

Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil

T. Razafimbelo⁽¹⁾, B. Barthès⁽¹⁾, E. F. de Luca⁽¹⁾, M.-Ch.Larré-Larrouy⁽¹⁾, J.-Y. Laurent⁽¹⁾, C. C. Cerri⁽²⁾ et Ch. Feller⁽¹⁾

(1) MOST, IRD-CIRAD, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France.

(2) Université de São Paulo-CENA, Avenida Centenário 303, 13416-970 Piracicaba-SP, Brésil

RÉSUMÉ

Le Brésil étant le premier producteur mondial de canne à sucre, un changement dans le mode de gestion des résidus de cette culture pourrait avoir des effets notables sur la teneur en carbone (C) de l'atmosphère. Dans une plantation de canne à sucre de longue durée (50 ans) installée sur un sol ferrallitique argileux du sud du Brésil, on compare la teneur en C du sol total et de ses fractions granulométriques (après dispersion) et la stabilité structurale (résistance à l'éclatement) des couches superficielles (0-5 et 5-10 cm) sous deux traitements : l'un comportant une récolte manuelle précédée d'un brûlis des résidus (CB, canne brûlée), l'autre une récolte mécanisée avec paillis des résidus depuis 6 ans (CNB, canne non brûlée).

La teneur en C total du sol est plus élevée en CNB qu'en CB, significativement à 0-5 cm (25,2 vs. 21,0 g C.kg⁻¹) mais pas à 5-10 cm (22,3 vs. 20,5 g C.kg⁻¹); la différence est également significative à 0-10 cm (23,7 vs. 20,7 g.kg⁻¹). Cette différence correspond à un stockage de C en CNB s'élevant à 0,65 t C.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-10 cm de profondeur, représentant 13 % du C apporté par les résidus aériens de la canne à sucre. Par rapport à CB, le surplus de C en CNB est principalement associé à la fraction argileuse (0-2 µm). Le taux de macroagrégats stables (> 200 µm) est également plus élevé en CNB qu'en CB à 0-5 et 5-10 cm de profondeur (p < 0,01); il est corrélé avec les contenus en C du sol total (r = 0,71; p < 0,01), de la fraction 0-2 µm (r = 0,73) et de la fraction hydrosoluble (r = 0,84). On fait l'hypothèse que la forte population de vers de terre en CNB aurait un rôle important dans l'enfouissement et la décomposition des résidus paillés, et déterminerait l'enrichissement de la fraction argileuse en C et l'accroissement de la stabilité structurale.

Mots clés

Carbone organique du sol, fractionnement granulométrique, agrégats stables, canne à sucre, Brésil

SUMMARY

EFFECT OF GREEN TRASH MANAGEMENT OF SUGAR CANE RESIDUES ON CARBON SEQUESTRATION IN A CLAYEY OXISOL IN SOUTHERN BRAZIL

Brazil is the first world producer of sugar cane, and changes in sugar cane residue management in this country may thus have noticeable consequences in the global carbon (C) budget. The effects of sugar cane residue management on topsoil (0-5 and 5-10 cm) C and aggregation were assessed in a clayey Oxisol of subtropical southern Brazil. Carbon content of whole soil and particle-size fractions (after dispersion), and soil aggregate stability (to slaking), were determined in a long-duration sugar cane plantation (50 years), with either pre-harvest residue burning (CB) or 6-year green trash management (CNB, residue mulching).

Soil total C was greater in CNB than in CB; the difference was significant at 0-5 cm (25.2 vs. 21.0 g C kg⁻¹) but not at 5-10 cm (22.3 vs. 20.5 g C kg⁻¹), but it was nevertheless significant at 0-10 cm (23.7 vs. 20.7 g kg⁻¹). This difference represented C sequestration in CNB amounting to 0.65 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ at 0-10 cm, and corresponding to 13 % of sugar cane aboveground residue C returned to the soil. Differences in total C between CNB and CB mainly affected the clay-size fraction C (0-2 μm). The water-stable macroaggregate (> 200 μm) content was also greater in CNB than in CB at 0-5 and 5-10 cm (p < 0.01), and correlated closely with soil total C (r = 0.71; p < 0.01), clay-sized C (r = 0.73), and water-soluble C (r = 0.84). We hypothesised that the dense population of earthworms in CNB had a leading part in burying and decomposition of mulched residues, which determined the enrichment in clay-sized C and the improvement of aggregate stability.

Key-words

Soil organic carbon, particle-size fractionation, stable aggregates, sugar cane, Brazil

RESUMEN

EFFECTOS DE LOS RESIDUOS DE PAJA DE LA CAÑA DE AZÚCAR SOBRE LA CAPTACIÓN DE CARBONO EN UN SUELO FERROSO ARCILLOSO DEL BRASIL.

Siendo Brasil el primer productor mundial de caña azúcar, un cambio en el modo de gestión de los residuos de este cultivo podría tener efectos notables en la concentración de carbono (C) atmosférico. En una plantación de caña de azúcar de larga duración (50 años) instalada en un suelo ferroso y arcilloso del sur del Brasil, se comparó la concentración en carbono del suelo total y de sus fracciones granulométricas (después de la dispersión), así como la estabilidad estructural de las capas superficiales (0-5 cm y 5-10 cm) bajo dos tratamientos: el primero, consiste en la recolección manual precedida de una quema de residuos (CB, caña quemada); y el otro es una recolección mecanizada de la paja de los residuos de 6 años (CNB, caña no quemada). La concentración en carbono total del suelo es mayor en CNB que en CB, significativamente a 0-5 cm (25.2 vs 21.0 g C.kg⁻¹) pero no a 5-10 cm (22.3 vs 20.5 g C.kg⁻¹); la diferencia es igualmente significativa a 0-10 (23.7 vs 20.7 g C.kg⁻¹). Esta diferencia corresponde a un almacenamiento de C en CNB elevándose a 0.65 t C.ha⁻¹.año⁻¹ a 0-10 cm de profundidad, representando 13% del C aportado por los residuos aéreos de la caña de azúcar. Con respecto a CB, el exceso de C en CNB está principalmente asociado a la fracción arcillosa (0-2 μm). La tasa de macro-agregados estables (> 200 μm) es más elevada en CNB que en CB a 0-5 cm y 5-10 de profundidad (p < 0.01); está correlacionado con los contenidos de C del suelo total (r = 0.71; p < 0.01), de la fracción 0-2 μm (r = 0.73) y de la fracción hidrosoluble (r = 0.84). Se propuso la hipótesis que la fuerte población de lombrices de tierra tendría un papel importante en el entierro y la descomposición de los residuos de paja y determinarían el enriquecimiento de la parte arcillosa, en C así como el aumento de la estabilidad estructural.

Palabras clave

Carbón orgánico del suelo, fraccionamiento granulométrico, agregados estables, caña de azúcar, Brasil

Depuis 150 ans, la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES : CO₂, CH₄ et N₂O) augmente de façon exponentielle. Parmi les GES, le dioxyde de carbone représente environ 60 % du potentiel de réchauffement global de l'atmosphère, étant émis en quantités très importantes (IPCC, 2001). Au niveau mondial, les augmentations des teneurs en GES dans l'atmosphère proviennent à 60 % de la combustion des énergies fossiles et de l'industrie, et à 40 % de l'agriculture et du changement d'usage des terres (IPCC, 2001). On estime que les zones intertropicales participent pour moitié à l'enrichissement atmosphérique en GES consécutif aux activités agricoles et au changement d'usage des terres (déforestation, en particulier). La gestion des agroécosystèmes, notamment tropicaux, est donc susceptible d'avoir une influence sensible sur les flux de GES entre le sol et l'atmosphère. Parmi les alternatives de gestion susceptibles de favoriser le stockage de carbone d'origine atmosphérique dans le système sol-plante, le non-labour du sol et/ou les cultures sous couverture végétale sont mises en avant par de nombreux travaux (Feller et Beare, 1997; Balesdent *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2000; IPCC, 2001; Sà *et al.*, 2001). Toutefois, leurs potentialités doivent être testées en vraie grandeur et quantifiées.

Le travail présenté ici étudie l'effet du mode de gestion des résidus de la canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. La canne à sucre occupe 5 millions d'hectares au Brésil, et sa production de biomasse foliaire est importante (10 à 15 t MS.ha⁻¹.an⁻¹). Dans le système de récolte traditionnel, notamment pour faciliter la coupe manuelle des cannes, les feuilles sont brûlées avant récolte, d'où une émission brutale de CO₂ dans l'atmosphère (et aussi, probablement, de CH₄ et N₂O). Dans le système alternatif sans brûlis, qui implique généralement la mécanisation de la récolte, la biomasse foliaire est laissée en paillis sur le sol lors de la récolte. Si la majeure partie de ce paillis est minéralisée progressivement au cours de l'année, une partie est susceptible de résider plus longtemps dans le système, donnant lieu à une augmentation de la teneur en matière organique (MO) du sol.

En terme de séquestration, une alternative de gestion est d'autant plus efficace que l'enrichissement du sol en C affecte des compartiments organiques plus stables. Notre étude s'intéressera tout particulièrement à la granulométrie de la MO du sol, plusieurs travaux ayant montré des différences notables dans les temps de renouvellement de la MO associée aux différentes classes granulométriques, tant dans les sols tempérés (Balesdent *et al.*, 1987) que tropicaux (Cerri *et al.*, 1985; Feller et Beare, 1997).

Compte tenu de la liaison entre les dynamiques de C et de l'agrégation (Chenu *et al.*, 1998; Amézketa, 1999; Six *et al.*, 1999; Barthès *et al.*, 2000; Puget *et al.*, 2000), il importe d'évaluer parallèlement l'effet du système de culture sur la stabilité de l'agrégation du sol. En effet, la stabilité de l'agrégation est en général corrélée étroitement avec la teneur en MO du sol, notamment dans les sols tropicaux (Feller *et al.*, 1996). Les agrégats peuvent jouer un rôle de protection physique de la MO, en la rendant moins accessible à la minéralisation microbienne, donc en augmentant la durée de vie du

C stocké (Angers et Chenu, 1997; Feller et Beare, 1997; Balesdent *et al.*, 2000).

L'étude présentée ici a pour objectifs de quantifier, en référence à la pratique traditionnelle de brûlis, l'effet du paillis des résidus aériens de canne à sucre sur (i) la teneur en C organique du sol, (ii) la granulométrie de ce C organique, et (iii) la stabilité de l'agrégation, dans un sol ferrallitique argileux du Brésil.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Site expérimental et prélèvements

L'étude est réalisée dans une plantation de canne à sucre située à 200 km au nord de Piracicaba, dans l'Etat de São Paulo, au sud du Brésil. Le climat de la région est tropical à subtropical, avec une température moyenne annuelle de 22,9°C et une pluviométrie moyenne annuelle de 1560 mm. Le sol est développé sur des coulées basaltiques. Sa texture est argileuse (60 % d'argile), la fraction argileuse étant constituée principalement de kaolinite et d'oxyhydroxydes métalliques. Il est classé comme Latossol rouge dystrophique (EMBRAPA, 1999), Orthic Ferralsol (FAO, 1972) ou Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 1999). En surface (0-10 cm), le pH CaCl₂ est d'environ 4,7, la capacité d'échange cationique d'environ 9 cmol⁺.kg⁻¹ et le taux de saturation en bases du complexe d'échange d'environ 30 %.

Les parcelles étudiées sont en culture continue de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L., var. SP 80-185) depuis 50 ans. Jusqu'en 1995, la récolte était effectuée après brûlis. À partir de 1995, le site a été divisé en 12 parcelles : six parcelles avec récolte manuelle précédée d'un brûlis deux à sept jours auparavant, comme durant les 50 années précédentes (traitement CB, canne brûlée) ; six parcelles avec récolte mécanisée et abandon des résidus végétaux non brûlés (feuilles et extrémités des tiges) en paillis à la surface du sol (traitement CNB, canne non brûlée). Chaque parcelle a été attribuée au hasard à l'un ou l'autre traitement. La plantation est fertilisée en NPK à 25, 125 et 125 kg.ha⁻¹ à la plantation (tous les six ans), puis à 85, 50 et 100 kg.ha⁻¹.an⁻¹ à chaque repousse, c'est-à-dire chaque année car le cycle cultural dure 12 mois. Le sol n'a pas été travaillé entre 1995 et 2001, date de prélèvement des échantillons étudiés.

Des échantillons de sol ont été prélevés en août 2001, juste avant la récolte, sur chaque parcelle expérimentale, à 0-5 et 5-10 cm de profondeur. Les sols n'ont pas été échantillonnés au-delà de 10 cm de profondeur car des analyses réalisées en 1998 n'ont pas révélé de différence significative entre traitements au-delà de cette profondeur, notamment pour les teneurs et stocks de C et N (De Luca, 2002). Pour chaque parcelle et chaque profondeur, un échantillon composite est constitué à partir de six prélèvements élémentaires, dont trois répartis sur le rang central et trois sur l'inter-rang central. Les échantillons sont séchés à l'air, tamisés à 2 mm, et des aliquotes sont broyées à 0,2 mm pour analyse de C et N. Les parcelles n'ont

pas été échantillonnées en 1995, mais on peut supposer que les sols sous CB n'ont pas évolué de 1995 à 2001, étant depuis 50 ans sous le même système de culture.

Fractionnement granulométrique de la matière organique

Le principe du fractionnement utilisé est celui décrit par Gavinelli *et al.* (1995), qui vise à maximiser la dispersion du sol en minimisant l'altération de la MO. Une adaptation de la méthode a été nécessaire pour obtenir une dispersion convenable du sol étudié, qui a une agrégation très stable. Quelques essais méthodologiques préalables ont été effectués en faisant varier la quantité de dispersant ajouté (hexamétaphosphate de sodium, HMP), la durée d'agitation et d'ultrasonication. La méthode suivante a été finalement adoptée.

Vingt grammes de sol sont mis en contact pendant une nuit à 4°C avec 200 mL d'eau permutée et 0,8 g de HMP. Le mélange est ensuite agité en présence de 10 billes d'agate pendant 12 h, sur un agitateur rotatif à la fréquence de 50 agitations par minute. La suspension de sol est ensuite tamisée successivement à 200 µm puis 50 µm. La fraction 50-200 µm, après séparation par battée de la fraction légère, est soumise pendant une minute aux ultrasons (High Ultrasonic Processor 600 W, aux 2/3 de la puissance maximale de l'appareil, soit 195 J.s⁻¹ ou 150 J.mL⁻¹ suspension), puis retamisée à 50 µm. Le refus > 50 µm est joint à la fraction légère précédemment extraite. La suspension < 50 µm est soumise aux ultrasons pendant dix minutes (conditions identiques à ci-dessus) puis tamisée à 20 µm. La suspension < 20 µm est agitée (30 retournements manuels) et mise à sédimenter pour permettre le siphonnage de la fraction 0-2 µm, dont l'extraction complète est réalisée en répétant l'opération (avec rajout d'eau) jusqu'à obtention d'un surnageant clair. La fraction 0-2 µm est flocculée, centrifugée et lavée à l'eau, tandis qu'une aliquote du surnageant et des eaux de lavage réunis est prélevée et filtrée à 0,2 µm pour dosage de C organique dans la fraction soluble. Les autres fractions sont séchées à 40°C et pesées, puis broyées à 200 µm pour le dosage de C et N.

Cette caractérisation est réalisée pour toutes les parcelles, sur les échantillons prélevés à 0-5 cm de profondeur, susceptibles de présenter les différences les plus importantes.

Dosage du carbone et de l'azote

Les teneurs en C et N totaux des sols et fractions solides sont déterminées par voie sèche par combustion en microanalyse élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Chaque valeur présentée est la moyenne de trois dosages. Le sol étant non carbonaté, C total est assimilé à C organique. Le carbone organique hydrosoluble est dosé à l'aide d'un analyseur Shimadzu TOC 5000.

Stabilité structurale

La stabilité structurale est étudiée au moyen d'un test adapté d'après Kemper et Rosenau (1986). Quatre grammes de sol séché

à l'air et tamisé à 2 mm sont introduits dans un tamis de 200 µm dont la base plonge dans un béccher d'eau déminéralisée. Après 2 h d'immersion, le tamis est soumis à un mouvement de va-et-vient vertical pendant 6 minutes, le béccher restant fixe. Ce mouvement vertical (amplitude de 1,3 cm, fréquence de 33 cycles par minute) produit une alternance d'émersions et d'immersions qui tamise l'échantillon dans l'eau. La fraction > 200 µm est séchée à l'étuve à 105°C pendant 16 h puis pesée. Elle est constituée de macroagrégats stables (MA) et de sables grossiers (SG). Les SG sont extraits en tamisant la fraction > 200 µm dans la soude diluée (qui disperse les MA), puis séchés à 105°C et pesés. La teneur en MA est calculée par différence entre la fraction > 200 µm et SG.

Cette caractérisation est réalisée pour toutes les parcelles à 0-5 cm et sur un échantillon composite par traitement à 5-10 cm, avec quatre répétitions par échantillon.

Méthode statistique

Le traitement statistique des données est effectué avec le logiciel Statistica par la méthode de comparaison des moyennes suivant le test t de Student (Dagnélie, 1975).

RÉSULTATS

Carbone et C/N des échantillons de sol total

Le taux moyen de C total est plus élevé en CNB qu'en CB (*tableau 1*), avec une différence de 20 %, significative, dans la couche 0-5 cm (25,2 vs. 21,0 g.kg⁻¹; $p < 0,05$), de 9 %, non significative, dans la couche 5-10 cm (22,3 vs. 20,5 g C.kg⁻¹; $p > 0,05$), et de 15 %, significative, dans la couche 0-10 cm (23,7 vs. 20,7 g.kg⁻¹; $p < 0,05$). Par ailleurs, C diminue significativement de 0-5 à 5-10 cm en CNB ($p < 0,05$), mais pas en CB. En moyenne, le rapport C/N est de l'ordre de 13,5 et 13,0 à 0-5 et 5-10 cm de profondeur, respectivement, sans différence significative entre traitements ou entre profondeurs ($p > 0,05$).

La masse volumique du sol étant de 1,3 g.cm⁻³ à 0-5 et 5-10 cm de profondeur en CNB et CB (De Luca, 2002), les stocks de C s'y élèvent respectivement à 16,4 et 13,7 t C.ha⁻¹ à 0-5 cm, et à 30,9 et 27,0 t C.ha⁻¹ à 0-10 cm. Le système de culture n'ayant pratiquement pas changé depuis plus de 50 ans en CB (monoculture avec brûlis), on fait l'hypothèse que le stock de C y est à l'équilibre et n'évolue plus; la différence entre CNB et CB représente donc un stockage en CNB qui, à 0-5 et 0-10 cm, atteint 2,7 et 3,9 t C.ha⁻¹ après 6 ans de pailis, soit 0,45 et 0,65 t C.ha⁻¹.an⁻¹, respectivement. La quantité de résidus aériens restitués est de l'ordre de 15 t MS.ha⁻¹ par récolte (De Luca, 2002), soit 30 t C.ha⁻¹ en 6 ans (cinq récoltes). Le surplus de C stocké en CNB dans la couche 0-10 cm représente ainsi 13 % du C restitué sous forme de pailis.

Carbone et C/N des fractions

Tableau 1 - Teneurs en C (g C.kg⁻¹ sol), N (g N.kg⁻¹ sol) et rapport C/N du sol sous canne avec résidus brûlés (CB) ou paillés (CNB) à 0-5, 5-10 et 0-10 cm de profondeur (moyenne et écart-type de six répétitions).**Table 1** - Soil C content (g C kg⁻¹ soil), N content (g N kg⁻¹ soil) and C/N ratio under sugar cane residue burning (CB) or mulching (CNB) at 0-5, 5-10 and 0-10 cm depths (mean and standard deviation over six replicates).

Profondeur	C		N		C/N	
	CB	CNB	CB	CNB	CB	CNB
0-5 cm	21,0 ± 1,7 Aa	25,2 ± 2,4 Ba	1,6 ± 0,2 Aa	1,9 ± 0,2 Ba	13,5 ± 1,5 Aa	13,5 ± 0,6 Aa
5-10 cm	20,5 ± 2,3 Aa	22,3 ± 1,2 Ab	1,6 ± 0,2 Aa	1,7 ± 0,1 Aa	13,0 ± 1,5 Aa	13,1 ± 0,4 Aa
0-10 cm	20,7 ± 1,9 A	23,7 ± 1,7 B	1,6 ± 0,2 A	1,8 ± 0,2 A	13,2 ± 1,5 A	13,3 ± 0,5 A

Pour un même niveau de profondeur, les lettres majuscules signalent les différences significatives entre traitements ($p < 0,05$).

Pour un même traitement, les lettres minuscules signalent les différences significatives entre niveaux de profondeur ($p < 0,05$).

Tableau 2 - Distribution de C dans les fractions granulométriques de CB et CNB à 0-5 cm de profondeur (moyenne et écart-type de six répétitions-terrain).**Table 2** - Carbon distribution in particle-size fractions in CB and CNB at 0-5 cm depth (mean and standard deviation over six replicates).

Traitement	Fraction	Masse g.kg ⁻¹ sol	C		Rapport C/N
			g.kg ⁻¹ fraction	g.kg ⁻¹ sol	
CB	200-2000 µm	28,5 ± 4,4	21,4 ± 4,1	0,6 ± 0,2 Aa	29,0 ± 5,1 Aa
	50-200 µm	156,5 ± 21,2	12,0 ± 2,2	1,9 ± 0,6 Abc	21,7 ± 2,8 Ab
	20-50 µm	87,1 ± 6,3	16,6 ± 1,3	1,5 ± 0,2 Ab	19,6 ± 2,4 Ab
	2-20 µm	286,1 ± 21,7	23,4 ± 2,9	6,7 ± 1,3 Ad	14,6 ± 0,7 Ac
	0-2 µm	454,2 ± 43,1	17,7 ± 2,1	8,0 ± 0,6 Ad	11,1 ± 1,3 Ad
	hydrosoluble	nd	nd	2,0 ± 0,2 Ac	nd
	somme	1012,3 ± 3,5	nd	20,8 ± 2,0 A	nd
	SNF	1000,0	21,0 ± 1,7	21,0 ± 1,7 A	13,5 ± 1,5 A
	somme/SNF (%)	101,2	nd	98,9 ± 3,3	nd
CNB	200-2000 µm	29,3 ± 4,9	22,1 ± 9,6	0,7 ± 0,3 Aa	31,9 ± 8,0 Aa
	50-200 µm	140,3 ± 12,7	12,1 ± 1,6	1,7 ± 0,1 Ab	21,9 ± 1,5 Ab
	20-50 µm	81,2 ± 6,8	20,8 ± 3,5	1,7 ± 0,3 Ab	19,3 ± 1,8 Ac
	2-20 µm	258,1 ± 32,2	27,6 ± 1,9	7,2 ± 1,3 Ad	14,9 ± 0,7 Ad
	0-2 µm	495,7 ± 28,7	21,9 ± 2,0	10,8 ± 0,6 Be	11,0 ± 0,2 Ae
	hydrosoluble	nd	nd	2,6 ± 0,3 Bc	nd
	somme	1004,5 ± 2,5	nd	24,6 ± 2,0 B	nd
	SNF	1000,0	25,2 ± 2,4	25,2 ± 2,4 B	13,5 ± 0,6 A
	somme/SNF (%)	100,5	nd	97,9 ± 2,3	nd

SNF: sol non fractionné.

nd: non déterminé.

Pour une même fraction, les lettres majuscules signalent les différences significatives entre traitements ($p < 0,05$).

Pour un même traitement, les lettres minuscules signalent les différences significatives entre fractions ($p < 0,05$).

granulométriques

Ces résultats (tableau 2) concernent la couche de sol 0-5 cm. Les bilans en masse sont compris entre 100 et 102 %. L'excès proviendrait d'une fixation d'ions phosphate de l'HMP. Les bilans en C sont corrects, de 98 à 99 % en moyenne. Les bilans en N sont moins bons, de 88 à 89 % en moyenne (données non présentées).

Les concentrations en C des fractions 200-2000, 50-200 et 20-50 μm sont comprises entre 12,0 et 22,1 g.kg^{-1} fraction en CB et CNB. Elles sont plus élevées dans la fraction 2-20 μm : 27,6 et 23,4 g.kg^{-1} fraction en CNB et CB, respectivement. La seule différence significative entre traitements concerne la fraction 0-2 μm , qui contient 21,9 et 17,7 g.kg^{-1} fraction en CNB et CB, respectivement ($p < 0,05$).

Tous traitements confondus, les fractions $> 20 \mu\text{m}$ ont un contenu en C plus faible ($< 2 \text{ g.kg}^{-1}$ sol) que les fractions $< 20 \mu\text{m}$ ($> 6 \text{ g.kg}^{-1}$ sol) (figure 1). Les trois fractions $> 20 \mu\text{m}$ contiennent chacune moins de 10 % du C total du sol, les fractions 2-20 et 0-2 μm environ 30 et 40 %, respectivement, et la fraction hydrosoluble environ 10 %. La principale différence entre traitements concerne la fraction 0-2 μm , dont le contenu en C est 35 % plus élevé sous CNB que sous CB (respectivement 10,8 et 8,0 g.kg^{-1} sol; $p < 0,05$). La fraction hydrosoluble a également un contenu en C significativement plus élevé en CNB qu'en CB, mais la différence est faible en valeur absolue (2,6 vs. 2,0 g.kg^{-1} sol; $p < 0,05$). L'enrichissement du sol en C sous paillis de résidus affecte donc la fraction argileuse principalement.

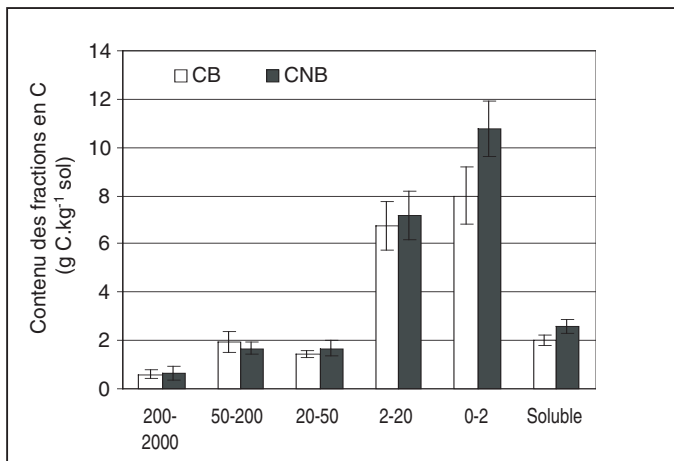
Le rapport C/N diminue des fractions grossières vers les fractions fines, sans différence significative entre traitements: le C/N des fractions > 20 , 2-20 et 0-2 μm est en moyenne de 19 à 32, 15 et 11, respectivement. Ces valeurs sont conformes aux données de la littérature, selon lesquelles ces trois fractions contiennent respectivement des débris végétaux peu décomposés, des débris végétaux et fongiques très décomposés, et des MO amorphes associées à des résidus microbiens (Feller, 1995).

Stabilité structurale

La teneur moyenne des échantillons en sables grossiers est faible (67 à 93 g.kg^{-1}), et ne diffère pas significativement entre CB et CNB ($p > 0,05$) (tableau 3). Les teneurs en macroagrégats stables ($> 200 \mu\text{m}$) sont fortes (550 à 660 g.kg^{-1}), et sont très significativement plus élevées en CNB qu'en CB à tous les niveaux de profondeurs considérés ($p < 0,01$): la différence atteint 17 % dans la couche 0-5 cm (655 vs. 558 g.kg^{-1}), 9 % dans la couche 5-10 cm (616 vs. 565 g.kg^{-1}), et 13 % dans la couche 0-10 cm (636 vs. 561 g.kg^{-1}). Naturellement élevée dans ce sol ferrallitique argileux, la stabilité structurale est encore augmentée par six années de paillis des résidus.

Figure 1 - Contenu en C des fractions granulométriques à 0-5 cm de profondeur (les barres représentent les écarts-types).

Figure 1 - Carbon amount in particle-size fractions at 0-5 cm depth (bars represent standard deviations).



Relations entre paramètres (matière organique, agrégation)

Sur la population constituée par les 12 échantillons prélevés à 0-5 cm de profondeur, la recherche de corrélations linéaires permet de mettre en évidence des relations entre plusieurs des variables étudiées.

La teneur en C total est corrélée positivement et significativement avec le contenu en C des fractions 0-2 μm ($r = 0,85$) et 20-50 μm ($r = 0,72$; $p < 0,01$), et dans une moindre mesure, avec le contenu en C des fractions 2-20 μm ($r = 0,68$) et hydrosoluble ($r = 0,63$; $p < 0,05$), mais il n'est pas corrélé significativement avec le contenu en C des fractions 50-200 et 200-2000 μm . Certaines fractions ont également des contenus en C corrélés positivement

Tableau 3 - Teneurs en sables grossiers (SG) et macroagrégats stables (MA) à 0-5, 5-10 et 0-10 cm de profondeur (moyenne et écart-type, en g.kg^{-1} sol).

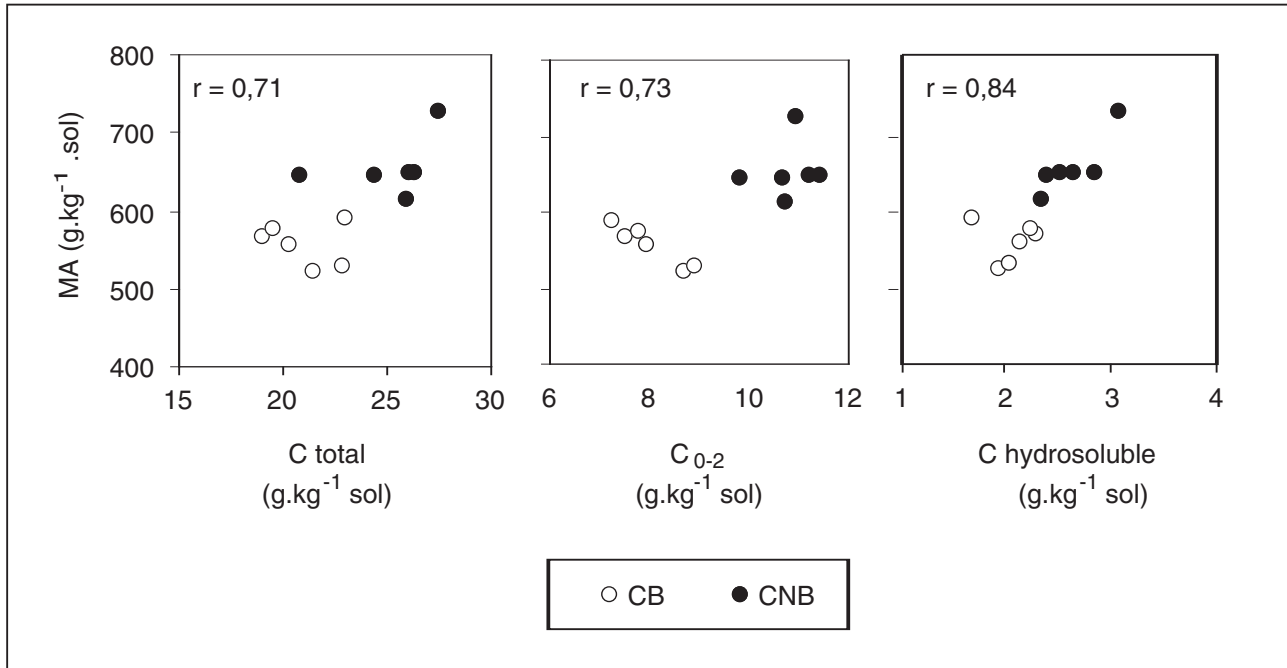
Table 3 - Coarse sand (SG) and stable macroaggregate (MA) contents at 0-5, 5-10 and 0-10 cm depths (mean value and standard deviation, in g.kg^{-1} soil).

Traitement	Profondeur	SG	MA
CB	0-5 cm	92,5 ± 10,4 A	557,9 ± 29,1 A
	5-10 cm	66,7 ± 8,5 A	564,6 ± 5,8 A
	0-10 cm	79,6 ± 6,7 A	561,2 ± 14,8 A
CNB	0-5 cm	87,1 ± 8,6 A	655,3 ± 53,7 B
	5-10 cm	72,9 ± 5,0 A	616,2 ± 7,8 B
	0-10 cm	80,0 ± 5,0 A	635,8 ± 27,1 B

Pour une même fraction et un même niveau de profondeur, les lettres majuscules signalent les différences significatives entre traitements ($p < 0,05$).

Figure 2 - Relations entre teneur en macroagrégats stables (MA) et contenus en C du sol total, de la fraction argileuse (C_{0-2}) et de la fraction hydrosoluble, à 0-5 cm de profondeur.

Figure 2 - Relationships between stable macroaggregate content (MA) and C content of whole soil, clay-size fraction C (C_{0-2}), and hydrosoluble fraction, at 0-5 cm depth.



entre eux : fractions 0-2 μm et hydrosolubles ($r = 0,79$; $p < 0,01$), et dans une moindre mesure, 2-20 et 20-50 μm ($r = 0,61$; $p < 0,05$).

Le taux de macroagrégats stables est corrélé positivement et significativement avec C total ($r = 0,71$; $p < 0,05$), avec le contenu en C de la fraction 0-2 μm ($r = 0,73$; $p < 0,01$), et plus encore, avec le contenu en C de la fraction hydrosoluble ($r = 0,84$) (figure 2).

La teneur en argile n'est pas corrélée significativement au taux de macroagrégats stables ($r = 0,45$; $p > 0,05$) ni à la teneur en C total du sol ($r = 0,03$).

DISCUSSION

Par rapport au sol cultivé avec brûlis des résidus depuis 50 ans (CB), considéré à l'équilibre, le sol recevant un paillis des résidus de canne à sucre depuis 6 ans (CNB) est plus riche en C : sa teneur en C total est plus élevée de 4,2 g.kg⁻¹ à 0-5 cm (+20%) et de 3,0 g.kg⁻¹ à 0-10 cm (+15%), soit un gain annuel moyen de 0,45 t C.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-5 cm et 0,65 t C.ha⁻¹.an⁻¹ à 0-10 cm. Ces valeurs sont comparables à celles mesurées sous cultures annuelles, dans des systèmes avec semis direct sous couverture végétale (SCV) : des synthèses récentes rapportent des gains moyens d'environ 0,35 t C.ha⁻¹.an⁻¹ pour les régions tropicales et subtropicales (Six *et al.*, 2002), et de 0,2 et 0,5 t C.ha⁻¹.an⁻¹ en

milieu tropical sec et humide, respectivement (IPCC, 2001). D'un point de vue quantitatif, la canne à sucre avec paillis des résidus s'avère donc aussi efficace que les systèmes SCV pour séquestrer C dans le sol, ce qui n'est pas étonnant compte tenu de l'importante biomasse des résidus aériens de canne à sucre (environ 15 t MS.ha⁻¹.an⁻¹ paillées).

Nos résultats montrent que dans le sol ferrallitique argileux considéré, l'enrichissement en C sous paillis de résidus concerne principalement la fraction argileuse : à 0-5 cm, la fraction 0-2 μm , qui contient 40 % environ du C total, représente 67 % de la différence de C total entre CNB et CB (soit 2,8 sur 4,2 g.kg⁻¹ sol); les fractions hydrosoluble et 2-20 μm , qui contiennent environ 10 et 30 % du C total, représentent 14 et 12 % de la différence de C total entre CNB et CB, respectivement. Cet enrichissement en C affectant principalement les fractions fines est rapporté par plusieurs travaux réalisés dans des systèmes avec paillis : dans un sol ferrallitique argileux d'Afrique du Sud, après 59 ans de canne non brûlée avec paillis des résidus de récolte, Graham *et al.* (2002) mesurent une augmentation de teneur en C de 12 g C.kg⁻¹ sol à 0-5 cm, dont 0,5 g C.kg⁻¹ seulement dans la fraction organique légère (densité < 1,7), constituée principalement de MO grossières; au Sénégal, dans des sols sableux sous paillis, Feller *et al.* (1987) observent des augmentations de C essentiellement dans la fraction < 50 μm ; sous SCV au Brésil, Bayer *et al.* (1999) et Peixoto *et al.* (1999) notent aussi une

augmentation de C dans les fractions < 53 µm. En revanche, lorsque les résidus sont enfouis et non paillés, l'enrichissement en C affecte principalement les fractions grossières dans les sols à dominante sableuse (Feller *et al.*, 1983; Barrios *et al.*, 1996), et affecte toutes les fractions dans les sols argileux (Kapkiyai *et al.*, 1999).

L'enrichissement du sol en MO suite à l'apport de résidus de récolte affecterait ainsi des compartiments granulométriques différents selon que cet apport est superficiel ou enfoui: l'apport en surface sous forme de paillis déterminerait l'enrichissement en C des fractions fines principalement, quelle que soit la texture; l'enfouissement déterminerait un enrichissement de toutes les fractions dans les sols argileux, mais surtout des fractions grossières dans les sols sableux. Sous l'effet du travail du sol et notamment du labour, les débris végétaux grossiers sont incorporés massivement et rapidement, ce qui n'est pas le cas lorsqu'ils sont laissés en paillis. En revanche, les activités fauniques sont très développées sous paillis (Kladvik, 2001). C'est notamment le cas dans les parcelles étudiées (Feller, 2001): la macrofaune est plus diversifiée, et a une densité et une biomasse plus élevées en CNB qu'en CB (5 vs. 3 groupes fauniques présents, 339 vs. 24 individus.m⁻² et 1,45 vs. 0,13 g.m⁻² à 0-10 cm, respectivement); les vers de terre, en particulier, ont une densité et une biomasse plus élevées en CNB qu'en CB (136 vs. 3 individus.m⁻² et 1,29 vs. < 0,02 g.m⁻² à 0-30 cm, respectivement). Or quelques travaux rapportent que dans des sols ayant reçu des apports de résidus végétaux, la présence de vers de terre géophages provoque un transfert de C des fractions grossières vers les fractions fines (Martin, 1991; Villenave *et al.*, 1999). On peut donc formuler l'hypothèse que le paillis des résidus de canne à sucre stimule l'activité de la macrofaune et notamment des vers de terre, ce qui contribue à l'enfouissement des résidus, à leur fragmentation et à leur décomposition, et détermine un enrichissement des fractions fines du sol en MO. Par ailleurs, les vers de terre sécrètent des mucilages constitués en grande partie de MO hydrosolubles (Brown *et al.*, 2000), ce qui pourrait contribuer à expliquer l'enrichissement du sol en MO hydrosolubles sous paillis.

Les données de la littérature indiquent que le temps moyen de renouvellement du C associé à la fraction fine du sol est relativement lent, et serait de l'ordre de 40 ans pour ces Oxisols tropicaux (Cerri *et al.*, 1985), contre moins de 5 ans pour le C associé aux fractions plus grossières (Feller et Beare, 1997). L'enrichissement en C de la fraction fine sous paillis de résidus permettrait ainsi une séquestration relativement durable, puisqu'affectant des compartiments à dynamique lente. En revanche, l'enrichissement du sol sous paillis en MO hydrosoluble, moins important en valeur absolue, ne permettrait pas une séquestration durable, car cette fraction est en grande partie labile (Baldock, 2002).

Par ailleurs, le paillis de résidus de canne à sucre s'accompagne d'une amélioration de la stabilité structurale du sol superficiel: à 0-5 cm, le taux de macroagrégats stables est 17 % plus élevé en CNB qu'en CB. De manière générale, l'agrégation du sol dépend de plusieurs facteurs: texture, minéralogie des argiles, MO, cations échangeables, oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Le Bissonnais,

1996; Amézketa, 1999); toutefois, la différence observée ici résulte uniquement des niveaux de restitutions organiques différents. Le rôle de la MO dans la stabilité structurale des sols tropicaux a été rapporté par de nombreux auteurs (Feller *et al.*, 1996; Albrecht *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2002). Il n'est donc pas étonnant que le paillis de résidus, qui enrichit le sol en MO, améliore également sa stabilité structurale. La corrélation entre teneur en C total et taux de macroagrégats stables, observée sur nos parcelles, est fréquemment signalée dans la littérature (Tisdall et Oades, 1982; Chenu *et al.*, 1998; Amézketa, 1999).

Dans nos parcelles sous canne, la stabilité de l'agrégation paraît particulièrement liée aux fractions argileuse et hydrosoluble, dont les contenus en C augmentent le plus fortement sous paillis. Dans un sol ferrallitique argileux sous canne de Martinique, Feller *et al.* (1991) ont caractérisé les MO associées à la fraction argileuse: ils ont identifié des bactéries avec leurs polysides intra- et extracellulaires, des débris figurés non reconnaissables et des MO non figurées à caractère amorphe et polyosidique imprégnant la matrice argileuse, une grande partie de ces MO amorphes et des polysaccharides entourant les bactéries étant extractible à l'eau chaude. L'importance particulière des polysaccharides dans la stabilisation de la structure est rapportée par de nombreux auteurs (Cheshire, 1979; Tisdall et Oades, 1982; Baldock, 2002). Ceci pourrait expliquer dans nos parcelles sous canne la corrélation entre MO hydrosolubles ou associées aux argiles, relativement riches en polysaccharides, et macroagrégation stable. Cependant, Kouakoua *et al.* (1997) ont montré que dans un sol ferrallitique argileux du Congo, l'extraction des MO solubles à l'eau chaude (riches en polysaccharides) ne déterminait pas de diminution du taux de macroagrégats stables, pourtant corrélé étroitement au taux de MO solubles à l'eau chaude. Dans ce type de sol riche en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium fortement agrégeants, la corrélation entre agrégation et MO solubles pourrait donc témoigner d'une protection des MO solubles dans les macroagrégats plus que de leur effet agrégeant.

L'implication des MO grossières dans la stabilité de l'agrégation est souvent évoquée dans la littérature (Tisdall et Oades, 1982; Baldock, 2002). Mais dans nos parcelles sous canne, le contenu en C des fractions grossières est faible, n'augmente pas sous paillis de résidus, et n'est pas corrélé au taux de macroagrégats stables. Le rôle agrégeant des substances humiques (biopolymères partiellement dégradés et condensats des produits de cette dégradation), quoique moins étudié, est également signalé par plusieurs auteurs, qui soulignent leur capacité à former des liaisons fortes avec les argiles et les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Piccolo et Mbagwu, 1990; Baldock, 2002). Ces composés pourraient être impliqués dans l'augmentation du taux de macroagrégats stables dans nos parcelles sous paillis de résidus de canne, en relation avec l'augmentation du contenu en C de la fraction argileuse voire de la fraction hydrosoluble (les substances humiques de faible poids moléculaire sont hydrosolubles; mais on a vu que la corrélation entre macroagrégation stable et MO hydrosoluble ne témoignait pas forcément du rôle agrégeant de cette fraction organique dans les sols

ferrallitiques argileux).

Les vers de terre, dont la biomasse accrue en CNB pourrait déterminer l'enrichissement des fractions fines en MO, ont également un rôle dans la stabilité de l'agrégation. Tisdall (1996) rapporte que par rapport aux macroagrégats du sol environnant non ingéré, les macroagrégats fabriqués par ces invertébrés sont peu stables lorsqu'ils sont jeunes et encore frais, mais deviennent plus stables après dessèchement, et gardent cette propriété après réhumectation. L'auteur explique la stabilité élevée de ces macroagrégats par le malaxage et le moulage des matériaux dans le tube digestif des vers de terre, qui détermineraient, après dessèchement, un contact étroit entre particules argileuses et MO, favorisant l'établissement de liaisons organo-minérales fortes. Le développement de cette macroagrégation biologique stable serait particulièrement marqué en présence de résidus organiques, notamment sous forme de mulch, et dans les sols ferrallitiques (Blanchart *et al.*, 1999). Les vers de terre pourraient donc être largement responsables de l'augmentation du taux de macroagrégats stables sous paillis de résidus dans le sol étudié, en relation avec l'enrichissement du sol en C dans la fraction argileuse voire dans la fraction hydrosoluble.

CONCLUSION

La récolte de la canne à sucre avec paillis des résidus restitue au sol une grande partie des matières organiques perdues lors d'une récolte après brûlis. La comparaison entre les deux modes de gestion des résidus aériens de la canne montre que le paillis permet de séquestrer du C dans le sol ferrallitique argileux étudié : à 0-10 cm de profondeur, la teneur en C du sol augmente ainsi de 15 %, soit un stockage de 0,65 t C.ha⁻¹.an⁻¹, représentant 13 % du C paillé.

Cet enrichissement en C concerne principalement la fraction argileuse (0-2 µm), et dans une moindre mesure la fraction hydrosoluble, mais aucun enrichissement en C n'est constaté dans les fractions grossières. Le temps moyen de renouvellement du C associé à la fraction argileuse étant relativement lent, on peut supposer que ce stockage préférentiel dans la fraction fine permet une séquestration relativement durable. Le paillis des résidus de canne permet aussi une augmentation du taux de macroagrégats stables, ce taux étant corrélé avec le contenu en C du sol total, de la fraction argileuse, et surtout de la fraction hydrosoluble. La macrofaune et notamment les vers de terre, dont la biomasse est plus élevée sous paillis de résidus de canne, pourraient avoir un rôle important dans l'enrichissement de la fraction argileuse en C et dans l'amélioration de la stabilité structurale.

REMERCIEMENTS

M. Balabane et un lecteur anonyme sont remerciés pour la correction d'une version antérieure de cet article.

H. Ferrer est remercié pour sa traduction du résumé en espagnol.

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.
- Amézqueta E., 1999 - Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, 83-151.
- Angers D.A. et Chenu C., 1997 - Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: Lal R., Kimble J., Follet R.F. et Steward B.A. (Ed.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*, pp. 199-206. CRC Press, Boca Raton, Floride.
- Baldock J.A., 2002 - Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In: Huang P.M., Bollag J.M. et Senesi N. (Ed.), *Interactions between Soil Particles and Microorganisms: Impact on the Terrestrial Ecosystem*, pp. 85-131. Wiley and Sons, Chichester, GB.
- Balesdent J., Mariotti A. et Guillet B., 1987 - Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 25-30.
- 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.
- Barrios E., Buresh R.J. et Sprent J.I., 1996 - Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 185-193.
- Barthès B., Azontonde A., Boli B.Z., Prat C. et Roose E., 2000 - Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science*, 51, 485-495.
- Bayer C., Mielniczuk J. et Martin-Neto L., 1999 - Alterações da matéria orgânica associada as frações minerais induzidas pelo manejo do solo no sul do Brasil. 3° Encontro Brasileiro sobre Substâncias Húmicas, pp. 125-134. Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- Blanchart E., Albrecht A., Alegre J., Dubois A., Gilot C., Pashanasi B., Lavelle P. et Brussaard L., 1999 - Effects of earthworms on soil structure and physical properties. In: Lavelle P., Brussaard L. et Hendrix P. (Ed.), *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*, pp. 149-172. CAB International, New York.
- Brown G.G., Barois I. et Lavelle P., 2000 - Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 36, 177-198.
- Cerri C., Feller C., Balesdent J., Victoria R. et Plenecassagne A., 1985 - Application du traçage isotopique naturel en ¹³C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, t. 300, Série II, 9, 423-428.
- Chenu C., Puget P. et Balesdent J., 1998 - Les associations argiles - matière organique dans les sols: microstructure et contribution à la stabilité structurale. Communication au Congrès Mondial de Science du sol, Montpellier.
- Cheshire M.V., 1979 - Nature and Origin of Carbohydrates in Soils. Academic Press, Londres, 216 p.
- Dagnélie P., 1975 - Théorie et Méthodes Statistiques. Applications Agronomiques. Seconde édition. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux. 378 p.
- De Luca E.F., 2002 - Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar. Thèse de doctorat, Université de São Paulo, 101 p.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), 1999 - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 412 p.
- FAO, 1972 - Soil Map of the World, Group IV, South America. FAO, Rome.
- Feller C., 1995 - La Matière Organique dans les Sols Tropicaux à Argile 1:1. Recherche de Compartiments Organiques Fonctionnels. Une Approche

- Granulométrie. Collection TDM, ORSTOM Editions, 144, 393 p.
- Feller C.L., 2001 - Efeitos da colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono et propriedades do solo. Processo FAPESP n°98/12648-3. Relatório final. Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 150 p.
- Feller C., Bernhardt-Reversat F., Garcia J.-L., Pantier J.-J., Roussos S. et Van Vliet-Lanôe B., 1983 - Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 20, 223-238.
- Feller C., Chopart J.-L. et Dancette F., 1987 - Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal). Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 24, 237-252.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J.-M., Toutain F. et Morel J.-L., 1991 - Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t. 312, Série II, 1491-1497.
- Feller C., Albrecht A. et Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: Carter M.R. et Stewart B.A. (Ed.), Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils, pp. 309-359. Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, Floride.
- Feller C. et Beare M.H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. Geoderma, 79, 69-116.
- 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 for tropical soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 26, 1749-1760.
- 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.
- IPCC, 2001 - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P., Dai X. et Maskell K. (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 944 p.
- Kapkiyai J.J., Karanja N.K., Qureshi J.N., Smithson P.C. et Woormer P.L., 1999 - Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management. Soil Biology and Biochemistry, 31, 1773-1782.
- Kemper W.D. et Rosenau R.C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods, pp. 425-442. ASA, Madison, Wisconsin.
- Kladivko E.J., 2001 - Tillage systems and soil ecology. Soil and Tillage Research, 61, 61-76.
- Kouakoua E., Sala G.-H., Barthès B., Larré-Larrouy M.-C., Albrecht A. et Feller C., 1997 - La matière organique soluble à l'eau chaude et la stabilité de l'agrégation. Aspects méthodologiques et application à des sols ferrallitiques du Congo. European Journal of Soil Science, 48, 239-247.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Soil characteristics and aggregate stability. In: Agassi M. (Ed.), Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation, pp. 41-60. Dekker, New York.
- Martin A., 1991 - Short- and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsosia anomala* (Omodeo) (Megascoleceida, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. Biology and Fertility of Soils, 11, 234-238.
- Peixoto R.T.G., Stella L.M., Machulek Jr A., Mehl H.U. et Batista E.A., 1999 - Distribuição das frações granulométricas da matéria orgânica em função do manejo do solo. 3º Encontro Brasileiro sobre Substancias Humicas, pp. 347-351. Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- Piccolo A. et Mbagwu J.S.C., 1990 - Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. Plant and Soil, 123, 27-37.
- Puget P., Chenu C. et Balesdent J., 2000 - Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science, 51, 595-605.
- Sà J.C.M., Cerri C., Dick W.A., Lal R., Filho S.P.V., Piccolo M.C. et Feigl B.E., 2001 - Organic matter dynamics and C sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. Soil Science Society of America Journal, 65, 1486-1499.
- Six J., Elliot E.T. et Paustian K., 1999 - Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no tillage systems. Soil Science Society of America Journal, 63, 1350-1358.
- Six J., Elliot E.T. et Paustian K., 2000 - Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biology and Biochemistry, 32, 2099-2103.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S.M., Sà J.C.M. et Albrecht A., 2002 - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils; Effects of no-tillage. Agronomie, 22, 755-775.
- Soil Survey Staff, 1999 - Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, 870 p.
- Tisdall J.M., 1996 - Formation of soil aggregates and accumulation of organic matter. In: Carter M.R. et Stewart B.A. (Ed.), Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils, pp. 57-96. CRC Press, Boca Raton, Floride.
- Tisdall J.M. et Oades J.M., 1982 - Organic matter and water stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33, 141-163.
- Villenave C., Charpentier F., Lavelle P., Feller C., Brussaard L., Pashanasi B., Barois I., Albrecht A. et Patrón J.C., 1999 - Effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics following earthworm inoculation in field experimental situations. In: Lavelle P., Brussaard L. et Hendrix P. (Ed.), Earthworm Management in Tropical Agrosystems, pp. 173-197. CAB International, New York.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

REVUES

SCIENCE DU SOL

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.
Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.
A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

LA LETTRE DE L'ASSOCIATION

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH, Angers.

ÉTUDE ET GESTION DES SOLS

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité Éditorial est composé de trente membres de France et de pays francophones.

OUVRAGES

LE LIVRE JUBILAIRE (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET COMPORTEMENT DU SOL (1984)

PODZOLS ET PODZOLISATION

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

MICROMORPHOLOGIE DES SOLS/SOIL MICROMORPHOLOGY

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

CARTE MONDIALE DES SOLS ET SA LÉGENDE

Présentée sous forme de deux diapositives (1984).

LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE

Principaux sols d'Europe, deuxième édition 1995.
Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.

SYNTHÈSE NATIONALE DES ANALYSES DE TERRE : PÉRIODE 1990-1994

par C. Walter, C. Schvartz, B. Claudot, P. Arousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

ACTES DU XVI^E CONGRÈS MONDIAL DE SCIENCES DU SOL, MONTPELLIER - AOÛT 1998

