

LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL, UN INDICATEUR POTENTIEL DE LA DURABILITÉ DES SYSTÈMES DE CULTURE DANS LES ZONES TROPICALES SEMI-ARIDES ET SUBHUMIDES D'AFRIQUE DE L'OUEST ?¹

C. FELLER

ORSTOM, Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC)
BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France.

Résumé

En se fondant sur les synthèses agronomiques faites récemment pour les régions semi-arides à subhumides d'Afrique de l'Ouest et sur de nombreux résultats collectés par l'auteur sur les relations entre la matière organique des sols et les autres propriétés édaphiques, il est proposé, pour les systèmes à base de cultures annuelles, de considérer la teneur en carbone organique total (C ‰) comme un des indicateurs potentiels de la durabilité de ces systèmes. Les valeurs-seuils de C ‰ pour l'horizon 0-10 cm, qui sont dépendantes de la teneur en argile+limon fin (A+LF), sont calculées par l'équation : $C \text{ ‰} = 0,32 (A+LF \text{ ‰}) + 0,87$. Elles représenteraient les valeurs en deçà desquelles la dégradation des propriétés des sols peut être importante et partiellement irréversible (érosion en nappe), et la durabilité de la productivité végétale non assurée. En outre, quelques réflexions sont développées sur les voies de recherche d'autres types d'indicateurs à caractère organique ou biologique qui pourraient être plus pertinents que les seules teneurs en carbone organique total.

Mots-clés. Durabilité, Systèmes de culture, Indicateurs édaphiques, Matière organique du sol, Afrique de l'Ouest.

¹ Ce texte est aussi celui d'une conférence faite sous le même titre lors de l'Atelier SCOPE "Gestion durable des terres en zones semi-arides et subhumides de l'Afrique", tenu à Dakar (Sénégal) du 15 au 19 Novembre 1993. Il est actuellement soumis pour publication dans les Actes de cet Atelier.

Summary - Is soil organic matter a potential indicator of the sustainability of cropping systems in the African semi-arid and subhumid tropics ?

Recent agronomic studies made in West African semi-arid and subhumid tropics, and numerous results obtained by the author on the relationships existing between soil organic matter and different edaphic properties, suggest - in the absence of other well-identified and robust soil indicators - that the total soil organic carbon content (C‰) might be used as a potential indicator for the sustainability of the annual cropping systems. The threshold values of C‰ calculated for the surface horizon (0-10 cm) from the equation : $C‰ = 0.32 (A+LF \%) + 0,87$, with A+LF being clay+fine silt, would represent the values under which the degradation of soil properties would be important and partly non-reversible (sheet erosion), and the plant productivity would not be sustained. Besides, a few considerations on the possible use of other organic or biological indicators - more relevant than total soil organic carbon content - are presented.

Key-words - Sustainability, Cropping systems, Soil indicators, Soil organic matter, West Africa

I - INTRODUCTION

Comme le signalent SWIFT et WOOPER (1993), il existe presque autant de définitions du terme "Sustainability" (que nous traduirons ici par "Durabilité" en français) que de personnes qui en parlent. A titre d'exemple, ces auteurs rapportent sept définitions publiées entre 1987 et 1992. De manière générale, il apparaît que ce concept recouvre les deux aspects suivants :

- le maintien à long terme, malgré les fluctuations normales de l'écosystème, d'une stabilité de la productivité dans un contexte agro-socio-économique donné (SPENCER et SWIFT, 1992) ;

- la conservation des ressources (sols, eaux) qui sont à la base de la production végétale (FAO, 1989 ; YOUNG, 1989).

Pris sous ce double aspect, il est clair que la matière organique (MO) du sol, pourrait, *a priori*, constituer un indicateur potentiel (ou intervenir dans un indice plus complexe) de durabilité des systèmes de culture puisque, directement ou indirectement, à travers ses multiples fonctions, la MO est susceptible de jouer un rôle important dans de nombreuses propriétés édaphiques qui déterminent en partie la productivité végétale et la conservation des sols et des eaux.

On a souvent montré l'existence de relations étroites entre les teneurs en MO, ou en carbone organique (C), des horizons de surface de sols ferrugineux et ferrallitiques et leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Nous en donnons quelques exemples au Tableau I pour diverses situations d'Afrique de l'Ouest, sous une pluviométrie moyenne annuelle variant de 700 à 1400 mm. Par ailleurs, des valeurs-seuils des teneurs en MO des horizons de surface des sols sous cultures annuelles sont parfois proposées en relation avec leur érodibilité. C'est le cas de sols ferrallitiques du Brésil avec des valeurs-seuils en MO d'environ 1,5 à 2,0 % (LEPRUN, 1988) et de sols ferrallitiques argileux et de vertisols d'origine volcanique avec des valeurs-seuils d'environ 2,5 % (ALBRECHT et al., 1992).

Par contre, les corrélations positives entre teneur en MO et productivité végétale sont loin d'être des lois générales (SANCHEZ et MILLER, 1986 ; SANCHEZ et LOGAN, 1992) et lorsque de telles relations existent, il est souvent difficile d'interpréter simplement les variations de productivité observées comme étant dues au seul paramètre MO. Ainsi, pour la zone qui nous intéresse, CRETENET (1993, cet atelier) trouve que la productivité cotonnière dans des systèmes de culture à base coton ne dépend pas du niveau de MO des sols. Par contre, pour les systèmes à bases céréales ou céréales-légumineuses, il ressort, de la synthèse agronomique faite par PIERI (1989), que le maintien de la productivité végétale dépend plus ou moins étroitement des pratiques de fertilisation organique (fumiers, composts) ou organo-minérale et des niveaux

Tableau I- Paramètres statistiques des équations de régression multiple pour les corrélations du type :

Table I- Statistical parameters for multiple regression equations:

$$Y = aC + b(A+LF) + c \quad \text{avec } C \text{ en mg/g sol et } A+LF \text{ en g/100 g sol.}$$

n = nombre d'échantillons

r = coefficient de la corrélation multiple.

r1, r2 et r3 = coefficients des corrélations simples Y-C, Y-(A+LF) et C-(A+LF). Le rapport r1/r2 supérieur à 1 est indicateur d'une meilleure corrélation avec C qu'avec A+LF

R = Valeur théorique de r1, r2 ou r3 au risque de 1 %.

NS, S et HS = Non Significatif (5 %), Significatif (5 %) et Hautement Significatif (1 %).

Horizons 0-20 cm. Sols à argile 1:1. Situations "Afrique de l'Ouest" sauf pour Cm28, Nm28 et Pase (Afrique de l'Ouest + divers échantillons des Antilles et du Brésil).

Y	n	a	b	c	r	Signification	r1/r2	r1	r2	r3	R
pH _{H2O}	37	0,06	0,01	5,57	0,43	HS	1,2	0,42	0,35	0,74	0,42
pH _{KCl}	37	0,08	-0,02	5,14	0,35	NS	2,6	0,31	0,12	0,74	0,42
BE 7 (me %)	37	0,34	-0,08	2,19	0,57	HS	2,0	0,53	0,26	0,74	0,42
CEC7 (me %)	37	0,32	0,03	1,64	0,81	HS	1,3	0,81	0,64	0,74	0,42
P ₂ O _{5t} (‰)	37	0,037	0,001	0,064	0,69	HS	1,3	0,69	0,53	0,74	0,42
TRB (me %) **	27	0,52	0,07	7,82	0,6	HS	1,2	0,6	0,52	0,83	0,49
log(10*IS) ***	24	-0,02	-0,01	1,34	0,87	HS	1,8	-0,86	-0,48	0,39	0,5
pF _{2,5} (%)	22	0,14	0,45	-0,09	0,92	HS	0,8	0,77	0,92	0,81	0,54
pF _{4,2}	22	-0,03	0,19	0,41	0,88	HS	0,8	0,7	0,88	0,81	0,54
EU (%)	22	0,17	0,26	-0,49	0,92	HS	0,9	0,79	0,91	0,81	0,54
Cm28****	16	4,9	-3	1	0,91	HS	2,7	0,90	0,34	0,49	0,62
Nm28****	21	7,6	-0,46	38,6	0,89	HS	2,0	0,88	0,45	0,61	0,55
Pase****	23	4,51	-0,18	29,0	0,86	HS	1,9	0,85	0,46	0,61	0,53

* BE7 et CEC7 = Bases Echangeables et Capacité d' Echange Cationique à pH 7

** TRB = Réserves Totales en Bases (selon Herbillon, 1989)

*** Is = Indice d'Instabilité Structurale (selon Hénin et al., 1969)

**** Cm28 et Nm28 = Carbone et Azote minéralisés (µg/g sol) en 28 jours (selon Nicolardot, 1988), Pase = Activité phosphatasique (µg pNitrophénol/h/g sol) (selon Tabatabai, 1982)

des stocks organiques des sols, aussi bien dans le cadre d'agricultures traditionnelles (SIBAND, 1974) que pour des agricultures plus intensifiées (GANRY et al., 1974 ; SEDOGO, 1981 ; PICHOT et al., 1981 ; AZONTONDE, 1993). C'est ainsi que, généralement, la durabilité de la production végétale n'est plus assurée dès lors que les durées de jachère traditionnelle, dans les systèmes traditionnels, sont inférieures à cinq ans, ce qui est le cas actuel le plus fréquent, ou que la fertilisation minérale, dans les systèmes intensifiés, n'est pas associée à des amendements organiques. Parallèlement, divers travaux expérimentaux visant à simuler l'érosion des sols, donc à diminuer (entre autres) le niveau des stocks organiques, font généralement apparaître des effets dépressifs de l'érosion sur la productivité potentielle des sols (LAL, 1976 ; MBAGWU, 1985). Les résultats des travaux récents d'AZONTONDE (1993) au Bénin, sur parcelles à divers degrés d'érosion vont dans le même sens. Signalons que la teneur en MO du sol est prise en considération dans le modèle "QUEFTS" (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) pour la prévision de rendements potentiels de maïs pour des sols tropicaux à argile 1:1 (JANSSEN et al., 1990).

Ces quelques observations conduisent à l'idée que, la teneur en MO du sol étant un paramètre relativement intégrateur de l'état physique, chimique et biologique du sol, ce paramètre pourrait être associé à d'autres paramètres simples du milieu dans la recherche d'indicateurs de durabilité de la productivité végétale et de la conservation de la ressource-sol pour la zone tropicale semi-aride à subhumide d'Afrique de l'Ouest. Dans ces conditions, il faut s'interroger sur les valeurs-seuils à prendre en considération dans ce type de démarche.

Cette interrogation constitue le principal sujet de cet article. Enfin, quelques réflexions seront aussi développées sur l'intérêt de quelques autres paramètres susceptibles de servir d'indicateurs de l'état organique et/ou biologique du sol.

Dans toute la suite de ce texte, les teneurs en MO seront exprimées à travers les teneurs en carbone organique. Par simplification de langage, les sols étudiés étant non carbonatés, nous assimilerons le carbone organique totale au carbone total (C).

II - RECHERCHE DE VALEURS-SEUILS EN CARBONE DU SOL EN VUE DE L'ÉTABLISSEMENT D'INDICATEURS DE DURABILITÉ DES SYSTÈMES DE CULTURE

A - Critères pris en considération

Deux types de critères doivent être envisagés : ceux qui reflètent la durabilité de la productivité végétale, ceux qui reflètent de manière non irréversible la conservation de la ressource-sol.

Compte-tenu des observations faites ci-dessus sur les relations "Teneurs en C -Productivité végétale" il est clair que des valeurs-seuils en C pourront être déduites des parcelles sous cultures annuelles de longue durée, fertilisées ou non, mais n'ayant reçu aucune fumure organique ou n'intégrant pas dans la rotation culturale des jachères de moyenne durée (environ 5 ans). Ces parcelles représentant, hors phénomène d'érosion, les valeurs effectivement les plus faibles en C que l'on obtient pour les horizons de surface (cf. ci-dessous), toutes les autres propriétés des sols liées significativement aux teneurs en C (complexe d'échange, stabilité structurale, tests d'activité biologique globale) seront aussi à leur niveau le plus bas.

Par ailleurs, la faible couverture du sol en début de saison des pluies en région semi-aride favorise l'érosion en nappe des sols avec appauvrissement en surface d'éléments fins (argile+limon fin, A+LF, taille inférieure à 20 μm). Or ceux-ci sont généralement riches en C et en éléments nutritifs (N, P, Bases) (ROOSE, 1977). Ces pertes sont irréversibles. Il est donc essentiel de pouvoir déterminer les causes de la faiblesse du stock organique des parcelles cultivées :

- soit, trop faible niveau des restitutions organiques et donc déséquilibre du bilan minéralisation - humification. L'appauvrissement n'est pas irréversible. Le niveau du stock organique peut être augmenté par une politique adaptée de gestion des matières organiques ;
- soit, appauvrissement par érosion en nappe, auquel cas une partie de l'appauvrissement constaté est difficilement réversible, et, dans ces conditions, la lutte contre cette forme d'érosion est la première mesure à prendre.

B - Résultats

Pour la détermination des valeurs-seuils de C au dessous desquelles la durabilité de la productivité végétale et la conservation de la ressource-sol pourraient ne pas être assurées, nous avons choisi dans la zone semi-aride à subhumide d'Afrique de l'Ouest, pour des pluviométries annuelles variant de 700 à 1400 mm, différentes parcelles regroupées en trois séries :

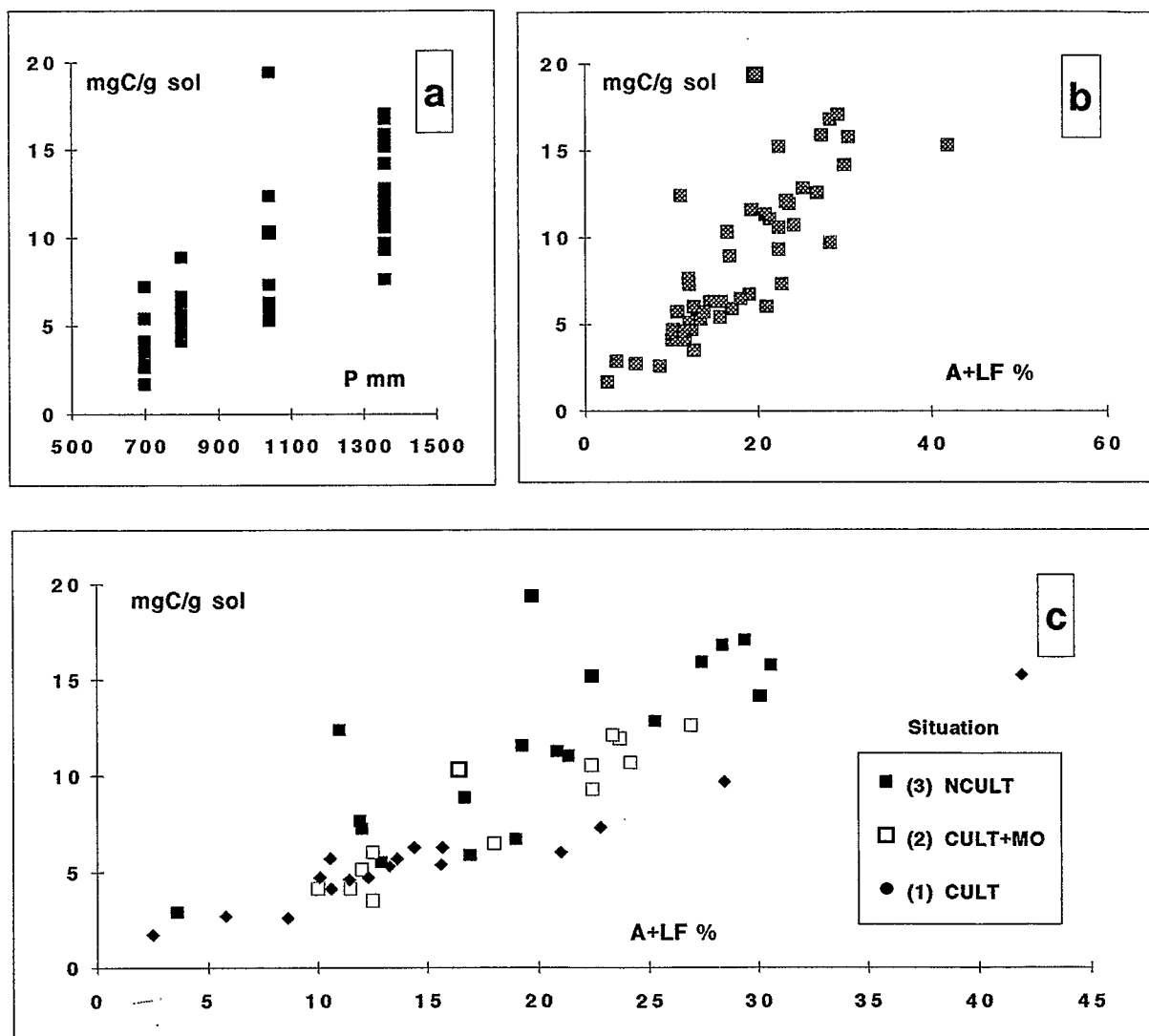
- *série 1* : 17 parcelles en cultures annuelles de durée supérieure à 5 ans, souvent supérieure à 10, et ne recevant pas ou peu d'amendements organiques ($< 3 \text{ t/ha/an}$), avec des durées de jachère inférieures à 3 ans, en positions topographiques telles (pentes inférieures à 1 %) que les phénomènes d'érosion en nappe soient limités. Ces parcelles sont dites en cultures continues et symbolisées par "CULT" ;
- *série 2* : 13 parcelles cultivées avec amendements organiques d'origines animale ou végétale ($> 5 \text{ t/ha/an}$) et/ou intégrant des jachères de durée moyenne (environ 5 ans). Ces parcelles sont symbolisées par "CULT+MO".

Figure 1- Relations entre la teneur en carbone des sols (C), la pluviométrie annuelle (P) et la texture (teneur en argile+limon fin, A+LF) :

Figure 1- Relationships between carbon content (C), annual rainfall (P) and texture (clay+fine silt, A+LF) :

- (a) relation carbone - pluviométrie ,
- (b) relation carbone - texture, tous échantillons confondus,
- (c) relation carbone - texture pour des situations non cultivées (NCULT, savane, forêt, jachère ancienne), sous culture continue (CULT) et sous culture avec apports organiques sous forme d'amendements ou de jachères (CULT+MO).

Horizons de surface 0-10 cm. Sols à argile 1:1 d' Afrique de l'Ouest.



- série 3 : 19 parcelles sous savane, forêt ou jachère ancienne, dites non cultivées et symbolisées par "NCULT" ;

Tous les sols étudiés sont des sols bien drainés, à argile 1:1 (ferrugineux et ferrallitiques), et à horizons de surface (0-20 cm) peu ou non gravillonnaires. Toutes les parcelles ont été prélevées de façon identique par horizon 0-10, 10-20, 20-40 cm (6 à 12 répétitions). L'intervalle de confiance sur les teneurs moyennes en C est d'environ 10 %. Les situations sont décrites dans FELLER et al. (1991a).

Toutes parcelles confondues, il apparaît (figure 1b) une corrélation très étroite ($r = 0,814$) entre les teneurs en C des horizons 0-10 cm et leur teneur en éléments fins (A+LF). Pour la collection étudiée ($n = 49$), la corrélation peut être améliorée ($r = 0,854$) avec la prise en compte de la pluviométrie moyenne annuelle Pmm (figure 1a) dans une corrélation multiple du type $C = f(Pmm, A+LF)$. Nous retrouvons là des résultats similaires à ceux publiés par JONES (1973) pour des sols de la même zone.

Les corrélations $C = f(A+LF)$ restent hautement significatives quand on distingue les trois séries de parcelles CULT, (droites 1 ou 1'), CULT+MO (droites 2 ou 2') et NCULT (droites 3 ou 3'). Les équations sont les suivantes :

droite 1 :	$C \% = a (A+LF \%) + b$	avec $a = 0,32$; $b = 0,87$; $r = 0,97$	ou encore,
droite 1' :	$C \% = a' (A+LF \%)$	avec $a' = 0,37$	$r = 0,96$
droite 2 :	$C \% = a (A+LF \%) + b$	avec $a = 0,53$; $b = -1,43$; $r = 0,93$	ou encore,
droite 2' :	$C \% = a' (A+LF \%)$	avec $a' = 0,46$	$r = 0,92$
droite 3 :	$C \% = a (A+LF \%) + b$	avec $a = 0,48$; $b = 1,78$; $r = 0,77$	ou encore,
droite 3' :	$C \% = a' (A+LF \%)$	avec $a' = 0,54$	$r = 0,76$

La droite 1 (ou 1') représente l'ensemble des points des parcelles cultivées en cultures annuelles, sans restitutions organiques et dans des conditions d'érosion en nappe limitée. Compte tenu du fait que les teneurs en C données par cette équation correspondent à des parcelles pour lesquelles la durabilité de la productivité végétale n'est plus nécessairement assurée, nous admettrons que la droite 1 définit l'ensemble des valeurs-seuils à prendre en considération pour l'établissement de critères de durabilité de la production végétale. Par ailleurs, pour une teneur en éléments fins (A+LF) donnée :

- (i) tout point situé *sur* la droite 1, correspond à un état fortement dégradé du sol aussi bien sur les plans chimique, physique que biologique. Cet état est atteint en moins de 5 ans

pour les horizons de surface sableux et entre 5 et 10 ans pour les horizons de surface sablo-argileux,

- (ii) tout point situé *sous* la droite 1, avec une teneur en carbone très faible, correspond à un sol appauvri par érosion en nappe par suite d'exposition de particules fines généralement riches en C (ROOSE, 1977). La droite 1 définit donc l'ensemble des valeurs-seuils au dessous desquelles la conservation de la ressource-sol est fortement compromise.

La droite 1 pourrait donc représenter l'ensemble des valeurs-seuils en C recherchées, puisque cet ensemble répond aux deux critères mentionnés précédemment : la durabilité de la productivité végétale et la conservation de la ressource-sol. Cette droite permet, pour les sols ferrugineux et ferrallitiques, grâce au paramètre texture, de poser un diagnostic à toutes les échelles spatiales : de la toposéquence aux comparaisons régionales.

Les valeurs des situations CULT+MO comprises entre les droites 1 (situations CULT) et 3 (situations NCULT) correspondent à un état organique satisfaisant du sol. Cet état est atteint, en station expérimentale, et pour des systèmes intensifiés, par des apports répétés et importants (5 à 10 t MS/ha/an) pendant 4 à 5 ans de fumiers ou de composts, et, en système traditionnel, par des jachères spontanées d'environ 5 ans ou le parcage d'animaux tournant sur les parcelles 1 à 2 années sur 3 (BACYE, 1993 ; FELLER non publié) .

De manière totalement indépendante, il est intéressant de constater que PIERI (1989), pour des sols de savane de l'Afrique de l'Ouest, propose comme *indicateur de "sensibilité d'une terre à la déstructuration"*, le paramètre "St" tiré de l'équation :

$$MO \% = St \times (A+L) \% / 100$$

avec A+L représentant la "somme argile+limon" (particules < 50 µm)

Pour les échantillons étudiés, les limons grossiers (taille 20-50 µm) sont généralement très faiblement représentés, si bien, qu'en première approximation, on peut assimiler A+L de l'équation de PIERI à A+LF des équations données ci-dessus. Après un changement d'unité permettant de passer de MO % aux teneurs en carbone C ‰, l'équation de PIERI devient :

$$C \text{ ‰} = St' \times (A + L \%)$$

et les valeurs de la pente (St') peuvent alors être comparées à celles obtenues (coefficients a') par nous-mêmes pour les équations des droites 1', 2' et 3'.

Selon PIERI, pour des horizons de surface à teneurs en A+L variant de 0 à 15 % :

- lorsque St' est inférieur à 0,29 ($St < 5 \%$), l'horizon de surface est déstructuré et présente une grande sensibilité à l'érosion ;
- lorsque St' est supérieur à 0,52 ($St > 9 \%$), l'horizon ne présente pas de risque immédiat de déstructuration.

La valeur de St' égale à 0,29 est légèrement plus faible que la valeur de la pente a' (0,37) qui conduit au calcul des valeurs-seuils de carbone proposées ici. Ceci est probablement dû à l'existence de parcelles plus ou moins fortement érodées dans les situations PIERI. La valeur St' de 0,52 est intermédiaire entre les valeurs des pentes a' des droites 2' (0,46) et 3' (0,57) correspondant respectivement aux valeurs susceptibles d'être atteintes en sol cultivé par une gestion satisfaisante de la MO du sol ($a' = 0,46$) et les valeurs maximum trouvées pour les situations sous savane, forêt ou jachère ancienne ($a' = 0,57$).

Ces résultats indépendants se confortent mutuellement et la droite 1 peut servir pour le calcul de valeurs-seuils de carbone dans une optique de recherche d'indicateurs de durabilité des systèmes de culture des zones semi-arides à subhumides d'Afrique de l'Ouest. La gamme de texture concernée ($A+LF \%$ de 5 à 40 ou $A \%$ de 3 à 20) est très représentative de la majorité des sols ferrugineux et ferrallitiques d'Afrique de l'Ouest. Rappelons que ces variations se rencontrent aussi bien au niveau de la toposéquence qu'à des échelles régionales.

III - RÉFLEXIONS SUR D'AUTRES INDICATEURS DE L'ÉTAT ORGANIQUE OU BIOLOGIQUE DU SOL

Un certain nombre de modifications des propriétés édaphiques, dans le sens de la dégradation ou de la restauration des sols, peuvent apparaître rapidement à court terme (0 à 3 ans) sans que, pour autant, des variations significatives soient enregistrées pour la teneur en C de l'horizon de surface. C'est le cas, par exemple, des effets très significatifs des jachères de courte durée sur la stabilité de la structure (MOREL et QUANTIN, 1972). On invoque alors soit l'effet de compartiments organiques agrégeants et à turn-over rapide, soit les effets des activités fauniques, les vers de terre en particulier, activités fortement favorisées sous jachères ou prairies dans les situations à pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 800 à 1000 mm et à saison sèche n'excédant pas 4 à 5 mois (LAVELLE, 1983). Dans ces conditions, il serait bien évidemment préférable d'utiliser, à la place de l'indicateur "carbone total", soit un indicateur "faune", soit un indicateur basé sur l'analyse d'un compartiment organique spécifique à tel ou tel processus de dégradation ou de réhabilitation. Ainsi, SPARLING (1991), cité par SWIFT et WOOPER (1993), indique que la mesure de la biomasse microbienne (BM) est plus sensible que celle du carbone total pour déceler des tendances de dégradation ou de réhabilitation. Un travail récent de CHAUSSOD et al. (1992) conforterait cette idée.

Il est évident que les recherches doivent se poursuivre dans cette voie, car, actuellement, on dispose de peu de *relations quantifiées* entre des indicateurs biologiques potentiels, autres que le carbone total, et les propriétés édaphiques intervenant particulièrement dans la conservation des sols et la productivité végétale. A ce sujet, deux types de recommandation nous paraissent devoir être soulignés :

1) l'indicateur doit être efficace dans l'échelle de temps 0 à 5 ans souvent imprécisément couverte par les variations de carbone total. Ceci implique que l'indicateur proposé ne soit pas trop sensible aux variations saisonnières ou au mode de stockage et préparation des échantillons. Dans ce sens, il n'est pas certain que la seule mesure de la biomasse microbienne (BM) soit adaptée. La prise en compte d'un compartiment plus large et à turn-over plus lent (BM + métabolites, selon CHAUSSOD et al., 1992) pourrait effectivement être envisagée. Dans le même ordre d'idées, nous avons montré par ailleurs (FELLER et al., 1991a) que la fraction "débris végétaux du sol", constituée des MO figurées associées aux fractions sableuses, et facilement séparable par simples tamisages du sol sous eau, représentait, à court et moyen termes, la principale cause de variation des teneurs en carbone total dans ces sols tropicaux à texture grossière. Dans les cas des sols les plus sableux, comme les sols ferrugineux peu lessivés, cette fraction représente plus de 80 % du carbone facilement minéralisable, et à ce titre peut être considérée comme la principale réserve énergétique pour la microflore, et environ 40 % de l'azote facilement minéralisable (FELLER, 1993). Les quelques estimations, en milieu tropical, des taux de renouvellement *in situ* de cette fraction organique, déterminés à l'aide du traceur ^{13}C en abondance naturelle, conduisent effectivement à des temps moyens de résidence moyens à faibles, d'environ 10 ans (CERRI et al., 1985 ; MARTIN et al., 1990 ; DESJARDINS, 1991 ; FELLER et al., 1991b), donc largement inférieurs à celui du carbone total (environ 50 ans), mais supérieur à celui du compartiment microbien (environ 0,25 ans, DUXBURY et al., 1989). L'intérêt du compartiment "débris végétaux" (ou "particulate organic matter" selon la définition de CAMBARDELLA et ELLIOTT, 1992) est souligné aussi par SWIFT et WOOPER (1993) ;

2) en terme de corrélation "indicateur-propriété étudiée", l'indicateur choisi, autre que le carbone total, doit permettre d'établir des coefficients de corrélation, avec les propriétés étudiées, *nettement supérieurs* à ceux obtenus avec les seuls indicateurs carbone ou azote totaux. C'est ainsi que pour la zone concernée, il faut poursuivre les recherches sur des indicateurs de fertilité azotée tels que les potentiels de minéralisation de l'azote ou les différentes formes de l'azote organique du sol, telles que celles obtenues par hydrolyse acide (EGOUMENIDES et al, 1987), car ces indicateurs sont souvent fortement corrélés à N total (DJEGUI, 1992 ; WANEUKEM et GANRY, 1992). La même remarque s'applique à la fraction "débris végétaux" du sol évoquée ci-dessus.

IV - CONCLUSION

Pour la zone tropicale semi-aride à subhumide d'Afrique de l'Ouest, la teneur en carbone total des horizons de surface devrait pouvoir servir, parmi d'autres paramètres simples à collecter, d'indicateur de durabilité pour les systèmes de culture annuelle à faibles niveaux d'intrants, mais aussi pour un certain nombre de systèmes intensifiés de la région. Des valeurs-seuils des teneurs en carbone des horizons 0-10 cm, en deçà desquelles existent des risques à la fois de dégradation des sols et de non-durabilité de la productivité végétale, sont proposées. Ces valeurs sont calculées à partir des équations :

$$C \text{ ‰} = 0,32 (A+LF \text{ ‰}) + 0,9 \quad \text{ou encore} \quad C \text{ ‰} = 0,37 (A+LF \text{ ‰})$$

pour des valeurs de A+LF% variant de 5 à 40.

Ces propositions sont à considérer, bien évidemment, avec grande prudence. Enfin, comme il est souligné dans les conclusions et recommandations du groupe 3 de cet Atelier, un important effort de recherche doit être développé dans le domaine des "indicateurs biologiques".

BIBLIOGRAPHIE

ALBRECHT, A., BROSSARD, M., CHOTTE, J.L., & FELLER, C. - 1992 - Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 27. Sous presse.

AZONTONDE, H. A., - 1993 -. Dégradation et restauration des terres de barre au Sud Bénin. Comm. 10^{ème} Journées Réseau Erosion. 15-18 Sept. 1993. ORSTOM, Montpellier, Rapp. mult., 22 p.

BACYE, B.- 1993 - *Influence des systèmes de culture sur le statut organique des sols et la dynamique de l'azote en zone soudano-sahélienne*. Thèse Doct. Univ., Aix Marseille III, 188 p.

CAMBARDELLA, C.A., & ELLIOTT, E.T. - 1992 - Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Sci. Soc. Am. J., 56 : 777-783.

CERRI, C. C., FELLER, C., BALESSENT, J., VICTORIA, R., & PLENECASSAGNE, A. - 1985 - Application du traçage isotopique naturel en ¹³C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. C. R. Acad. Sc. Paris, 9, Sér. 2 (t. 300) : 423-428.

CHAUSSOD, R., ZUVIA, M., BREUIL, M.C., & HETIER, J.M. - 1992 - Biomasse microbienne et "statut organique" des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 27. Sous presse.

CRETENET, M. - 1993 - Conception de systèmes de culture durables. L'expérimentation en amont et en aval de l'enquête dans l'étude de la fertilité des sols. (Cet Atelier).

DESJARDINS, T. - 1991 - *Variations de la distribution de la matière organique (carbone total et ^{13}C) dans les sols ferrallitiques du Brésil. Modifications consécutives à la déforestation et à la mise en culture en Amazonie orientale.* Thèse Doct., Univ. Nancy I, 137 p. + Annexes.

DJEGUI, N.- 1992 - *Influence des systèmes de cultures sur le statut organique (particulièrement sur la dynamique de l'azote) des sols sur terres de barre du Sud-Bénin.* Thèse Doct. I.N.P.T. Toulouse, 191 p.

DUXBURY, J.M., SMITH, M. & DORAN, J.W.- 1989 - Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. Chap. 2, In D.C. Coleman, J.M. Oades and G. Uehara (eds.): *"Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems"*. NifTAL Project, Hawai Univ., 249 p.

EGOUMENIDES, C., PIOMBO G., SERVAT, D. & MARGER, J.L. - 1990. Etude des fractions granulométriques, des fractions organiques de l'azote et du rapport C/N dans un sol ferrallitique cultivé du Brésil. L'Agron. Trop., 45: 145-147.

FAO - 1989 - *Sustainable Agricultural Production : Implication for International Agricultural Research. Technical Advisory Committee, CGIAR.* FAO Research and Technical Paper No. 4. Rome, Italy : FAO.

FELLER, C., FRITSCH, E., POSS, R., & VALENTIN, C. - 1991a - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 26 (1) : 25-36.

FELLER, C., CASABIANCA, H., & CERRI, C. C. - 1991b - Renouvellement du carbone associé aux différentes fractions granulométriques d'un sol ferrallitique forestier (Brésil) à la suite du défrichement et de cultures continues de canne à sucre. Etude avec ^{13}C en abondance naturelle. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 26 (4) : 365-370.

- FELLER, C.- 1993. - Organic inputs, soil organic matter and functional soil organic compartments in low activity clay soils in tropical zones. pp. 77-88. In: K. Mulongoy et R. Merckx (ed.) "*Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*". J. Wiley-Sayce, Chichester.
- GANRY, F., BIDEAU, J., & NICOLI, J. - 1974 - Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle d'un mil Souna III. *Agron. Trop.*, 29 (10) : 1006-1015.
- HENIN, S., GRAS, F. & MONNIER, G.- 1969 - *Le profil cultural*. 2ème éd., Masson, Paris, 332 p.
- HERBILLON, A.J.,- 1989. - Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soils. pp. 39-48, In : "*Proc. 8th Int. Soil Classification Workshop*", Rio de Janeiro.
- JANSSEN, B.H., GUIKING, F.C.T., van der EIJK, D., SMALING, E.M.A., WOLF, J., & van REULER, H. - 1990 - A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46 : 299-318.
- LAL, R. - 1976 - Soil erosion on an alfisol in Western Nigeria. *Geoderma*, 16 : 363-431.
- LAVELLE, P. - 1983 - The soil fauna of tropical savannas. I. The community structure. II. The earthworms. pp.471-504, In "*Tropical Savannas*". F. Bourière (ed.), Elsevier Publ., Amsterdam.
- LEPRUN, J. C. - 1988 - Matière organique et conservation des sols. Exemples brésiliens. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 24 (4) : 333-395.
- MARTIN, A., MARIOTTI, A., BALESSENT, J., LAVELLE, P., & VUATTOUX, R. - 1990 - Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ¹³C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22 : 517-523.
- MBAGWU, J. S. C. - 1985 - Subsoil productivity of an ultisol in Nigeria as affected by organic wastes and inorganic fertilizer amendments. *Soil Sci.*, 140 (6) : 436-441.
- MOREL, R., & QUANTIN, P.- 1972 - Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (République Centrafricaine). *L'Agron. Trop.*, 27: 667-739.

NICOLARDOT, B.- 1988 - Evolution du niveau de biomasse microbienne du sol au cours d'une incubation de longue durée : relations avec la minéralisation du carbone et de l'azote organique. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 25: 287-304.

PICHOT, J., SEDOGO, M.P., POULAIN, J.F. & ARRIVETS, J., - 1981 - Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. *Agron. Trop.*, 36: 122-133.

PIERI, C.- 1989 - *Fertilité des terres de savanes*. Ministère de la Coopération-CIRAD (eds.), Paris, 444 p.

ROOSE, E. - 1977 - *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest*. T.D. ORSTOM n° 78, ORSTOM - Paris, 108 p.

SANCHEZ, P. A., & MILLER, R. H. - 1986 - Organic matter and soil fertility management in acid soils of the tropics. *Trans. 13th Congr. Int. Soil Sci.*, 6 : 609-625.

SANCHEZ, P. A., & LOGAN, T. J. - 1992 - Myths and scene about the chemistry and fertility of soils in the tropics. pp. 35-46. *In* R. Lal, & P.A. Sanchez (eds.). "*Myths and science of soils of the tropics*". ASA Spec. Publ. N° 29, SSSA-ASA, Madison (WI), 185 p.

SEDOGO, M. P. - 1981 - *Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride*. Thèse Doct. Ing. Sci. Agron. I.N.P.L., Univ. Nancy, 158 p.

SIBAND, P. - 1974 - Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *l'Agron. Trop.*, 29 : 1228-1248.

SPARLING, G.D. - 1991 - Organic matter carbon and microbial biomass carbon as indicators of sustainable land use. *In* C.R. Elliot, M. Latham, and J. Dumanski. (eds) *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Vol. 2 : Technical Papers*. IBSRAM Proceedings No. 12., IBSRAM, Bangkok, Thailand.

SPENCER, D.S.C., & SWIFT, M.J. - 1992 - Sustainable agriculture : Definition and measurement. *In* K.Mulongoy, M. Gueye, and D.S.C. Spencer (eds) *Biological Nitrogen Fixation and Sustainability of Tropical Agriculture*. John Wiley, Chichester, UK.

SWIFT, M.J., & WOOMER, P. - 1993 - Organic matter and the sustainability of agricultural systems : definition and measurement. pp. 3-18. *In* K. Mulongoy et R. Merckx (eds.). "*Soil*

organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture". IITA/K.U. Leuven. Wiley-Sayce Co-Publication, Chichester, UK.

TABATABAI, M.A.- 1982 - Soil Enzymes. pp. 903-947, In A.L. Page, R.H. Miller et D.R. Keeney (eds.): "*Methods of Soil Analysis*". Part. 2. Agronomy 9, 2nd Edition,, ASA-SSA, Madison, WI.

WANEUKEM, V., & GANRY, F. - 1992 - Relations entre les formes d'azote organique du sol et l'azote absorbé par la plante dans un sol ferrallitique du Sénégal. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 27. Sous presse.

YOUNG, A. - 1989 - *Agroforestry for Soil Conservation*. Wallingford, CAB International/ICRAF, UK/Nairobi, Kenya.

Tableau I- Paramètres statistiques des équations de régression multiple pour les corrélations du type :

Table I- Statistical parameters for multiple regression equations:

$$Y = aC + b(A+LF) + c \quad \text{avec } C \text{ en mg/g sol et } A+LF \text{ en g/100 g sol.}$$

n = nombre d'échantillons

r = coefficient de la corrélation multiple.

r1, r2 et r3 = coefficients des corrélations simples Y-C, Y-(A+LF) et C-(A+LF). Le rapport r1/r2 supérieur à 1 est indicateur d'une meilleure corrélation avec C qu'avec A+LF

R = Valeur théorique de r1, r2 ou r3 au risque de 1 %.

NS, S et HS = Non Significatif (5 %), Significatif (5 %) et Hautement Significatif (1 %).

Horizons 0-20 cm. Sols à argile 1:1. Situations "Afrique de l'Ouest" sauf pour Cm28, Nm28 et Pase (Afrique de l'Ouest + divers échantillons des Antilles et du Brésil).

Y	n	a	b	c	r	Signification	r1/r2	r1	r2	r3	R
pH _{H2O}	37	0,06	0,01	5,57	0,43	HS	1,2	0,42	0,35	0,74	0,42
pH _{KCl}	37	0,08	-0,02	5,14	0,35	NS	2,6	0,31	0,12	0,74	0,42
BE 7 (me %)	37	0,34	-0,08	2,19	0,57	HS	2,0	0,53	0,26	0,74	0,42
CEC7 (me %)	37	0,32	0,03	1,64	0,81	HS	1,3	0,81	0,64	0,74	0,42
P ₂ O _{5t} (‰)	37	0,037	0,001	0,064	0,69	HS	1,3	0,69	0,53	0,74	0,42
TRB (me %) **	27	0,52	0,07	7,82	0,6	HS	1,2	0,6	0,52	0,83	0,49
log(10*IS) ***	24	-0,02	-0,01	1,34	0,87	HS	1,8	-0,86	-0,48	0,39	0,5
pF _{2,5} (%)	22	0,14	0,45	-0,09	0,92	HS	0,8	0,77	0,92	0,81	0,54
pF _{4,2}	22	-0,03	0,19	0,41	0,88	HS	0,8	0,7	0,88	0,81	0,54
EU (%)	22	0,17	0,26	-0,49	0,92	HS	0,9	0,79	0,91	0,81	0,54
Cm28 ****	16	49	-3	1	0,91	HS	2,7	0,90	0,34	0,49	0,62
Nm28 ****	21	7,6	-0,46	38,6	0,89	HS	2,0	0,88	0,45	0,61	0,55
Pase ****	23	4,51	-0,18	29,0	0,86	HS	1,9	0,85	0,46	0,61	0,53

* BE7 et CEC7 = Bases Echangeables et Capacité d' Echange Cationique à pH 7

** TRB = Réserves Totales en Bases (selon Herbillon, 1989)

*** Is = Indice d'Instabilité Structurale (selon Hénin et al., 1969)

**** Cm28 et Nm28 = Carbone et Azote minéralisés (µg/g sol) en 28 jours (selon Nicolardot, 1988), Pase = Activité phosphatasique (µg pNitrophénol/h/g sol) (selon Tabatabai, 1982)

Figure 1- Relations entre la teneur en carbone des sols (C), la pluviométrie annuelle (P) et la texture (teneur en argile+limon fin, A+LF) :

Figure 1- Relationships between carbon content (C), annual rainfall (P) and texture (clay+fine silt, A+LF) :

- (a) relation carbone - pluviométrie ,
- (b) relation carbone - texture, tous échantillons confondus,
- (c) relation carbone - texture pour des situations non cultivées (NCULT, savane, forêt, jachère ancienne), sous culture continue (CULT) et sous culture avec apports organiques sous forme d'amendements ou de jachères (CULT+MO).

Horizons de surface 0-10 cm. Sols à argile 1:1 d' Afrique de l'Ouest.

