

Distribution granulo-densimétrique de la matière organique dans un sol argileux sous semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches

I. Grandière⁽¹⁾, T. Razafimbelo⁽²⁾, B. Barthès⁽¹⁾, E. Blanchart⁽¹⁾, J. Louri⁽¹⁾, H. Ferrer⁽¹⁾, C. Chenu⁽³⁾, N. Wolf⁽⁴⁾, A. Albrecht⁽¹⁾⁽²⁾ et Ch. Feller⁽⁵⁾

1 IRD - UR 179 SeqBio, ENSAM, 2 Place Viala, Bâtiment 12, 34060 Montpellier Cedex 1, France

2 Laboratoire des Radiosotopes, Service de la Radioagronomie, BP 3383 Route d'Andraisoro, 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

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

RÉSUMÉ

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 clés

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

SUMMARY**DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC MATTER AMONG PARTICLE-SIZE AND DENSITY FRACTIONS IN NO TILLAGE SYSTEMS OF A CLAYEY SOIL OF MADAGASCAR HIGHLANDS**

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 lead 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 µm) within aggregates through physico-chemical protection, and (ii) in fine fractions (< 50 µm) 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 µm). 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 µm)..

Key-words

Clayey tropical soil, no-tillage, SOC storage, particle size, densimetric fractions.

RESUMEN**DISTRIBUCIÓN GRANULO-DENSIMÉTRICA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN UN SUELO ARCILLOSO BAJO SIEMBRA DIRECTA CON COBERTURA VEGETAL EN LAS ALTAS TIERRAS DE MADAGASCAR.**

La siembra directa, en particular bajo cubierta vegetal (SCV), permite almacenar materia orgánica (MO), pues carbono C en los suelos tropicales, de ahí su interés agronómico (fertilidad) y medioambiental (atenuación del cambio climático). El objetivo del trabajo presentado es estudiar el efecto de tres sistemas SCV sobre el contenido en C del suelo total y de sus fracciones granulo-densimétricas, sobre un dispositivo agronómico de larga duración (11 años) instalado en suelo arcilloso a Antsirabe, Madagascar (16°C, 1300mm an⁻¹). Los sistemas SCV probados comportan un tratamiento con cobertura muerta [NT m/s, rotación maíz (*Zea mays*)/soja (*Glycine max*)] y dos tratamientos con cobertura viva [NT m/m-d, rotación maíz/maíz con una cobertura vegetal de *Desmodium uncinatum*; y NT h/s-k, rotación frijol (*Phaseolus vulgaris*)/soja con una cobertura de *Pennisetum clandestinum*]. Son comparados a un sistema convencional [CT m/s, rotación maíz/soja]. En comparación con los suelos bajo CT, los suelos bajo SCV presentan contenidos en C significativamente más elevados a 0-5 cm (+13,3 mgC.g⁻¹ suelo en promedio) y a 5-10 cm (+5,8 mgC.g⁻¹ suelo en promedio) de profundidad. En los sistemas SCV, las plantas de cobertura no permiten aumentar significativamente los contenidos en C del suelo. La distribución de C en las fracciones granulo-densimétricas difiere según los sistemas y según la profundidad. A 0-5 cm., el C almacenado bajo NT es principalmente localizado: (i) en las MO particulares internas a los agregados (>50 µm), donde está protegido físicamente, y (ii) en la fracción fina del suelo (<50 µm), donde está protegido físico-químicamente por adsorción sobre las partículas minerales. A 5-10 cm, el C almacenado bajo NT se localiza esencialmente en la fracción fina del suelo. Para el conjunto del horizonte 0-10 cm, el almacenamiento de C bajo SCV es debido para 17 a 27% a las MO particulares internas en los agregados >50 µm, y para 46 a 60% a las fracciones finas <50 µm.

Palabras clave

Suelo tropical arcilloso, siembra directa bajo cobertura vegetal y protección de C, fracciones físicas de la MO.

Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES ; CO₂, N₂O et CH₄), 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 milieu tropical 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 biochimique. Les protections physique et physico-chimique peuvent être abordées à l'aide de fractionnements physiques du sol, soit en taille d'agrégats, soit en fractions densimétriques et/ou granulométriques de particules de sol dispersées.

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 ou non 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 (libres) 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 proportion de la MO séquestrée qui est localisée dans les fractions fines du sol, est plus importante que celle localisée dans les autres fractions (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 récents (Razafimbelo *et al.*, 2006) 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.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

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 1 300 mm. Le sol étudié est argileux (70 % 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.* (2006).

Le dispositif expérimental étudié a été mis en place par l'ONG Tafa avec l'appui du CIRAD en 1991. C'est un dispositif complètement randomisé, comprenant trois répétitions 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 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 m/m-d : un système SCV (NT) à couverture végétale vivante, sans travail du sol (NT m/m-d), associant une culture continue de maïs (m) et une légumineuse de couverture, le desmodium (d, *Desmodium uncinatum*) ;
- 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*).

Les apports, sur chaque traitement, comprennent un amendement organique (fumier de bovin) à raison de 5 t 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 éliminées avec des herbicides (glyphosate, 5 l.ha⁻¹). Les quantités de résidus aériens restitués par chaque traitement en SCV sont respectivement 4 900, 7 000 et 7 400 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de matières sèches, pour NT m/s, NT h/s-k et NT m/m, respectivement.

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.

Fractionnement physique de la MO du sol

Le fractionnement de la MO mis en œuvre associe densimétrie et granulométrie. Il est schématisé sur la *figure 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, dites particulières (référence au P), situées à l'extérieur des 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 > 50 µm

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 parti-

cules 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.

Détail de l'obtention des fractions MOPi 50-200 µm

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.m⁻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).

Dosages de C et azote (N)

Les concentrations en C et N des sols totaux (mgC,N.g⁻¹ sol) et des fractions (mg C,N.g⁻¹ 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 µm (avant séparation de F0-2 et F2-20) filtrée sur filtre millipore (0,22 µm). La concentration obtenue (mgC.l⁻¹) est corrigée de la teneur en C de l'eau déminéralisée utilisée.

Microscopie électronique à balayage

Des aliquotes des différentes fractions de l'échantillon CT m/s 0-5 cm (parcelle a) séchées 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).

Figure 1 - Méthode de fractionnement granulo-densimétrique utilisée.

Figure 1 - The granulo-densimetric fractionation method.

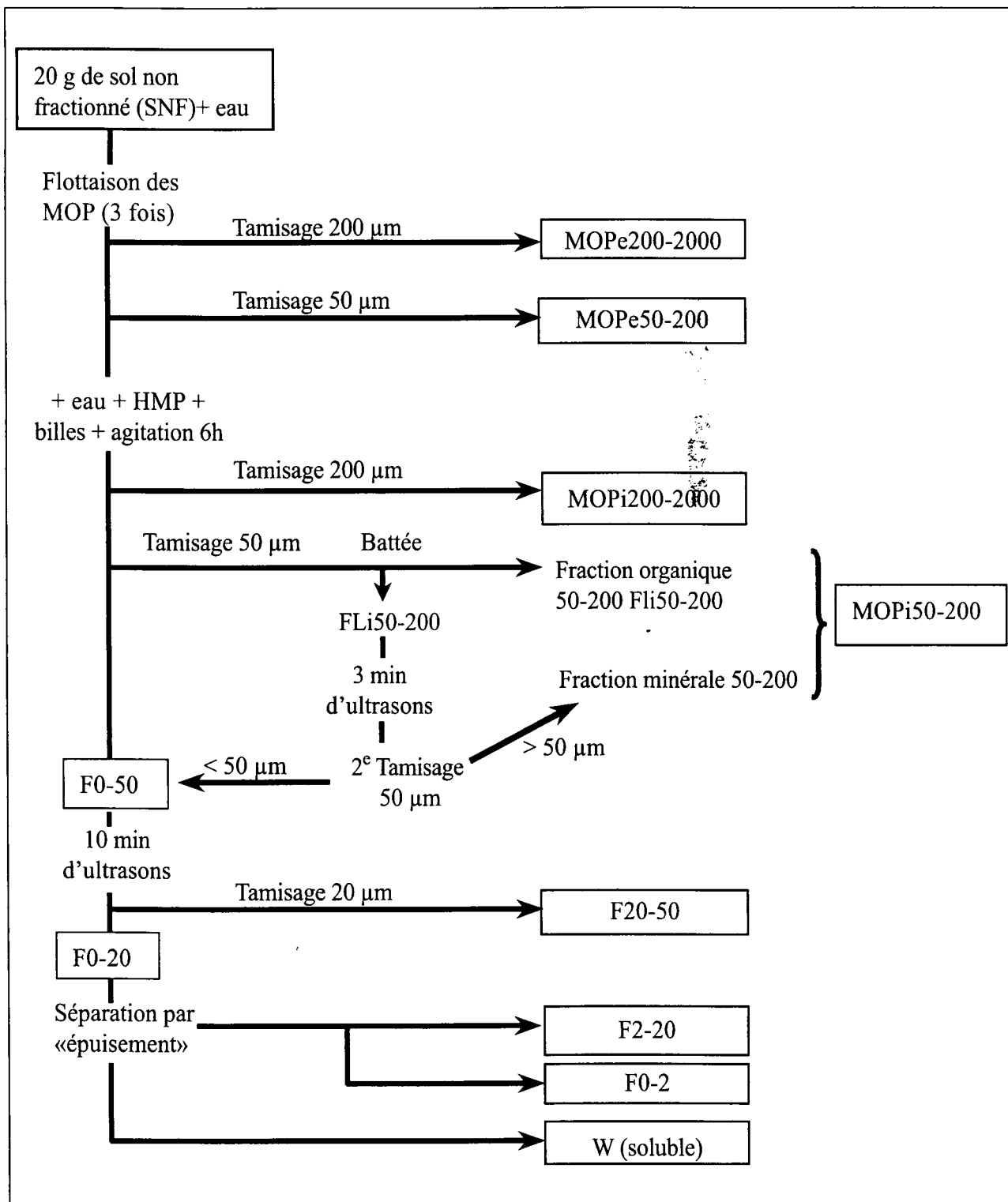
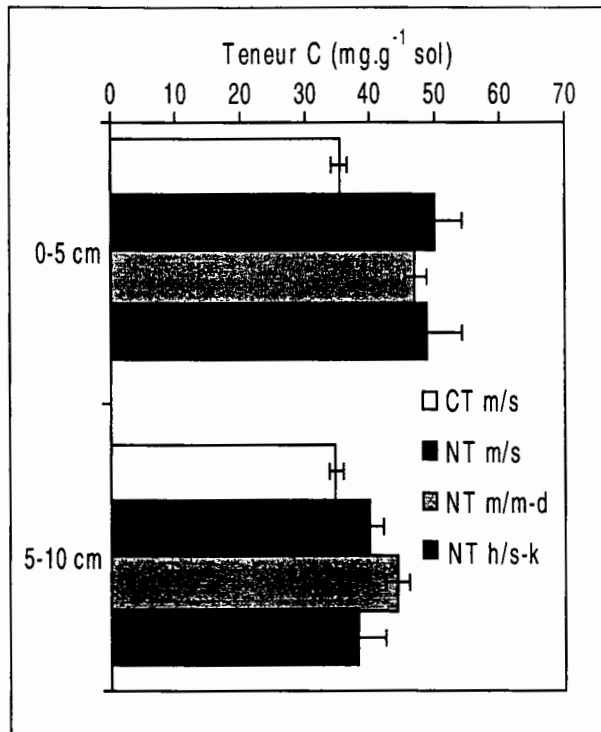


Figure 2 - Teneurs en C des sols totaux non fractionnés à 0-5 et 5-10 cm (moyenne \pm écart-type, $n = 3$).

Figure 2 - C contents of whole soil at 0-5 and 5-10 cm depth (mean \pm standard deviation, $n = 3$). Andranomanelatra, Madagascar.



Analyse statistique des résultats

Les données obtenues sont analysées par analyse de variance, et les moyennes sont classées et comparées entre elles par le test de Newman Keuls. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

RÉSULTATS

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 CT (*figure 2*). A 0-5 cm, la teneur moyenne en C des SCV ($n = 9$) est significativement plus importante ($p < 0,05$) 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 ($p < 0,05$) que celle sous travail conventionnel (CT m/s). A 5-10 cm, la teneur en C sous NT m/m-d est significativement supérieure ($p < 0,05$) à celles sous NT h/s-k et *a fortiori* CT m/s. Les teneurs en C ne diffèrent pas significativement ($p > 0,05$) entre les trois types de SCV à 0-5 cm, alors qu'à 5-10 cm, la teneur en C est significativement plus faible ($p < 0,05$) sous NT h/s-k que sous NT m/m-d.

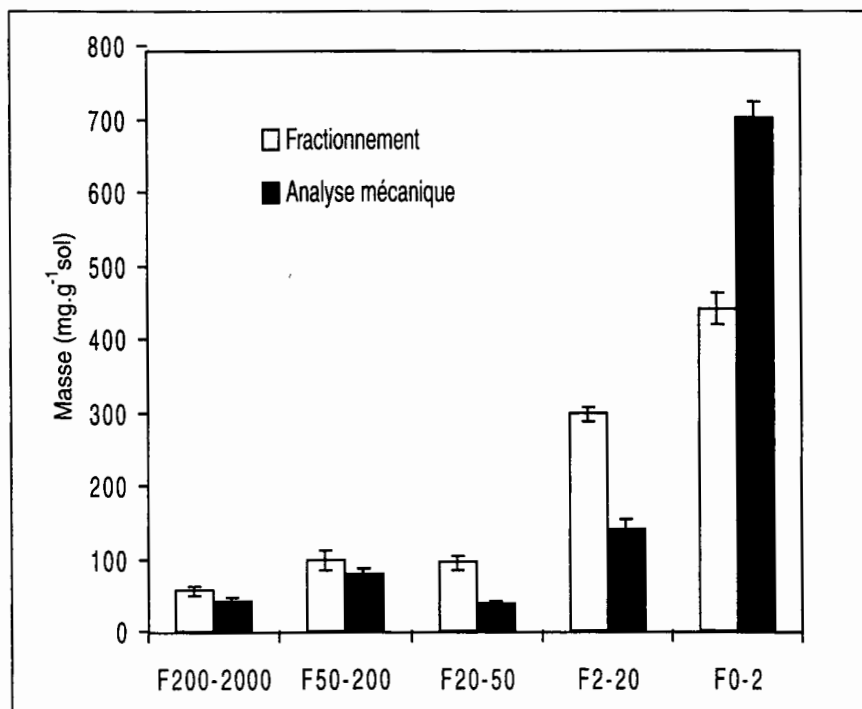


Figure 3 - Comparaison des masses moyennes des fractions issues du fractionnement granulométrique et de l'analyse mécanique pour l'ensemble des échantillons traités (moyenne \pm écart-type).

Figure 3 - Comparison of the mean masses of fractions resulting from granulometric fractionation and mechanical analysis (mean \pm standard deviation).

La teneur moyenne en C sous SCV est plus élevée ($p < 0,05$) 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 CT (35,3 et 34,8 mgC.g⁻¹ sol, respectivement à 0-5 et 5-10 cm).

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*) que la dispersion est incomplète pour l'ensemble des fractions supérieures à 20 µm et en particulier pour les fractions 2-20 µm et 20-50 µm. 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* indiquent que les échantillons analysés possèdent une granulométrie très proche.

Variabilité de laboratoire et variabilité de terrain. Pour la variabilité induite par la méthode de fractionnement au laboratoire (*tableau 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 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. Si on regarde les variabilités obtenues pour chaque système cultural, on a, pour le système CT, des CV en majorité plus faibles que pour chacun des systèmes SCV (données non présentées).

Caractéristiques générales des fractions

Concentrations en C et rapports C/N des fractions (*tableau 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*). 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 sur un échantillon provenant d'une parcelle du traitement CT m/s 0-5 cm. Les photos (*figure 4*) 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*, *figure 5*).

Comme il a été montré à la *figure 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 6* 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

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

Tableau 1 - Variation coefficients (CV, in %) of the results of physical fractionation for three lab repetitions. Sample 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 2 - Coefficients de variation (CV, en %) minima et maxima des résultats du fractionnement granulométrique sur les trois répétitions des quatre traitements pour les couches 0-5 et 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

Tableau 2 - Minimum and maximum variation coefficients (CV, in %) of the results of the physical fractionation over the three field replicates of the four treatments at 0-5 and 5-10 cm depth. Andranomanelatra, Madagascar.

Profondeur	Fractions	Masse	Concentration 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	-

Les valeurs correspondent aux coefficients de variation minima et maxima des quatre traitements.

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.

DISCUSSION

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.*, 2006). 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. Les teneurs en C plus élevées à 0-5 cm qu'à 5-10 cm pour les systèmes NT sont probablement dues à l'accumulation des débris (mulch) et à une densité racinaire plus importante à 0-5 cm qu'à 5-10. Pour le système CT, on n'a pas cette différence à cause de l'homogénéisation par le labour de ces deux horizons.

Pour les systèmes NT, le fait d'inclure une plante de couverture ne permet pas d'augmenter significativement la teneur en C du sol. Les différences de teneurs en carbone entre les systèmes NT et CT de cette étude sont discutées dans Razafimbelo *et al.* (2006). Elles 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.

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 sesquioxydes 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 μ m et leur transfert dans les fractions < 50 μ m. De même, pour améliorer la désagrégation des fractions MOPi50-200, 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 μ m, et c'est la raison pour laquelle nous avons considéré une seule fraction 0-50 μ m au lieu des trois fractions 20-50, 2-20 et 0-2 μ m. La *figure 3* montre que les fractions > 50 μ 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, MOPe et MOPi. 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 2*, qui inclut variabilité de terrain et de laboratoire.

Caractéristiques des fractions

Les concentrations en C des différentes fractions sont très variables. Les fractions MOPe, constituées essentiellement de matières organiques légères externes aux agrégats, sont très organiques. Les concentrations en C des fractions MOPe dans cette étude sont légèrement plus élevées que celles observées par Feller *et al.*

Tableau 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. Andranomanelatra, Madagascar (moyenne ± écart-type, n = 3).

Tableau 3 - Mass, C concentration (mg.g⁻¹ fraction), C content (mg.g⁻¹ soil) and C/N ratio of particle size and density fractions at a) 0-5 cm and b) 5-10 cm depths. Andranomanelatra, Madagascar (mean ± standard deviation, n = 3).

a) 0-5 cm	CT m/s	NT m/s	NT m/m-d	NT h/s-k	F
Masse	(mg.g⁻¹ sol)				
MOPe200_2000	3,5 ± 1,3 a	6,6 ± 2,6 a	5,0 ± 0,8 a	7,0 ± 3,5 a	1,430
MOPe50-200	2,0 ± 0,6 a	1,8 ± 0,3 a	2,4 ± 1,2 a	1,8 ± 1,3 a	0,312
MOPi200-2000	60,0 ± 3,8 a	62,3 ± 16 a	46,7 ± 3,8 a	57,5 ± 2,8 a	1,964
MOPi50-200	103,1 ± 10,6 a	95,0 ± 37,8 a	87,9 ± 20,4 a	115,1 ± 37,9 a	0,488
F20-50	124,9 ± 20,4 a	93,4 ± 75,6 a	81,9 ± 7,4 a	79,3 ± 21,9 a	0,607
F2-20	310,2 ± 4,4 a	295,1 ± 14,6 a	327,8 ± 12,8 a	323,6 ± 14,2 a	2,467
F0-2	403,0 ± 31,7 a	405,8 ± 46,2 a	404,6 ± 71,3 a	410,6 ± 50,3 a	0,012
W	-	-	-	-	
Somme	1006,7 ± 0,7 b	1003,3 ± 4,5 ab	1002,8 ± 3,6 ab	995,0 ± 7,1 a	4,110
SNF	1000	1000	1000	1000	
Concentration C	(mg.g⁻¹ fraction)				
MOPe200_2000	304,2 ± 14,1 a	302,5 ± 37,7 a	276,1 ± 32,5 a	301,0 ± 22,9 a	0,663
MOPe50-200	135,0 ± 18,0 a	162,0 ± 35,4 a	155,4 ± 36,9 a	160,6 ± 9,5 a	0,617
MOPi200-2000	13,4 ± 3,2 a	48,9 ± 12,9 b	34,6 ± 13,5 b	44,1 ± 11,4 b	6,034
MOPi50-200	30,0 ± 0,8 a	56,8 ± 2,0 b	62,2 ± 6,6 b	51,8 ± 12,3 b	12,049
F20-50	34,0 ± 3,0 a	58,4 ± 2,1 b	56,6 ± 9,5 b	59,2 ± 7,7 b	10,706
F2-20	36,3 ± 1,6 a	48,0 ± 1,6 b	46,5 ± 2,4 b	47,9 ± 2,7 b	21,267
F0-2	23,7 ± 1,1 a	27,2 ± 3,6 a	29,2 ± 2,1 a	28,6 ± 1,6 a	3,497
W	-	-	-	-	
Somme					
SNF	35,3 ± 1,3 a	50,0 ± 4,2 b	46,9 ± 1,7 b	48,7 ± 5,6 b	10,158
Contenu C	(mg.g⁻¹ sol)				
MOPe200_2000	1,1 ± 0,3 a	2,1 ± 1,0 a	1,4 ± 0,1 a	2,1 ± 0,9 a	0,298
MOPe50-200	0,3 ± 0,1 a	0,3 ± 0,0 a	0,3 ± 0,1 a	0,3 ± 0,2 a	0,240
MOPi200-2000	0,8 ± 0,2 a	3,2 ± 1,4 b	1,6 ± 0,7 ab	2,5 ± 0,7 ab	4,188
MOPi50-200	3,1 ± 0,4 a	5,4 ± 2,0 a	5,4 ± 0,7 a	6,2 ± 3,2 a	1,425
F20-50	4,3 ± 0,9 a	5,4 ± 0,9 a	4,8 ± 0,5 a	4,6 ± 0,8 a	1,071
F2-20	11,3 ± 0,6 a	14,2 ± 1,7 b	15,3 ± 1,0 b	15,5 ± 1,5 b	0,014
F0-2	9,6 ± 1,1 a	11,0 ± 1,4 a	11,7 ± 1,4 a	11,8 ± 2,0 a	1,325
W	4,3 ± 0,3 a	3,8 ± 0,2 a	4,3 ± 0,7 a	4,7 ± 0,5 a	1,519
Somme	34,6 ± 1,4 a	45,3 ± 4,1 b	44,8 ± 2,3 b	47,7 ± 3,2 b	14,226
SNF	35,3 ± 1,3 a	50,0 ± 4,2 b	46,9 ± 1,7 b	48,7 ± 5,6 b	10,158
C/N					
MOPe200_2000	15,8 ± 1,6 a	17,0 ± 1,4 a	14,7 ± 1,6 a	16,6 ± 3,4 a	0,662
MOPe50-200	11,0 ± 0,8 a	13,1 ± 0,6 a	12,1 ± 0,7 a	13,2 ± 2,4 a	1,827
MOPi200-2000	17,8 ± 1,6 a	15,1 ± 0,9 a	15,9 ± 0,8 a	15,9 ± 3,1 a	1,183
MOPi50-200	15,3 ± 0,6 a	14,2 ± 0,2 a	13,8 ± 0,2 a	14,6 ± 2,5 a	0,711
F20-50	14,2 ± 1,4 a	13,8 ± 0,4 a	14,4 ± 0,3 a	14,3 ± 1,2 a	0,198
F2-20	13,3 ± 0,6 a	13,1 ± 0,3 a	14,8 ± 2,5 a	13,1 ± 0,9 a	1,106
F0-2	12,1 ± 0,1 a	12,0 ± 0,3 a	10,6 ± 2,4 a	12,0 ± 1,1 a	0,902
W	-	-	-	-	
Somme					
SNF	13,8 ± 0,4 a	14,0 ± 0,1 a	13,4 ± 1,0 a	14,0 ± 0,4 a	

CT m/s : travail conventionnel, rotation maïs-soja.
 NT m/s : semis direct, rotation maïs/soja, en mulc
 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.
 SNF : sol non fractionné.
 Les lettres minuscules différentes, pour une même fraction, d'un traitement à un autre, indiquent une différence significative entre les traitements ($p < 0,05$).

Tableau 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. Andranomanelatra, Madagascar (moyenne ± écart-type, n = 3).

Tableau 3 - Mass, C concentration (mg.g⁻¹ fraction), C content (mg.g⁻¹ soil) and C/N ratio of particle size and density fractions at a) 0-5 cm and b) 5-10 cm depths. Andranomanelatra, Madagascar (mean ± standard deviation, n = 3).

b) 5-10 cm	CT m/s	NT m/s	NT m/m-d	NT h/s-k	F
Masse	(mg.g⁻¹ sol)				
MOPe200_2000	3,6 ± 0,4 a	3,2 ± 2,4 a	2,4 ± 0,3 a	1,8 ± 1,0 a	1,157
MOPe50-200	2,3 ± 0,2 a	1,6 ± 0,7 a	1,3 ± 0,5 a	1,9 ± 1,6 a	0,679
MOPi200-2000	52,4 ± 3,4 a	54,5 ± 15,7 a	44,8 ± 0,9 a	48,0 ± 2,5 a	0,860
MOPi50-200	105,6 ± 12,6 a	103,4 ± 25,0 a	90,2 ± 1,3 a	89,2 ± 4,8 a	1,094
F20-50	133,4 ± 9,7 a	94,6 ± 36,2 a	82,3 ± 12,4 a	87,2 ± 31,6 a	2,544
F2-20	294,3 ± 18,2 a	265,3 ± 30,5 a	284,5 ± 16,1 a	315,5 ± 23,8 a	2,502
F0-2	417,5 ± 12,2 a	479,9 ± 66,0 a	497,3 ± 26,2 a	450,8 ± 68,4 a	6,172
W	-	-	-	-	
Somme	1009,1 ± 2,9 b	1002,6 ± 2,3 ab	1002,7 ± 0,7 ab	994,3 ± 7,6 a	6,172
SNF	1000	1000	1000	1000	
Concentration C	(mg.g⁻¹ fraction)				
MOPe200_2000	286,6 ± 19,2 a	284,8 ± 6,3 a	311,1 ± 14,7 a	285,6 ± 16,6 a	2,158
MOPe50-200	140,0 ± 12,6 ab	121,4 ± 0,7 a	159,7 ± 15,2 b	122,0 ± 16,5 a	5,946
MOPi200-2000	11,9 ± 2,1 a	13,9 ± 5,0 a	18,2 ± 5,6 a	13,9 ± 3,0 a	1,233
MOPi50-200	31,8 ± 3,0 a	37,2 ± 3,3 a	40,2 ± 5,3 a	30,7 ± 3,2 a	4,196
F20-50	35,0 ± 1,7 a	45,9 ± 1,0 b	45,1 ± 1,9 b	40,1 ± 5,2 ab	8,882
F2-20	36,2 ± 1,2 a	44,7 ± 0,6 b	44,4 ± 3,3 b	39,9 ± 1,7 a	12,548
F0-2	23,3 ± 1,1 a	25,7 ± 1,3 ab	29,6 ± 3,1 b	26,1 ± 1,4 ab	5,446
W	-	-	-	-	
Somme					
SNF	34,8 ± 1,0 a	39,8 ± 2,3 ab	44,2 ± 1,8 b	38,0 ± 4,3 a	6,655
Contenu C	(mg.g⁻¹ sol)				
MOPe200_2000	1,0 ± 0,2 a	0,9 ± 0,7 a	0,7 ± 0,1 a	0,5 ± 0,3 a	1,022
MOPe50-200	0,3 ± 0 a	0,2 ± 0,1 a	0,2 ± 0,1 a	0,2 ± 0,2 a	1,253
MOPi200-2000	0,6 ± 0,1 a	0,8 ± 0,4 a	0,8 ± 0,3 a	0,7 ± 0,2 a	0,385
MOPi50-200	3,4 ± 0,6 a	3,7 ± 1,1 a	3,6 ± 0,5 a	2,7 ± 0,4 a	1,780
F20-50	4,7 ± 0,4 a	4,4 ± 1,6 a	3,7 ± 0,6 a	3,6 ± 1,8 a	0,522
F2-20	10,7 ± 0,8 a	12,0 ± 1,5 a	12,7 ± 1,4 a	12,6 ± 1,4 a	1,607
F0-2	9,7 ± 0,7 a	12,0 ± 1,3 ab	14,7 ± 1,3 b	11,7 ± 1,4 ab	6,583
W	4,5 ± 0,2 a	4,9 ± 0,6 a	5,4 ± 0,7 a	4,5 ± 0,8 a	
Somme	35,0 ± 0,4 a	40,5 ± 6,4 a	41,8 ± 2,9 a	36,5 ± 3,3 a	3,914
SNF	34,8 ± 1,0 a	39,8 ± 2,3 ab	44,2 ± 1,8 b	38,0 ± 4,3 a	6,655
C/N					
MOPe200_2000	15,9 ± 1,3 a	16,8 ± 0,9 a	17,2 ± 0,9 a	17,6 ± 3,8 a	0,372
MOPe50-200	11,7 ± 0,6 a	12,6 ± 0,7 a	12,6 ± 1,0 a	12,5 ± 0,9 a	0,747
MOPi200-2000	18,3 ± 2,1 a	18,2 ± 2,6 a	17,4 ± 1,9 a	19,5 ± 4,1 a	0,286
MOPi50-200	15,2 ± 1,0 a	14,8 ± 0,6 a	14,9 ± 0,3 a	15,1 ± 0,0 a	0,325
F20-50	14,6 ± 1,2 a	14,2 ± 0,9 a	14,7 ± 0,2 a	14,7 ± 0,7 a	0,284
F2-20	13,5 ± 0,4 a	13,1 ± 0,6 a	13,6 ± 0,1 a	13,4 ± 0,5 a	0,678
F0-2	12,3 ± 0,2 a	12,3 ± 0,5 a	12,2 ± 0,3 a	12,3 ± 0,3 a	0,077
W	-	-	-	-	
Somme					
SNF	14,8 ± 0,5 a	14,3 ± 0,5 a	14,3 ± 0,2 a	13,8 ± 0,6 a	

CT m/s : travail 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, d'un traitement à un autre, indiquent une différence significative entre les traitements ($p < 0,05$).

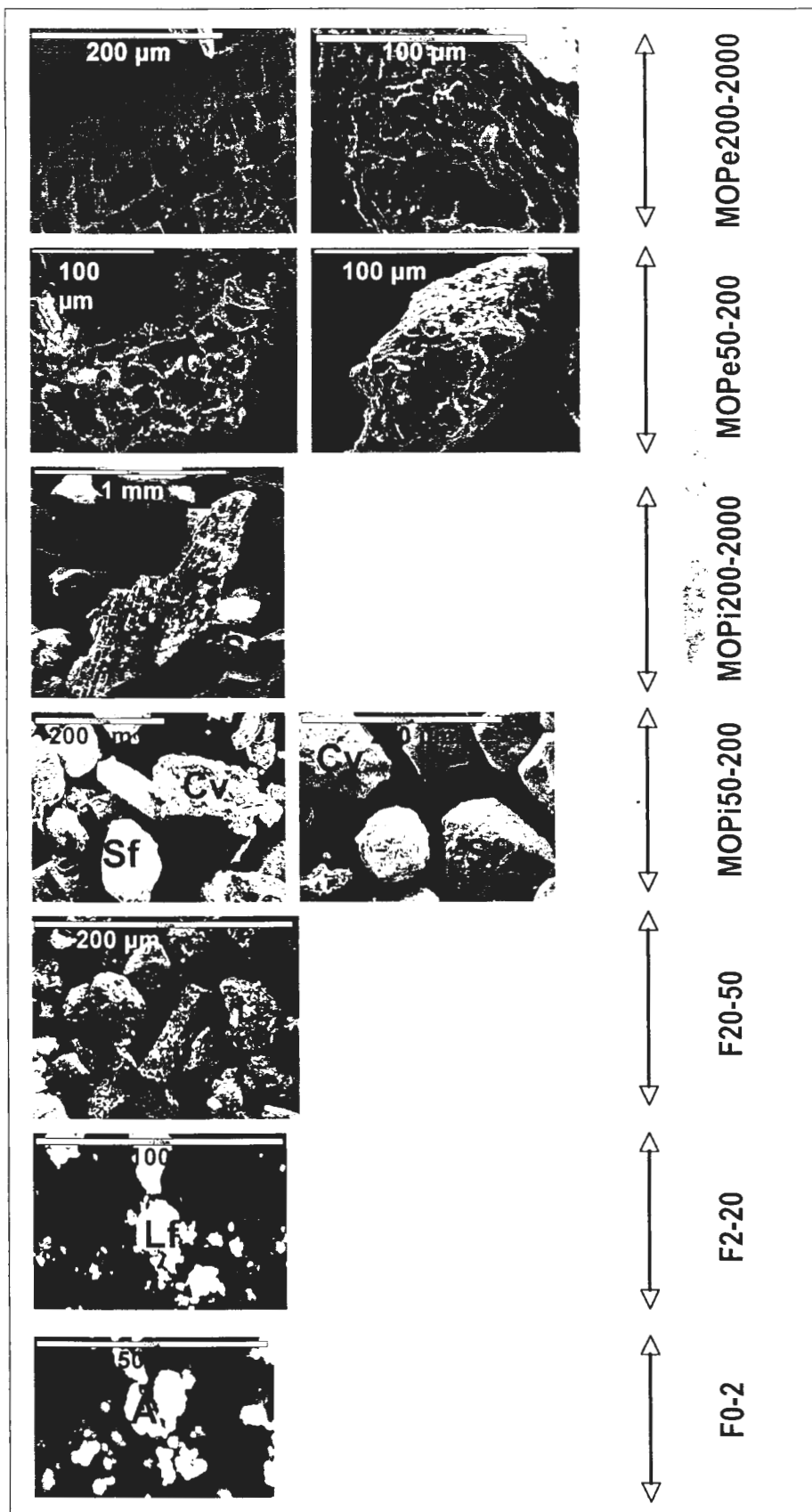


Figure 4 - Photos des fractions granulo-densimétriques obtenues par microscopie électronique à balayage.

Figure 4 - Picture of particle size and density fractions using scanning electron microscopy.

Cv : Cellule végétale
 Sg : Sable grossier
 Sf : Sable fin
 Lg : Limon grossier
 Lf : Limon fin
 A : Argile

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

Figure 5 - Comparison of C amounts of different fractions under no-tillage and conventional tillage at a) 0-5 cm and b) 5-10 cm depth (mean \pm standard deviation).

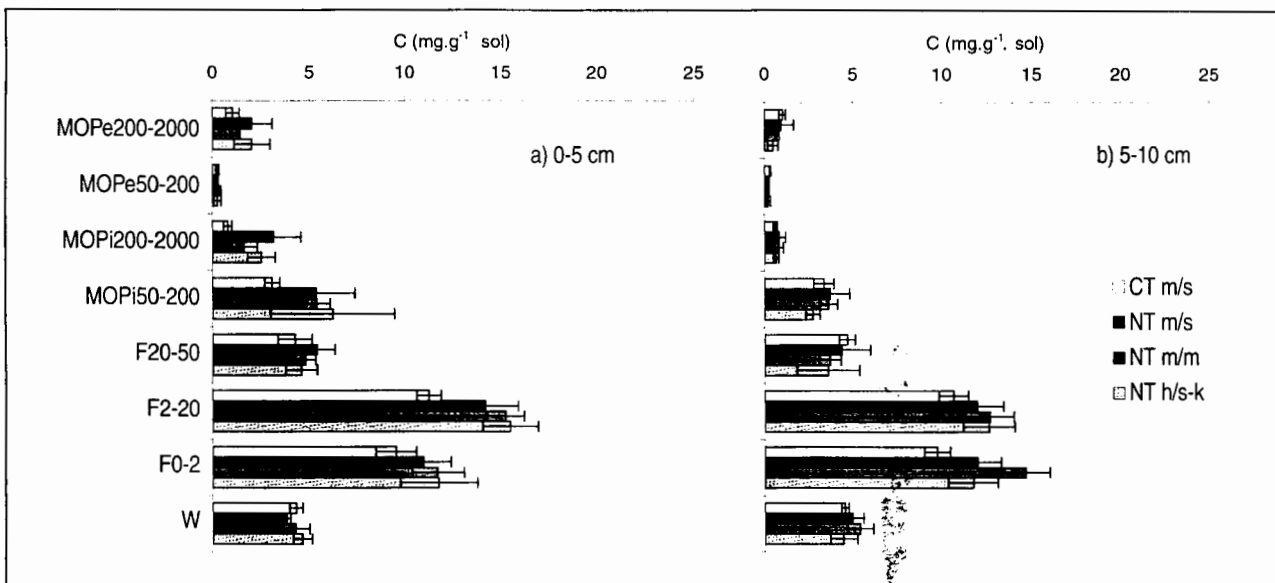
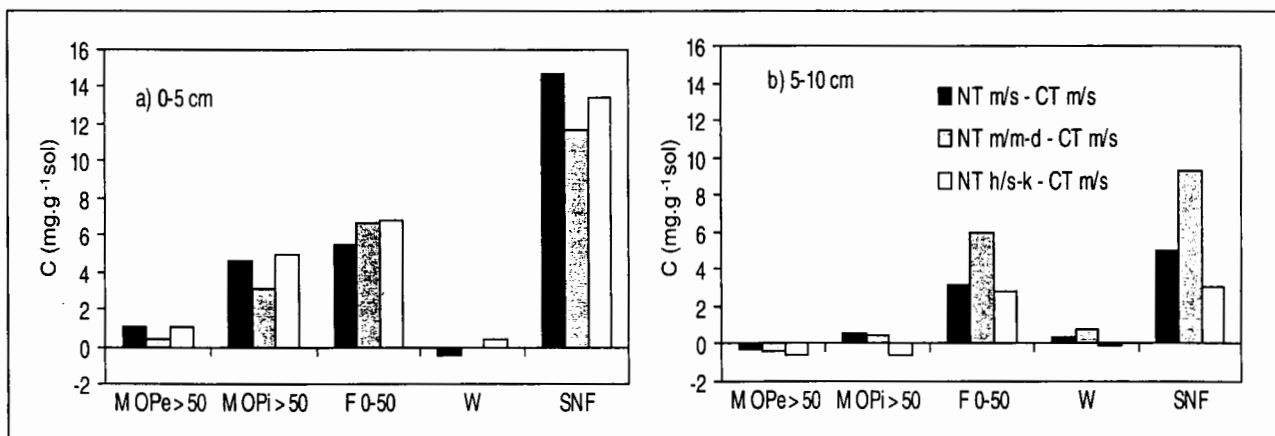


Figure 6 - Différences de contenus en C entre sols sous semis direct et sous travail conventionnel dans les fractions des matières organiques particulières externes (MOPe > 50) et internes aux agrégats (MOPi > 50), dans les fractions fines (F 0-50) et dans la fraction soluble (W), pour les couches - a) 0-5 cm et b) 5-10 cm. Andranomanelatra, Madagascar.

Figure 6 - Differences in C amounts between soils under no-till and conventional tillage in the coarse fractions located outside (MOPe > 50) and within aggregates (MOPi > 50), in fine fractions (F 0-50) and in the water-soluble fraction (W), at a) 0-5 cm and b) 5-10 cm depth. Andranomanelatra, Madagascar.



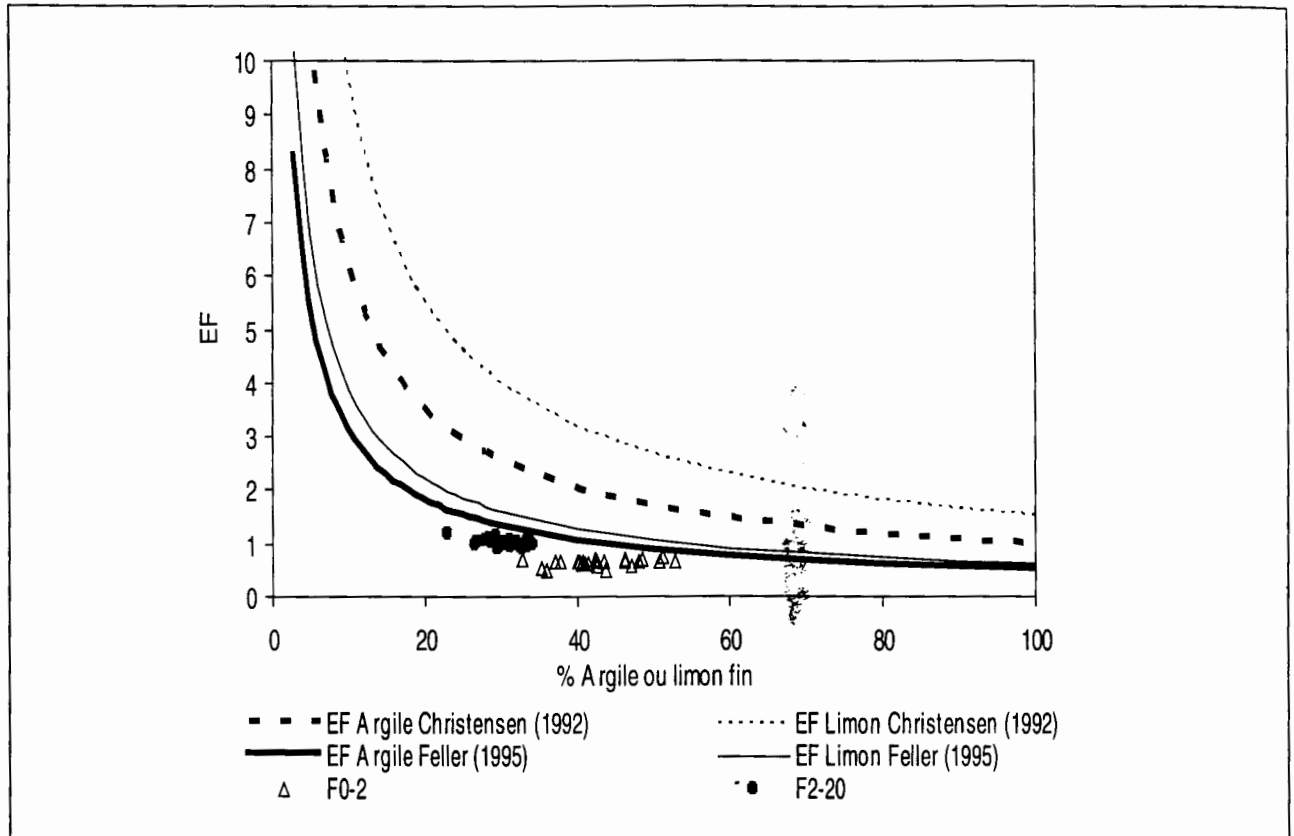
(1995) sur des fractions organiques légères de 20-2000 μm de sols ferrallitiques argileux des Antilles (Ferrisols) et du Brésil (Latosols), de 90 et de 260 mg.C.g^{-1} fraction, respectivement.

Dans notre étude, ces valeurs élevées de concentration en C des MOPe pourraient être attribuées à une moindre contamination par des matières minérales. (pureté \geq 75 %).

Les fractions MOPi, comprenant les débris organiques internes

aux agrégats, possèdent des concentrations en C inférieures à celles des fractions MOPe et plus ou moins équivalentes aux concentrations en C des fractions < 50 μm . Les concentrations en C de MOPi200-2000 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 (pauvres en C mais en grande quantité) présents dans ces fractions. Les concentrations

Figure 7 - Facteur d'enrichissement en C (Enrichment factor, EF) des fractions argileuses (F0-2) et limoneuses fines (F2-20).
Figure 7 - Carbon enrichment factor (EF) of clay (F0-2) and fine silt fractions (F2-20).



en C des MOPi dans cette étude ne sont toutefois pas comparables avec les données de Feller (1995), puisque ne correspondant pas à une fraction physique bien dispersée. C'est un ensemble de débris organiques de taille > 50 μm 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 celles des argiles (F0-2). Selon Christensen (1992), l'enrichissement en C de ces fractions est inversement proportionnel à leur masse (en %) dans le sol. Cet enrichissement est représenté par le facteur d'enrichissement (ou Enrichment Factor, EF), qui est défini comme étant le rapport entre la concentration en C des fractions (mg C/g fraction) et la teneur en C du sol (mg C/g sol). L'EF des fractions limoneuses et argileuses étudiées ici a été calculé et comparé aux données de sols tempérés (Christensen, 1992) et tropicaux (Feller, 1995) (figure 7). 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, riches 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) chargées de matière organique humifiée à faible C/N. D'une manière générale, les rapports C/N ne sont pas affectés par le mode de gestion du sol (NT ou CT).

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 µm). Pour la couche 5-10 cm, l'augmentation est uniquement associée à la fraction fine (F 0-50 µm).

Si les fractions MOPe > 50 µm sont composées de débris végétaux libres, les fractions MOPi > 50 µm sont composées de débris végétaux qui ont été emprisonnés dans des agrégats > 50 µm, et dans cette étude, le rapport C/N des MOP internes est très voisin de celui des MOP externes. Ce qui indique une qualité assez proche des deux types de MOP. Des travaux de la littérature ont montré que les 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.* (2006), pour les systèmes étudiés ici, ont trouvé des teneurs en macroagrégats (> 200 µm) 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 µm 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 horizons 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 µm est plus élevé sous NT que sous CT. Cet accroissement de MO dans les fractions < 50 µm peut résulter de divers processus : (i) d'un apport important de MO sous forme particulière < 50 µm 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 µm.

Concernant d'éventuels apports sous une forme < 50 µm, 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 µm) en fractions fines (< 50 µm) 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.m², respectivement), en milieu de saison de pluie.

La fixation et la protection des MO par adsorption sur les colloïdes du sol est confirmée 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 µm 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 µm, 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.

CONCLUSION

Les dispositifs sous systèmes SCV présentent des teneurs en C plus élevées par rapport à celui 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 plus majoritairement dans les fractions fines du sol (< 50 µm) ;
- à 5-10 cm : quasi-exclusivement 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.

Par l'intermédiaire de l'augmentation du stock organique du

sol, les systèmes SCV étudiés permettent ainsi (i) d'améliorer les propriétés agronomiques du sol, et (ii) de séquestrer du carbone d'origine atmosphérique, et ceci d'autant plus que cette MO stockée est essentiellement localisée dans une fraction stable du sol.

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 TAFE, 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. Ils tiennent à remercier particulièrement messieurs N. Moussa, C. Razanamparany, R. Michellon, B. Muller et madame L. Rabeharisoa pour leur aide.

BIBLIOGRAPHIE

- 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, pp. 95-106.
- 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, pp. 133-140.
- 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, pp. 101-109.
- Beare M. H., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994a - Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 777-786.
- Beare M. H., Cabrera M. L., Hendrix P. F. et Coleman D. C., 1994b - Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 787-795.
- 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, pp. 495-503.
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontondé A. et Feller C., *soumis* - 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 627-633.
- Feller C. et Beare M. H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the Tropics. *Geoderma*, 79, pp. 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 p.
- 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, pp. 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. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 12, Sér. 2, pp. 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, pp. 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, pp. 1749-1806.
- Golchin A., Oades J. M., Skjemstad J. O. et Clarke P., 1994 - Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32, pp. 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, pp. 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, pp. 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. 3^o 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, pp. 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., 2006 - 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. *Etude et Gestion des Sols*, 13, pp. 113-117.
- 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, pp. 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., 2001 - Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 65, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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 (ORSTOM).