

# Les lipides libres des sols sous formations naturelles au Burkina Faso :

## Nature, origine et relation avec quelques facteurs de fertilité

F. J.-P. Pallo<sup>(1)</sup>, L. Lemée<sup>(2)</sup> et A. Amblès<sup>(2)</sup>

1 Institut de l'Environnement et de Recherches agricoles (INERA) - 04 BP 8645 - Ouagadougou 04 - Burkina Faso

2 Laboratoire de chimie 12 (UMR 6514) - Université de Poitiers-40 avenue du recteur Pineau - 86022 Poitiers Cedex - France

### RÉSUMÉ

L'analyse qualitative et quantitative des lipides libres de l'horizon supérieur de dix profils de sol, répartis le long d'un gradient climatique allant de la zone sahélienne à la zone sud soudanienne au Burkina Faso, a été effectuée pour établir d'éventuelles relations avec des paramètres physiques, chimiques et biologiques de ces sols. Les lipides ont été extraits avec du chloroforme et analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG-SM). Les résultats montrent que la masse des lipides varie de 35 à 137 mg.kg<sup>-1</sup> de sol et représente moins de 1 % du carbone total. Les composés identifiés sont des mono- et di-acides gras (sous forme d'esters méthylés), des alcools (acétylés), des hydrocarbures, des stéroïdes et hopanoïdes. Ils sont majoritairement d'origine végétale. Mais des acides gras ramifiés et une partie des diacides ont une origine bactérienne. Par ailleurs, la proportion des lipides libres dans la matière organique du sol est négativement corrélée avec la somme des bases échangeables, la capacité d'échange cationique, la réserve en eau utile. Toutefois, certains de ces composés, comme l'acide nonadécanoïque (C19), l'acide palmitique (C16) et l'acide stéarique (C18), présentent des corrélations positives avec ces mêmes propriétés (CEC...), la respiration du sol et le taux de carbone associé à la biomasse microbienne.

### Mots clés

Sols, matière organique, lipides, Burkina Faso.

**SUMMARY****FREE LIPIDS OF SOILS UNDER NATURAL FORMATIONS IN BURKINA FASO:****Nature, origin and relation with some fertility factors.**

Free lipids extracted from the surface horizon of ten soil profiles were studied in order to enhance the knowledge on these non-humic substances. Profiles were distributed from the sahelian to the south sudanian zones of Burkina Faso (table 1). Biological, physical and chemical properties were determined (table 2 and 3). Lipids, extracted from each sample with chloroform, were derivatised and analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The amounts of free lipids which ranged from 35 to 137mg.kg<sup>-1</sup> soil (figure 1a) represented less than 1 % of total carbon (figure 1b). Identified compounds were mono- and di-fatty acids (as methyl esters), alcohols (acetylated), alkanes, steroids and hopanoids. These compounds are characteristic of a dominant plant origin. However branched acids and a part of diacids are of bacterial origin. Moreover the amount of free lipids negatively correlates with the sum of exchangeable cations, cations exchangeable capacity (CEC) and useful water supply. However, the amounts of nonadecanoic (C19), palmitic (C16) and stearic (C18) acids are positively correlated, respectively with the previous soil chemical properties, the cumulative carbon mineralization and the carbon from microbial biomass (table 5).

**Key-words**

Soils, organic matter, lipids, Burkina Faso.

**RESUMEN****LIPIDOS LIBRES EN EL BURKINA FASO: Clase, origen y relación con algunos factores de fertilidad.**

Los lípidos libres sacados de diferentes perfiles de suelos fueron estudiados con el fin de mejorar el conocimiento de estas sustancias no húmicas. Los perfiles están repartidos según las zonas climáticas, del Sahel hasta el sur del Sudán, y hasta el Burkina Faso y los horizontes superficiales de las extensiones de estas áreas fueron considerados (cuadro 1). Las propiedades biológicas, físicas y químicas han sido determinadas (cuadro 2 y 3). Los lípidos, sacados de cada muestra al cloroformo, han sido derivados y analizados con una cromatografía de fase gaseosa espectrometría de masa (CFG-EM). Las cantidades de lípidos libres, que van de 35 a 137 mg.kg<sup>-1</sup> suelo (fig 1a) representan menos del 1 % del carbono orgánico total (fig 1b). Componentes identificados son mono o diácidos (bajo la forma de ésteres metílicos), alcoholes (acetilénicos), alcanos, esteroides y hopanoides. Estos componentes son característicos de un origen principalmente vegetal. Sin embargo, los ácidos ramificados y una parte de los diácidos son de origen bacteriano. Además, el índice de lípidos libres no está correlacionado con el índice de la suma de los cationes intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la reserva de agua útil. Al contrario, los cantidades de ésteres metílicos, de ácidos nonadecanoicos (C19), esteárico (C18) y palmítico (C16) están respectivamente correlacionados con las propiedades químicas anteriores, la mineralización acumulativa del carbono y el carbono de la biomasa microbiana (cuadro 5).

**Palabras clave**

Suelo, materia orgánica, lípidos, Burkina Faso

## INTRODUCTION

La matière organique des sols (MOS) désigne l'ensemble des substances, soit héritées directement des organismes végétaux, soit produites par les transformations biologiques (animales, fongiques, bactériennes.) et/ou physico-chimiques, exclusion faite de la partie aérienne des plantes (Baldock et Nelson, 1999). Elle inclut également une variété de produits organiques souvent intimement liés aux composantes inorganiques du sol (Guggenberger *et al.*, 1994). Sur le plan chimique, la MOS comporte diverses fractions dont des substances humiques (Acides humiques, fulviques, humine), des biomolécules (protéines, polysaccharides, lipides...). Les propriétés physiques de ces produits et notamment la solubilité dans l'eau ou, *a contrario* l'hydrophobie de ces différentes classes de composés est un critère important de leur comportement biogéochimique.

Au Burkina Faso, les matières organiques humiques et les biomolécules associées (principalement les protéines et les polysaccharides) ont fait l'objet de quelques études visant à mieux caractériser la MOS et / ou à appréhender davantage son évolution sous culture (Sourabié, 1979; Zombré, 1984; Pallo, 1993), alors que les travaux sur les lipides sont plutôt rares. Pourtant, les lipides jouent un rôle déterminant sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols et sont particulièrement abondants en milieu acide où ils peuvent représenter jusqu'à 30 % du carbone total (Lemée, 2004). Par ailleurs, selon divers auteurs cités par Amblès (1991), les lipides du sol comporteraient des substances pouvant inhiber la germination des graines et la croissance des plantes, les activités et le développement des microorganismes du sol (Agoramoorthy *et al.*, 2007) et ont un impact négatif sur la réserve en eau des horizons humifères. En revanche, ils sont souvent associés aux humus bruts et auraient alors un effet bénéfique sur la structure du sol (Jambu *et al.*, 1983). Le travail présenté ici vise à combler certaines lacunes sur les connaissances de ces substances non humiques dans les sols au Burkina Faso. Il se justifie par (1) les diverses actions entreprises sur le plan national, pour assurer une gestion intégrée de la fertilité des sols et pour promouvoir, en particulier, une meilleure utilisation des amendements organiques, (2) l'application pour les cultures de rente notamment, de quantités de plus en plus élevées d'intrants (engrais, pesticides, herbicides), dont la composition peut inclure ces composés organo-solubles, (3) le déversement dans les milieux naturels et/ou dans les voies d'évacuation des eaux usées, de déchets de nature lipidique (hydrocarbures, huiles usagées, matières grasses diverses) susceptibles de modifier les propriétés physico-chimiques et biologiques initiales des sols affectés aux cultures maraîchères (agriculture urbaine ou péri-urbaine). En conséquence, son objectif est d'appréhender le statut des lipides des sols, en relation avec le climat général, les facteurs stationnels (texture, hydromorphie), les types de

sol et le couvert végétal. Pour ce faire, l'étude a été réalisée en considérant une séquence de sols sous formations naturelles de longue durée (70 ans environ). Elle porte particulièrement sur la fraction lipidique directement extractible qualifiée de « lipides libres ».

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Cadre géographique

L'étude a été réalisée sur six sites localisés le long d'un gradient climatique, allant de la zone soudanienne plus humide à la zone sahélienne plus sèche du Burkina Faso. Les caractéristiques des milieux sont reportées dans le *tableau 1*. Les sols étudiés sont les plus répandus (Bunasols, 1985) et/ou les plus fertiles du pays (Boulet, 1976). Les premiers sont des Ferruginosols et les seconds des Brunisols. Les Luvisols de la région nord et les Ferrallitols de la région Ouest ont également été considérés. Au total, dix profils représentatifs des groupes de sol considérés ont été étudiés. Le couvert végétal comporte une strate arbustive avec présence fréquente d'Acacia, et une strate herbacée avec des graminées comme Hyparrhenia, Pennisetum, Andropogon. Pour un même métabolisme du C, on considère que l'aridité du climat favorise la synthèse de lipides protecteurs à chaîne longue (cires cuticulaires) (Vogts *et al.*, 2007).

### Matériels

Un échantillon composite de sol a été prélevé au niveau de l'horizon supérieur (0-20 cm) de chacun des dix profils de sol indiqués dans le *tableau 1*. La synthèse des caractères morphologiques de ces profils montre que les Brunisols du site de Sâ ont, sur toute leur épaisseur, une texture fine et une structure fortement développée, polyédrique subangulaire. Ils comportent dès l'horizon de surface des taches d'hydromorphie. Celui de Sambonaye s'en distingue par la présence d'un horizon de recouvrement à texture sablo-limoneuse à la surface et par des caractères vertiques en profondeur. Le Luvisol de ce site a également un horizon superficiel de texture moyenne à grossière. Les horizons intermédiaire et profond présentent des taches d'hydromorphie. Le Ferruginosol de Niangoloko se particularise par l'émergence d'une induration à 75 cm de profondeur et par la texture sableuse des horizons qui précèdent cette dernière. Le Ferrallitols de Farakoba est, sur toute son épaisseur, rouge et faiblement structuré. Le Ferruginosol de ce site diffère du Ferrallitols qui lui est associé, par la présence de graviers ferromanganiques et par des taches brun-rougeâtre dans les horizons intermédiaires et profonds. Le Ferruginosol du site de Yabo possède une cuirasse à partir de 70 cm de profondeur. L'horizon qui repose sur cette induration a 80 à

**Tableau 1** - Données sur les sites d'étude.**Table 1** - Data on the studied sites.

Zone climatique		Sud-soudanienne			Nord -soudanienne			Sahélienne			
Sites	N°	1	2	3	4	5	6				
	Désignation	Niangoloko	Farakoba	Tiogo	Sâ	Yabo	Sambonaye				
Coordonnées géographiques		10°16'21"N 4°53'27"W	11°10'54"N 4°16'21"W	12°13'38"N 2°49'06"W	12°39'20"N 3°17'53"W	13°1'55"N 1°32'43"W	14°8'40"N 0°3'10"E				
Pluviosité moyenne annuelle (mm)		1020,7	1015,8	797,5	755,3	707,8	442,6				
Température moyenne annuelle (°C)		27,4	27,3	28,1	28,7	28,5	29,7				
Composition floristique*		As2; Pc; Ff; Ad; Do; Ic; Hd; Ag; Sp.	Dm2; Pt; Ff; Gs; As2	Tl; Dm3; Si; Gs; Ks; As; Vp.	Cf; Cg; Gs; Am; Sb; Ag; Cp; Da.	Gs; Dc; Am; Gt; Ea; Ap; Ag; Bs.	Dc; Cm; As; Sb; Pp1; Pp2; Ab; Se.	Pl; As; Ca; Dm; Cn; Ab; Pp2.	Gs; Cn; Am; Ca; Fa.	Ar; Ba; Ct; Bs.	As; Ma; Ct; Cb; Bs.
Profil de sol	N°	FCN 8	FKA 7	FKA 9	FCT 14	FCT43	FCS 14	FCS44	FCY 12	SBY 14	SBY 31
	Classification (R.P.2008)	Ferruginosol cuirassé	Ferrallitisol meuble	Ferruginosol meuble	Ferruginosols semiluviques		Brunisols eutriques		Ferruginosol cuirassé	Luvisol	Brunisol vertique

Composition floristique\*: **Ad**: *Acacia dudgeonii* Craib.; **Ar**: *Acacia raddiana* (Savi) Brenan; **Am**: *Acacia macrostachya* Reich. ex DC; **As1**: *Acacia seyal* Del; **Ag**: *Andropogon gayanus* Kunth; **Ap**: *Andropogon pseudapricus* Stapf; **As2**: *Annona senegalensis* Pers.; **Ab**: *Aspilia bussei* O.Hoffm. et Muschl; **Ba**: *Balanites aegyptiaca* (L.) Del.; **Bs**: *Borreria stachydea* (DC.) Hutch. et Dalz.; **Ca**: *Commiphora africana* (A. Rich.) Engl.; **Cb**: *Cenchrus biflorus* Roxb.; **Cf**: *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don.) Benth.; **Cg**: *Combretum ghasalense* Engl. et Diels; **Cm**: *Combretum micranthum* G. Don.; **Cn**: *Cassia nigricans* Vahl.; **Cp**: *Cochlospermum planchonii* Hook. F.; **Ct**: *Cassia tora* Linn.; **Da**: *Diheteropogon amplexens* (Nee) W. D. Clayton.; **Dc**: *Dichrostachys cinerea* (Forssk.) Hutch. et Dalz.; **Do**: *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch. et Dalz.; **Dm1**: *Dalbergia melanoxylon* Guill. et Perr.; **Dm2**: *Diospyros mespiliformis* Hochst; **Dm3**: *Detarium microcarpum* G. et Perr.; **Ea**: *Entada africana* Guill. et Perr.; **Fa**: *Feretia apodanthera* Del.; **Ff**: *Flacourtia flavescens* Willd.; **Gs**: *Guiera senegalensis* Lam.; **Gt**: *Gardenia ternifolia* Schum. et Thonn.; **Hd**: *Hyparrhenia diplandra* Hack. stapf.; **Ic**: *Indigofera colutea* (Burn. f.) Merrill; **Ks**: *Khaya senegalensis* A. Juss.; **Ma**: *Maerua crassifolia* Forssk.; **Pc**: *Parinari curatellifolia* Planch. ex Benth.; **Pl**: *Pterocarpus lucens* Guill. et Perr.; **Pp1**: *Pennisetum polystachyon* (Linn.) Schult; **Pp2**: *Pennisetum pedicellatum* Trin.; **Pc**: *Parinari curatellifolia* Planch. ex Benth.; **Pt**: *Piliostigma thonningii* (Schum.) Milne Rech.; **Sb**: *Sclerocarya birrea* Hochst.; **Se**: *Schizachyrium exile* (Hochst); **Si**: *Strychnos spinosa* Lam.; **Sp**: *Sporobolus pyramidalis* P. Beauv.; **Tl**: *Terminalia laxiflora* Engl.; **Vp**: *Vitellaria paradoxa* Gaertn.

90 % d'éléments grossiers (débris de cuirasse, graviers ferromanganiques...). Les Ferruginosols du site de Tiogo ont un horizon supérieur humifère (Ah) bien individualisé de couleur gris sombre. Les horizons sous-jacents ont, en plus des taches d'oxydo- réduction, des concrétions ferromanganiques. Quant aux caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des dix échantillons de sol, quelques-unes figurent dans les *tableaux 2 et 3*. Elles montrent qu'à l'exception des pH, tous les autres paramètres varient fortement d'un échantillon de sol à un autre. Les échantillons 6 et 7 (Brunisols) se distinguent par leurs plus fortes teneurs en argiles (40-60 %), ce qui entraîne une somme des bases échangeables (9,4 et 11,4 cmol. kg<sup>-1</sup> sol) et une capacité d'échange cationique (16 et 18 cmol. kg<sup>-1</sup> sol) plus élevées. Il en est de même des pF et des teneurs en phosphore total. Inversement, les plus faibles valeurs de ces paramètres

sont celles de l'échantillon 1 (Ferruginosol). Les échantillons 2 et 3 (Ferrallitisol et Ferruginosol) présentent le complexe adsorbant le moins saturé (S/T: 58 et 47 %). En moyenne, la teneur en matière organique totale n'excède pas 2 %. Les échantillons 8 et 9 (Ferruginosol et Luvisol) présentent des quantités de C-CO<sub>2</sub> dégagé au bout de 31 jours d'incubation, supérieures à 300 mg C kg<sup>-1</sup> sol. L'échantillon 7 (Brunisol) détient le plus faible et l'échantillon 9 (Luvisol) le plus fort taux de minéralisation globale (TMG) du carbone. La quantité de carbone associée à la biomasse microbienne (CBM) dépasse généralement 100 mg C kg<sup>-1</sup> sol, sauf pour les échantillons 2 et 7 (Ferrallitisol et Brunisol). Les échantillons 1 (Ferruginosol) et 10 (Brunisol) ont les valeurs les plus élevées de CBM exprimées en pour cent de C total.

**Tableau 2** - Quelques caractéristiques physiques des échantillons de sol.**Table 2** - Some physical characteristics of the soil samples.

N° Echantillon	Granulométrie (p.c)			pF *(p.c)		
	Argiles	Limons totaux	Sables totaux	pF 2,5	pF 3,0	pF 4,2
1- Ferruginosol	1,50	8,45	90,05	3,31	2,28	1,39
2- Ferrallitisol	9,00	13,15	77,85	7,39	5,65	2,57
3- Ferruginosol	6,50	19,30	74,20	8,44	6,58	3,36
4- Ferruginosol	12,25	23,46	64,29	14,17	8,07	4,25
5- Ferruginosol	8,75	11,58	79,67	6,51	3,29	2,20
6- Brunisol	39,00	37,35	23,65	24,68	16,98	12,16
7- Brunisol	61,50	27,65	10,85	26,79	16,12	11,83
8- Ferruginosol	16,50	47,75	35,75	16,57	6,22	5,74
9- Luvisol	20,00	12,35	67,65	12,11	8,63	4,66
10- Brunisol	12,50	3,45	84,05	4,78	3,59	2,18

pF\*: logarithme décimal du potentiel capillaire (Mériaux, 1979)

**Tableau 3** - Caractéristiques chimiques et biologiques des échantillons de sol.**Table 3** - Chemical and biological characteristics of the soil samples.

N°échantillon	MO totale	pH		SBE	CEC	SBE/CEC	Phosphore total	Paramètres biologiques			
		p.c	Eau					KCl		mg P kg <sup>-1</sup>	Cumul C-CO <sub>2</sub> dégagé 31 <sup>e</sup> jour mg C kg <sup>-1</sup> sol
1- Ferruginosol	0,34	7,00	5,19	1,22	1,48	82,4	44	98,7	5,0	119,0	6,01
2- Ferrallitisol	0,56	6,39	5,05	1,32	2,28	57,9	83	209,0	6,4	66,8	2,06
3- Ferruginosol	0,73	6,22	4,90	1,58	3,39	46,6	90	233,0	5,5	122,0	2,88
4- Ferruginosol	1,65	6,17	4,87	3,03	4,15	73,01	59	208,2	2,2	187,2	1,95
5- Ferruginosol	0,89	6,01	4,45	1,64	2,20	74,54	42	56,4	1,1	101,6	1,95
6- Brunisol	1,80	6,41	4,92	9,37	16,07	58,30	105	144,0	1,3	245,6	2,29
7- Brunisol	1,40	6,10	4,19	11,38	18,01	63,20	148	71,4	0,9	76,8	1,00
8- Ferruginosol	1,48	6,23	4,92	3,10	4,42	70,13	93	324,0	3,9	164,8	1,98
9- Luvisol	0,74	6,76	5,18	5,73	5,82	98,45	107	306,0	8,5	168,3	4,67
10- Cambisol	0,41	6,60	4,69	2,91	3,57	81,51	74	127,6	5,5	146,6	6,37

MO: matière organique; SBE: Somme des bases échangeables en cmol.kg-1 sol; CEC: Capacité d'échange cationique en cmol.kg-1 sol;

SBE/CEC: Taux de saturation en p.c; C-CO<sub>2</sub>: Quantité de carbone minéralisé; CBM: Carbone associé à la biomasse microbienne; TMG: Taux de minéralisation globale du carbone (C-CO<sub>2</sub> dégagé en p.c de C.total)

## Méthodes d'analyse physiques, chimiques et biologiques des sols

Trois groupes de propriétés édaphiques pouvant avoir une influence sur la fertilité des sols étudiés ont été considérés :

- les propriétés physiques : granulométrie et pF ;
- les propriétés chimiques : pH, somme des bases échangeables, capacité d'échange cationique, phosphore total et matière organique totale ;
- les paramètres biologiques : respiration du sol (C-CO<sub>2</sub> dégagé), minéralisation de la M.O., biomasse microbienne.

Ces différentes variables ont été déterminées sur la terre fine ( $\varnothing < 2$  mm) comme suit :

- La méthode internationale par pipetage à la pipette robinson a été employée pour distinguer cinq classes granulométriques : argiles (0-2  $\mu$ m) ; limons fins (2-20  $\mu$ m) ; limons grossiers (20 – 50  $\mu$ m) ; sables fins (50 – 200  $\mu$ m) ; sables grossiers (200 – 2000  $\mu$ m) (exprimées en % de terre fine séchée à 105°). L'humidité des sols a été déterminée aux pF<sub>2,5</sub>, pF<sub>3,0</sub> et pF<sub>4,2</sub>. Ces paramètres correspondent à l'humidité équivalente pour les Brunisols (pF 3,0), pour les autres unités de sol (pF 2,5) et à l'humidité au point de flétrissement (pF 4,2). Ils ont ainsi permis de déterminer la réserve en eau utile des sols étudiés (Mériaux, 1979).

- Les mesures du pH ont été faites sur une suspension de sol dans l'eau (et dans une solution normale de KCl) à l'aide d'un pH-mètre muni d'électrodes en verre. La détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) est celle basée sur une extraction avec l'argent thiourée à 0,01M et qui permet, en même temps, de déterminer les bases échangeables (Chabra *et al.* 1975). La teneur en phosphore total a été obtenue après minéralisation dans un mélange constitué d'acide sulfurique, acide salicylique et de sélénium ; suivie de son dosage à l'auto-analyseur en utilisant le molybdate d'ammonium comme indicateur.

Le carbone total a été déterminé par la méthode de Walkley et Black (1934). Le dosage du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dégagé a été réalisé par la méthode décrite par Dommergues (1960). La procédure consiste à introduire 100 g de sol tamisé à 2 mm et humidifié aux 2/3 de sa capacité maximale de rétention en eau, dans un bocal en verre de capacité 1 litre. On y place également un bécher et un récipient contenant respectivement 20 ml de soude (NaOH 0,1M) et de l'eau. Puis le bocal hermétiquement fermé est mis à incuber. Le gaz carbonique dégagé est piégé par la soude et dosé par titration avec de l'acide chlorhydrique (HCl 0,1M), en présence de phénolphtaléine, après précipitation préalable du carbone de sodium par 2 ml de chlorure de Baryum (BaCl<sub>2</sub> 30g.l<sup>-1</sup>). L'incubation dure 31 jours.

La quantité de CO<sub>2</sub> dégagé (C-CO<sub>2</sub>) est obtenue par la formule suivante :

$$\text{C-CO}_2 \text{ (mg / 100 g de sol)} = (V_{\text{blanc}} - V_{\text{échantillon}}) \times 2,2$$

où :

- $V_{\text{blanc}}$  = quantité de HCl 0,1 N utilisée pour les bocaux témoins
- $V_{\text{échantillon}}$  = quantité de HCl 0,1 N utilisée pour les bocaux renfermant l'échantillon de sol
- à 2,2 g de CO<sub>2</sub> correspond 1 ml de HCl 0,1 N (Dommergues, 1960).

Les mesures ont été effectuées quotidiennement pendant une semaine, puis tous les deux jours jusqu'au 31<sup>e</sup> jour. Le carbone de la biomasse microbienne a été déterminé par la méthode de Jenkinson et Powlson (1976) à partir d'échantillons de sol fumigés (F) et non fumigés (nF). La quantité de carbone de la biomasse microbienne (CBM) est calculée par :

$$\text{CBM} = [F(0-7) - nF(7-14)] / kc$$

Où :

- kc = coefficient de proportionnalité représentant la fraction minéralisable en CO<sub>2</sub> du carbone de la biomasse, est égal à 0,41 (Anderson et Domsch, 1978 ; Chaussod *et al.*, 1986) ;
- F(0-7) représente le C-CO<sub>2</sub> dégagé pour l'échantillon de sol fumigé entre 0-7 jours ;
- nF(7-14) le C-CO<sub>2</sub> dégagé pour l'échantillon de sol non fumigé entre 7-14 jours.

## Extraction des lipides libres

Elle a précédé celle des substances humiques comme suggéré par Saiz- Jimenez (1996). La procédure employée est celle adoptée par la Société Internationale des substances humiques (IHSS, 1983). Les lipides ont été extraits par Soxhlet pendant 24 heures, à partir de 100 g d'échantillon de sol tamisés à 2 mm (avec 300 ml de chloroforme bi-distillé). Après évaporation du solvant à l'évaporateur rotatif, les lipides totaux sont pesés puis conservés au réfrigérateur à 4 °C pour les futures analyses.

## Analyse des composés lipidiques des sols

Chaque extrait lipidique a fait l'objet d'un premier test par chromatographie sur couche mince (CCM) préalable à une dérivation éventuelle des composés polaires (alcools et acides) en composés non-polaires (respectivement acétates et esters méthyliques), permettant une analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG – SM). La chromatographie sur couche mince a été effectuée sur une couche d'alumine recouverte de silice (Alugram Sil G/UV). Elle a permis d'identifier les différents constituants, selon le rapport (R<sub>F</sub>) entre leur distance de migration et celle du front total d'humectation. Les extraits lipidiques totaux pour lesquels le test CCM révèle la présence d'alcools et d'acides, trop polaires pour être analysés par CG/SM, subissent une étape de dérivation. Les alcools sont acétylés par l'anhydride

acétique dans la pyridine et les acides sont méthylés par du triméthylsilyl – diazométhane (TMS – CHN<sub>2</sub>) (Amblès, 1991).

Les analyses chromatographiques (CG) en phase gazeuse ont été réalisées à l'aide d'un chromatographe (Varian 3900, piloté par un logiciel Star Workstation) équipé d'une colonne capillaire (SGE BPX 5,30 m de long, 0,25 µm diam int), d'un injecteur split/splitless et d'un détecteur à ionisation de flamme (FiD). Les analyses de masse ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre (ThermoElectron Automass couplé à un chromatographe Trace GC). Chaque constituant est caractérisé par son temps de rétention (abscisse), son intensité (ordonnée) et son spectre de masse par comparaison avec des standards et des spectres de référence. Son abondance relative est déterminée par une intégration automatique du pic chromatographique correspondant, ce qui permet d'établir des histogrammes de distribution en abondance relative des composés des diverses familles étudiées.

## Analyses statistiques

Afin d'indiquer le degré de liaison entre les produits organo-solubles libérés et les autres caractéristiques des sols, le test de corrélation de rang de Spearman (1904) a été appliqué. Les coefficients ont été calculés en utilisant le logiciel Minitab sous window - version 13 - 31. Par convention d'écriture, les signes utilisés, pour indiquer le degré de signification des probabilités sont les suivants: +: p<0,05 (significatif); ++: p<0,01 (haute-ment (significatif); +++: p<0,001(très hautement significatif).

## RÉSULTATS

Les données présentées sur la *figure 1a* montrent que la masse des lipides extraits est comprise entre 35 mg kg<sup>-1</sup> sol pour l'échantillon 9 (Luvisol) et 137 mg.kg<sup>-1</sup> sol pour l'échantillon 4 (Ferruginosol). Les teneurs en lipides représentent 0,06 et 0,83 % de carbone total pour les échantillons 6 (Brunisol) et 1 (Ferruginosol) (*figure 1b*). L'ensemble des familles lipidiques que l'on retrouve dans les extraits se répartissent de la manière suivante:

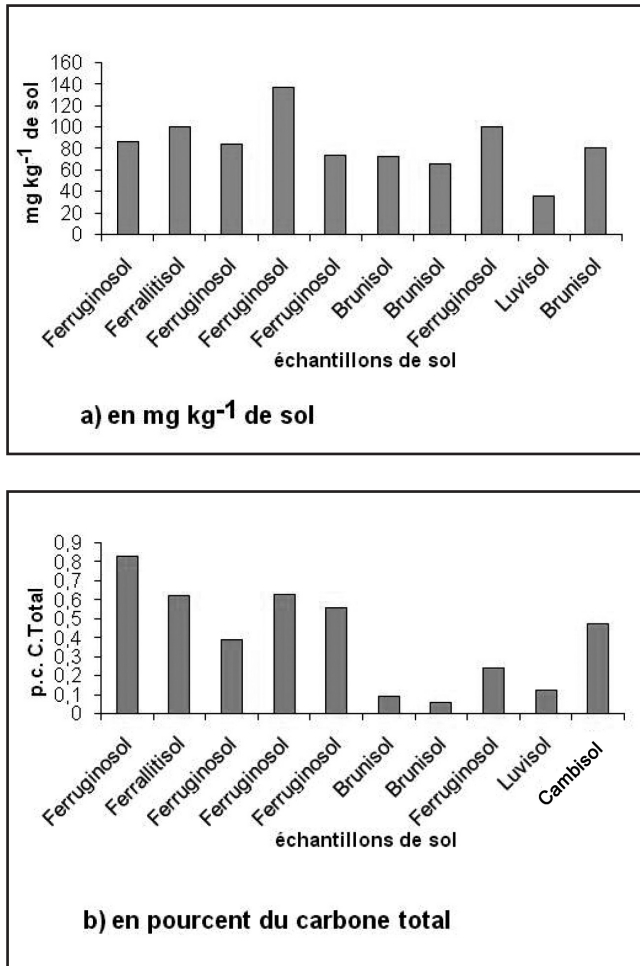
- acides gras méthylés (\*)
- diacides gras méthylés (Δ)
- alcools acétylés (●)
- Hydrocarbures (HC)
- Stéroïdes (C)
- Hopanoïdes (A, B, D).

Leurs abondances relatives (pourcentage de la fraction chromatographique) sont reportées sur le *tableau 4*. On note que les esters méthyliques des acides à nombre pairs de C comme l'acide myristique (\*14), palmitique (\*16), oléique (\*18 :1), stéarique (\*18 :0), lignocérique (\*24), cérotique (\*26) et monta-

nique (\*28) sont communs aux extraits de tous les échantillons de sol, avec cependant une nette prédominance du palmitate de méthyle (\*16). Les esters méthyliques des acides arachidique (\*20) et behénique (\*22) ne sont absents que dans l'extrait lipidique de l'échantillon 6 (Brunisol). En ce qui concerne les acides à nombre impair de C, on trouve dans tous les échantillons l'ester méthylique du pentadécanoïque (\*15), tandis que l'ester méthylique de l'acide hénécicosanoïque (\*21) n'apparaît que dans les extraits des échantillons 1 (Ferruginosol) et 5 (Ferruginosol). Pour le cas spécifique de l'extrait lipidique de l'échantillon 1, il renferme tous les esters méthyliques des acides gras mentionnés sauf celui de l'acide lacéroïque (\*32). Les acides dicarboxyliques sont représentés par les diesters méthyliques des acides nonadécanoïque (Δ19), tricosanoïque (Δ23), pentacosanoïque (Δ25), heptacosanoïque (Δ27) et nonacosanoïque (Δ29). Seul le premier composé est noté dans tous les extraits étudiés, singulièrement dans les échantillons 6 et 7 (Brunisols). Le diester méthylique de l'acide nonacosanoïque (Δ29) n'existe que dans l'échantillon 10 (Brunisol). Les alcools acétylés se limitent aux composés C<sub>22</sub> et C<sub>24</sub>. Ils sont observés dans l'extrait de l'échantillon 1 dont ils constituent moins de 1 %. Quant aux hydrocarbures (HC), leur distribution va du C<sub>20</sub> au C<sub>31</sub>. Ils ont été tous identifiés dans les extraits des échantillons 1 (Ferruginosol) et 5 (Ferruginosol), avec une abondance relative totale de 20 et 15 %. Dans les extraits lipidiques des autres échantillons de sol, la diversité des HC est plus restreinte avec prédominance des C20 et C22. Enfin, parmi les composés polycycliques, quatre produits organo-solubles ont été identifiés. Il s'agit d'un méthoxyhopanoïque (A), d'une hopanone en C<sub>30</sub> (B), des acétates de sitostérol (C) et de cholestanol (D). Tous figurent dans les extraits des échantillons 3 (Ferruginosol) et 5 (Ferruginosol). Leurs pourcentages relatifs sont de l'ordre de 15 et 10 %. Présent dans six des dix échantillons de sol considérés, le composé A est le plus répandu.

Les résultats du test de corrélation de rang de Spearman sont reportés dans le *tableau 5*. Ils ne révèlent pas de corrélation significative entre la masse des lipides, exprimée en mg kg<sup>-1</sup> sol, et les caractéristiques des échantillons de sol considérés. Par contre, lorsque ces substances sont exprimées en pour cent du Carbone organique total, elles sont négativement corrélées avec les propriétés physiques retenues, sauf avec le rapport sables/argiles. La corrélation est positive avec ce dernier paramètre. Les coefficients de corrélation les plus élevés sont obtenus avec pF<sub>3,0</sub> et pF<sub>4,2</sub>. Au niveau des constituants lipidiques, le myristate de méthyle (\*14) et l'oléate de méthyle (\*18 :1) ont respectivement une corrélation positive avec le taux de particules fines (Ø<50 µm) et la réserve en eau utile (pF<sub>2,5</sub> – pF<sub>4,2</sub>). L'oléate de méthyle est aussi positivement corrélé avec pF<sub>2,5</sub> et pF<sub>4,2</sub>; la corrélation entre le myristate de méthyle et le rapport sables / argiles étant négative. Par ailleurs, la corrélation entre d'une part le diester méthylique de l'acide nonadécanoïque (Δ19) et d'autre part le taux d'argile, pF<sub>3,0</sub> et [pF<sub>3,0</sub>

**Figure 1** - Teneurs en lipides des échantillons des sols étudiés  
**Figure 1** - Amounts of lipids in the studied soil samples.



-  $pF_{4,2}$ ] est positive, très hautement significative ( $p < 0,001$ ) avec la variable granulométrique, et significative ( $p < 0,05$ ) avec les deux variables hydriques. Elle devient négative, hautement significative ( $p < 0,01$ ) avec le rapport sables/argiles. Concernant les propriétés chimiques, des corrélations négatives, significatives et hautement significatives lient respectivement le taux de lipides exprimé en % C total de matière organique, à la capacité d'échange cationique (CEC), à la somme des bases échangeables (SBE). Les variables SBE et CEC, auxquelles s'ajoute la teneur en phosphore total, sont en revanche positivement corrélées avec le diester méthylique de l'acide nonadécanoïque ( $\Delta 19$ ). Pour les paramètres biologiques, une corrélation positive a été établie entre le cumul de C-CO<sub>2</sub> dégagé au bout de 31 jours d'incubation des échantillons de sol et le palmitate de méthyle (\*16) d'une part, entre le taux de carbone associé à la biomasse microbienne et le stéarate de méthyle (\*18 :0)

d'autre part. Enfin, seul le pentadécanoate de méthyle (\*15) est positivement corrélé avec le taux de matière organique totale.

## DISCUSSION

L'importance des lipides des sols a été signalée par de nombreux auteurs (Jambu *et al.*, 1978; Ziegler, 1989, Dinel *et al.*, 1991; Naafs et Van Berger, 2002). Pour la plupart, les études ont porté sur leurs nature et origine afin de mieux comprendre l'évolution des matières organiques (MO) des sols et pour cerner davantage leurs interactions avec les autres caractéristiques édaphiques (Jambu *et al.*, 1978; Jambu *et al.*, 1983; Amblys *et al.*, 1993; Collina-Tejada *et al.*, 1996). Elles ont en général été exécutées dans des zones à hydromorphie prolongée et/ou sur des sols évoluant sous conditions climatiques favorables à l'accumulation de MO en surface ou dans les horizons sub-superficiels. En effet, la teneur en MO totale de tels horizons désignés par H ou O (FAO, 1994) peut excéder 300g C kg<sup>-1</sup>sol (Sombroek *et al.*, 1993) et les lipides, représenter plus de 20 % de cette fraction organique (Amblys, 1991). Par contre, les travaux réalisés ici l'ont été en zone tropicale sèche. Ils ont concerné des horizons de surface (Ah) dont les propriétés sont celles d'un horizon A caractérisé par une accumulation de MO humifiée mélangée à la fraction minérale (FAO, 1994). Il s'ensuit que dans de tels horizons pauvres à très pauvres en MO selon la classification suggérée par Boyadgiev (1980), la masse des lipides est faible (moins de 1 %), comparée aux valeurs (2-4 %) observées par Lemée (2004) en région tempérée sur des sols à forte accumulation superficielle de MO totale (tourbes acides). Par ailleurs, à la différence de ce que Moucawi (1981) a observé en région tempérée, ces travaux n'ont pas révélé de corrélation positive significative entre le taux de MO totale et la masse de lipides exprimée en mg.kg<sup>-1</sup> sol, sans doute parce qu'il ne s'agit ici que des lipides directement extractibles et non des lipides totaux qui incluent les lipides associés aux SH. On relève que deux facteurs semblent influencer les taux de lipides libres de l'horizon supérieur des sols étudiés: la texture et l'hydromorphie temporaire. Les sols à caractère hydromorphe et à texture fine tels que les Brunisols du site de Sâ et le Luvisol de Sambonaye ont les teneurs en lipides (% du C. total) les plus faibles; tandis que le Ferruginosol du site de Niangoloko a les valeurs les plus élevées. En fonction des zones climatiques, en région sahélienne, le Luvisol a les taux de MO totale, les TMG et cumul de C-CO<sub>2</sub> dégagé au 31<sup>e</sup> jour d'incubation les plus élevés (Pallo *et al.*, 2006). Par contre, en zone nord-soudanienne, les Brunisols possèdent les valeurs les plus faibles des paramètres biologiques précités; ceci est attribué aux fortes teneurs en argiles de ces Brunisols pour lesquels des corrélations négatives existent notamment entre d'une part les quantités d'argiles et d'autre part le cumul de C-CO<sub>2</sub> dégagé et le carbone de la biomasse microbienne (Pallo *et al.*,



**Tableau 4** - Pourcentage relatif des constituants lipidiques dans les horizons de surface des sols étudiés (en p.c de la fraction chromatographique).**Table 4** - Relative percentage of lipidic components in the top horizons of the studied soils.

N°	Composés	N° ECHANTILLON DE SOL									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	*14	3,4	4,4	4,2	7,0	2,1	5,9	6,0	6,9	3,4	4,6
2	*15	2,1	3,7	2,2	6,2	6,0	5,0	3,7	4,2	5,2	3,7
3	*16	21,7	55,5	38,3	39,6	12,3	47,8	39,1	55,0	49,3	29,8
4	HC-20	0,9	-	-	3,3	2,1	-	3,3	2,5	-	3,6
5	*18 :1	4,5	20,4	3,9	7,5	5,0	17,1	15,2	8,1	5,1	3,1
6	HC-21	2,5	-	-	-	1,6	-	-	-	-	-
7	*18	6,3	8,9	7,1	12,8	4,9	11,2	10,7	11,3	23,0	22,1
8	HC-22	3,3	-	2,7	-	3,2	-	2,8	3,0	-	3,6
9	HC-23	1,4	-	1,9	-	2,9	-	-	-	-	2,5
10	*20	1,3	1,2	3,8	1,9	2,7	-	2,3	2,1	5,1	2,7
11	HC-24	1,3	-	-	-	2,1	-	-	-	-	3,3
12	*21	0,7	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-
13	HC-25	1,1	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-
14	*22	2,8	0,8	1,2	1,1	3,9	-	1,4	1,5	1,8	1,5
15	$\Delta$ 19	1,2	2,0	1,3	1,5	1,4	4,6	7,0	1,5	2,0	2,4
16	HC-26	0,8	-	-	-	1,3	-	0,9	-	-	-
17	*23	1,2	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-
18	•22	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	HC-27	0,9	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-
20	*24	4,5	0,8	2,7	1,2	4,0	1,2	1,5	1,6	1,6	1,3
21	•24	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	*25	0,9	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-
23	HC-29	1,2	-	-	-	2,0	0,9	-	-	-	-
24	*26	6,1	0,7	2,4	1,3	3,4	1,4	1,7	1,2	1,8	1,3
25	$\Delta$ 23	3,2	-	-	-	2,2	-	-	-	-	0,7
26	*27	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	HC-31	1,9	-	-	-	2,0	-	-	-	-	-
28	*28	3,6	1,6	2,5	1,9	3,1	1,4	2,3	1,1	1,7	1,2
29	$\Delta$ 25	3,2	-	2,7	2,7	3,9	-	-	-	-	1,6
30	A	4,8	-	7,0	5,0	6,2	3,5	-	-	-	1,2
31	B	-	-	3,7	2,8	1,7	-	-	-	-	-
32	*30	4,7	-	2,5	2,0	2,7	-	2,1	-	-	1,6
33	$\Delta$ 27	3,4	-	5,1	2,2	4,1	-	-	-	-	2,8
34	C	-	-	2,0	-	2,4	-	-	-	-	1,9
35	D	2,1	-	2,8	-	2,4	-	-	-	-	-
36	*32	-	-	-	-	2,3	-	-	-	-	2,1
37	$\Delta$ 29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4

\*: acides gras méthylés;  $\Delta$ : diacides gras méthylés; •: alcools acétylés; HC: hydrocarbures; C: stéroïdes; A, B, D: hopanoïdes

2009). Ces faibles taux de minéralisation du carbone corroborent également les observations faites par Duhaufour (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). En zone sud-soudanienne, le Ferruginosol de Niangoloko se distingue des autres unités de sol (Ferruginosol et Ferrallitisol) par un CBM plus élevé et par un cumul C-CO<sub>2</sub> et un TMG plus faibles (Pallo *et al.*, 2008). La composition floristique des strates arborée, arbustive et herbacée autour des profils étudiés ne semble pas influencer les teneurs en lipides. Quant à l'analyse des constituants lipidiques, elle a révélé les mêmes catégories de lipides identifiées par Jambu *et al.*, 1978; Schnitzer *et al.*, 1986; Amblès *et al.*, 1991; Stevenson 1994). Elles résultent de la décomposition et de la transformation de résidus animaux et végétaux non ou partiellement dégradés (Braids et Miller, 1975) mais elles peuvent également être synthétisées dans le sol par les microorganismes. Par ailleurs, certains composés tels que les alcools acétylés témoignent d'une activité réductrice (Lemée, 2004). D'autres comme les hopanoïdes sont habituellement observés dans les sédiments anciens matures. Ils proviendraient principalement du bactériohopanetetrol, qui joue un rôle de renforceur membranaire dans les organismes procaryotes (Lemée, *op. cit.*). On relève également la présence de stéroïdes (acétate de sitostérol) considérés comme des marqueurs de milieux marins. Toutefois, ils sont largement distribués dans les tissus animaux et végétaux et par conséquent susceptibles d'apparaître dans le sol. Quant aux hydrocarbures, ils rassemblent les alcanes linéaires, ou *n*-alcanes, et les hydrocarbures polycycliques. Les alcanes linéaires sont de formule générale C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>. Celles des végétaux supérieurs ont une prédominance de nombre impair d'atomes de carbone. Par contre les *n*-alcanes des bactéries et champignons présentent une distribution équivalente des C impairs et pairs; si bien que les variations observées pour l'abondance relative des C en nombre pair ou impair dans les *n*-alcanes du sol et de la MOS peuvent refléter différentes origines (micro-organismes ou végétaux supérieurs) (Stevenson, 1994). Les données semblent indiquer que les *n*-alcanes présents dans les sols étudiés ici sont, majoritairement, d'origine végétale. Les alcènes linéaires ou *n*-alcènes (C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>) n'ont pas été spécifiquement identifiés dans les extraits lipidiques considérés. L'absence ou le faible pourcentage des hydrocarbures polycycliques pourrait se justifier par la localisation géographique des sols étudiés. En effet, bien qu'une partie de ces substances soit d'origine naturelle, elles sont liées à la pollution environnementale issue de la combustion de combustibles fossiles (Stevenson, *op.cit.*). Les zones concernées ne sont pas soumises à une telle pollution. Par ailleurs, la littérature abonde d'écrits relatant les effets bénéfiques de la matière organique des sols (MOS) sur les facteurs de fertilité tels que la capacité d'échange cationique (CEC), la somme des bases échangeables (SBE) et la réserve en eau

utile (RU) (Nwinyi, 1973; Thompson *et al.*; 1989; Asadu *et al.*; 1997; Baldock et Nelson, 1999). Nos résultats indiquent que cette influence positive est plus due aux substances humiques qu'à la fraction lipidique de la MOS. En effet, les corrélations entre le taux de lipides (en pour cent du C. total) et les paramètres édaphiques précités se sont révélées négatives; ce qui confirme les observations faites ailleurs sur le rôle néfaste de ces produits sur la réserve en eau utile notamment. Toutefois, de par leurs corrélations positives, des constituants lipidiques tels que les acides nonadécanoïque ( $\Delta 19$ ), palmitique (\*16) et stéarique (\*18 :0), semblent corrélés à une augmentation de la SBE et la CEC pour la première, le cumul de C- CO<sub>2</sub> dégagé pour la seconde, le taux de carbone associé à la biomasse microbienne, pour la troisième variable. Ces 3 molécules sont considérées comme révélateurs d'activité fongique parce qu'elles constituent ensemble les produits de dégradation par les champignons de l'eicosane (alcane en C20) présent dans les cires cuticulaires des végétaux (Hadibarata *et al.*, 2007).

## CONCLUSION

Les teneurs en lipides libres de l'horizon A humifère (Ah) des principales unités de sol du Burkina Faso sont faibles, comprises entre 0,06 et 0,83 % du carbone total. Hormis les esters méthyliques d'une quinzaine d'acide gras, dominés par le palmitate de méthyle, ces substances sont constituées de di-esters méthyliques, d'alcools acétylés, d'hydrocarbures linéaires et polycycliques. Ces constituants lipidiques ont une origine majoritairement végétale, puis microbienne. Par ailleurs, le pourcentage de ces lipides libres présente des corrélations négatives avec les facteurs de fertilité tels que la somme des bases échangeables, la capacité d'échange cationique et la réserve en eau utile, mais aussi avec le taux de particules fines ( $\varnothing < 50 \mu\text{m}$ ). Ces données corroborent celles obtenues dans les régions tempérées sur des sols à horizon organique de type fibrist ou saprist, très riche en matière organique peu décomposée. Cependant, on relève ici que certains composés lipidiques ont des corrélations positives avec ces différents paramètres et d'autres sont révélateurs de l'activité biologique globale des sols. Tout comme d'autres biomolécules détachées des ensembles macromoléculaires, les lipides libres expriment une résultante entre les compartiments-sources et le résidu des processus de soustraction, comme la biodégradation, l'incorporation dans des associations organo-minérales stables ou la lixiviation. A cause de leur faible taux, les lipides libres ne limitent pas la capacité productive des sols étudiés. Elle reste déterminée par les apports de matière organique fraîche et par les biomolécules et les substances humiques. Néanmoins, comme substances non humiques, les lipides libres sont souvent associés, dans les sols du Burkina Faso, aux particules organiques des fractions sableuses, donc à une fraction gros-

**Tableau 5** - Coefficients de corrélation de rang de Spearman entre les caractéristiques des sols et les constituants lipidiques.**Table 5** - Spearman's rank correlation between soils characteristics and lipidic components.

	MO totale	Propriétés physiques								Propriétés chimiques			Paramètres biologiques	
		A	A+LT	S/A	pF2,5	pF3,0	pF4,2	pF2,5-pF4,2	pF3,0-pF4,2	SBE	CEC	Phosphore total	Cumul de C-CO <sub>2</sub> dégagé	CBM
Lipides en p.c de C.total	-0,81 ++	-0,73 +	0,79 ++	0,74 +	-0,79 ++	-0,81 ++	-0,83 ++	-0,79 ++	-0,72+	-0,72 +	-0,76 +	-	-	-
*C14	-	-	0,67 +	-0,65 +	-	-	-	0,67 +	-	-	-	-	-	-
*C15	0,69 +	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
*C16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,74 +	-
*C18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64 +
*C18:1	-	-	0,65 +	-	0,65 +	-	0,65 +	0,65 +	-	-	-	-	-	-
ΔC19	-	0,88 +++	-	-0,82 ++	-	0,64 +	-	-	0,65 +	0,74 +	0,74 +	0,66 +	-	-

MO: matière organique; A: argiles; A+LT= somme argiles+limons totaux; S/A: rapport sables/argiles; SBE: somme des bases échangeables; CEC: capacité d'échange cationique; CBM: Carbone associé à la biomasse microbienne en mg C kg<sup>-1</sup> sol.

-: non significatif; +: significatif ( $p < 0,05$ ); ++: hautement significatif ( $p < 0,01$ ); +++: très hautement significatif ( $p < 0,001$ ).

sière, mais très accessible, des matières organiques. Comme noté ailleurs (Pallo *et al.*, 2006; 2008), ces fractions jouent un rôle important sur l'activité biologique des sols et en conséquence sur la libération des nutriments. Les lipides libres sont alors révélateurs d'une fertilité potentielle.

## BIBLIOGRAPHIE

- Agoramoorthy G., Chandrasekaran M., Venkatesalu., Hsu M.J., 2007-Antibacterial and antifungal activities of fatty acid methyl esters of blind-your-eye mangrove from India. *Brazilian Journal of microbiology* (2007) 38:739-742.
- Ambès A, 1991 - Protocole d'extraction et d'analyse des lipides des sols. Doc inédit. Laboratoire de chimie XII. Univ. de Poitiers. 23 p.
- Ambès A., Jacquesy J.C., Jambu P., Joffre J. et Maggi-churin R., 1991 - Polar lipid fraction in soil kerogen like matter. *Organic Geochemistry*, 17, 341-349.
- Ambès A., Jacquesy J.C., Jambu P., Mayoungou - Vernbet P., Okomé-Mintsa M., Hita C., et Parlanti E., 1993 - High molecular weight lipids present in soil. Nature and origin. *Organic Geochemistry*. (Oygard K. ed), F.

Hurtigtrykk Oslo, 668-671.

- Anderson J.P.E et Domsch KH., 1978 - Mineralization of bacteria and fungi in chloroform fumigated soils. *Soil Biol Biochem.* 10, 207 - 213
- Asadu C.L.A, Diels J.et Vanlauwe B., 1997 - A comparison of the contributions of clay, silt and organic matter to the effective CEC of soils of subsaharan Africa. *Soil Science* 162 (11), 785-794.
- Baldock J.A et Nelson P.N., 1999 - Soil organic matter. pp 25-84 in: Malcom E. Summer (ed). Hand book of Soil Science. CRC Press.
- Boulet R. 1976 - Notice des cartes de ressources en sol de Haute volta. Echelle 1/500000. Centre ORSTOM Paris, 97 p.
- Boyadgiev T.G. 1980 - Création d'un service des sols. Haute-volta. Etat des connaissances des sols. AG: DP / UPV/74/007. Rapport technique 1. PNUD /FAO, Rome, 1980, 33 p.
- Braids O.C., Miller R.H 1975 - Fats Waxes and Resins in soil, pp 343-368 In: Gieseking J.E (ed) Soil components, vol.1, organic components. Springer Verlag. New-York.
- Bureau national des sols (Bunasols), 1985 - Guide pour le terrain, 7<sup>e</sup> réunion du sous-comité Ouest et centre africain de corrélation des sols et d'évaluation des terres. Bunasols. Ouagadougou 57 p.
- Chabra R., Pleysier J., and Cremers A. 1975 - The measurement of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. Proc. Intern. Clay Conf. (1975) :439 - 449.

- Chaussod R., Nicolardot B et Catroux G, 1986 - Mesure en routine de la biomasse microbienne des sols par la méthode de fumigation au chloroforme. *Science du sol* 2, 201-211.
- Collina-Tejada A., Amblès A., et Jambu P., 1996-Nature and origin of soluble lipids shed into the soil by rainwater leaching a forest of *Pinus maritima* sp. *European Journal of Soil Science*, 47, 637-643.
- Dinel H., Levesque M., Mehuys G.R.1991-Effects of long – chain aliphatic compound on the aggregate stability of Lacustrine silty clay. *Soil science* 151 (3): 228-239.
- Dommergues Y., 1960 - La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *L'agronomie tropicale* 15, 55-60.
- Duchaufour Ph. (1997) - Abrégé de pédologie-sol-végétation-environnement. 5<sup>ème</sup> éd. Masson, France. 291 p.
- FAO, 1994 - Directives pour la description des sols. 3<sup>e</sup> édit. (révisée) FAO. Rome. 73 p.
- Franzuebbers A.J., Arshad M.A. (1997) - Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1382-1386.
- Guggenberger G. Christensen B.T et Zech W. 1994 - Land use effects on the composition of organic matter in particle size separates of soil. 1. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science* 45, 449-458.
- IHSS, 1983 - Outline of extraction procedure. In. Proc 1<sup>st</sup> International Humic Substances Society (IHSS) conference. Estes Park, CO: IHSS Press.
- Jambu P., Fustec E, Jacquesy R. 1978. Les lipides des sols: nature, origine, évolution, propriété. *Science du sol* 4, 229-240.
- Jambu P., Coulibaly G., Bilong P., Magnoux P. et Amblès A. 1983 - Influence of lipids on physical properties of soils. HUMUS et PLANTA VIII "Studies about Humus", 46-50.
- Jenkinson D.S. et Powlson D.S. 1976 - The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V.A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 8 (3) 209-213.
- Lemée L. 2004 - Caractérisation structurale de la matière organique complexe des sols et des sédiments. Dynamique et réactivité. Habilitation à diriger des recherches. Univ. de Poitiers. 120 p.
- Mériaux S. 1979 - Le sol et l'eau. pp 266-312. In: Bonneau M. et B. Souchier (eds). Pédologie: 2. Constituants et propriétés du sol. Masson-Paris.
- Moucawi J. 1981 - Recherches sur l'évolution de la matière organique dans les plaines atlantiques. Plaine calcaire et Bas – Bocage vendéen France. Thèse Doct. d'état – Univ de Poitiers.
- Naaf D.F.W., et Van Bergen P.F. 2002 - A qualitative study on the chemical composition of ester - bound moieties in a acidic andosolic forest soil. *Organic Geochemistry* 33, 189-199.
- Nwinyi S.S.O 1973 - The contribution of organic matter to cation exchange capacity of eastern Nigeria soils. *Sols Africains* Vol. XVIII n°1, 47-58.
- Pallo F. 1993 - Evolution of organic matter in some soils under shifting cultivation practices in Burkina Faso. pp 109 – 120. in: Mulongoy and Merckx R. (eds). Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. IITA / KU. Leuven – A Wiley – Sayce co-publication.Chichester.
- Pallo F.J.P., Asimi S., Assa A., Sedogo P.M., Sawadogo N. 2006 - Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. *Etude et gestion des sols* 13 (4) : 289-304.
- Pallo F.J.P., Sawadogo N., Sawadogo L., Sedogo P.M., Assa A. -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., Sawadogo N., Zombré N. P., Sédogo M.P. 2009 - Statut de la matière organique des sols de la zone nord - soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009 13(1):139-142.
- Saiz Jimenez C. 1996 – The chemical structure of humic substances : recent advances. pp 1-44. In: Piccolo A. (ed). Humic substances in terrestrial ecosystems. Elsevier. Amsterdam.
- Schnitzer M., Hindle C.A., Meglic M., 1986 – Supercritical gas extraction of alkanes and alkanolic acids from soils and humic materials. *Soil Sci. Soc. Am.J.50*: 326 – 331.
- Sombroek W.G., Nachtergaele F.O et Hebel A. 1993 – Amounts dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417 – 426.
- Sourabié, N., 1979 – Influence de la canne à sucre sur les sols de Bérégadougou (Haute – Volta). Cas particulier des facteurs de fertilité liés à la matière organique. Thèse Doct.3<sup>e</sup> cycle. Univ. Aix – Marseille III – 190 p.
- Spearman C., 1904 - The proof and measurement of association between two things. *Am. J.psych.*15: 72-101.
- Stevenson F.J. 1994 – Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2<sup>nd</sup> ed. John Willey and Sons. 496 p.
- Thompson M.L., Zhang H., Kazemi M., Sandor J.A, 1989 - Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. *Soil Science* 148 (4): 205-257.
- Vanlauwe B., Nwoke O.C., Sanginga N., Merckx R. (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, et Black I.A, 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.
- Ziegler F. 1989 - changes of lipid content and lipid composition in forest humus layers derived from Norway spruce. *Soil Biol. Biochem.* 21(2) : 237-243.
- Zombré N.P.1984 - Les sols développés sur roches à complexe d'altération montmorillonitique et kaolinique dans le centre sud de la Haute – Volta (caractère et fertilité). Thèse de Doct. 3<sup>e</sup> cycle. Univ. Aix-Marseille III- 362 p.