

STATUT DE LA MATIERE ORGANIQUE DES CAMBISOLS ET DES LIXISOLS SOUS FORMATIONS NATURELLES DE LONGUE DUREE EN ZONE NORD-SOUDANIENNE AU BURKINA FASO

J.-P. F. PALLO¹, N. SAWADOGO¹, N. P. ZOMBRE², M. P. SEDOGO¹

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles. (INERA) 04 BP 8645 Ouagadougou 04 Burkina Faso.
E-mail: jeanpallo@hotmail.com

²Université de Ouagadougou-Unité de Formation et de Recherches/Science de la vie et de la terre (UFR/SVT),
03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

RESUME

L'étude vise à évaluer la matière organique des Cambisols et des Lixisols sous formations naturelles de longue durée en zone climatique nord-soudanienne et à établir, les relations entre cette composante édaphique et les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces deux types de sol. L'étude a été menée dans deux formations naturelles protégées depuis 1936 (forêt classée de Yabo) et 1938 (forêt classée de Sâ) au Burkina Faso. Les analyses ont porté sur la quantification du carbone total et de l'azote total et sur la détermination des taux respectifs de carbone et d'azote dans les fractions (0 - 50 µm), (50 - 200 µm) et (200 - 2000 µm). La respiration du sol (CO₂ dégagé) et le taux de carbone de la biomasse microbienne ont aussi été mesurés. Les résultats montrent que les deux unités de sol renferment, en moyenne, 8 à 10 g kg⁻¹ sol de carbone total et environ 1 g kg⁻¹ sol d'azote total. Ces valeurs sont supérieures à celles des sols des zones sahélienne et sud-soudanienne. Pour les lixisols, ce sont les facteurs climatiques qui ont permis d'expliquer ces teneurs en carbone total et en azote total. Pour les cambisols, ce sont les caractéristiques texturales qui ont été incriminées. Par ailleurs, plus de 70 % de carbone total et plus de 80 % de l'azote total sont liés aux particules argilo-limoneuses (0 - 50 µm). Les quantités de carbone associées aux fractions inférieures à 200 µm ont eu des corrélations positives, avec la capacité d'échange cationique et la somme des bases échangeables ; tandis que l'activité biologique globale a eu une corrélation positive avec le pH. L'étude suggère, également, qu'une mise en valeur agricole de telles unités de sol, doit être accompagnée d'amendements organiques et d'aménagements anti-érosifs, pour accroître leurs productivités.

Mots-clés : Burkina Faso, Cambisols, Lixisols, fractionnement de la matière organique, activité biologique

ABSTRACT

CAMBISOLS AND LIXISOLS ORGANIC MATTER STATUS UNDER TWO LONG TERM NATURAL FORMATIONS
IN THE NORTH SUDANIAN CLIMATIC ZONE OF BURKINA FASO

The study aims : first to enhance the knowledge on organic matter content of Cambisols and Lixisols ; secondly to point out, the relationships between this compound and the physical, chemical and biological properties of these soil groups. The study was carried out in two natural formations, protected against fires, pasture and cutting, since 1936 (Yabo forest) and since 1938 (Sâ forest). Total carbon and nitrogen, as well as, the amounts of C and N involved in 3 particle size fractions [(0 - 50 µm) ; (50 - 200 µm) ; (200 - 2000 µm)], were determined. Carbon (C) mineralization and microbial biomass C were also measured. The results show that, in the two soils units, total C was comprised between 8 and 10 g kg⁻¹ soil and the average of total N was 1 g kg⁻¹ soil. These values were higher than those of soils from the Sahelian and south Sudanian zones. The relative high values of total C and total N were attributed to climatic factors, for lixisols and to soil texture, for cambisols. Moreover, more than 70 % of total C and 80 % of total N were related to the 0 - 50 µm size fractions. The chemical soil properties, such as exchange cations capacity and the sum of exchangeable bases, were positively correlated with the amounts of C held by the 0 - 50 µm and

the 50 - 200 μm size fractions while biological activity was positively correlated with pH. In order to increase the productivity of such soil units, it was suggested that organic inputs be combined with appropriate land management that will reduce run - off and increase water infiltration in soil.

Key-words : Burkina Faso, Cambisols, Lixisols, organic matter fractionation, biological activity

INTRODUCTION

La matière organique du sol (MOS) désigne l'ensemble des substances qui contiennent du carbone organique, présentes dans le sol (Schnitzer, 1991 ; Stevenson, 1994). Elle regroupe, outre les résidus végétaux et animaux dans divers stades de décomposition, les micro-organismes vivants ou morts, les substances issues des synthèses microbiologiques et / ou chimiques de leurs produits de décomposition liées à la matière minérale du sol (Guggenberger *et al.*, 1994).

La quantité totale de carbone organique des sols (COS) du monde est estimée à 1576 Pg (Eswaran *et al.*, 1993) dont un tiers environ (506 Pg) se trouve dans les sols tropicaux. Elle représente respectivement le double et environ le triple des stocks de carbone de l'atmosphère (750 Pg) et de la biomasse végétale (550 Pg) (Post *et al.*, 1990 ; Johnson et Kerns, 1991). Cette quantité élevée du COS fait de ce paramètre, la source potentielle la plus importante de dioxyde de carbone ; si bien qu'à la faveur des changements climatiques, elle pourrait influencer davantage la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et entraîner des changements de l'environnement global (Kirschbaum, 1995). Par ailleurs, en jouant un rôle dans la fixation des métaux lourds, la MOS permet d'éviter la pollution des nappes phréatiques par ces éléments (Karapanogiotis *et al.*, 1991 ; He et Singh, 1994).

En plus de son importance écologique, la MOS influence les processus de formation et d'évolution des sols (Baldock et Nelson, 1999) et leur fertilité physique et chimique. Ainsi, dans les systèmes d'évaluation des terres (FAO, 1976 ; 1983 ; 1985), elle est considérée comme un des attributs-clés des qualités des terres telles que la disponibilité des éléments nutritifs, la capacité de rétention des nutriments et les risques d'érosion.

Différentes méthodes, souvent complémentaires, existent pour caractériser la MOS. Les fractionnements chimiques se réfèrent à celle élaborée par Oden (1919). Elles utilisent

des réactifs alcalins pour séparer les acides humiques, les acides fulviques et l'humine. Elles ont été appliquées dans de nombreuses études consacrées à la matière organique des sols tropicaux (Dabin, 1980 ; Leroux, 1980 ; Garnier-Sillam *et al.*, 1989 ; Zombré, 1984 ; Pallo, 1993). Actuellement, la procédure la plus courante est celle adoptée par la Société Internationale des Substances Humiques (IHSS, 1983). Elle préconise que l'extraction des substances humiques soit précédée par la séparation des lipides libres (Saiz-Jimenez, 1996). Les critiques faites par de nombreux auteurs (Oades, 1995 ; Zuman et Rupp, 1995 ; Swift, 1996) aux procédures employant des extractants alcalins ont favorisé le développement des méthodes de fractionnement physique de la MOS. Leurs objectifs sont de séparer les constituants de la matière organique sans altérer leur nature. Quant aux techniques spectroscopiques d'étude de la MOS, elles regroupent entre autres, la résonance magnétique nucléaire en phase solide (^{13}C RMN), la pyrolyse analytique et la spectroscopie infra-rouge Fourier Transform (FTIR). Elles permettent d'identifier les composants majeurs des fractions organiques, tels que les hydrates de carbone, les phénols, les mono(di)mères de lignine et les graisses. En accroissant les connaissances sur la composition et la structure de la MOS sous cultures et sous forêts (Hempfling et Schulten, 1988 ; 1990 ; 1991), ces techniques conduisent à des pratiques de gestion environnementale plus efficaces (Schulten et Schnitzer, 1992).

Au Burkina Faso, pendant de nombreuses années, la caractérisation de la matière organique des sols s'est limitée à la détermination du taux de carbone total, de l'azote total et du rapport C/N. Depuis une trentaine d'années, les voies chimiques et physiques sont les plus couramment utilisées ; l'application des techniques spectroscopiques étant récente (Pallo, 2009). Pour l'essentiel, les études visent à proposer des modes de gestion de la MOS afin d'accroître les productions agricoles et d'assurer le développement d'une agriculture durable. En conséquence, elles sont réalisées en vue d'appréhender l'incidence des systèmes

de culture sur les différents compartiments organiques (Sedogo, 1993 ; Bacyé, 1993 ; Pallo, 1993 ; Kambire *et al.*, 2001 ; Mando, 2005 a, b, c ; Ouattara *et al.*, 2006). Les travaux détaillés consacrés exclusivement aux caractéristiques de la MOS des écosystèmes naturelles sont plus récents et moins nombreux (Bilgo *et al.*, 2004 ; Serpantié *et al.*, 2004 ; Nacro *et al.*, 2005 ; Pallo *et al.*, 2006, 2008 et 2009).

La présente étude se justifie par le fait que les diverses actions mises en œuvre dans le cadre d'une stratégie nationale et d'un plan d'action de gestion intégrée de la fertilité des sols adoptés en 1998, mettent l'accent sur la promotion et l'utilisation plus importante des amendements organiques par les producteurs (MA, 1999). Aussi, la quantification des taux initiaux de carbone et d'azote des différentes fractions granulométriques des sols sous formations naturelles de longue durée est-elle indispensable pour une meilleure interprétation de la dynamique de la MOS sous divers types d'utilisation agricoles des terres. Les travaux ont été effectués dans les forêts classées de Sâ (Province du Mouhoun) et de Yabo (Province du Sanmatenga) en zone nord-soudanienne au Burkina Faso. Ils ont porté sur : (1) la distribution granulométrique du carbone et de l'azote, (2) l'activité biologique globale et la biomasse microbienne dont le rôle dans la biogenèse de l'humus et l'importance dans la libération des éléments nutritifs ont été relevés par Brookes *et al.* (1984) et Diaz-Ravina *et al.* (1993) et (3) les relations entre les caractéristiques de la matière organique et les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Dans la classification française des sols (CPCS, 1967), les sols étudiés à Sâ et à Yabo appartiennent respectivement au groupe des sols

bruns eutrophes tropicaux, réputés être les plus fertiles du pays (ORSTOM, 1970) et au groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés (sols dominants au Burkina Faso). Dans la Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols (FAO, 1998), les sols de Sâ sont des Cambisols ferri-épigleyiques et ceux de Yabo, des Lixisols épiskeleti -pétroferriques. Dans le reste du texte, ils sont désignés par « cambisols » et « lixisols ».

MATERIELS ET METHODES

CADRE GEOGRAPHIQUE

Les sites étudiés sont localisés dans les formations naturelles (« forêts ») de Sâ (Figure 1) et de Yabo (Figure 2), respectivement classées en 1938 et en 1936. Les principales caractéristiques de ces formations sont présentées dans le tableau 1. Sur la carte climatique dressée en 1998 par la direction nationale de la météorologie, ces deux forêts évoluent sous climat nord-soudanien. En revanche, d'après les travaux de Guinko (1984), Sâ et Yabo sont respectivement placés dans les zones climatiques nord-soudanienne et subsaharienne. Sur les deux sites, les pluviosités et températures moyennes annuelles sont du même ordre de grandeur. Les sols subissent les mêmes régimes hydrique et thermique (Boyadgiev, 1980). Le substratum géologique est constitué d'alluvions épaisses à Sâ (Haarbrink, 1970) et de roches acides post-tectoniques à Yabo (Ducellier, 1963). Les territoires phytogéographiques appartiennent aux secteurs soudanien septentrional et subsaharien (Guinko, 1984).

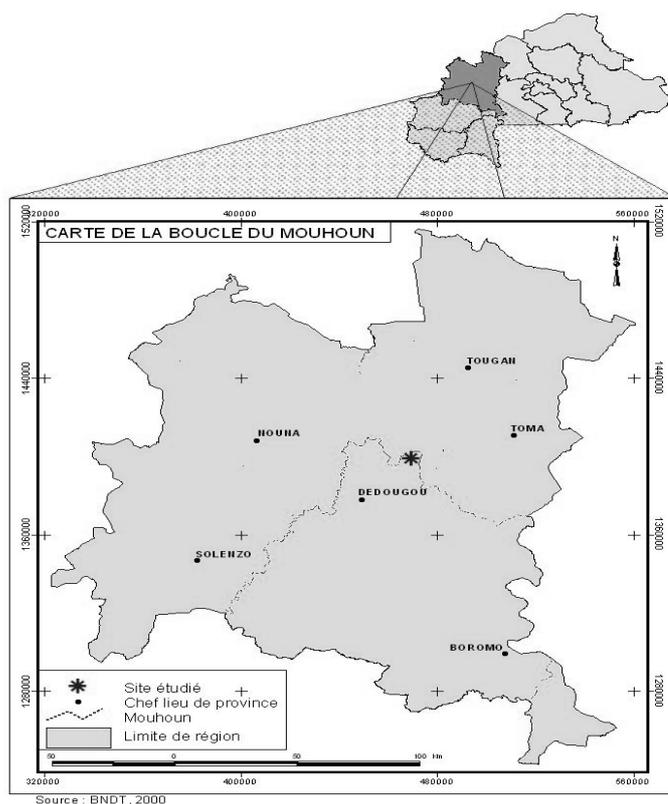


Figure1 : Carte de localisation du site de Sâ.

Location map of the Sâ site.

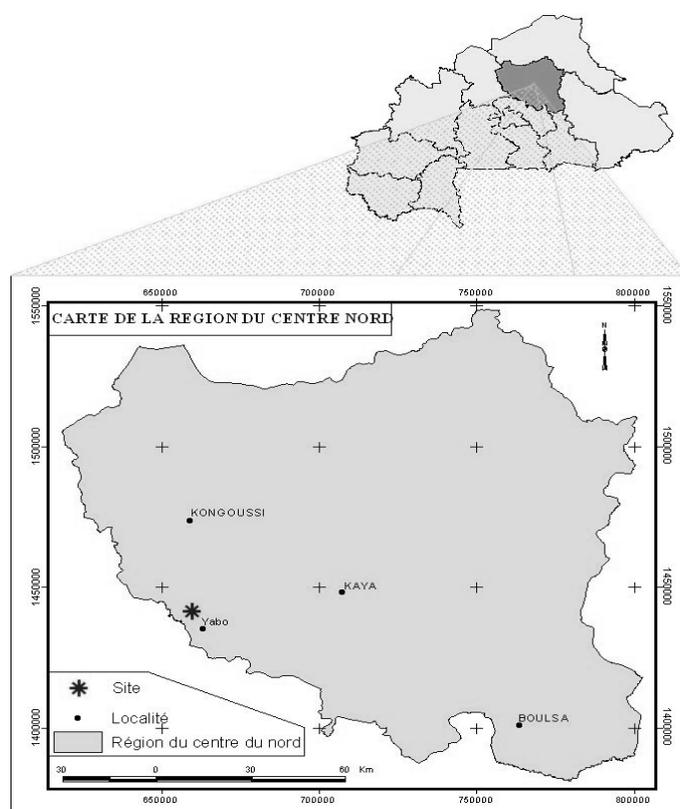


Figure 2 : Carte de localisation du site de Yabo.

Location map of the Yabo site.

Tableau 1 : Données sur les sites d'étude.

General data on the studied sites.

Site	Sa	Yabo	Source
Coordonnées géographiques	12°40'54"N 3°15'33"W	13°1'55" N 1° 32'43" W	
Climat	Nord soudanien	Subsahélien	Guinko, 1984
Pluviosité moyenne annuelle (mm)	755,3	707,8	
Température moyenne annuelle (T° C)	28,7	28,5	
Régime hydrique des sols	Ustique	Ustique	Boyadgiev, 1980
Régime thermique des sols	Isohyperthermique	Isohyperthermique	Boyadgiev, 1980
Substratum géologique	* Grès de sotuba * Alluvions épaisses	* Granites alcalins post-tectoniques Porphyroïde à hornblende verte.	
Sols (groupe de référence)	Cambisols	Lixisols	
Territoire phytogéographique	Secteur soudanien septentrional	Secteur sub sahélien	Guinko, 1984
Principales espèces végétales	<i>Dichrostachys cinerea</i> (Forssk) Hutch et Dalz. ; <i>Combretum micranthum</i> G.Don. ; <i>Acacia seyal</i> Del. ; <i>Commiphora africana</i> (A.Rich.) Engl. ; <i>Pterocarpus lucens</i> Guill. et Perr. ; <i>Aspelia bussei</i> O. Hoffm.et Muschl. ; <i>Pennisetum pedicellatum</i> Trin. ; <i>Pennisetum polystachyon</i> (Linn.) Schult.	<i>Combretum nigricans</i> Lepr.ex Guill.et Perr. ; <i>Guiera senegalensis</i> Lam. ; <i>Acacia macrostachya</i> Reich. ex DC. ; <i>Combretum micranthum</i> G.Don. ; <i>Commiphora africana</i> (A.Rich.) ; <i>Loudetia togoensis</i> (Pilger) C.E.Hubbard ; <i>Microchloa indica</i> (Linn.f.) P. Beauv. ; <i>Borreria stachydea</i> (D.C.) Hutch et Dalz. ; <i>Zornia glochidiata</i> reichb. ex DC	

Les valeurs moyennes des paramètres climatiques considérés ont été calculées pour la période 1982 - 2000 / The means values of climatic data were calculated for 1982-2000 period.

MATERIELS

Les caractères morphologiques et physico-chimiques de 16 profils de sol ont été déterminés pour chacun des deux unités. Les caractères morphologiques révèlent, entre autres, que les cambisols sont caractérisés par une structure fortement développée sur l'ensemble du profil, une texture fine et des tâches d'hydromorphie dès la surface. Les lixisols sont faiblement structurés. Ils renferment de très nombreux graviers ferrugineux et présentent une induration à 40 - 50 cm de profondeur. Leur texture est plutôt moyenne. Un échantillon a été prélevé au niveau de l'horizon supérieur (0 - 20 cm) des 16 profils de l'unité de sol concernée. Au total, trente deux échantillons de sol ont été étudiés.

METHODES D'ANALYSE PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES ECHANTILLONS DE SOL

Les propriétés physico-chimiques des sols ont été déterminées sur la terre fine (< 2 mm). La

méthode à la pipette Robinson a été employée pour déterminer la granulométrie des sols. Cinq classes granulométriques ont été séparées : argiles (0 - 2 µm) ; limons fins (2 - 20 µm) ; limons grossiers (20 - 50 µm) ; sables fins (50 - 200 µm) ; sables grossiers (200 - 2000 µm). Les mesures de pH ont été réalisées dans une suspension de sol dans l'eau et dans une solution normale de Chlorure de potassium (KCl), à l'aide d'un pH-mètre muni d'électrodes en verre. Le rapport 2/5 a été appliqué. La détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des bases échangeables a été faite par une extraction à l'aide d'une solution d'argent thiouré à 0,01 M (Bunasols, 1987).

FRACTIONNEMENT DE LA MATIERE ORGANIQUE

Outre la détermination du carbone total, de l'azote total respectivement par les méthodes de Walkley et Black (1934) et de Kjeldahl (Bremner, 1965), la matière organique a fait

l'objet d'un fractionnement granulométrique sur sol tamisé à 2 mm, selon la méthode décrite par Feller (1979). Elle est basée sur un fractionnement du sol par tamisages successifs à l'aide d'un tamis de 200 µm et 50 µm. Trois fractions ont été obtenues : i) la fraction argilo-limoneuse (0 - 50 µm) ou organo-minérale ; ii) la fraction associée aux sables fins (50 - 200 µm) et iii) la fraction organique associée aux sables grossiers (200 - 2000 µm). Afin de réduire le risque de transfert artificiel de carbone des débris végétaux des fractions grossières ($\varnothing > 50 \mu\text{m}$) aux fractions fines ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$), souligné par Balesdent *et al.* (1991), l'énergie ultrasonique n'a pas été appliquée lors du fractionnement. Les teneurs en carbone et azote de chaque fraction ont, également été déterminées par la méthode de Walkley et Black (1934) et par celle de Kjeldahl (Bremner, 1965), respectivement.

Les coefficients d'enrichissement en carbone (EC) et en azote (EN) de chaque fraction ont été calculés comme suit (Christensen, 2001) :

$$EC = \frac{\text{mg C g}^{-1} \text{ fraction}}{\text{mg C g}^{-1} \text{ du sol non fractionné}} \quad (1)$$

$$EN = \frac{\text{mg N g}^{-1} \text{ fraction}}{\text{mg N g}^{-1} \text{ du sol non fractionné}} \quad (2)$$

Ils permettent d'éliminer les différences liées au taux de MO du sol brut non fractionné et de comparer les concentrations de MO dans les trois fractions.

DOSAGE DU GAZ CARBONIQUE (CO₂) DÉGAGÉ

Le CO₂ dégagé a été mesuré en utilisant la méthode décrite par Dommergues (1960). L'incubation a duré 31 j. Les mesures ont été effectuées journalièrement pendant la première semaine, puis tous les deux jours jusqu'au 31^e j.

Le taux de minéralisation globale du carbone (TMG) a été calculé :

$$TMG = \frac{\text{Quantité du carbone dégagé}}{\text{Quantité du carbone organique du sol}} \times 100 \quad (3)$$

Le taux de minéralisation du carbone labile (TML) a été obtenu à l'aide de la formule suivante (Mallouhi et Jacquin, 1985) :

$$TML = \frac{\text{TMG échantillon fumigé} - \text{TMG échantillon non fumigé}}{\text{TMG échantillon non fumigé}} \quad (4)$$

DETERMINATION DU CARBONE DE LA BIOMASSE MICROBIENNE

Les déterminations du carbone de la biomasse microbienne ont été effectuées selon la méthode de Jenkinson et Powlson (1976), à partir d'échantillons de sol fumigés (F) et non fumigés (NF). Les échantillons ont été incubés à la température de 30 °C et le CO₂ dégagé a été dosé après les 7^e et 14^e j.

La quantité de carbone de la biomasse microbienne (CBM) a été obtenue à l'aide de la formule :

$$CBM = \frac{F(0-7) - nF(7-14)}{Kc} \quad (5)$$

où : kc est le coefficient de proportionnalité représentant la fraction minéralisable en CO₂ du carbone de la biomasse et dont la valeur est égal à 0,41 (Anderson et Domsch, 1980 ; Chaussod *et al.*, 1986) ; F (0 - 7) représente le C - CO₂ dégagé par l'échantillon de sol fumigé entre les 0^e et 7^e jours et nF (7 - 14), le C - CO₂ dégagé par l'échantillon de sol non fumigé entre les 7^e et 14^e jours.

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

L'analyse statistique des données a consisté principalement à déterminer par le test de Spearman (1904) les coefficients de corrélation des rangs (rs) entre les différents paramètres indiqués ci-dessus, pris deux à deux. Ils ont été calculés en utilisant le logiciel Minitab (version 13-31) sous Window. Les signes utilisés pour indiquer et apprécier le degré de signification des probabilités sont les suivants : * : p < 0,05 (significatif) ; ** : p < 0,01 (hautement significatif) ; *** : p < 0,001 (très hautement significatif).

RESULTATS

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.

Quelques caractéristiques des échantillons de sol étudiés sont présentées dans le tableau 2. Elles montrent que dans les cambisols, les argiles constituent la fraction granulométrique dominante (plus de 50 %) par contre, dans les lxisols, ce sont les limons totaux (environ 50 %). Le taux de matière organique totale s'élève à 1,5 % dans les cambisols et avoisine

1,8 % dans les lixisols. La somme des bases échangeables (S) et la capacité d'échange cationique (CEC) sont, toutes supérieures à 10 cmol.kg^{-1} de sol dans les cambisols et inférieures à 5 cmol.kg^{-1} de sol dans les lixisols. Les deux unités de sol ont des horizons supérieurs à complexe adsorbant faiblement désaturé (S/CEC > 60 %) et à pH eau faiblement acide (6 et 6,5).

CARACTERES GENERAUX DE LA MATIERE ORGANIQUE

Les teneurs moyennes des sols en carbone total et en azote total, exprimées en g.kg^{-1} sol brut (sol non fractionné) ont été respectivement de 8,71g C et de 0,89 g N dans les cambisols. Les valeurs correspondantes, dans les lixisols sont 10,26 g C et 0,78 g N (Tableau 3). Le rapport C/N s'élève à 10 (cambisols) et 13,1 (lixisols).

La séparation en trois fractions ([0 - 50 μm] ; [50 - 200 μm] ; [200 - 2000 μm]) a entraîné des pertes. Néanmoins, pour les échantillons des cambisols, le taux de récupération en masse de sol s'est élevé à 98,3 %, et pour ceux des lixisols, à 99,6 %. Les taux de C s'élèvent en moyenne à 99,4 % (cambisols) et à 98,1 % (lixisols) tandis que ceux de N sont 97,4 % (cambisols) et 98,8 % (lixisols).

Les teneurs en carbone et en azote des fractions granulométriques sont consignées dans le tableau 3.

Distribution granulométrique du carbone

La fraction argilo-limoneuse (0 - 50 μm) représente dans les cambisols, 81 % et dans les lixisols, 74 % de la somme des taux de carbone des trois fractions. Le carbone associé à la fraction «sables fins» représente 9 % et 15 % de cette somme et la fraction «sables grossiers» (200 - 2000 μm) renferme dans les unités de sol 10 % et 11 %, respectivement.

Ainsi, quelle que soit l'unité de sol, la fraction organo-minérale ($\phi < 50 \mu\text{m}$) possède le taux de carbone, en g.kg^{-1} sol, le plus élevé.

Une corrélation positive existe entre le carbone total et les taux de carbone de F (0 - 50 μm) ($r_s = 0,81^{***}$) et de F (200 - 2000 μm) ($r_s = 0,52^*$) dans les cambisols. La teneur en carbone total et celle en carbone de F (0 - 50 μm) ont été négativement corrélées avec le taux d'argiles ($r_s = -0,68^{**}$ et $r_s = -0,70^{**}$) ; tandis que la somme des bases échangeables a une corrélation positive avec le taux de carbone de F (50 - 200 μm) ($r_s = 0,50^*$). Quant aux lixisols, les quantités de carbone des différentes fractions ont été corrélées d'une part, avec le carbone total (r_s^{***}) et d'autre part, entre elles. Il en est de même de la capacité d'échange cationique (CEC) et du taux de carbone de F (0 - 50 μm) ($r_s = 0,53^*$). Par contre, le rapport sables/argiles a été négativement corrélé avec C. total ($r_s = -0,49^*$).

Tableau 2 : Quelques caractéristiques physico - chimiques des échantillons de sols étudiés.

Selected physical and chemical properties of the soil samples.

	Sites	
	Sâ Cambisols (n = 16)	Yabo Lixisols (n = 16)
Argiles (%)	54,5 ± 15,5	14,0 ± 2,9
Limons totaux (%)	32,9 ± 13,9	48,2 ± 3,4
Sables totaux (%)	12,6 ± 4,7	37,8 ± 1,9
pH-eau	6,4 ± 0,5	6,1 ± 0,2
pH-KCl	4,8 ± 0,5	4,65 ± 0,3
Somme des bases échangeables (S) (cmol.kg^{-1} de sol)	12,51 ± 2,13	2,90 ± 0,62
Capacité d'échange cationique (CEC) (cmol.kg^{-1} de sol)	17,90 ± 1,62	3,75 ± 0,76
Taux de saturation (S/CEC) (%)	69,82 ± 9,5	66,19 ± 5,7

Tableau 3 : Teneur en matière organique dans les 3 fractions granulométriques du sol.*The distribution of C and N in the 3 particle size fractions.*

		Sites	
		Sâ	Yabo
		Cambisols (n = 16)	Lixisols (n = 16)
Matière organique totale (MO) (%)		1,5 ± 0,4	1,8 ± 0,4
C	C.total gkg ⁻¹ sol nf(*)	8,71 ± 2,34	10,26 ± 2,29
A	C.total gkg ⁻¹ sol (1)	8,66 ± 2,42	10,06 ± 2,26
R	CF [0 - 50 µm] gkg ⁻¹ sol	6,99 ± 2,14	7,44 ± 1,61
B	CF [0 - 50 µm] gkg ⁻¹ fraction	8,689 ± 2,71	11,296 ± 2,40
O	CF [50 - 200 µm] gkg ⁻¹ sol	0,89 ± 0,54	1,46 ± 0,39
N	CF [50 - 200 µm] gkg ⁻¹ fraction	6,644 ± 2,77	6,538 ± 2,11
E	CF [200 - 2000 µm] gkg ⁻¹ sol	0,78 ± 0,50	1,16 ± 0,40
(C)	CF [200 - 2000 µm] gkg ⁻¹ fraction	12,646 ± 7,56	9,849 ± 3,60
N. total gkg ⁻¹ sol nf (*)		0,89 ± 0,21	0,78 ± 0,13
A	N. total gkg ⁻¹ sol (2)	0,867 ± 0,21	0,77 ± 1,27
Z	NF. [0-50µm] gkg ⁻¹ sol	0,723 ± 0,22	0,64 ± 0,12
O	NF. [0-50µm] gkg ⁻¹ fraction	0,898 ± 0,22	0,972 ± 0,18
T	NF. [50 -200µm] gkg ⁻¹ sol	0,089 ± 0,07	0,08 ± 0,02
E	NF. [50 -200µm] gkg ⁻¹ fraction	0,664 ± 0,22	0,358 ± 0,08
(N)	NF. [200 -2000µm] gkg ⁻¹ sol	0,055 ± 0,05	0,05 ± 0,01
	NF. [200 -2000µm] gkg ⁻¹ fraction	0,892 ± 0,45	0,424 ± 0,08
C.total / N.total (3)		9,98 ± 1,74	13,06 ± 1,73
C/N F [0 - 50µm]		9,67 ± 1,91	11,63 ± 1,46
C/N F [50 - 200µm]		10,00 ± 3,81	18,25 ± 4,88
C/N F [200 - 2000µm]		14,18 ± 4,31	23,20 ± 7,36

* nf : sol non fractionné. Whole soil.

(1) somme des teneurs en carbone des fractions exprimées en g par kg de sol / *Sum of fractions carbon contents g.kg⁻¹ soil.*(2) somme des teneurs en azote des fractions exprimées en g par kg de sol / *Sum of fractions nitrogen contents gkg⁻¹ soil.*

(3) Rapport (1) / (2)

Distribution dans les différentes fractions granulométriques de l'azote

Elle a été pratiquement identique dans les deux unités de sol. Ainsi, dans les cambisols et les lixisols, le taux d'azote lié à la fraction argilo-limoneuse ($\phi < 50 \mu\text{m}$) a représenté 84 % et 83 % de la somme en azote des fractions. Au niveau de la fraction (50 - 200 μm), ces pourcentages ont été de 10% ; contre 6 et 7 % pour la fraction (200 - 2000 μm).

Dans ces unités, une corrélation positive a été notée entre l'azote total et celui de la fraction (0 - 50 μm) (r_{s***}). Il en est de même entre la première variable et la quantité d'azote associé à F (50 - 200 μm) (r_{s*}) dans les lixisols.

Rapport C/N de la matière organique des fractions granulométriques

La moyenne de C/N F [0 - 50 μm] s'élève à 9,7 (cambisols) et 11,6 (lixisols). Celle de C/N F (50 - 200 μm) atteint respectivement 10,5 et

18,3 ; contre 14,2 et 23,2 pour C/N F (200 - 2000 μm). Il s'ensuit que le rapport C/N augmente de la fraction argilo-limoneuse à la fraction «sables grossiers».

Dans les cambisols, le rapport C.total / N.total est en étroite corrélation avec C/N de la fraction (0 - 50 μm) ($r_{s} = 0,91^{***}$). Dans les lixisols, cette corrélation s'étend également aux C/N des deux autres fractions. En outre, C/N F(0 - 50 μm) est positivement corrélé avec le taux d'argiles ($r_{s} = 0,63^{**}$) et négativement avec le rapport sables/argiles ($r_{s} = -0,58^*$).

Coefficient d'enrichissement en carbone et en azote des fractions

Le coefficient d'enrichissement en carbone (E_c) moyen (Tableau 4) dans la fraction (0 - 50 μm) des cambisols est de l'ordre de 1 ; contre 0,76 et 1,45 dans les fractions (50 - 200 μm) et (200 - 2000 μm). Pour les lixisols, sa valeur accuse une diminution importante dans la fraction (50 -

200 μm) ; celles obtenues dans les deux autres fractions étant du même ordre de grandeur.

Les variations des coefficients d'enrichissement en azote (EN) des fractions selon les unités de

sol, sont similaires à celles en carbone (Tableau 4). Toutefois dans les compartiments (0 - 50 μm) des sols considérés, EN est plus élevé que Ec. En outre, la fraction (50 - 200 μm) détient les valeurs de EN et de Ec les plus faibles.

Tableau 4 : Coefficients d'enrichissement en carbone (Ec) et en azote (EN) des 3 fractions.

Carbon (EC) and Nitrogen (EN) enrichment factors for the 3 particle size fractions.

		Sites	
		Sâ	Yabo
		Cambisols (n = 16)	Lixisols (n = 16)
Ec	F [0 – 50 μm]	0,98 \pm 0,06	1,10 \pm 0,06
	F [50 – 200 μm]	0,76 \pm 0,17	0,64 \pm 0,09
	F [200 – 2000 μm]	1,45 \pm 0,27	0,96 \pm 0,26
E _N	F [0 – 50 μm]	1,01 \pm 0,05	1,25 \pm 0,06
	F [50 – 200 μm]	0,75 \pm 0,17	0,46 \pm 0,08
	F [200 – 2000 μm]	1,00 \pm 0,21	0,54 \pm 0,14

ACTIVITE BIOLOGIQUE GLOBALE ET BIOMASSE MICROBIENNE

La quantité de carbone minéralisée (C-CO₂) a varié avec le temps de fumigation de l'échantillon de sol. Le tableau 5 montre que les échantillons non fumigés des lixisols ont un cumul de C-CO₂ dégagé au moins deux fois plus élevés que celui des échantillons non fumigés des cambisols. Il en est de même des taux moyens de minéralisation globale du carbone (TMG). Des différences ont également été observées au niveau des échantillons fumigés des deux unités de sol. Par ailleurs, pour les lixisols, les valeurs du cumul de C-CO₂ dégagé au 31^e j d'incubation et du TMG des échantillons de sol fumigés ont été plus faibles que celles des échantillons non fumigés. Dans les deux unités de sol, le taux moyen de carbone associé à la biomasse microbienne a représenté environ 2 % du carbone total des échantillons de sol étudiés. En valeur absolue, il est plus élevé dans les lixisols (Tableau 5).

Le cumul de C-CO₂ dégagé par les échantillons non fumigés des cambisols est positivement corrélé avec le taux de carbone de F (0 - 50 μm) (rs = 0,51*) et avec le rapport sables/argiles (rs*). Il l'a été négativement avec le taux d'argiles (rs**).

Par ailleurs, des corrélations positives lient le pH eau au cumul de C-CO₂ dégagé par les échantillons de sol fumigés (rs = 0,64**) et au taux de carbone associé à la biomasse microbienne, exprimé en mg C kg⁻¹ sol (rs = 0,63**). Ce dernier paramètre a eu une corrélation négative avec le taux d'argiles (rs = -0,59*). Au niveau des lixisols, une corrélation positive a aussi été notée entre le cumul de C-CO₂ dégagé par les échantillons de sol non fumigés et la teneur en carbone de F(0 - 50 μm)(rs = 0,54*). Les corrélations entre le taux de minéralisation globale du carbone des échantillons de sol fumigés et les taux de carbone des fractions sableuses ont été négatives. Lorsque le carbone de la biomasse microbienne (CBM) est exprimé en mg C kg⁻¹ sol, il corrèle positivement avec le carbone total, les quantités de carbone associées aux fractions et le rapport C.total / N.total. Ramené en pour cent de C. total, ses corrélations avec C. total et C/N F(50 - 200 μm) deviennent négatives. Par ailleurs, des corrélations positives très hautement significative et hautement significative ont été obtenues entre la capacité d'échange cationique et le cumul de C-CO₂ dégagé par les échantillons de sol non fumigés (rs = 0,76***) et fumigés (rs = 0,65**). De même, le pH eau a été positivement corrélé avec CBM en mg C.kg⁻¹ sol.

Tableau 5 : Caractéristiques biologiques des échantillons de sol étudiés.*Biological characteristics of soil samples used.*

		Sites	
		Sà	Yabo
		Cambisols (n = 16)	Lixisols (n = 16)
Cumul de C -CO ₂ dégagé 31 ^e jours mg C kg ⁻¹ sol	Echantillons de sol non fumigés	117,6 ± 4,74	298,8 ± 6,81
	Echantillons de sol fumigés	134,8 ± 3,86	286,2 ± 7,31
Taux de minéralisation globale du carbone (TMG) %	Echantillons de sol non fumigés	1,35 ± 0,44	2,91 ± 0,55
	Echantillons de sol fumigés	1,60 ± 0,52	2,8 ± 0,62
Teneurs en carbone de la biomasse microbienne (CBM)	mg C kg ⁻¹ sol	159,2 ± 5,15	204,2 ± 5,08
	% C .total	1,9 ± 0,67	2,05 ± 0,39

DISCUSSION

Les sols étudiés sont considérés comme pauvres en MO selon la synthèse réalisée par Boyadgiev (1980) avec une teneur en matière organique totale comprise entre 1 et 2 %. La teneur moyenne est, cependant, plus élevée que celle des sols considérés, dans les régions sahélienne (Pallo *et al.*, 2006) et sud soudanienne (Pallo *et al.*, 2008) au Burkina Faso. Dans les deux unités de sol, la majeure partie du carbone total est associée aux particules argilo-limoneuses. La même observation a été faite sur d'autres types de sol (Sedogo, 1993 ; Bacyé, 1993) et aussi sur sols tempérés (Christensen, 2001). Elle résulte des liens entre la matière organique et la fraction argileuse du sol (Spain, 1990 ; Shang et Tiessen, 1997). Par ailleurs, le taux de carbone associé à la fraction «sables fins» (50 - 200 µm) a eu une corrélation positive avec la somme des bases échangeables dans les cambisols. Celui lié aux particules argilo-limoneuses étant positivement corrélé avec la capacité d'échange cationique dans les lixisols. De tels effets bénéfiques de la MOS sur les caractéristiques du complexe adsorbant ont été mentionnés dans la littérature (Thompson *et al.*, 1989 ; Asadu *et al.*, 1997).

Dans le cas spécifique des cambisols, les corrélations entre le carbone total, le carbone associé à la fraction fine et le taux d'argiles sont négatives ; à la différence de celles observées au niveau des ferralsols de la région Ouest du Burkina Faso (Pallo *et al.*, 2008). De tels liens dans les différents types de sol ne sont pas toujours significatifs ; chaque sol ayant une capacité maximale de préservation du carbone organique (Hassink, 1995). Ici, ces corrélations négatives pourraient être dues à la nature des argiles qui s'y forment. En effet, elles induisent

des constantes hydriques élevées (en particulier pF_{4,2}) et par conséquent de faibles réserves en eau utile (5 % en moyenne). Le tapis herbacé, principale source de la matière organique du sol, est alors peu dense et se limite à des graminées annuelles là où les teneurs en argiles sont très élevées ; d'où de faibles apports initiaux de matière organique fraîche.

En ce qui concerne les coefficients d'enrichissement en carbone (Ec), la fraction argilo-limoneuse a présenté les valeurs les plus élevées dans les lixisols. Comme noté ailleurs par Christensen (2001), sa valeur baisse dans les fractions sableuses. Au niveau des cambisols, le plus fort coefficient d'enrichissement en carbone a été enregistré dans la fraction de 200 - 2000 µm. Ceci se justifie probablement par la présence, dans ce compartiment de matières macro-organiques (Oades, 1989) et / ou d'agrégats (classe des sables grossiers) ayant pour noyau des particules organiques, et qui demeurent stables à l'eau (Buyanovsky *et al.*, 1994). La différence de texture entre les deux unités de sol explique ainsi celles des coefficients d'enrichissement en carbone des fractions.

Au niveau de l'azote total (N), les sols étudiés en sont pauvres à très pauvres (N. total < 0,1 %) et sont comparables à 29 % des sols du Burkina Faso étudiés entre 1960 et 1980 (Boyadgiev, 1980). Dans les deux unités de sol, plus de 80 % de N. total sont liés à la fraction argilo-limoneuse comme dans les lixisols de la région du centre (Pallo *et al.*, 2000) et dans les cambisols de la région sahélienne (Pallo *et al.*, 2006). Il est ainsi déterminé par NF (0 - 50 µm). La corrélation négative de l'azote total avec le taux d'argiles résulte des liens avec le carbone total. Au niveau de chaque unité de sol, les variations de EN des fractions sont identiques à celles des Ec correspondants.

Concernant les rapports C/N de la matière organique associée aux différentes fractions, de nombreux auteurs notent qu'ils baissent avec la taille de ces dernières (Catroux *et al.*, 1987 ; Christensen, 2001). Cette baisse est indicatrice d'une augmentation du degré d'humification des produits organiques (Guggenberger *et al.*, 1994) et d'un bon niveau de dispersion de l'échantillon. Elle est également liée à une décroissance significative des phénols dérivés de la lignine des fractions grossières aux fractions fines (Amelung *et al.*, 1978). Nos résultats sont en accord avec ces données. En effet, les rapports C/N de la fraction (0 - 50 μm) sont généralement plus faibles que ceux de la matière organique des fractions sableuses. Ceci est dû à la nature des MO associées à cette fraction argilo-limoneuse : association de débris de parois végétales ou fongiques et de micro-agrégats organo-limoneux dans la fraction (2 - 20 μm), dominance des MO à caractère amorphe dans les fractions argileuses (Feller, 1995).

Les valeurs des paramètres pédobiologiques, des lixisols ont été plus élevées que celles des cambisols. Ceci est dû aux fortes teneurs en argiles de ces derniers, et pour lesquels des corrélations négatives existent, notamment entre, d'une part, les quantités d'argiles et d'autre part, le cumul de C-CO₂ dégagé et le carbone lié à la biomasse microbienne. Les faibles taux de minéralisation du carbone corroborent également les observations de Duchaufour (1997) dans des sols aussi argileux que ceux étudiés ici et résultent du fait d'une meilleure protection des fractions organiques par les argiles (Franzluebbers et Arshad, 1997 ; Vanlauwe *et al.*, 1999). Cependant, des corrélations positives ont aussi été établies entre les taux d'argiles et le carbone de la biomasse microbienne (Merckx *et al.*, 1985) et des effets stimulateurs de l'addition d'argile sur la décomposition des produits organiques ont été obtenus par Kunc et Stotzky (1974). Les teneurs élevées en carbone total des lixisols semblent liées à la courte durée de la saison des pluies (5 mois) et au régime ustique des sols ; si bien que les paramètres pédobiologiques tels que le carbone associé à la biomasse microbienne sont davantage fonction de la distribution du carbone dans les fractions organiques que des propriétés physiques des

sols. On relève, par ailleurs, que l'activité biologique globale est positivement corrélée avec la capacité d'échange cationique et le pH (eau et KCl) de ces lixisols.

Enfin quelle que soit l'unité de sol, la proportion de carbone stockée dans la biomasse microbienne se situe dans la fourchette de celles (2 - 5 % de C.total) indiquées par Duchaufour (1997).

CONCLUSION

Le taux de matière organique des cambisols et des lixisols sous formations naturelles de longue durée en zone climatique nord-soudanienne est en moyenne plus élevé que celui des zones climatiques sahélienne et sud - soudanienne du Burkina Faso. Dans la zone climatique nord-soudanienne, les processus de transformation de la matière organique des sols convergent vers une accumulation des produits organiques dans l'épipédon. Dans les cambisols, c'est le rôle protecteur des argiles contre les attaques microbiennes, qui explique de telles teneurs en MO. Dans les lixisols, ce sont davantage le climat (longueur de la saison pluvieuse) et le pédoclimat (ustique, isohyperthermique) qui sont incriminés. Les rapports C/N révèlent toutefois, que la matière organique des cambisols est plus stable que celle des lixisols. Cependant quelle que soit l'unité de sol, les particules argilo-limoneuses jouent un rôle prépondérant dans la séquestration du carbone. La fraction organo-minérale ainsi formée notamment dans les lixisols, agit sur la fertilité en augmentant la capacité d'échange cationique. En outre, dans ces deux unités de sol, des paramètres tels que le pH et la CEC sont aussi améliorés par l'activité biologique globale. En conséquence, une mise en valeur agricole de ces lixisols requiert, en plus de l'augmentation des taux de MO par des amendements (fumiers, compost), l'utilisation d'aménagements visant à minimiser le ruissellement des eaux de pluie et à favoriser leur infiltration en vue de maintenir l'humidité du sol durant une longue période. De tels apports organiques sur les cambisols participeront aussi à accroître l'activité biologique globale, grâce à l'introduction de fractions organiques à C/N élevé dans ces sols, sujettes à une plus rapide transformation par les micro-organismes.

REFERENCES

- Amelung W., Flach K. W. and W. Zech. 1999. Lignin in particle size fractions of native grassland soils as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63 : 1222 - 1228.
- Anderson J. P. E. and K. H. Domsch. 1978. Mineralization of bacteria and fungi in chloroform fumigated soils. *Soil Biol. Biochem.* 10 : 207 - 213
- Anderson D. M., Saggat S., Bettary J. R. and J. W. B. Stewart 1981- Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter : I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulphur. *Soil Sci Soc. Am. J.* 45 : 767 - 772.
- Asadu C. L. A., Diels J. and B. Vanlauwe. 1997. A comparison of the contributions of clay, silt and organic matter to the effective CEC of sub saharan Africa. *Soil Science* 162 : 785 - 794.
- Bacýé B. 1993. Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano sahélienne (province du Yatenga, Burkina Faso). Thèse Doctorat, Univ. Aix Marseille III, France. 243 p.
- Baldock J. A. and P. N. Nelson. 1999. Soil organic matter. In Malcom E. Sumner (Eds.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. pp 25 - 84.
- Balesdent J., Petraud J. P. et C. Feller. 1991. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du sol* 2 : 95 - 106.
- Bilgo A., Hien V., Serpantié G., Masse D., Chotte J. L., Fournier Je et P. Zaoners. 2004. Matière organique et éléments minéraux déplacés par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère ou mixtes en savane soudanienne (Burkina Faso), in : Roose E., De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (Eds.) *Gestion de la biomasse et érosion du carbone*, Bulletin du réseau érosion 22, Montpellier, pp 208 - 222.
- Boyadgiev T. G. 1980. Création d'un service des sols. Haute- Volta. Etat des connaissances des sols : DP/UPV/74/007 - rapport technique 1. PNUD/ FAO, Rome. 33 p.
- Bremner J. M. 1965. Total nitrogen. In : C. A. Black (Eds.) *Methods of soil analysis*, part 2. American Society of Agronomy 9 : 1149 - 1178.
- Brookes P. C., Powlson D. S. and D. S. Jenkinson. 1984. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 16 : 169 - 175.
- Bunasols (Bureau national des sols). 1987. Méthodes d'analyse physique, chimique des sols, eaux, plantes. Doc. Techn. n° 3. Bunasols. Ouagadougou (Burkina Faso). 162 p.
- Buyanovsky G. A., Aslam M., G. H. Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 : 1167 - 1173.
- Catroux G. and M. Schnitzer. 1987. Chemical, spectroscopic and biological characteristics of the organic matter in particle size fractions separated from an aquoll. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 51 : 1200 - 1207.
- Chaussod R., Nicolardot B. et G. Catroux. 1986. Mesure en routine de la biomasse microbienne des sols par la méthode de fumigation au chloroforme. *Science du sol* 2 : 201 - 211.
- Christensen B. T. 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European journal of Soil Science* 52 : 45 - 353.
- CPCS (Commission de pédologie et de cartographie des sols). 1967- Classification des sols. Edit. 1967 ; ENSA - Grignon. 67 p.
- Dabin B. 1980. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Cahiers ORSTOM Série Pédol.* 18 (3 - 4) : 197 - 215.
- Diaz - Ravina M., Acea M. J. and T. Carballas. 1993. Microbial biomass and its contribution to nutrient concentrations in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25 : 25 - 31.
- Dommergues Y. 1960. La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols, *L'agronomie tropicale* 15 : 55 - 60.
- Ducellier J. 1963. Carte géologique de reconnaissance de la Haute - Volta, feuille ND- 30SE et ND30NE (partie Haute - Volta) 1/500000^e, Ouagadougou (Burkina Faso).
- Duchaufour Ph. 1997. Abrégé de pédologie. Sol - Végétation - Environnement. 5^e édition. Masson.
- Eswaran H., Van der Berg E. and P. Reich 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 192 - 194.
- Feller C. 1979. Une méthode de fractionnement de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux à textures

- grossières très pauvres en humus. Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol. XVIII : 339 - 346.
- Feller C. 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 : 1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Collection TDM n° 144, ORSTOM, Paris. 393 p.
- F.A.O. 1998. Base de référence mondiale pour les ressources en sols. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 84, FAO, Rome, Italie. 91 p.
- F.A.O. 1985. Land evaluation for irrigated agriculture. FAO soil bull. N° 55, FAO, Rome, Italy, 231 p.
- F.A.O. 1983. Land evaluation for rainfed agriculture. FAO soil bull. N° 52, FAO, Rome, Italy, 237 p.
- F.A.O. 1976. Framework for land evaluation. FAO soil bull. N° 32, FAO, Rome, Italy, 72 p.
- Franzuebbers A. J. and M. A. Arshad. 1997. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture, Soil Sci. Soc. Am. J. 61 : 1382 - 1386.
- Garnier-Sillam E., Renoux J. et F. Toutain. 1989. Les composés humiques des termitières de *Thoracotermes macrothorax* (humivore) et de *Macrotermes mulleri* (champignoniste). Soil Biol. Biochem. 21(4) : 499 - 505.
- Guggenberger G., Christensen B. T. and W. Zech. 1994. Land- use effects on the composition of organic matter in particle size separates of soil : I Lignin and carbohydrate signature. European journal of Soil Science. 45 : 449 - 458.
- Guinko S. 1984. La végétation de la Haute-Volta. Tome 1- Thèse Doctorat es Sciences Naturelles. Univ. Bordeaux III. 318 p.
- Haarbrink F. W. 1970. Carte de reconnaissance photogéologique au 1/200000^e, Dédougou, DGM, Ouagadougou (Burkina Faso).
- Hassink J. 1995. Organic matter dynamics and N mineralization in grassland soils. Ph. D thesis- Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 250 p.
- He Q. B., and B. R Singh. 1994. Effects of organic matter on the distribution, extractability and uptake of Cd on soils. Journal of Soil Science 44 (4) : 641 - 650.
- Hempfling R. and H. R. Schulten. 1991. Chemical characterization of the organic matter in forest soils by Curie point pyrolysis GC/MS and pyrolysis-field ionization mass spectrometry. Organic Geochemistry-15 (2) : 131 - 145.
- Hempfling R. and H. R. Schulten. 1990. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry of agricultural soils and their humic fractions. Z.Pflanzenemahr.Bodenk. 154 : 425 - 430.
- Hempfling R. and H. R. Schulten. 1988. Characterization and dynamics of organic compounds in forest humus studied by pyrolysis-gas chromatography/electron impact mass spectrometry and pyrolysis-(high resolution) field ionization mass spectrometry. J. Anal. Pyrolysis 13 : 319 - 325.
- IHSS, 1983. Outline of extraction procedure. In. Proc 1st International Humic Substances Society (IHSS) conference. Estes Park, CO : IHSS Press
- Jenkinson D. S. and D. S. Powlson. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. A method for measuring soil biomass. Soil Biol. Biochem. 8 : 209 - 213.
- Johnson M. G. and J. S Kerns. 1991. Sequestering carbon in soils : A workshop to explore the potential for mitigating global climate change. USEPA Rep.600/3-91/031. Environ. Res. Lab., Corvallis, OR.
- Kambire S. H., Sédogo P. M., et V. Hien. 2001. Effet de l'âge de mise en culture sur la dynamique des compartiments granulométriques de la matière organique d'un sol ferrugineux tropical du Burkina Faso. Science et Technique, série Sciences naturelles et agronomie, 25 : 7 - 15.
- Karapanagiotis N. K., Sterrit R. M., and J. N. Lester. 1991. Heavy metal complexation in sludge amended soils .The role of organic matter in metal retention. Env. Sci. Tech. 12 : 1107 - 1116.
- Kirschbaum M. U. F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biol. Biochem. 27 : 753 - 760.
- Kunc F. and G. Stotzky. 1974. Effect of clay minerals on heterotrophic microbial activity in soil, Soil Science 118 : 186 - 195.
- Leroux H. 1980. Contribution à l'étude de la matière organique des sols sous forêts claires (savanes) de Côte d'Ivoire, en fonction des principaux facteurs naturels de pédogenèse. Thèse Doctorat d'état. Fac. d'Abidjan (Côte d'ivoire).
- Mallouhi N. et F. Jacquin. 1985. Essai de corrélation entre propriétés biochimiques d'un sol salsodique et sa biomasse. Soil Biol. Biochem. 17 : 23 - 26.

- Mando A., Ouattara B., Somado A. E., Wopereis M. C. S., Stroosnijder L. and H. Breman. 2005a. Long term effects of fallow, tillage and manure application on soil organic matter and nitrogen fractions and on sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. *Soil use and Management* 21: 25 - 31.
- Mando A., Bonzi M., Wopereis M. C. S., Lompo F. and L. Stroosnijder. 2005b. Long term effects of mineral and organic fertilization on soil organic fractions and sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. *Soil use and Management* 21: 396 - 401.
- Mando A., Ouattara B., Sedogo M., Stroosnijder L., Ouattara K., Brussaard L. and B. Vanlauwe. 2005c. Long term effect of tillage and manure application on soil organic fractions and crop performance under Sudano-Sahelian conditions. *Soil and Tillage Research* 80 : 95 - 101.
- Merckx R., Harton D. and J. A. Van Veen. 1985. Turnover of root derived material and related microbial biomass formation in soils of different texture, *Soil Biol Biochem.* 17 : 565 - 569.
- MA (Ministère de l'Agriculture). 1999. Stratégie Nationale et Plan d'action de gestion intégrée de la fertilité des sols. Ouagadougou Burkina Faso. 120 p.
- Nacro H. B., Asimi S., Ouattara B., Somé N. A., Lompo F. et A. Ouédraogo. 2005. Dynamics of soil organic matter in sudanian fallows : distribution of organic and microbial activity in different size classes. *Journal des Sciences* Vol. 5 n° 1: 7 - 14.
- Oades J. M. 1995. Organic matter : chemical and physical fraction. In : Lefroy R. D. B., Blair G. J., Graswell E. T. (Eds.). *Soil organic management for sustainable agriculture*. Australian centre for international agriculture research. Canberra : pp. 135 - 139.
- Oades J. M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. In : Dixon J. B., Weed S. B. (Eds.). *Mineral in soil environments*, 2nd edit. Soil Science Society of America-Madison, WI, pp. 89 - 159.
- Oden S. 1919. Die huminsauren. *Kolloidchem. Beih* 11 : 75 - 260. (Cité par Baldock J. A. and P. N. Nelson. 1999).
- ORSTOM. 1970. Rapport de synthèse sur la cartographie pédologique systématique à l'échelle du 1/500 000^e de la Haute-Volta. Centre ORSTOM de Dakar. 30 p.
- Ouattara B., Ouattara K., Serpantié G., Mando A., Sedogo M. P. and A. Bationo. 2006. Intensity cultivation induced effects on soil organic carbon dynamic in the western cotton area of Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76 : 331 - 339.
- Pallo F. J. P. 2009. Statut de la matière organique des sols sous formations naturelles de longue durée au Burkina Faso. Thèse de Doctorat d'état es Sciences naturelles. Université Polytechnique de Bobo Dioulasso. Vol. 1 et 2. 382 p.
- Pallo F. J. P., Lemée L. et A. Amblès. 2009. Les lipides libres des sols sous formations naturelles au Burkina Faso : nature, origine et relation avec quelques facteurs de fertilité. *Etude et Gestion des sols* 16 (2) : 101 - 112.
- Pallo F. J. P., Sawadogo N., Sawadogo L., Sedogo P. M. et A. Assa. 2008. Statut de la matière organique des sols dans la zone sud soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12 (3) : 291 - 301.
- Pallo F. J. P., Asimi S., Assa A., Sedogo P. M. et N. Sawadogo. 2006. Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. *Etude et Gestion des Sols*. 13 : 289 - 304.
- Pallo F., Sawadogo L. et P. M. Sedogo. 2000. Effets des feux répétés sur les teneurs en azote des sols dans la région centre Ouest du Burkina Faso. *Sci. et Tech. Série Sciences Naturelles et Agronomie* 24 : 92 - 108.
- Pallo F. 1993. Evolution of organic matter in some soils under shifting cultivation practices in Burkina Faso. in : Mulongoy and Merckx R. (Eds.). *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. IITA / KU. Leuven - A Wiley - Sayce co-publication: pp. 109 - 120.
- Post W. M., Peng T. H., Emmanuel W. R., King A. W., Dale V. H. and D. L. De angelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Sci.* 78 : 310 - 326.
- Saiz Jimenez C. 1996. The chemical structure of humic substances : recent advances. pp. 1 - 44. in : Piccolo A. (Eds.). *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Elsevier. Amsterdam : pp. 1 - 44.

- Schnitzer M. 1991. Soil organic matter- The next 75 years. *Soil Science* 151 : 41 - 58.
- Schulten H.-R. and M. Schnitzer. 1992. Structural studies on soil humic acids by Curie - point pyrolysis - gas chromatography/ mass spectrometry. *Soil Science* 153 (3) : 205 - 224.
- Sedogo P. M. 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture. Incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse Doct. es Sciences. Univ. Nat. de Côte d'Ivoire, 330 p.
- Serpantié G., Yoni M., Hien V., Abbadie L., Bilgo A. et B. Ouattara. 2004. Le carbone du sol dans les territoires des savanes soudanaises cotonnières. in : Roose E., De Noni G., Prat C., Ganry F., Bourgeon G. (Eds.). Gestion de la biomasse et érosion du carbone, Bulletin du réseau érosion 22, Montpellier, pp 308 - 370.
- Shang C. and H. Tiessen. 1997. Organic matter lability in a tropical Oxisol : evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size density and magnetic fractionations. *Soil Science* 162 : 795 - 807.
- Spain A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on carbon and nitrogen contents of some Australian rainforest soils. *Austr.J.Soil Res.* 28 : 825 - 839.
- Spearman C. 1904. The proof and measurement of association between two things. *Am J. Psych.* 15 : 72 - 101.
- Stevensen F. J. 1994. Humus chemistry : genesis, composition, reactions. 2nd ed. John Willey and Sons. 496 p.
- Swift R. S. 1996. Organic matter characterization. In : Sparks D. L. *et al.* (Eds.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science Society of America Book. Series n° 5. SSSA, Madison WI : pp. 1011 - 1069.
- Thompson M. L., Zhang H., Kazemi M. and J. A. Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. *Soil Science* 148 : 205 - 257.
- Vanlauwe B., Nwoke O. C., Sanginga N. and R. Merckx. 1999. Evaluation of methods for measuring microbial biomass C and N, and relationships between microbial biomass and soil organic matter particle size classes in west - African soils, *Soil Biol. Biochem.* 31 : 1071 - 1082.
- Walkley A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37 : 29 - 38.
- Zombré N. P. 1984. Les sols développés sur roches à complexe d'altération montmorillonitique et kaolinitique dans le centre sud de la Haute - Volta (caractère et fertilité). Thèse de Doct. 3^e cycle. Univ. Aix-Marseille III. 362 p.
- Zuman P. and E. B. Rupp. 1995. Polarography in the investigation of alkaline cleavage of lignin, soil organic matter and humic acids. *Chemia Analityczna* 40 : 549 - 565.