan L., Jones P. G. et Jarvis A., 2005 - Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978.
- IPCC, 2007 - *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and A. Reisinger (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland, 104pp.
- 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.
- 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.
- 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, Iguaçú, Brazil.
- 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.
- Raun W. R., Johnson G. V., Phillips S. B. et Westerman R. L., 1998 - Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. *Soil and Tillage Research*, 47, 323-330.
- Razafimbelo T., Barthes B., Larre-Larrouy M.-C., Luca E. F. D., Laurent J.-Y., Cerri C. C. et Feller C., 2006 - Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115, 285-289.
- Razafimbelo T., 2005 - Stockage et protection de carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. Montpellier, Université de Montpellier II.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S. et Deneff K., 2004 - A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79, 7-31.
- 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. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Walkley A. et Black I. A., 1934 - An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 63, 251-257.