

Pole 1

Relations entre stabilité de l'agrégation et matière organique totale et soluble à l'eau chaude dans des sols ferrallitiques argileux (Congo, Brésil)

E. Kouakoua¹, M.-C. Larré-Larrouy¹, B. Barthès¹, P. L. de Freitas², C. Neves³, G.-H. Sala¹,
et C. Feller¹

¹Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC), ORSTOM-IRD, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex, France; ²EMBRAPA / CNPS, Rua Jardim Botânico, 1024, 22460-000 Rio de Janeiro, Brésil; ³Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Agronomia, C.P. 6001, CEP 86051, Londrina, PR Brésil. Reçu le 14 juillet 1998, accepté le 8 juin 1999.

Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.-C., Barthès, B., de Freitas, P. L., Neves, C., Sala, G.-H. et Feller, C. 1999. Relations entre stabilité de l'agrégation et matière organique totale et soluble à l'eau chaude dans des sols ferrallitiques argileux (Congo, Brésil). *Can. J. Soil Sci.* 79: 561-569. La matière organique (MO) a souvent un rôle important dans la stabilité structurale des sols. Ce travail a pour objectif de caractériser la MO soluble à l'eau chaude et son rôle dans la stabilité structurale de sols ferrallitiques argileux sous différents modes de gestion. La stabilité des macroagrégats (>200 µm) est évaluée à l'eau froide (AS) et après extraction à l'eau chaude (ASe). Les teneurs en carbone organique total et sous forme de sucres et la composition en sucres sont déterminées sur le sol et sur l'extrait eau chaude.

Défrichement et mise en culture déterminent généralement une diminution des teneurs en carbone et en macroagrégats stables, mais certaines pratiques permettent de limiter ces effets. Les extraits eau chaude sont plus riches en sucres que les sols, l'origine microbienne des sucres étant dominante dans les deux cas. La stabilité des agrégats est corrélée à la teneur en carbone du sol et des extraits eau chaude, ainsi qu'à la teneur en sucres du sol. Toutefois, l'absence de différence significative entre AS et ASe, pour chaque échantillon étudié, révèle que les MO solubles à l'eau chaude n'ont pas ici de rôle essentiel dans la stabilité de l'agrégation.

Mots clés: matière organique, stabilité des macroagrégats, extraction eau chaude, sucres, sols ferrallitiques

Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.-C., Barthès, B., de Freitas, P. L., Neves, C., Sala, G.-H. and Feller, C. 1999. Relationship between aggregate stability and total and hot-water-extractable organic matter in clayey ferrallitic soils (Congo, Brazil). *Can. J. Soil Sci.* 79: 561-569. Organic matter (OM) generally plays an important role in soil aggregate stability. The objective of this work was to characterize the hot water-extractable OM and its role in the aggregate stability of clayey ferrallitic soils under different land use management. The macroaggregate (>200 µm) stability of these soils was determined before (AS) and after hot-water extraction (ASe). The contents in total organic carbon and in carbon present as carbohydrates, as well as the sugar composition, were determined on the bulk soils and their hot-water extracts.

The carbon and macroaggregate contents decreased upon land-clearing and cultivation, but to a lesser extent when some cultural practices were used. Whatever the situation considered, the hot-water extract always presented a higher carbohydrate content than the bulk soil. The high values of ratios $r = (\text{galactose} + \text{mannose})/(\text{arabinose} + \text{xylose})$ suggested that a large proportion of carbohydrates was of microbial origin. There were significant correlations between AS and the carbon content of bulk soils or hot-water extracts, and between AS and the soil carbohydrate content. On the opposite, whatever the soil sample studied, no significant difference could be found between AS and ASe, showing that hot-water extractable OM had thus no clear aggregating role in these soils.

Key words: Organic matter, macroaggregate stability, hot-water extraction, carbohydrates, ferrallitic soils

Le défrichement et la mise en culture des sols de la zone intertropicale s'accompagnent souvent d'une diminution de leur teneur en matière organique (MO) et d'une dégradation de leur structure (Feller et al. 1996). Dans les études consacrées à la stabilité structurale, les auteurs s'interrogent généralement sur la nature des compartiments organiques impliqués dans cette dégradation, sans toutefois apporter de réponses satisfaisantes.

Il est reconnu depuis longtemps, au moins pour les sols des zones tempérées, que les sucres (ou carbohydrates) sont en partie responsables de la stabilité de l'agrégation (Rennie et al. 1954). Ces sucres représentent 5 à 25% de la MO du sol, principalement sous forme de polysaccharides, dont une

partie est hydrosoluble (Cheshire 1979). Des corrélations, significatives (Angers et al. 1993) ou non (Carter et al. 1994), existent entre les teneurs en sucres totaux et la stabilité de l'agrégation du sol. De plus, la suppression sélective des sucres par l'anion periodate provoque une diminution de la stabilité de l'agrégation à l'eau (Angers et Mehuis 1989). A l'inverse, Harris et al. (1966) montrent que l'apport de polysaccharides microbiens au sol améliore cette stabilité. Par ailleurs, en étudiant l'amélioration à court terme de la stabilité de l'agrégation sous pâturage pour des sols de Nouvelle-Zélande, Haynes et Swift (1990) puis Haynes et al. (1991) indiquent que celle-ci est mieux corrélée avec la teneur en sucres solubles à l'eau chaude qu'avec la teneur en



carbone organique total, en carbone hydrolysable par l'acide chlorhydrique ou en sucres extractibles par la soude. De même, Gijsman et Thomas (1995) montrent que la stabilité de l'agrégation d'oxisols de Colombie est positivement corrélée avec la teneur en sucres solubles à l'eau chaude.

L'objectif de ce travail est d'analyser le rôle de la MO soluble à l'eau chaude, riche en sucres, dans la stabilité structurale de sols ferrallitiques argileux du Congo et du Brésil soumis à différents modes de gestion.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation des Situations

L'étude porte sur une gamme d'échantillons de surface (0–10 cm) de sols ferrallitiques argileux du Congo-Brazzaville et du Brésil, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1. Les situations étudiées correspondent à différents modes de gestion: forêt, savane, cultures annuelles, cultures pérennes (dont pâturage).

1. Au Congo, six parcelles sur sols ferrallitiques fortement désaturés (oxisols) argileux de la Vallée du Niari sont étudiées (Kouakoua et al. 1997):

1a. à Loudima (situation nommée Congo-L): (i) une savane-jachère (LS0) de plus de 20 ans, faisant suite à des cultures diverses; (ii) une jachère naturelle de quatre ans après plusieurs années de manioc (LJ); (iii) une parcelle sous culture de manioc depuis 20 ans (LM);

1b. à Nkayi (situation proche de Loudima, également notée Congo-L): une parcelle sous culture intensive et mécanisée de canne à sucre depuis 15 ans (LC);

1c. à Mantsoumba (situation nommée Congo-M): (i) une savane naturelle (MS); (ii) une parcelle sous culture intensive et mécanisée de manioc depuis 17 ans (MM).

2. Au Brésil, six parcelles sur sols ferrallitiques fortement désaturés (latosols) sont étudiées, dont trois dans l'état du Goiás (région de Goiânia) et trois dans l'état du Paraná (région de Londrina):

2a. à Goiânia (situation nommée Brésil-G): (i) une savane arbustive à arborée nommée "campo-cerrado" (CER), présentant un caractère anthropisé dû au défrichement sélectif de touffes de graminées et à l'introduction de bovins durant la saison sèche; (ii) un pâturage artificiel de longue durée (PAL), mis en place depuis plus de 15 ans, replanté en *Brachiaria brizanthae* depuis cinq ans avec labour (charrue à socs) et fertilisation; ce pâturage est considéré comme peu dégradé selon la terminologie brésilienne; (iii) une parcelle sous rotation maïs/haricot en culture conventionnelle depuis cinq ans (CCL) avec un travail du sol sur 15 cm, suivi d'un double passage de pulvérisateur à disque niveleur (5 à 10 cm), avec traitement herbicide non sélectif et enfouissement des résidus de récolte (Freitas et al. 1999);

2b. à Londrina (situation nommée Brésil-L): (i) une parcelle sous forêt naturelle (FN), caractéristique de l'écosystème "floresta tropical sub-caducifolia"; (ii) une parcelle cultivée en avoine depuis plus de 20 ans (CA), avec travail du sol; (iii) une parcelle dans un verger de *Citrus* de 10 ans, avec couverture de légumineuse (CL) à *Arrachis prostrata* dans l'interrang; cette parcelle était précédemment cultivée en manioc, et les prélèvements de sols y sont effectués sous

Tableau 1. Caractéristiques générales des sols étudiés (profondeur 0–10 cm)

Zone d'étude	Mode de gestion	Echantillon	Argile		Limon		Sable		Minéralogie	Ct g kg ⁻¹	pH eau	CEC cmol(+) kg ⁻¹	BE kg kg ⁻¹	FeCBD	AlCBD g kg ⁻¹
			%	%	%	%									
Congo-L	Savane arbustive	LS0	77	9	10				k + g	35.0	5.0	3.6	1.8	30	6
Congo-L	Manioc continu (20 ans)	LM	66	20	14				k + g	21.8	6.0	5.3	4.8	36	7
Congo-L	Jachère naturelle (4 ans)	LJ	59	27	14				k + g	36.4	5.5	9.3	9.1	32	8
Congo-L	Canne à sucre continue (15 ans)	LC	78	12	10				k + g	27.0	4.3	4.6	3.8	19	5
Congo-M	Savane arbustive non dégradée	MS	38	32	30				k + g	42.5	5.0	7.6	5.1	34	7
Congo-M	Manioc continu (17 ans)	MM	60	22	14				k + g	18.0	4.4	4.6	2.9	12	2
Brésil-G	Savane arborée dégradée	CER	46	20	34				k + hm + gb + g	23.8	5.5	1.4	0.8	35	5
Brésil-G	Rotation maïs/haricot	CCL	50	15	35				k + hm + gb + g	21.4	5.2	2.4	2.5	39	5
Brésil-G	Prairie plantée (15 ans)	PAL	36	16	48				k + hm + gb + g	22.0	5.9	2.5	2.6	30	5
Brésil-L	Forêt dense	FN	80	16	4				k + hm + gb + g	31.9	6.8	12.5	10.5	87	5
Brésil-L	Avoine continue (20 ans)	CA	71	20	10				k + hm + gb + g	17.7	5.7	8.5	3.3	71	4
Brésil-L	Couverture de légumineuses (10 ans)	CL	69	22	10				k + hm + gb + g	24.5	5.9	10.4	8.0	72	5

Abréviations: k = kaolinite, g = goéshite, gb = gibbsite, hm = hématite, Ct = carbone total, CEC = capacité d'échange cationique, BE = bases échangeables, Fe = fer, Al = aluminium, CBD = réactif citrate-bicarbonate-dithionite de sodium.

légumineuse (Neves et al. 1998).

Ce dispositif permet d'effectuer des comparaisons afin d'appréhender deux principaux types d'effets: (i) effets du défrichage et de la mise en culture (LS0 vs. LM; MS vs. MM; CER vs. CCL; FN vs. CA); (ii) effet de pratiques d'amélioration de la fertilité de sols dégradés par une longue période de culture continue (LM vs. LJ; CCL vs. PAL; CA vs. CL).

De manière synthétique (Tableau 1), les sols sont très acides au Congo-M, acides au Congo-L et Brésil-G, et acides à neutres au Brésil-L. La teneur en fer est plus élevée au Brésil-L qu'au Brésil-G, Congo-L et Congo-M. L'argile minéralogique prédominante est toujours la kaolinite, associée à la goëthite au Congo, associée à l'hématite, à la gibbsite et à la goëthite au Brésil. Enfin, cette collection d'échantillons argileux couvre une large gamme de teneur en carbone total (17.7 à 42.5 g kg⁻¹ sol dans la couche 0–10 cm).

Mesure de la Stabilité Structurale à l'Eau Froide et à l'Eau Chaude

La détermination de la stabilité des agrégats dans l'eau, adaptée de Kemper et Rosenau (1986), suit la méthodologie présentée par Kouakoua et al. (1997). Quatre grammes d'échantillon séché à l'air et tamisé à 2 mm sont directement pesés sur un tamis de maille 200 µm, qui est ensuite immergé pendant 30 min à température ambiante dans un bécher contenant 100 mL d'eau déminéralisée. Le tamisage dans l'eau est ensuite réalisé en agitant le tamis dans le bécher au moyen d'un agitateur vertical à mouvement alternatif pendant 6 min (1.3 cm d'amplitude verticale, 35 cycles min⁻¹). Sur la fraction ayant traversé le tamis, la fraction "argile + limons fins" (<20 µm) dispersée, notée (A+Lf)d, est déterminée par la méthode de la pipette Robinson (1967). La fraction restant sur le tamis, constituée de macroagrégats (>200 µm) stables AS et de sables grossiers SG, est totalement dispersée par la soude (NaOH 0.05 M); AS est calculé par différence entre la fraction >200 µm et SG, le poids des matières organiques grossières étant négligé. Tous les résultats sont exprimés en g kg⁻¹ de sol séché à 105°C.

La stabilité des agrégats est également déterminée après traitement à l'eau chaude. Dans ce cas, l'ensemble constitué par le bécher d'eau déminéralisée avec le tamis contenant l'échantillon est placé dans une étuve à 90°C pendant environ 100 min (soit 40 min de montée en température et 60 min à 90°C). Les macroagrégats stables obtenus après traitement à l'eau chaude (ASe) sont déterminés comme précédemment. La fraction "argile + limons fins" est nommée (A+Lf)d (Kouakoua et al. 1997).

Analyses Physico-Chimiques

Les échantillons sont séchés à l'air et tamisés à 2 mm. L'analyse granulométrique est effectuée par la méthode de la pipette de Robinson (1967). Les minéraux phyllosilicatés et les oxyhydroxydes cristallisés sont identifiés par diffractométrie aux rayons X sur un dépôt orienté provenant d'une suspension d'argile placée sur une lame de verre préalablement dégraissée; l'analyse est faite à l'aide d'un diffrac-

tomètre informatisé (D 500, Siemens, Allemagne). Le carbone total Ct est dosé par combustion par voie sèche à l'auto-analyseur (CHN 600, Leco Corporation, St Joseph, Michigan). Le carbone extrait à l'eau chaude Cs est dosé après refroidissement, centrifugation (2500 × g pendant 30 min) et filtration, au moyen d'un analyseur spécifique (TOC 5000, Shimadzu, Tokyo, Japon). Les formes cristallisées du fer et de l'aluminium, dites "libres", sont extraites par le réactif CBD de Mehra-Jackson, et leurs formes dites "amorphes", par le réactif de Tamm (Rouiller et al. 1994). Les capacités d'échange cationique et les teneurs en bases échangeables sont déterminées au pH du sol par la méthode au chlorure de cobalthexamine (Fallavier et al. 1985). Les mesures de pH à l'eau sont effectuées en suspension dans un rapport sol:solution de 1:2.5.

Extraction et Dosage des Sucres

Les sucres sont extraits par deux hydrolyses successives (H₂SO₄), sur le sol tamisé à 2 mm, d'une part, sur l'extrait eau chaude préalablement évaporé à sec, d'autre part. La technique utilisée, préconisée par Oades et al. (1970), offre l'avantage d'extraire la plus grande partie des sucres monomères tout en limitant leur dégradation. Les sucres extraits sont dosés par chromatographie en phase gazeuse après silylation (Larré-Larrouy et Feller 1997). La séparation est effectuée sur un chromatographe muni d'un injecteur split-splitless et d'un détecteur à ionisation de flamme, équipé d'une colonne capillaire OV1. Les conditions opératoires sont les suivantes: température de l'injecteur 265°C, température du détecteur 250°C, température de la colonne programmée de 170°C à 230°C, à raison de 4°C min⁻¹.

La teneur totale en sucres extraits est calculée en sommant les teneurs des différents monosaccharides. La teneur en carbone de chaque monosaccharide est calculée d'après sa formule chimique. Le rapport $r = (\text{Mannose} + \text{Galactose}) / (\text{Arabinose} + \text{Xylose})$ proposé par Oades (1984) est calculé pour évaluer l'origine plutôt végétale ($r < 1$) ou microbienne ($r > 1$) des sucres.

Précision des Mesures et Traitements Statistiques

Les déterminations de AS, ASe, (A + Lf)d, (A + Lf)d_e, Ct et Cs sont réalisées à partir de trois répétitions au moins, et celles de Cst (carbone sous forme de sucres dans le sol total) et C_{ss} (carbone sous forme de sucres solubles à l'eau chaude) à partir de deux répétitions. Les intervalles de confiance sont calculés au seuil de 5%. Les comparaisons de moyennes sont réalisées à l'aide de la méthode des plus petites différences significatives au seuil de 5% (least significant differences LSD).

RÉSULTATS

Matière Organique des Sols et Stabilité des Agrégats

Les résultats sont présentés sur les Tableaux 1 (Ct, texture) et 2 (agrégation).

Au Congo, les teneurs en carbone total (Ct) et les taux de macroagrégats stables à l'eau (AS) des horizons 0–10 cm

Tableau 2. Teneurs en carbone soluble à l'eau chaude (Cs), en macroagrégats stables à l'eau froide (AS) et après traitement à l'eau chaude (ASe), en éléments fins dispersés à l'eau froide (A+Lf)d et après traitement à l'eau chaude (A+Lf)de

Zone d'étude	Echantillon	Cs	AS	ASe	(A+Lf)d	(A+Lf)de
		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹ (m ± ic)			
Congo-L	LS0	0.9	669 ± 15	667 ± 58	55 ± 2	56 ± 15
Congo-L	LM	0.5	571 ± 27	nd	48 ± 9	nd
Congo-L	LJ	0.4	621 ± 45	582 ± 27	41 ± 4	81 ± 4
Congo-L	LC	0.8	651 ± 44	599 ± 43	66 ± 6	43 ± 8
Congo-M	MS	0.9	746 ± 26	754 ± 23	7 ± 1	11 ± 2
Congo-M	MM	0.6	585 ± 57	599 ± 27	17 ± 3	25 ± 13
Brésil-G	CER	0.6	615 ± 12	621 ± 28	2 ± 0	12 ± 1
Brésil-G	CCL	0.4	541 ± 34	547 ± 32	1 ± 0	15 ± 2
Brésil-G	PAL	0.5	623 ± 34	652 ± 23	8 ± 1	10 ± 2
Brésil-L	FN	0.9	752 ± 67	793 ± 46	12 ± nd	14 ± nd
Brésil-L	CA	0.3	551 ± 61	548 ± 58	23 ± nd	26 ± nd
Brésil-L	CL	0.4	639 ± 29	663 ± 65	30 ± nd	35 ± nd

Abréviations: m = moyenne, ic = intervalle de confiance à 5%, nd = non déterminé.

Tableau 3. Teneurs en sucres, en carbone sous forme de sucres (Cst) et rapport *r* des sols étudiés

Zone d'étude	Ech.	Ara	Rha	Rib	Fuc	Xyl	Man	Fru	Gal-NH ₂	Gal	Glc-NH ₂	Gal-AU	Glc	Glc-AU	Somme	Cst	Cst	<i>r</i>
		mg kg ⁻¹															g 100 g ⁻¹ Ct	
Congo-L	LS0	150	96	591	n.i.	140	540	n.i.	n.i.	245	n.i.	116	1161	64	3104	1242	3.6	2.7
Congo-L	LM	86	42	351	n.i.	70	280	26	n.i.	145	26	32	517	18	1594	638	2.9	2.7
Congo-L	LJ	189	128	970	90	269	824	39	n.i.	344	47	74	1484	95	4552	1821	5.0	2.6
Congo-L	LC	138	102	721	n.i.	188	578	n.i.	n.i.	249	n.i.	92	1207	87	3362	1345	5.0	2.5
Congo-M	MS	369	118	382	73	456	1714	n.i.	244	308	997	196	4709	1608	11174	4337	10.2	2.5
Congo-M	MM	236	101	310	33	230	736	n.i.	53	175	120	n.i.	1470	127	3591	1427	7.9	2.0
Brésil-G	CER	114	98	578	n.i.	187	616	45	n.i.	239	39	46	1259	55	3277	1311	5.5	2.8
Brésil-G	CCL	92	80	382	n.i.	142	446	23	n.i.	170	21	n.i.	829	15	2201	880	4.1	2.6
Brésil-G	PAL	94	93	500	n.i.	174	486	46	n.i.	164	n.i.	18	816	17	2408	963	4.4	2.4
Brésil-L	FN	368	187	461	48	370	781	n.i.	123	250	284	45	1844	110	4871	1925	7.9	1.4
Brésil-L	CA	215	114	261	n.i.	247	536	n.i.	n.i.	156	159	n.i.	1131	81	3014	1190	6.7	1.5
Brésil-L	CL	319	178	452	15	293	627	n.i.	103	194	259	n.i.	1667	61	4168	1649	5.2	1.3

Abréviations: n.i. = non identifié, Ara = arabinose, Rha = rhamnose, Rib = ribose, Fuc = fucose, Xyl = xylose, Man = mannose, Fru = fructose, Gal-NH₂ = galactosamine, Gal = galactose, Glc-NH₂ = glucosamine, Gal-AU = acide galacturonique, Glc = glucose, Glc-AU = acide glucuronique, Ct = carbone total, $r = (\text{Man} + \text{Gal}) / (\text{Ara} + \text{Xyl})$.

sont significativement plus élevés sous savane que sous culture (LS0 vs. LM; MS vs. MM); sous jachère (LJ) ou canne à sucre (LC), les valeurs de AS sont intermédiaires, et peu différentes entre elles.

A Goiânia (Brésil-G), Ct diffère peu entre parcelles, mais AS est significativement plus élevé sous cerrado (CER) et sous pâturage (PAL) que sous rotation maïs-haricot (CCL). A Londrina (Brésil-L), Ct et AS sont significativement plus élevés sous forêt (FN) que sous culture d'avoine (CA); la parcelle sous couverture de légumineuse (CL) présente des valeurs intermédiaires.

Tous échantillons confondus, le taux d'éléments fins dispersés (A + Lf)d est faible, variant de 1 à 66 g kg⁻¹ sol. L'analyse mécanique révèle des teneurs en "argile + limon fin" totaux (A+Lf)t d'environ 800 g kg⁻¹ sol, soit un indice de dispersion (A + Lf)d/(A + Lf)t toujours inférieur à 0.1.

Par ailleurs, quelle que soit la parcelle, le taux de macroagrégats stables déterminé après extraction à l'eau chaude (ASe) n'est pas significativement différent de celui mesuré à l'eau froide (AS), au seuil de 5%. Concernant la fraction dispersée, les valeurs mesurées après extraction à l'eau chaude (A + Lf)de sont, selon la parcelle, supérieures, inférieures ou non différentes de celles mesurées à l'eau froide (A + Lf)d, au seuil de 5%.

Sucres du Sol (Tableau 3)

La teneur en carbone sous forme de sucres dans le sol total (Cst) est comprise entre 0.6 et 4.3 g kg⁻¹ sol, soit 2.9 à 10.2% de Ct. Elle diminue sous l'effet du défrichement et de la mise en culture (LS0 vs. LM; MS vs. MM; CER vs. PAL; FN vs. CL), la diminution étant plus forte en cas de culture annuelle (CER vs. CCL; FN vs. CA). En revanche, Cst est élevé en cas de culture à restitutions importantes (LS0 vs. LC).

Le glucose est toujours le sucre dominant (30 à 40% du total), devant le mannose, le ribose, le galactose et le xylose, les autres sucres étant faiblement représentés en général. Le rapport *r*, indicateur de l'origine végétale ou microbienne des sucres, est plus faible au Brésil-L (1.3 à 1.5) qu'ailleurs (1.9 à 2.9), mais il est souvent peu variable pour une même région. L'influence du défrichement et de la mise en culture continue sur *r* est généralement peu nette (LS0 vs. LM; CER vs. CCL; FN vs. CA). Mais parmi les parcelles cultivées, *r* est plus faible sous couvert herbacé pérenne que sous culture annuelle (LC vs. LM; PAL vs. CCL; CL vs. CA).

Sucres Extraits à l'Eau Chaude (Tableau 4)

La teneur en carbone sous forme de sucres solubles à l'eau chaude (C_{ss}) est comprise entre 0.03 et 0.12 g kg⁻¹ sol, soit

Tableau 4. Teneurs en sucres, en carbone sous forme de sucres (C_{ss}) et rapport *r* des extraits "eau chaude" des sols étudiés

Zone d'étude	Ech.	mg kg ⁻¹ sol														C _{ss}		<i>r</i>
		Ara	Rha	Rib	Fuc	Xyl	Man	Fru	Gal-NH ₂	Gal	Glc-NH ₂	Gal-AU	Glc	Glc-AU	Somme	C _{ss}	g 100 g ⁻¹ Cs	
Congo-L	LS0	6	5	n.i.	n.i.	6	30	n.i.	n.i.	17	n.i.	n.i.	149	n.i.	212	85	9.3	4.0
Congo-L	LM	3	3	8	n.i.	3	14	n.i.	n.i.	7	n.i.	n.i.	80	n.i.	118	47	9.4	3.4
Congo-L	LJ	4	4	12	n.i.	4	17	n.i.	n.i.	9	n.i.	7	100	n.i.	158	63	15.2	3.3
Congo-L	LC	6	8	43	n.i.	15	30	n.i.	n.i.	14	n.i.	9	131	n.i.	225	102	12.8	2.0
Congo-M	MS	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	34	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	251	n.i.	285	114	12.7	n.i.
Congo-M	MM	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	11	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	80	n.i.	91	36	6.1	n.i.
Brésil-G	CER	7	8	31	n.i.	17	34	n.i.	n.i.	15	n.i.	n.i.	150	n.i.	262	105	17.5	2.0
Brésil-G	CCL	14	14	79	n.i.	19	30	n.i.	n.i.	15	n.i.	n.i.	121	n.i.	293	117	29.3	1.4
Brésil-G	PAL	5	9	32	n.i.	15	37	4	n.i.	17	n.i.	n.i.	147	n.i.	267	107	21.4	2.6
Brésil-L	FN	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	29	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	201	n.i.	230	92	10.2	n.i.
Brésil-L	CA	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	71	n.i.	71	28	9.5	n.i.
Brésil-L	CL	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	10	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	108	n.i.	118	47	11.8	n.i.

Abréviations: n.i. = non identifié, Ara = arabinose, Rha = rhamnose, Rib = ribose, Fuc = fucose, Xyl = xylose, Man = mannose, Fru = fructose, Gal-NH₂ = galactosamine, Gal = galactose, Glc-NH₂ = glucosamine, Gal-AU = acide galacturonique, Glc = glucose, Glc-AU = acide glucuronique, Cs = carbone solubilisé à l'eau chaude, *r* = (Man+Gal)/(Ara+Xyl).

6.1 à 29.3% du carbone solubilisé à l'eau chaude (Cs), 2.5 à 13.3% du carbone sous forme de sucres du sol (C_{st}), et 0.2 à 0.6% de Ct. En proportion du sol total, C_{ss} diminue sous l'effet du défrichement et de la mise en culture (LS0 vs. LM; MS vs. MM; FN vs. CA-CL), sauf au Brésil-G, où ses variations restent limitées (CER vs. PAL-CCL). C_{ss} est toutefois élevé en cas de restitutions importantes (LC).

Le glucose est toujours le sucre dominant (>40% environ du total), devant le mannose, le ribose, le galactose, le xylose, les autres sucres étant généralement peu représentés voire non décelés. Le rapport *r* des sucres solubilisés à l'eau chaude peut être calculé seulement pour le Congo-L (2 à 4) et pour le Brésil-G (1.3 à 2.6). Le défrichement et la mise en culture s'accompagnent d'une diminution de *r* (LS0 vs. LM; LS0 vs. LC; CER vs. CCL), même après jachère (LS0 vs. LJ), mais pas lorsque la culture est un pâturage (CER vs. PAL). L'effet du mode d'occupation sur *r* est ainsi plus net pour les sucres de l'extrait eau chaude que pour les sucres du sol.

Corrélation entre les Différentes Variables

Tous échantillons confondus (*n* = 12), AS est significativement corrélé aux teneurs en carbone total Ct ($r^2 = 0.62$; $P < 0.01$) et en carbone soluble à l'eau chaude Cs ($r^2 = 0.67$; $P < 0.01$) (Figure 1). Il est également corrélé à la teneur en carbone sous forme de sucres dans le sol C_{st} ($r^2 = 0.51$; $P < 0.01$), mais la distribution non normale de C_{st} ne permet pas de conclure sur cette relation. Les relations entre AS et Ct, d'une part, entre AS et Cs, d'autres part, comportent un terme constant élevé (ordonnée à l'origine), respectivement 450 et 480 environ, alors que AS est compris entre 540 et 750 environ. Ainsi, pour les sols étudiés, Ct et Cs expliquent au maximum 35 à 40% de AS. En revanche, il n'y a pas de corrélation significative entre (A + Lf)_d et Ct ou Cs ($r^2 < 0.25$).

Par ailleurs, au seuil de 5%, AS n'est corrélé avec aucun des paramètres suivants: teneurs en calcium, magnésium, potassium, sodium, manganèse et protons échangeables, en aluminium échangeable, libre et amorphe, en fer libre et amorphe, somme des bases échangeables, capacité d'échange cationique, taux d'argile, somme carbone total + fer libre.

DISCUSSION

Teneur en Carbone Total

Dans chaque région, la teneur en carbone total des parcelles cultivées est généralement plus faible que sous savane ou forêt, sauf au Brésil-G. Ces résultats corroborent ceux obtenus sur les mêmes types de sols, sous savane de la Vallée du Niari, au Congo (Martin 1963; Djondo 1994), et sous forêt dans le Paraná, au Brésil (Tavares Filho 1995). La culture de la canne à sucre (Congo-L), qui s'accompagne d'importantes restitutions, permet de maintenir des teneurs élevées en carbone, par rapport aux autres cultures étudiées. Par ailleurs, certaines alternatives de gestion testées dans notre étude permettent d'augmenter la teneur en carbone de l'horizon de surface des sols cultivés: jachère naturelle de quatre ans (Congo-L), couverture de légumineuse herbacée de 10 ans (associée à un verger, Brésil-L). L'effet positif des jachères de moyenne durée sur le stockage du carbone a été souvent observé, l'importance de cet effet étant toutefois variable (Feller 1995). En revanche, l'effet des systèmes à légumineuses de couverture est moins connu; les travaux d'Azontondé (1993) montrent l'intérêt d'une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) pour améliorer le stock organique d'un sol ferrallitique dégradé.

Au Brésil-G, le défrichement et la mise en culture continue de la savane-cerrado (CER) s'accompagnent d'une variation limitée de la teneur en carbone dans l'horizon de surface. Ces observations rejoignent celles de Lepsch et al. (1994) pour d'autres sols cultivés de la même région. Cette faible variation s'expliquerait d'abord, selon Freitas et al. (en préparation), par la relative "anthropisation" du cerrado étudié, qui est pâturé extensivement et éclairci, avec un niveau de restitution probablement plus faible qu'un cerrado "protégé". Brossard et al. (1997) signalent en effet des taux de carbone total dans la couche de sol 0-20 cm de 34 à 48 g kg⁻¹ pour les cerrados protégés, et de 24 g kg⁻¹ pour un cerrado pâturé. En revanche, tous les résidus de récolte sont restitués sur la parcelle en culture continue étudiée (CCL), ce qui tend à rapprocher son taux de carbone de celui du cerrado dégradé. Par ailleurs, divers travaux montrent que les pâturages plantés bien gérés, tel celui étudié (PAL), main-

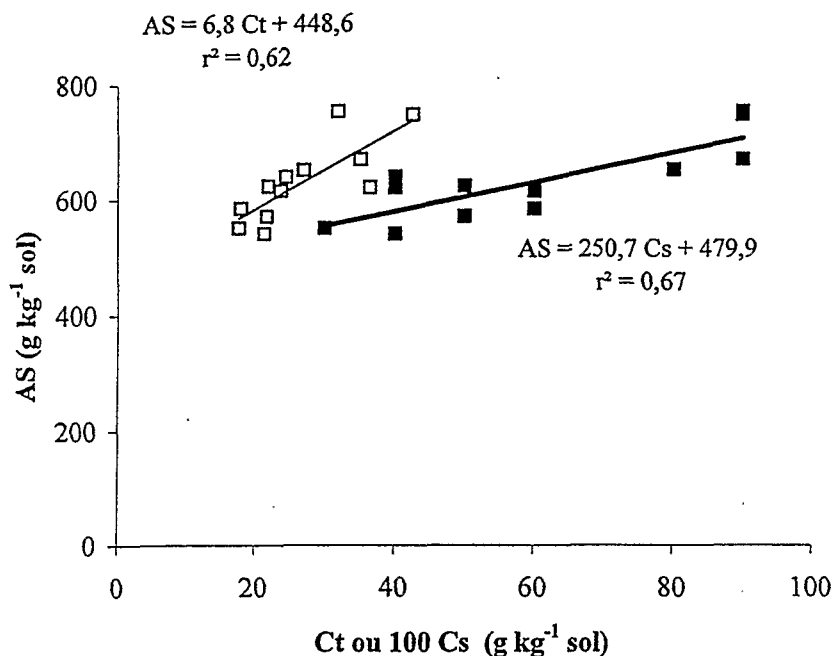


Fig. 1. Relations entre taux de macroagrégats stables à l'eau froide (AS) et teneurs en carbone total (Ct) ou soluble à l'eau chaude (Cs) pour les sols étudiés.

tiennent des teneurs en carbone équivalentes à celles relevées sous végétation naturelle (Albrecht et al. 1992; Desjardins et al. 1994; Correa et Reichardt 1995; Feigl et al. 1995).

Stabilité des Agrégats, Relation avec la Teneur en Carbone Total

Les sols étudiés ont une stabilité structurale élevée. La désagrégation dans l'eau est due essentiellement aux phénomènes d'éclatement, les phénomènes de dispersion apparaissant très limités comme l'indiquent les faibles valeurs de (A + Lf)_d. Les variations de teneurs en carbone total s'accompagnent généralement de variations du taux de macroagrégats stables, avec une corrélation positive et hautement significative entre AS et Ct. Ceci est en accord avec les résultats de nombreux travaux en milieu tropical, mettant en oeuvre d'autres méthodes d'étude de la stabilité structurale (Martin 1963; Feller et al. 1996). L'effet positif des jachères sur la stabilité structurale a également été démontré pour des sols de République Centrafricaine (Morel et Quantin 1972). En milieu tempéré, Baldock et Kay (1987) et Angers et Mehuys (1990) montrent aussi que la stabilité de l'agrégation est plus faible sous culture continue de maïs que sous prairie de graminées ou sous culture de légumineuse.

L'étude des relations entre AS et Ct montre que pour les sols étudiés, le carbone total explique au plus 40% environ de la stabilité des macroagrégats. Celle-ci apparaît donc largement contrôlée par d'autres facteurs, en particulier l'argile et les oxydes de fer, dont les teneurs sont élevées dans les sols étudiés, et dont le rôle agrégeant est connu (Oades et Waters 1991). La comparaison d'échantillons de

teneurs en carbone total équivalentes montre que des différences de teneur en fer libre s'accompagnent de différences de teneur en agrégats stables: ainsi, dans la comparaison LS0 vs. FN, les Ct, taux de fer libre et AS sont respectivement de 35 vs. 32 g kg⁻¹, 30 vs. 87 g kg⁻¹ et 669 vs. 752 g kg⁻¹; de même, dans la comparaison LM vs. CL, ils sont respectivement de 22 vs. 25 g kg⁻¹, 36 vs. 72 g kg⁻¹ et 571 vs. 639 g kg⁻¹. Toutefois, l'absence de relations significatives entre AS et différents paramètres physico-chimiques (cations échangeables, teneurs en argile et en formes du fer) montre que pour les échantillons étudiés, l'effet du mode de gestion des terres sur la stabilité structurale serait dû pour l'essentiel aux variations de teneurs en matière organique.

Sucres du Sol

Le défrichement puis la mise en culture continue (manioc, maïs/haricot, avoine) conduisent à une diminution de la teneur en sucres du sol. Des tendances similaires sont rapportées en milieu tempéré (Dalal et Henry 1988; Dormaar 1984). En revanche, sous jachère ou canne à sucre (Congo-L) et sous légumineuse de couverture (Brésil-L), la teneur en sucres du sol est relativement élevée, parfois supérieure à celle relevée sous végétation naturelle, du fait de restitutions importantes. La teneur en sucres du sol étant calculée par sommation des teneurs en sucres monomères, il convient toutefois de rester prudent dans l'interprétation des résultats.

Le rapport *r* est toujours supérieur à 1.3 pour les sucres du sol, ce qui témoigne de l'importance des processus de néosynthèse microbienne par rapport à l'héritage végétal. Les MO associées aux argiles, dominantes dans ces sols, sont en effet enrichies en sucres d'origine microbienne

(Feller et al. 1991; Feller et Beare 1997). Cette importance des sucres "microbiens" dans les sols étudiés est confirmée par les teneurs relativement élevées en mannose et ribose, d'origine principalement microbienne (Decau 1968; Cheshire 1979). Par ailleurs, r est plus faible dans les sols du Brésil-L (plus riches en fer) que dans ceux des autres sites; mais en l'absence d'analyse sur la composition en sucres des restitutions organiques, cette observation reste difficile à interpréter. Il n'y a pas de relation nette entre le défrichage puis la mise en culture et les variations de r des sucres du sol. Mais r est plus faible sous culture herbacée pérenne que sous culture annuelle (LC vs. LM; PAL vs. CCL; CL vs. CA). Cette différence correspond à une proportion plus importante de sucres d'origine végétale pour les premières; on peut l'expliquer par une proportion plus importante de MO sous forme de débris végétaux (fraction 50–2000 μm) dans les sols sous culture herbacée pérenne (Kouakoua 1998).

Sucres et Carbone Extraits à l'Eau Chaude, Relations avec l'Agrégation

La mise en culture intensive des savanes ou forêts s'accompagne généralement d'une diminution de la teneur en sucres et en carbone solubilisés à l'eau chaude. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par Feller (1995) et Leinweber et al. (1995) après détermination des teneurs en carbone soluble à l'eau chaude.

Le rapport r pour les sucres solubilisés à l'eau chaude est toujours supérieur à 1.3, comme dans le cas des sucres du sol, confirmant l'importance relative des sucres issus des néosynthèses microbiennes. Plusieurs auteurs signalent des rapports r supérieurs à 1 (1.0 à 1.6; Ball et al. 1996) et même supérieurs à 2 (2.1 à 2.3; Haynes et Francis 1993) pour les sucres extraits à l'eau chaude. Ils supposent que ces sucres sont principalement issus de la décomposition de polysaccharides microbiens exocellulaires, impliqués dans la stabilité des agrégats. Ces observations sont à rapprocher des résultats obtenus sur sols ferrallitiques par Feller et al. (1991), qui associent l'extraction à l'eau chaude et l'observation en microscopie électronique des fractions argileuses (après marquage métallique de la matière organique). Ceux-ci montrent que: (i) ces fractions apparaissent riches en MO amorphe, avec une morphologie typique d'exsudats racinaires et/ou microbiens; (ii) l'extrait est caractérisé par un rapport xylose/mannose très faible (<0.1), ce qui attesterait une origine essentiellement microbienne.

Nos données ne sont pas assez nombreuses pour analyser correctement l'effet du mode de gestion des terres sur r des sucres solubilisés à l'eau chaude. Elles tendent toutefois à montrer que r diminue après défrichage et mise en culture continue. On note également que l'effet du mode de gestion sur r n'est pas le même pour les sucres solubles à l'eau chaude et pour les sucres du sol.

Sur l'ensemble des 12 parcelles, le taux de macroagrégats stables à l'eau froide AS est corrélé positivement avec le taux de carbone soluble à l'eau chaude Cs ($r^2 = 0.67$), un peu plus étroitement qu'avec le taux de carbone total Ct ($r^2 = 0.62$). Ceci laisserait supposer que les MO solubles ont un rôle important dans la stabilité de l'agrégation, d'autant que

ces MO apparaissent relativement riches en sucres. Cette hypothèse va dans le même sens que celles de Haynes et Swift (1990) et Haynes et al. (1991), qui rapportent pour des sols de Nouvelle-Zélande des corrélations étroites entre AS et Ct, d'une part, entre AS et teneurs en sucres solubles à l'eau chaude, d'autre part. D'autres auteurs ont même mis en évidence des corrélations étroites entre AS et teneur en sucres solubles à l'eau chaude en l'absence de corrélations significatives entre AS et Ct (Metzger et al. 1987; Angers et al. 1993; Haynes et Francis 1993).

Nous avons contrôlé directement l'effet des MO solubles à l'eau chaude sur l'agrégation, en comparant pour chaque échantillon les taux de macroagrégats stables à l'eau froide AS et après extraction à l'eau chaude ASe. L'absence de différence significative entre AS et ASe montre que malgré l'existence de relations statistiques significatives, la MO soluble à l'eau chaude ne peut pas être considérée comme un facteur déterminant de la stabilité de l'agrégation dans ces sols ferrallitiques argileux. Ceci montre l'intérêt de tels contrôles directs pour évaluer le rôle réel des facteurs pouvant intervenir dans la stabilité de l'agrégation.

CONCLUSIONS

Le défrichage et la mise en culture des sols ferrallitiques argileux étudiés s'accompagnent généralement d'une diminution des teneurs en carbone et en sucres dans le sol et dans les extraits à l'eau chaude. Ils s'accompagnent également d'une diminution du taux de macroagrégats (>200 μm) stables. Mais certaines pratiques agricoles (jachère, légumineuses de couverture, pâturages etc.) permettent de limiter ces diminutions. Par ailleurs, l'étude de la composition en sucres des sols et des extraits à l'eau chaude révèle l'origine principalement microbienne de ces sucres, quel que soit le mode de gestion.

La stabilité des macroagrégats apparaît étroitement corrélée à la teneur en carbone total, ainsi qu'à la teneur en carbone soluble à l'eau chaude. Mais l'étude de l'effet direct de l'extraction à l'eau chaude ne révèle pas de différence significative entre stabilité de l'agrégation à l'eau froide et à l'eau chaude. Pour les sols étudiés, le carbone soluble à l'eau chaude ne peut donc pas être considéré comme un facteur déterminant de la stabilité des macroagrégats.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Messieurs B. Nyeté et Y.M. Djondo de nous avoir aimablement fourni les échantillons du Congo.

Albrecht, A., Rangon, L. et Barret, P. 1992. Effet de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cah. Orstom Sér. Pédol. 27: 121–133.

Angers, D. A. et Mehuys, G. R. 1989. Effects of cropping on carbohydrate content and water stable aggregation of a clay soil. Can. J. Soil Sci. 69: 373–380.

Angers, D. A. et Mehuys, G. R. 1990. Barley and alfalfa cropping effects on carbohydrate contents of a clay soil and its size fractions. Soil Biol. Biochem. 22: 285–288.

Angers, D. A., Samson, N. et Légère, A. 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. Can. J. Soil Sci. 73: 51–59.

- Azontondé, A. 1993. Dégénération et restauration des terres de Barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. *Cah. Orstom Sér. Pédol.* 28: 217–226.
- Baldock, J. A. et Kay, B. D. 1987. Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil. *Can. J. Soil. Sci.* 67: 501–511.
- Ball, B. C., Cheshire, M. V., Robertson, E. A. G. et Hunter, E. A. 1996. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil Till. Res.* 39: 143–160.
- Brossard, M., Lopes Assad, M. L., Chapuis, L. et Barcellos, A. O. 1997. Estoques de carbono em solos diferentes fitofisionomias de Cerrados. Pages 272–277 dans L. C. H. S. Laércio Leonel, ed. *Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado*. Dept. Ecologia Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Carter, M. R., Angers, D. A. et Kunelius, H. T. 1994. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1194–1199.
- Cheshire, M. V. 1979. *Nature and origin of carbohydrates in soils*. Academic Press, London, UK.
- Correa, J. C. et Reichardt, K. 1995. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um latossolo amarelo da Amazonia Central. *Pesquisa Agr. Brasil.* 30: 107–114.
- Dalal, R. C. et Henry, R. J. 1988. Cultivation effects on carbohydrate contents of soil fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1365–1365.
- Decau, J. 1968. Les polysaccharides du sol: origine, évolution et rôle. *Ann. Agron.* 19(1): 65–82.
- Desjardins, T., Andreux, F., Volkoff, B. et Cerri, C. C. 1994. Organic carbon and ^{13}C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonie. *Geoderma* 61: 19–25.
- Djondo, M. Y. 1994. Propriétés d'échange ionique des sols ferrallitiques argileux de la Vallée du Niari et sableux du Plateau de Mbé-Baté au Congo. Application à la correction de leur acidité. Thèse Doctorat Université Paris XII-Val de Marne.
- Dormaer, J. F. 1984. Monosaccharides in hydrolysates of water-stable aggregates after 67 years of cropping to spring wheat as determined by capillary gas chromatography. *Can. J. Soil Sci.* 64: 647–656.
- Fallavier, P., Babre, D. et Breysse, M. 1985. Détermination de la capacité d'échange des sols tropicaux acides. *Agron. Trop.* 40(4): 298–308.
- Feigl, B. L., Melillo, J. et Cerri, C. C. 1995. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). *Plant Soil* 175: 21–29.
- Feller, C. 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. ORSTOM Editions, Paris, France.
- Feller, C., Albrecht, A. et Tessier, D. 1996. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. Pages 309–359 dans M. R. Carter et B.A. Stewart, ed. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Advances in Soil Science. Lewis Publishers, New York, NY.
- Feller, C. et Beare, M. H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69–116.
- 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. *C. R. Acad. Sci. Sér. II* 312: 1491–1497.
- Freitas, P.-L. de., Blancaneaux, Ph., Gavinelli, E., Larré-Larrouy, M.-C. et Feller, C. 1999. Nivel e natureza do estoque orgânico de Latossolos sobre diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agr. Brasil.* (sous presse.)
- Gijsman, A. J. et Thomas, R. J. 1995. Aggregate size distribution and stability of an Oxisol under legumes-based and pure grass pastures in eastern Columbian savannas. *Aust. J. Soil Res.* 33: 153–165.
- Harris, R. F., Chesters, G. et Allen, O. N. 1966. Dynamics of soil aggregation. *Advan. Agron.* 18: 107–169.
- Haynes, R. J. et Francis, G. S. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.* 44: 665–675.
- Haynes, R. J. et Swift, R. S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J. Soil Sci.* 41: 73–83.
- Haynes, R. J., Swift R. S. et Stephen, R. C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil Till. Res.* 19: 77–87.
- Kemper, W. D. et Rosenau, R. C. 1986. Aggregate stability and size distribution. Pages 425–442 dans A. Klute, ed. *Methods of soil analysis*. Part. 1. 2nd ed. Agronomy Monograph No. 9. ASA et SSSA, Madison, WI.
- Kouakoua, E. 1998. La matière organique et la stabilité structurale d'horizons de surface de sols ferrallitiques argileux. Effet du mode de gestion des terres. Thèse Université. Nancy I.
- 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. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 239–247.
- Larré-Larrouy, M.-C. et Feller, C. 1997. Détermination of carbohydrates in two ferrallitic soils: Analysis by capillary gas chromatography after derivatization by silylation. *Soil Biol. Biochem.* 29(9/10): 1585–1589.
- Leinweber, P., Schulten, H.-R. et Körschens, M. 1995. Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biol. Fert. Soils* 20: 17–23.
- Lepsch, I. F., Menk, J. R. F., Oliveira, J. B. de 1994. Carbon storage and other properties of soils under agriculture and natural vegetation in São Paulo State, Brazil. *Soil Use Manage.* 10: 34–42.
- Martin, G. 1963. Dégénération de la structure des sols sous culture mécanisée dans la Vallée du Niari. *Cah. Orstom Sér. Pédol.* 2: 8–14.
- Metzger, L., Levanon, D. et Mingelgrin, 1987. The effect of sewage sludge on soil structure stability: Microbiological aspects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 346–351.
- Morel, R. et Quantin, P. 1972. Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (République Centrafricaine). *Agron. Trop.* 27: 667–739.
- Neves, C. S., Dechen, A. R., Feller, C. et Gonzalez, M. G. N. 1998. Influência de sistemas de manejo de solo em pomar de tangerina 'Poncã' sobre limão 'Cravo' em Latossolo Roxo. *Rev. Brasil. Frutic.* 20(3): 367–374.
- Oades, J. M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76: 319–337.
- Oades, J. M., Kirkman, M. A. et Wagner, G. H. 1970. The use of gas-liquid chromatography for the determination of sugars extracted from soils by sulfuric acid. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 230–235.
- Oades, J. M. et Waters, A. G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29: 815–828.
- Rennie, D. A., Truog, E. et Allen, O. N. 1954. Soil aggregation as affected by microbial gums, level of fertility and kind of crop. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 18: 339–403.

Robinson, J. B. D. 1967. Soil particle size fractions and nitrogen mineralization. *J. Soil Sci.* 18: 109–117.

Rouiller, J., Souchier, B., Bruckert, S., Feller, C., Toutain, F et Vedy, J.C. 1994. Méthodes d'analyses des sols. Pages 623–631 dans M. Bonneau et B. Souchier, ed. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*. 2nd éd. Masson, Paris, France.

Tavares Filho, J. 1995. Organisation et comportement de Latosols du Parana (Brésil). Influence de leur mise en culture. Thèse Université Nancy I.

