

Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures

Narcisse DJEGUI (1), Paul de BOISSEZON (2) et Évelyne GAVINELLI (2)

(1) Station de recherches sur le palmier à huile, B.P. 1, Pobè (République du Bénin).

(2) Centre Orstom, B.P. 5045, 34032 Montpellier cedex 1 (France).

RÉSUMÉ

On compare les stocks de matières organiques (C, N) dans les profils de trois sols rouges ferrallitiques appauvris en argile sur terres de barre sous forêt et sous différents systèmes de cultures : palmiers à huile, cultures vivrières annuelles et plantations forestières.

La diminution des teneurs en matière organique par rapport aux sols forestiers est marquée dans l'ensemble du profil des sols cultivés qui ne présentent pas de brusques gradients texturaux. Dans le cas contraire, elle n'est importante que dans les horizons supérieurs.

Il existe une forte hétérogénéité spatiale des teneurs en matière organique à mettre en relation :

- avec les façons culturales propres aux cultures vivrières conduites en billons ;*
- avec le mode de plantation en lignes et la restitution en andains des matières végétales résultant de l'élagage des palmiers à huile qui entraînent un développement différent des systèmes racinaires sous les « ronds » autour des palmiers, sous les andains et dans les interlignes.*

La quantification du stock organique des sols doit donc s'appuyer sur un échantillonnage raisonné des volumes de sols identifiés au préalable sur des profils culturaux et représentatifs de différentes zones dues aux techniques culturales.

Avec la mise en culture, la baisse des stocks organiques totaux concerne surtout les débris d'origine végétale de taille supérieure à 50 μm (C/N compris entre 12 et 15) et affecte peu, en particulier, les matières organiques associées aux argiles.

MOTS CLÉS : Matière organique – Fractionnement granulométrique – Sols ferrallitiques – Texture – Systèmes de culture.

ABSTRACT

ORGANIC MATTER LEVELS OF FERRALLITIC SOILS UNDER DIFFERENT CROPPING SYSTEMS IN THE SOUTH OF BENIN

The objective of this study was to compare the organic matter levels (C, N) encountered in three ferrallitic soils low in clay (designated by «terre de barre»), which developed under forests or were brought under cultivation (oil palm, food crops and tree plantation).

Compared to forest soils, cultivated soils that did not exhibit a sharp textural gradient showed a marked decrease of the organic matter content in the whole profiles. Otherwise, the most important decline in organic matter content occurred in the upper horizons.

There was a significant spatial heterogeneity amongst the organic matter contents; this is to be related to:

- the tillage practices adopted for food crops grown in ridges,*
- the row planting system and the incorporation of plant residues collected in windrows after pruning of oil palm; these residues had a marked effect on the development of the root system.*

Therefore, in order to determine the quantity of organic matter in the soil, it is important to rely on a reasoned sub-sampling of soil volumes previously identified on soil profiles.

Upon cultivation, the decrease of C and N affected essentially the plant residues > 50 μm ($12 < \text{C/N} < 15$) and very little the organic materials associated with the clay fractions.

KEY WORDS: Organic matter – Particle-size fractionation – Ferrallitic soils – Texture – Cropping systems.

INTRODUCTION

Le défrichement et la mise en culture des sols tropicaux provoquent généralement une brusque diminution des teneurs en matière organique, une variation rapide et importante de diverses propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et une baisse de la productivité végétale (DABIN, 1956 ; FAUCK *et al.*, 1969 ; SIBAND, 1974 ; SANCHEZ *et al.*, 1982).

La comparaison et l'évolution dans le temps des stocks de matières organiques du sol sous végétation naturelle et sous différents types ou successions culturales montrent qu'à l'influence des systèmes de cultures s'ajoutent de nombreux facteurs édaphiques et pédoclimatiques qui interfèrent avec les pratiques culturales dans le fonctionnement des écosystèmes agricoles (LAL et KANG, 1982).

Parmi les facteurs édaphiques qui interviennent dans cette évolution, nous retiendrons principalement le type de sol et particulièrement la texture (de BOISSEZON, 1973 ; FELLER *et al.*, 1991 b), le pH et la réserve minérale (ALLISON, 1973). Ces caractéristiques du sol conditionnent le type d'humus, la nature et l'importance des complexes organominéraux plus ou moins stables (MARTIN et HAIDER, 1986) et l'organisation (agrégation, porosité) des horizons humifères (HUMBEL *et al.*, 1977).

Le pédoclimat (température et humidité) conditionne la production végétale et donc l'apport des matières végétales ainsi que la vitesse d'évolution des résidus végétaux et des matières organiques du sol (SANCHEZ *et al.*, 1982).

Pour étudier l'influence des cultures annuelles ou pérennes sur le stock organique des sols du Sud-Bénin, nous avons donc essayé de minimiser les interactions avec les facteurs édaphiques et pédoclimatiques. Les parcelles étudiées ont été choisies sur des sols analogues, en position topographique identique, avec seulement des différences limitées du profil textural, du climat et du passé cultural.

Les écosystèmes qui ont été comparés constituent néanmoins un échantillonnage assez représentatif des situations agricoles les plus courantes de ces plateaux de faible altitude sur terres de barre. Ces sols sont actuellement soumis à une exploitation de plus en plus intensive avec réduction de la jachère pour les cultures vivrières et une fertilisation organique et/ou minérale très limitée, voire inexistante, même pour les plantations industrielles de palmiers à huile. Il s'ensuit une baisse des rendements qui s'accompagne d'une diminu-

tion des résidus végétaux laissés dans et sur les sols (WERTZ, 1979 ; PFEIFFER, 1988). Enfin, la diminution des restitutions organiques est aggravée par l'exportation de plus en plus fréquente d'une partie des résidus végétaux qui sont utilisés comme combustible domestique.

L'objectif de cette étude est de comparer les stocks de carbone et d'azote présents dans un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous végétation naturelle forestière et sous différents systèmes de cultures : palmier à huile, cultures vivrières annuelles et plantations forestières. La caractérisation de la matière organique est faite par un fractionnement granulométrique.

LOCALISATION DES SITES ÉTUDIÉS ET CLIMAT

Cette étude a été conduite dans la partie sud du Bénin dans une zone constituée de plateaux de faible altitude et peu accidentée sur terres de barre. Trois sites échelonnés d'est en ouest (site 1 : Pobè ; site 2 : Akpadanou et site 3 : Ouidah) ont été choisis pour comparer l'influence de différents systèmes de cultures (tabl. I).

Le climat

Sur l'ensemble des trois sites, le climat est de type « soudano-guinéen ». Il est caractérisé par l'alternance de deux saisons sèches et de deux saisons pluvieuses d'inégales durées. Les hauteurs pluviométriques augmentent d'ouest en est ; en moyenne sur les dix dernières années, elles sont de 850 mm à Ouidah, de 1 100 mm à Akpadanou et 1 200 mm à Pobè. La température moyenne annuelle est de 26,8 °C.

La végétation et le paysage agricole

La végétation climacique est une forêt ombrophile semi-sempervirente fortement secondarisée par endroit. Cette forêt existe sous forme d'îlots dont le plus important est celui de Pobè.

En raison de la pression démographique, ces forêts denses, et même les jachères forestières spontanées, ont généralement disparu au cours des dernières décades. L'espace agricole est maintenant dominé par des plantations villageoises ou industrielles de palmiers à huile et surtout par des cultures vivrières. Seuls les sols épuisés par la culture continue sont laissés en friche sous forme d'une savane faiblement arbustive dont la couverture herbacée est discontinue.

TABLEAU I
Caractéristiques des différents sites et parcelles étudiés
Characteristics of the different sites and plots studied

SITE	1. POBE	2. AKPADANOU	3. OUIDAH
CLIMAT			
- Pluviométrie moyenne annuelle	1200 mm	1100 mm	850 mm
PARCELLES			
- Forêt (F) - Plantation forestière (PF) - Palmeraie sol couvert (PSC) - Palmeraie sol nu (PSN) - Cultures vivrières (CV)	Forêt dense semi-décidue 1 ^{re} plantation 1957 (32 ans) 1 ^{re} plantation 1957 (32 ans) 30 - 40 ans	Forêt faiblement secondarisée Plantation de Cassia (21 ans) 1 ^{re} plantation 1969 (20 ans) 1 ^{re} plantation 1969 (20 ans) > à 20 ans	Forêt très secondarisée Plantation de Teck (22 ans) 1 ^{re} plantation 1973 (16 ans) > à 14 ans
SOLS			
HORIZON A1 (0-15 cm)			
- Argile + limons fins (0-20 µm)	15.9	8.9	8.2
- pH (H ₂ O)	6.3	7.5	5.9
- Bases échangeables cmol (+) kg ⁻¹	7.7	6.6	3.6
HORIZON AB (50-70 cm)			
- Argile + limons fins (0-20 µm)	52.8	13.9	15.8
- pH (H ₂ O)	5.75	7.2	5.7
- Bases échangeables cmol (+) kg ⁻¹	5.8	3.7	1.9

Les sols

Les sols de ces trois sites sont des sols rouges très analogues, développés sur matériaux sédimentaires du Continental Terminal et appelés localement « terres de barre » (fig. 1). Du point de vue de la classification CPCS (1967), ils appartiennent à la même famille des *sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris en argile*. Dans le système de classification FAO (1989), il s'agit de *ferralsol rhodique*, mollique sous forêt et ochrique sous culture, et pour la *Soil Taxonomy* USDA, ce sont des sols *Eustrustox*.

Ils sont caractérisés par la présence d'horizons humifères sablo-faiblement argileux, brun rouge (5YR 4/4), donc peu colorés par la matière organique, avec une structure grumeleuse très fine à particulière. Les teneurs en éléments fins augmentent progressivement en profondeur sans qu'un horizon d'accumulation puisse être identifié par un ventre de la courbe granulométrique, ni par les observations morphologiques du profil pédologique. La couleur devient progressivement rouge de plus en plus vif (2,5YR 4/6 à 10R 4/6) et la structure plus massive est à débit polyédrique subanguleux faiblement développé, mais les hori-

zons AB et B oxiqne restent meubles à l'état humide et assez cohérents à l'état sec.

Plusieurs séries de sols rouges sur terres de barre ont été distinguées en fonction de la teneur en argile de l'horizon B et de l'épaisseur des horizons A et AB appauvris en argile. De ce point de vue, le sol du site 1 de Pobè appartiendrait à la série « Rouge argileux » dont l'horizon B a des teneurs en argile supérieures à 45 % et dont l'horizon appauvri est peu épais. Au contraire, les sols des deux autres sites se classent dans la série « Rouge sableux », l'horizon B a moins de 35 % d'argile et l'horizon appauvri est beaucoup plus épais (IRHO, 1964 ; FAUCK, 1972 ; RAUNET, 1973). De plus, le gradient textural est nettement plus brutal dans le sol du site 1 et la proportion de sables fins par rapport aux sables grossiers y est plus importante. La fraction argileuse est surtout constituée de kaolinite, de goéthite et d'hématite avec des traces de minéraux interstratifiés.

La densité apparente, qui est analogue sous forêt dans la couche 0-15 cm de ces trois sites ($d_a = 1,2$ à $1,3$), augmente, plus rapidement en profondeur dans le site 1 et atteint des valeurs élevées de $1,6$ en profondeur.

Les caractéristiques du complexe argilo-humique de ces sols sont résumées dans le tableau I.

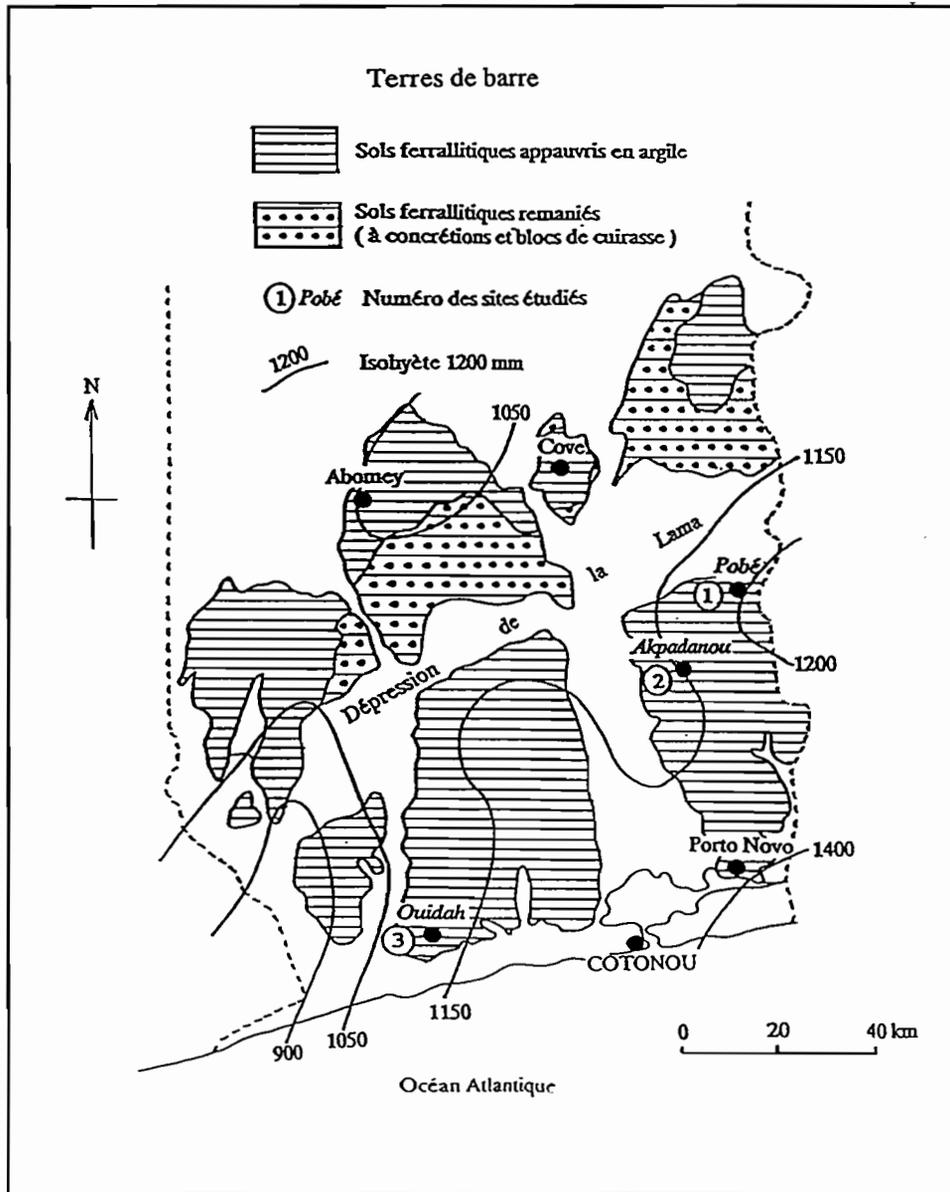


FIG. 1 – Sols ferrallitiques sur « Terres de barre » du Sud-Bénin, isohyètes annuelles et localisation des sites, d'après M. RAUNET, 1973.

Ferrallitic soils of Southern Benin (designated by «Terres de barre»), annual isohyet and site localization.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Forêt et systèmes de culture

L'étude porte sur des parcelles sous forêt naturelle (F), sous plantations industrielles de palmiers à huile (PSC, PSN), sous plantations forestières (PF) et sous cultures vivrières (CV).

Dans les plantations de palmiers à huile (*Elaeis guineensis*), les techniques culturales utilisées créent

une hétérogénéité spatiale du développement des systèmes racinaires et de l'apport des résidus végétaux qui nous conduiront à distinguer les « ronds » autour des palmiers (15 % de la surface) qui sont désherbés et reçoivent les engrais, les andains (25 % de la surface) qui reçoivent les palmes provenant de l'élagage et enfin les interlignes (60 % de la surface) qui sont maintenus au jeune âge soit en sol nu (PSN) par entretien mécanique, soit en sol couvert

avec une plante de couverture (PSC), généralement une légumineuse rampante, le *Pueraria* sp. Toutefois, la couverture herbacée régresse progressivement avec le temps sous l'effet de la concurrence avec les palmiers pour la lumière. Sous les plantations anciennes, la couverture végétale dans les interlignes est dans les deux cas (PSC et PSN) peu exubérante, voire discontinue.

Les plantations forestières (PF) après cultures vivrières de longue durée sont le *Cassia siamea* sur le site 2 et le *Tectona grandis* sur le site 3.

Les cultures vivrières (CV) annuelles sont réalisées sur des billons dans lesquels sont enfouis les résidus de la récolte précédente. La terre du billon provient essentiellement de la couche superficielle (0-12 cm) du sol de l'interbillon. Ces billons d'une dizaine de cm de haut sont espacés d'environ 80 cm. Les principales cultures associées et successives réalisées au cours des deux saisons de pluie sont : le maïs (*Zea mays*), le manioc (*Manihot esculenta*), l'arachide (*Arachis hypogea*) et le niébé (*Vigna unguiculata*). Après un an de culture, les billons sont refaits dans l'interbillon et cette pratique est alternée avec des jachères de très courte durée (un an et demi environ) qui ne permettent guère la reconstitution du stock organique de ces sols. Il s'ensuit une perte de rendement néfaste pour l'agriculteur (DJEGUI, 1982 ; PFEIFFER, 1988).

Méthodes de prélèvement des sols et mesures de terrain

PRÉLÈVEMENTS POUR L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTERSITE

Dans chaque parcelle, une microparcelle représentative de 20 m x 20 m a été matérialisée autour de chaque fosse d'observation du profil cultural.

Les échantillons moyens des sols sont constitués à partir de 40 prélèvements élémentaires effectués à la tarière pour les couches suivantes : 0-15, 15-35, 35-50, 50-70 et 100-120 cm. Pour les parcelles sous palmiers, les prélèvements ont été faits dans les interlignes. Pour les parcelles sous cultures vivrières, les prélèvements ont été réalisés uniquement dans les billons.

PRÉLÈVEMENTS POUR L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTRAPARCELLAIRE

Afin d'apprécier la variabilité intraparcellaire dans une parcelle de palmiers sur le site 3, un échantillonnage a été réalisé dans le cadre de la maille élémentaire définie comme l'espace com-

pris entre quatre palmiers sains et comprenant deux andains, un interligne et quatre « ronds » autour des palmiers. Les échantillons moyens ont été constitués par 5 prélèvements élémentaires par horizon dans chacun des andains (soit au total 10 prélèvements élémentaires), 8 prélèvements élémentaires par horizon pour les ronds (2 par rond) et 8 par horizon pour l'interligne.

Pour la parcelle sous cultures vivrières, deux échantillons moyens séparés ont été constitués à l'aide de 5 prélèvements élémentaires dans le sous-ensemble billon et 5 prélèvements élémentaires dans l'interbillon.

Dans les deux cas, quatre parcelles élémentaires, constituant quatre répétitions, ont ainsi été prélevées sous plantation de palmiers à huile et sous cultures vivrières.

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSE

Les échantillons ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm. La fraction supérieure à 2 mm, très négligeable en masse, n'est pas conservée. Pour le dosage du carbone et de l'azote des fractions aliquotes sont broyées finement.

MESURE DE LA DENSITÉ APPARENTE

La densité apparente (d_a) est déterminée par la méthode du cylindre (150 ml) sur la base de six à huit répétitions pour les horizons A et AB et quatre répétitions pour l'horizon B.

Méthodes d'analyse

Le carbone a été dosé par voie sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire CHN LECO, et l'azote par la méthode Kjeldahl.

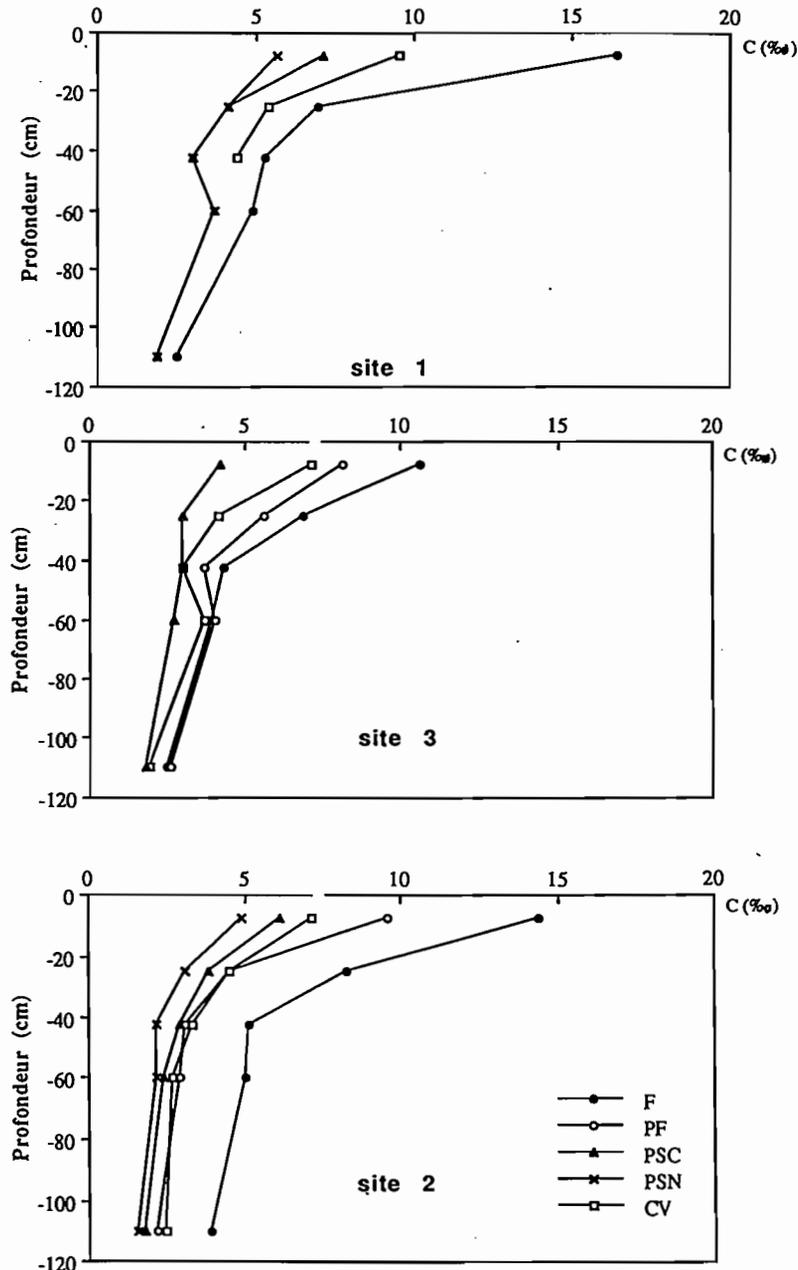
Le stock (Q en kg/m^2) de carbone ou d'azote contenu dans un horizon d'épaisseur e (cm) est obtenu par la formule suivante : $Q = C \times e \times d_a / 100$ dans laquelle d_a est la densité apparente et C les teneurs en carbone ou en azote exprimées en mg/g de sol.

La méthode de fractionnement granulométrique utilisée est inspirée de celles décrites par BRUCKERT (1979) et FELLER (1979). Après divers essais visant d'une part à minimiser l'énergie mécanique appliquée pour éviter une trop forte altération des matières organiques (TIESSEN *et al.*, 1983), et d'autre part, à obtenir un état de dispersion satisfaisant du sol, le protocole suivant a été utilisé pour les horizons de surface de ces sols : l'échantillon de sol (25 g) est agité dans 150 ml d'eau avec trois billes d'agate de 1 cm de diamètre pendant une

heure. Le tamisage avec lavage sur un tamis d'ouverture 200 µm permet de séparer la fraction sableuse grossière (SG). La suspension de sol inférieure à 200 µm est soumise à un traitement modéré (5 minutes) dans une cuve à ultrasons. Le tamisage à 50 µm sous eau permet d'isoler la fraction sableuse fine (50 à 200 µm). La suspension du sol inférieure à 50 µm est à nouveau passée pendant dix minutes dans la cuve à ultrasons. Les particules inférieures à 2 µm sont séparées de la fraction limoneuse L (2 à 50 µm) par sédimenta-

tions successives dans une allonge jusqu'à épuisement. Les différentes fractions sont séchées à l'étuve ventilée à 60 °C, pesées et broyées finement (100 µm) pour le dosage de C et de N.

Une analyse mécanique est aussi effectuée après destruction des matières organiques par l'eau oxygénée et dispersion par l'hexamétaphosphate de sodium. Dans ce cas, les fractions minérales fines sont prélevées à la pipette Robinson, dans les allonges de sédimentation, et les fractions sableuses sont obtenues par tamisage à sec.



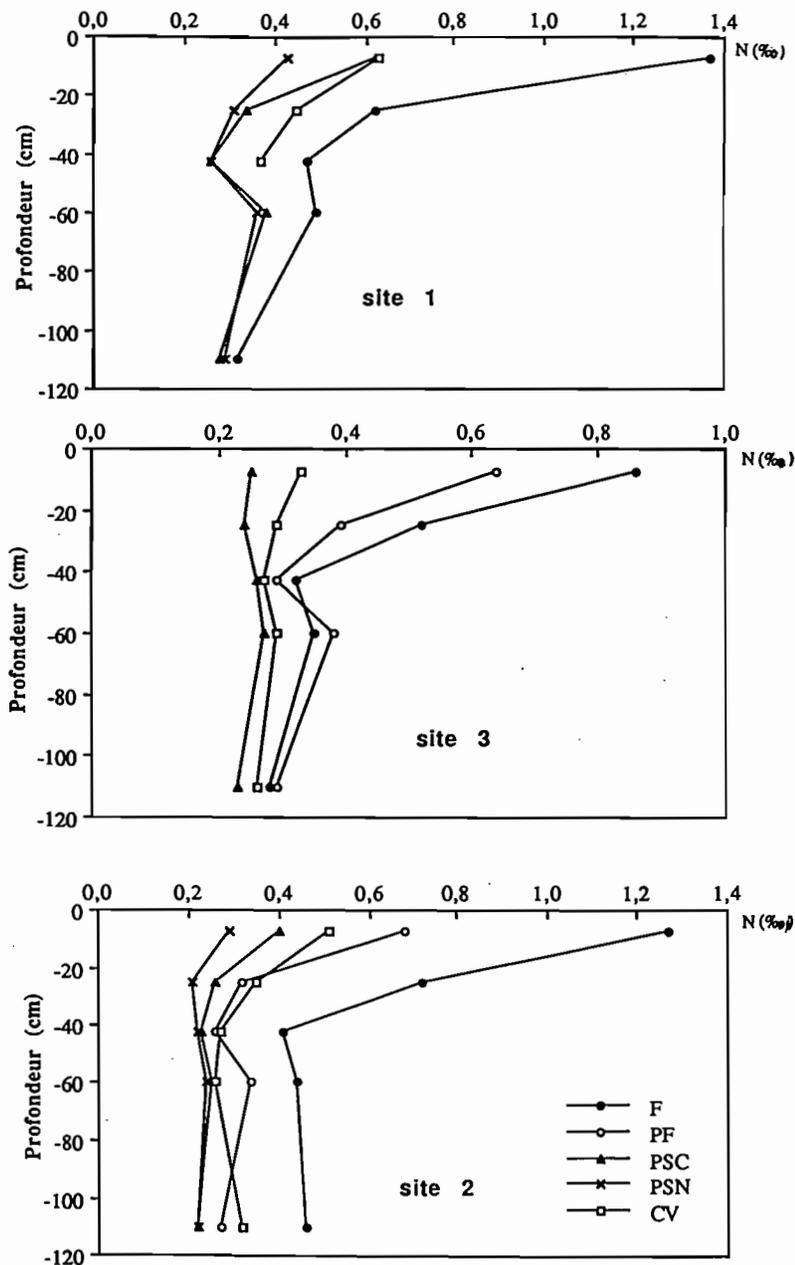


FIG. 2 b

FIG. 2 – Teneurs en carbone (fig. 2a) et azote (fig. 2b) dans les profils des différentes parcelles. (F) sous forêt, (PF) sous plantation forestière, (PSC) palmiers à huile avec plantes de couverture, (PSN) palmiers à huile sol nu, (CV) cultures vivrières. Carbon (fig. 2a) and nitrogen (fig. 2b) contents in the profiles of the different plots: for the forest soil (F), and the soil brought under cultivation (tree plantations: PF; oil palms with a leguminous cover, PSC; oil palms with no ground cover, PSN; food crops, CV).

RÉSULTATS

Répartition du carbone et de l'azote dans les profils de sols

Sous végétation naturelle forestière, les teneurs en C et N dans l'horizon des surfaces A1 sont plus

élevées sur le site 1 que sur les deux autres sites (fig. 2). Les teneurs diminuent dans l'horizon AB et un léger ventre d'accumulation apparaît vers 60 cm sur les sites 1 et 3.

Sur les trois sites, les teneurs en C et N dans les horizons superficiels des sols cultivés, varient dans

le sens $F > PF > CV > PSC > PSN$. Sur les sites 1 et 3 les différences entre parcelles sous forêt et parcelles sous cultures s'amenuisent à partir de 50/60 cm et les teneurs deviennent très voisines. Sur le site 2 par contre, la baisse des teneurs de C et de N dans les sols cultivés affecte non seulement les horizons superficiels mais aussi les horizons en profondeur.

L'effet du mode de couverture du sol pour les sols sous palmiers à huile s'exprime uniquement sur les 20 premiers centimètres avec un léger avantage pour les parcelles avec plantes de couverture au jeune âge (PSC) par rapport à celles en sol nu (PSN).

Sous forêt, le rapport C/N varie entre 11 et 12 pour les horizons superficiels. Ces valeurs sont du

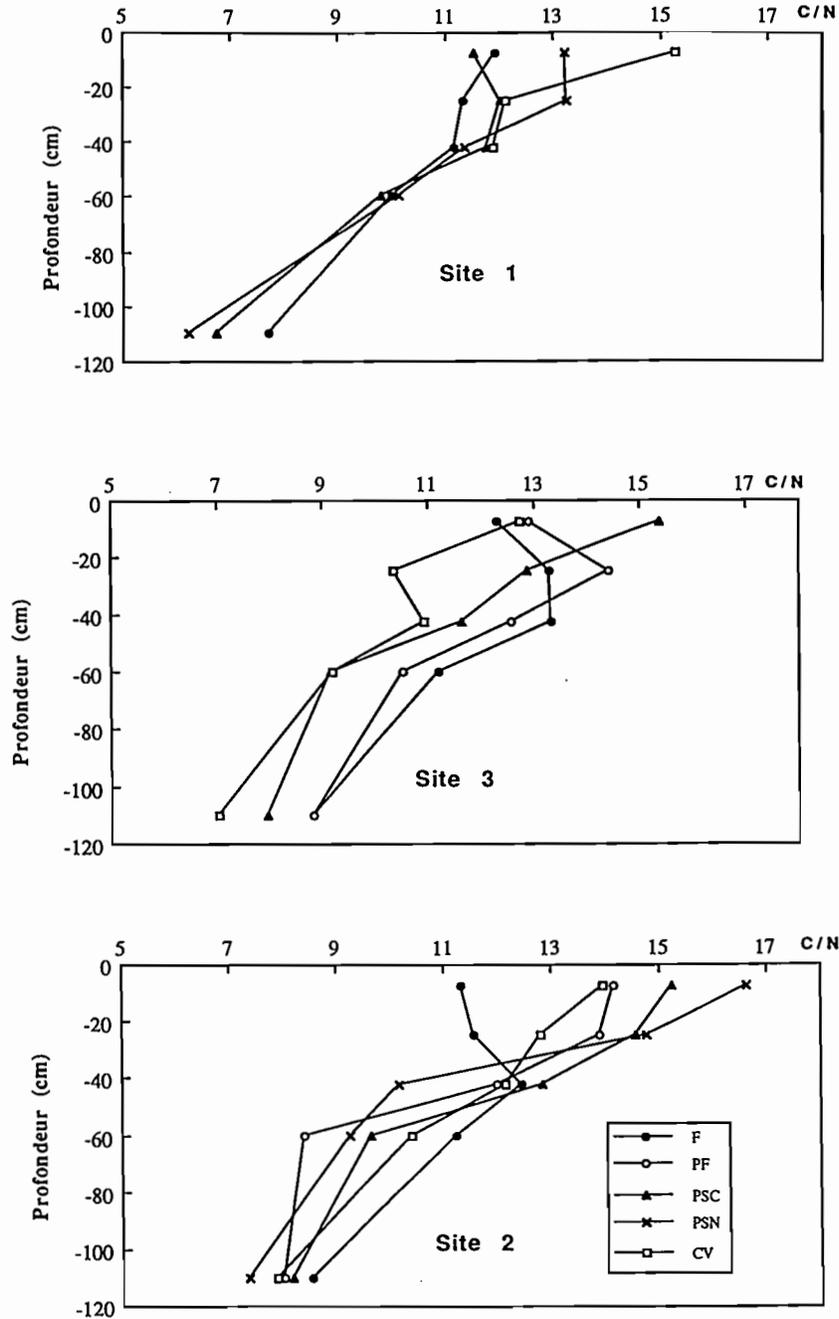


FIG. 3 – Rapport C/N dans les profils de parcelles étudiées, sur les trois sites.
C/N ratios in the profiles of the plots studied, at the three sites.

même ordre de grandeur que celles signalées par BOYER (1982) pour les sols ferrallitiques sous végétation naturelle. Elles traduisent une bonne décomposition de la matière végétale provenant de la litière et du système racinaire et la formation d'un « humus doux » qui peut être appelé suivant PERRAUD (1970) *mull forestier tropical* (eutrophe). Dans tous les profils, le rapport C/N décroît avec la

profondeur pour atteindre des valeurs de l'ordre de 8 dans l'horizon B (fig. 3).

Les stocks organiques

ÉVALUATION DES STOCKS ORGANIQUES DANS LES PROFILS ÉTUDIÉS

Pour comparer ces sols sous forêt et différents systèmes de cultures, il convient d'intégrer

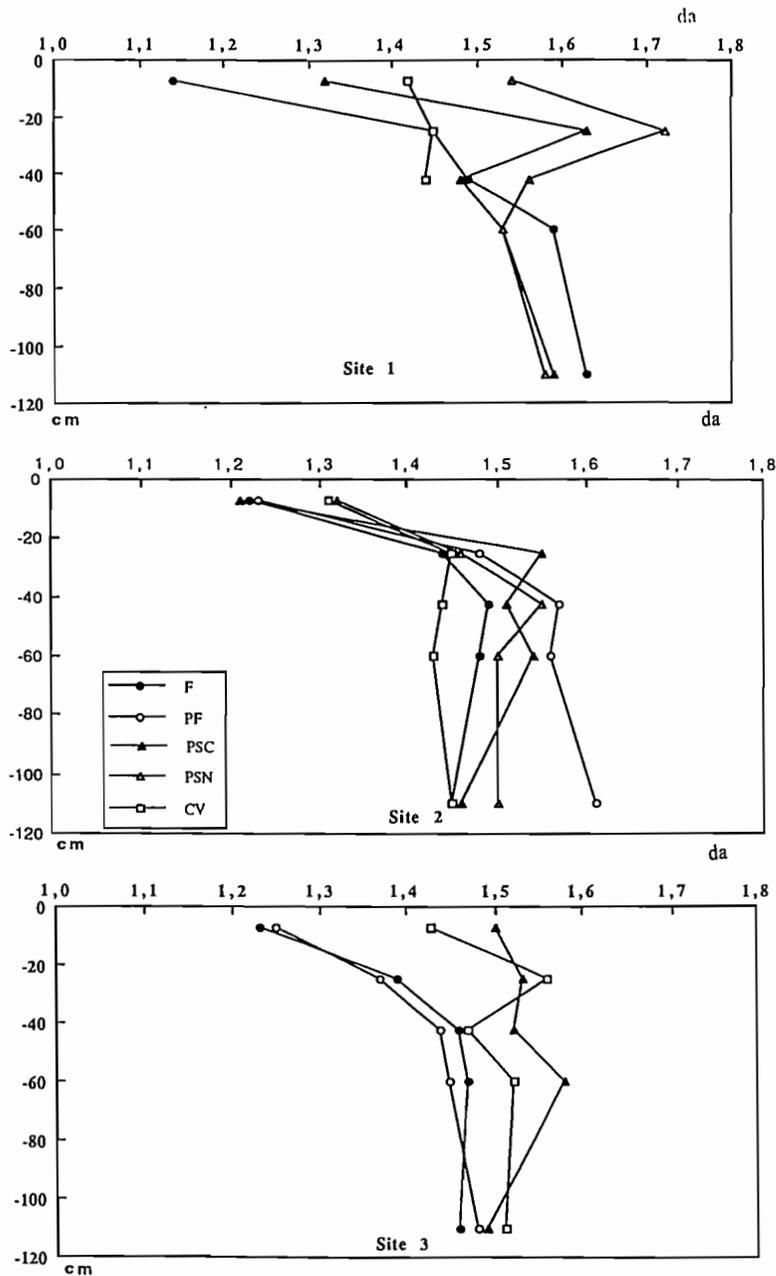


FIG. 4 – Densité apparente dans les profils des parcelles étudiées, sur les trois sites.
Bulk densities in the profiles of the plots studied, at the three sites.

l'ensemble des horizons humifères pour rendre compte des différences importantes dues au travail du sol et au développement des systèmes racinaires suivant les cultures. Il a donc été nécessaire d'étudier les quantités pondérales de matière organique pour l'ensemble du profil. D'autre part, la mise en culture provoque aussi une différenciation profonde de la morphologie et surtout de la densité apparente des horizons supérieurs en fonction du mode d'utilisation des parcelles (fig. 4). En cumulant ces différents paramètres, nous avons évalué pour chaque système de culture les stocks cumulés (0 à 70 cm) en C et en N (kg/m²) (tabl. IIa et IIb).

Pour chaque horizon, un indice de variation a été calculé de la manière suivante : indice de variation = 100 x (stock organique sous forêt - stock organique sous culture) / stock organique sous forêt.

Les principaux résultats sont les suivants :

(a) la couche 0 à 35 renferme 60 à 70 % des stocks organiques contenus dans les 70 cm superficiels de ces sols ;

(b) les indices de variation des stocks organiques indiquent un appauvrissement relatif plus important de l'ensemble des horizons sur le site 2 ;

(c) tout comme les teneurs, les stocks organiques des horizons superficiels se classent dans l'ordre F>PF>CV>PSC>PSN.

RELATIONS ENTRE SYSTÈMES DE CULTURES ET STOCKS ORGANIQUES

Hétérogénéité intraparcélaire

Lorsqu'on compare les teneurs ou les stocks de matières organiques dans les sols cultivés pendant des périodes analogues, on constate que les sols sous palmiers sont plus pauvres que ceux sous cultures vivrières (fig. 2 et tabl. IIa et IIb). Cela peut

TABLEAU IIa

Stocks de carbone (kgC/m²) dans les couches 0-35 cm et 0-70 cm des sols. (F) sous forêt, (PF) plantation forestière, (PSC) palmeraie sol couvert, (PSN) palmeraie sol nu, (CV) cultures vivrières
Organic-C levels (kgC/m²) in the 0-35 and 0-70 cm layers of the forest soil (F), and of the soils brought under cultivation (tree plantations: PF; oil palms with a leguminous cover, PSC; oil palms with no ground cover, PSN; food crops, CV)

	SITE 1 : POBE		SITE 2 : AKPADANOU		SITE 3 : OUIDAH	
	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm
Forêt	4.83	7.57	5.03	7.65	3.75	5.84
PF	-	-	3.10	4.73	3.04	5.00
PSC	2.77	4.56	2.27	3.66	1.84	3.37
PSN	2.73	4.56	1.86	3.02	-	-
CV	2.99	-	2.70	4.21	2.70	4.21
"Effet culture" Indice de variation relative	de 38 à 44 %		de 46 à 63 %		de 28 à 51 %	

TABLEAU IIb

Stocks d'azote (kgN/m²) dans les couches 0-35 cm et 0-70 cm des sols
Organic-N levels (kgN/m²) in the 0-35 and 0-70 cm layers of the soils

	SITE 1 : POBE		SITE 2 : AKPADANOU		SITE 3 : OUIDAH	
	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm	0-35 cm	0-70 cm
Forêt	0.41	0.68	0.44	0.66	0.30	0.47
PF	-	-	0.22	0.39	0.23	0.40
PSC	0.23	0.41	0.15	0.30	0.13	0.28
PSN	0.21	0.38	0.12	0.26	-	-
CV	0.26	-	0.20	0.35	0.16	0.31
Indice de variation relative	de 37 à 44 %		de 47 à 72 %		de 34 à 57 %	

s'expliquer par les exportations et mobilisations de l'azote plus importantes au niveau des palmeraies. Cependant cette conclusion doit être nuancée pour deux raisons :

(a) cette évaluation ne prend pas en compte les restitutions organiques importantes concentrées au niveau des andains dans les plantations de palmiers, tandis que dans les interlignes où nous avons effectué les premiers prélèvements, les intrants végétaux (racines de palmiers et parfois plantes de couverture) sont limités ;

(b) les prélèvements dans les parcelles de cultures vivrières ont été effectués dans les billons où sont enfouis les résidus de récolte. Ces billons sont, d'autre part, constitués par les mottes prélevées avec le système racinaire dans les premiers centimètres superficiels de l'interbillon. Par cette pratique, la couche du sol la plus riche en matière organique est concentrée sur la surface réduite du

billon et les racines des plantes cultivées se développent dans une couche de terre relativement plus riche en éléments fertilisants.

Ces deux observations nous ont amenés à comparer sur le site 3 l'influence des deux systèmes de cultures sur chacune des zones relativement homogènes conditionnées par les techniques culturales.

Dans les palmeraies, les teneurs de carbone et d'azote sont beaucoup plus élevées sous les andains qu'au niveau des ronds et des interlignes. Cependant les différences se limitent aux deux horizons superficiels (tabl. IIIa et IIIb).

Dans les parcelles sous cultures vivrières, les teneurs en carbone et en azote sous le billon et dans l'interbillon ne sont pas différentes. La terre rassemblée dans les billons présente par contre des teneurs en carbone nettement plus élevées que celles de l'interbillon (tabl. IV).

TABLEAU IIIa

Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%) sous palmeraie (PSC) du site 3. (Les teneurs suivies de lettres différentes diffèrent significativement au seuil de probabilité de 5 %)

Spatial variabilities of organic-C levels (%) found under oil palms with a leguminous cover (PSC), at site 3 (the values followed by different letters are significantly different at the 5 % level)

	ANDAIN	INTERLIGNE	ROUND
0 - 5 cm	0.82 ± 0.14 a	0.46 ± 0.08 c	0.55 ± 0.09 b
15 - 35 cm	0.54 ± 0.09 b	0.35 ± 0.06 d,e	0.46 ± 0.02 c
35 - 50 cm	0.40 ± 0.05 c,d	0.37 ± 0.05 d,e	0.34 ± 0.02 d,e
50 - 70 cm	0.33 ± 0.03 d,e	0.29 ± 0.05 e,f	0.35 ± 0.03 d,e
100 - 120 cm	0.23 ± 0.03 f,g	0.25 ± 0.02 f,g	0.22 ± 0.03 g

TABLEAU IIIb

Variabilité spatiale des teneurs en azote (%) sous palmeraie (PSC) du site 3

Spatial variabilities of organic-N levels (%) found under oil palms with a leguminous cover (PSC), at site 3

	ANDAIN	INTERLIGNE	ROUND
0 - 15 cm	0.52 ± 0.04 a	0.26 ± 0.03 d,e	0.36 ± 0.08 b
15 - 35 cm	0.34 ± 0.03 c	0.24 ± 0.03 c	0.32 ± 0.06 c,d
35 - 50 cm	0.28 ± 0.02 c,d,e	0.27 ± 0.03 d,e	0.29 ± 0.03 c,d,e
50 - 70 cm	0.29 ± 0.02 c,d,e	0.27 ± 0.02 d,e	0.31 ± 0.02 c,d,e
100 - 120 cm	0.25 ± 0.04 d,e	0.25 ± 0.02 d,e	0.25 ± 0.02 d,e

TABLEAU IV
Variabilité spatiale des teneurs en carbone (%) et en azote (‰) dans une parcelle de cultures vivrières du site 3
Spatial variabilities of organic-C (%) and organic-N (‰) levels found on a plot cultivated with food crops at site 3

	CARBONE/BILLON	CARBONE/INTERBILLON	AZOTE/BILLON	AZOTE/INTERBILLON
+ 8 - 0 cm	0.57 ± 0.04		0.40 ± 0.09	
0 - 15 cm	0.43 ± 0.06	0.46 ± 0.05	0.33 ± 0.06	0.32 ± 0.03
15 - 35 cm	0.30 ± 0.04	0.29 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.27 ± 0.01
35 - 50 cm	0.30 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.21 ± 0.02	0.27 ± 0.01
50 - 70 cm	0.29 ± 0.05	0.27 ± 0.03	0.30 ± 0.05	0.30 ± 0.05
100 - 120 cm	0.20 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.25 ± 0.02

TABLEAU V
Stocks organiques dans les parcelles sous palmiers avec plantes de couverture (PSC) et sous cultures vivrières (CV) du site 3
Organic levels found on the plots cultivated with oil palms with a leguminous cover (PSC) and food crops (CV) at site 3

Système de culture	ZONE	CARBONE			AZOTE		
		mg/g sol	kg/m2/zone	kg/m2/parcelle	mg/g sol	kg/m2/zone	kg/m2/parcelle
P S C 0 - 35 cm	ANDAIN	6.5	3.01	0.76	0.41	0.191	0.048
	ROND	5.0	2.65	0.40	0.34	0.179	0.027
	INTERLIGNE	4.0	2.11	1.26	0.25	0.132	0.079
	TOTAL			2.42			0.154
C V 0 - 40 cm	BILLON	3.9	2.51	1.50	0.27	0.170	0.11
	INTERBILLON	3.7	1.89	0.76	0.24	0.150	0.06
	TOTAL			2.26			0.170

Influence de l'hétérogénéité spatiale intraparcél-laire sur l'estimation des stocks organiques

En intégrant les données relatives à la teneur, à la densité apparente et à la superficie relative de chaque sous-ensemble, on obtient les stocks de matière organique qui figurent au tableau V. En tenant compte des andains et des ronds, les stocks de carbone et d'azote contenus dans les horizons superficiels (0-35 cm) de l'ensemble de la parcelle sous palmiers sont majorés d'environ 15 % par rapport à l'estimation faite dans les interlignes (comparer par exemple, pour le carbone, et sous PSC, le total 2,42 à l'estimation réalisée dans l'interligne 2,11).

Toutefois cette majoration n'est justifiée que dans le cas où toutes les palmes sont entassées dans

les andains. Ce n'est pas le cas dans la plupart des plantations industrielles du Sud-Bénin, car une partie des palmes est exportée comme bois de cuisine. Les andains sont alors réduits, voire inexistantes.

Inversement, les stocks de matières organiques contenues dans les 35 premiers centimètres des sols sous cultures vivrières qui ont été évalués à partir des échantillons prélevés dans et sous les billons (C = 2,51 kg/m²) dépassent d'environ 10 % les stocks évalués (C = 2,26) en tenant compte également des stocks de matières organiques dans l'interbillon.

En tenant compte de la variabilité intraparcél-laire, il apparaît qu'après une vingtaine d'années de cultures, les stocks moyens de carbone et

d'azote dans les 35 premiers cm des sols sont à peu près identiques dans les parcelles sous palmiers à huile ($C = 2,42 \text{ kg/m}^2$) et sous cultures vivrières ($C = 2,26 \text{ kg/m}^2$).

Répartition du carbone et de l'azote dans les fractions granulométriques

BILAN EN MASSE, CARBONE ET AZOTE

La comparaison des mesures répétées obtenues par l'analyse mécanique (An. méca.) et par la méthode de fractionnement granulométrique (Fr. granu.) utilisée indique (tabl. VI) que la méthode de fractionnement granulométrique par tamisage sous eau avec deux traitements successifs et peu intenses aux ultrasons permet d'obtenir pour ces horizons de surface assez sableux une dispersion assez bonne des agrégats supérieurs à $50 \mu\text{m}$ en évitant les dispersants chimiques et une trop forte altération des constituants organiques contenus dans les diverses fractions. La fraction argileuse est toutefois sous-estimée au bénéfice de la fraction limoneuse. Tous échantillons confondus, les bilans en masse varient de 99,1 à 101,3 %, les bilans en carbone (tabl. VII) de 99,1 à 103 % et ceux en azote (tabl. VIII) de 95 à 109 %.

COMPOSITION CHIMIQUE DES FRACTIONS

Les teneurs en carbone (mgC g^{-1} de fraction), en azote (mgN g^{-1} de fraction) et le rapport C/N apparaissent aux tableaux VII et VIII.

Les teneurs en carbone et en azote des fractions sont nettement plus élevées dans la fraction limoneuse et, dans une moindre mesure, dans la fraction argileuse des sols forestiers que dans les fractions sableuses sur les deux sites. Cependant, les différences entre les quantités de matières organiques contenues dans les fractions sableuses et celles contenues dans les fractions limoneuses et argileuses sont nettement plus accusées sur le site 1 que sur le site 2, en particulier pour l'azote.

Avec la mise en culture, la diminution des teneurs en azote dans les fractions argileuses est limitée, particulièrement sur le site 1, ce qui laisse supposer que l'azote organique est stabilisée dans les complexes organo-minéraux. Par contre, les teneurs en C et N des fractions limoneuses et surtout sableuses décroissent fortement avec la mise en culture. On observe enfin une tendance à l'augmentation du rapport C/N des fractions grossières dans les parcelles sous palmeraie.

En résumé, sur toutes les situations étudiées, on peut noter que :

(a) les teneurs en C et N des fractions varient dans l'ordre Limons > Argiles > Sables. Cette hiérarchie n'est pas affectée par la mise en culture ;

(b) les rapports C/N permettent de caractériser les différentes fractions. Ils varient en effet de 12,3 à 18 pour la fraction supérieure à $50 \mu\text{m}$, de 10 à 14 pour la fraction comprise entre 50 et $2 \mu\text{m}$ et

TABLEAU VI

Comparaison des bilans massiques ($\text{g}/100 \text{ g}$ de sol) de l'analyse mécanique (An. méca.) avec destruction de la matière organique par H_2O_2 et dispersant, et du fractionnement granulométrique (Fr. granu.) par tamisage humide avec traitement aux ultrasons des horizons 0-15 cm sous forêt et sous plantation de palmiers avec plantes de couverture (PSC) des sites 1 et 2
Difference between weights (g/100 g of soil) of particle-size obtained by mechanical analysis (An. méca.) after removal of organic matter with H_2O_2 and the use of a dispersing agent, and particle-size fraction (Fr. granu.) after wet sieving and ultrasonication in the 0-15 cm horizons of the forest soils and the soils brought under cultivation with oil palms with a leguminous cover (PSC), at the sites 1 and 2

SITE	SITE 1				SITE 2			
	FORET		PSC		FORET		PSC	
Méth. Fract.	An. méca	Fr. granu.	An. méca.	Fr. granu.	An. méca.	Fr. granu.	An. méca.	Fr. granu.
SG + SF (2000/50 μm)	79.9 %	88.6 %	87.0 %	87.5 %	87.8 %	90.2 %	92.5 %	93.0 %
LG + Lf (50/2 μm)	5.2 %	5.5 %	4.2 %	6.7 %	2.4 %	4.5 %	2.4 %	3.7 %
A (< 2 μm)	12.1 %	7.2 %	7.4 %	5.9 %	6.8 %	4.4 %	4.1 %	2.4 %
Mat. orga.	2.82 %		1.24 %		2.5 %		1.1 %	
SOMME	100.2 %	101.3 %	99.8 %	100.1 %	99.5 %	99.1 %	99.6 %	99.9 %

TABLEAU VII
Teneurs (mgC/g fraction) et quantités (mgC/g sol) de carbone dans les fractions granulométriques pour les horizons 0-15 cm des sites 1 et 2. (F) sous forêt, (PSC) palmiers à huile avec plantes de couverture
Carbon contents (mgC/g of fraction) and amount (mgC/g of soil) of the particle-size fractions in the 0-15 cm horizons of the sites 1 and 2, under forest (F), and oil palms with a leguminous cover (PSC)

Parcelles	POIDS		mgC/g fract.		mgC/g sol		% C total		ΔC $100 \Delta C/C$		C/N	
	F	PSC	F	PSC	F	PSC	F	PSC	F	PSC	F	PSC
SITE 1												
2000/50	88.6	87.6	9.59	2.90	8.50	2.50	57.0	34.6	6.00	78	12.3	15.3
50/2	5.5	6.7	69.1	41.7	3.80	2.63	25.5	36.4	1.17	15	11.9	10.4
< 2	7.2	5.9	36.7	35.8	2.60	2.08	17.5	28.8	0.52	7	7.3	8
Somme	101.3	100.2			14.9	7.21	100	100	7.69			
Sol brut					16.4	7.20					12	12
SITE 2												
2000/50	90.2	93.0	7.5	3.03	6.75	2.82	50.2	44.9	3.93	54.8	12.5	18.9
50/2	4.5	3.7	97.8	61.6	4.40	2.28	32.7	36.3	2.12	29.6	10.7	14.3
< 2	4.4	2.4	52.2	49.2	2.30	1.18	17.1	18.8	1.12	15.6	8.8	10.7
Somme	99.1	99.1			13.45	6.28	100	100	7.17			
Sol brut					14.40	6.10					11.3	15.3

TABLEAU VIII
Teneurs (mgN/g fraction), et quantités (mgN/g sol) d'azote dans les fractions granulométriques des sites 1 et 2. (F) sous forêt, (PSC) palmiers à huile avec plantes de couverture
Nitrogen contents (mgN/g of fraction) and amount (mgN/g of soil) of the particle-size fractions at sites 1 and 2, under forest (F), and oil palms with a leguminous cover (PSC)

Parcelles	POIDS %		mgN/g fraction		mgN/g de sol		% N total		ΔN $100 \Delta N/N$	
	F	PSC	F	PSC	F	PSC	F	PSC	F	PSC
SITE 1										
2000/50	88.6	87.6	0.78	0.19	0.69	0.17	50.7	25.0	0.52	76
50/2	5.2	6.7	5.81	4.00	0.32	0.26	23.5	38.2	0.06	9
< 2	7.1	5.9	5.0	4.5	0.35	0.25	25.7	36.8	0.10	15
Somme	101.3	100.2			1.36	0.68	100	100	0.68	
Sol brut					1.37	0.62				
SITE 2										
2000/200	90.2	93.0	0.60	0.16	0.54	0.15	50.2	44.9	0.39	49
200/50	4.5	3.7	9.11	4.32	0.41	0.16	32.7	36.3	0.25	32
< 2	4.4	2.4	5.91	4.58	0.26	0.11	17.1	18.8	0.15	19
Somme	99.1	99.1			1.21	0.42	100	100	0.79	
Sol brut					1.27	0.40				

enfin de 8 à 10 pour la fraction inférieure à 2 µm. Le rapport C/N diminue donc des fractions grossières aux fractions fines. Ces résultats confirment ceux publiés par différents auteurs en milieu tropical (FELLER *et al.*, 1991a) et en milieu tempéré (ANDERSON *et al.*, 1981).

DISTRIBUTION DU CARBONE ET DE L'AZOTE DANS LES FRACTIONS : EFFET DE LA MISE EN CULTURE

Sur les deux sites 1 et 2, plus de 50 % du carbone et de l'azote sont contenus dans la fraction sableuse pour les sols forestiers. La fraction sableuse (2 000/50 µm) contient 57 et 50 % du carbone total du sol, la fraction limoneuse (50/2 µm) 25 et 32 % et la fraction argileuse inférieure à 2 µm environ 17 % respectivement sur les sites 1 et 2. En ce qui concerne l'azote, les fractions prises dans le même ordre que précédemment contiennent 50, 23 et 25 % de l'azote total sur le site 1 et 50, 32 et 17 % sur le site 2.

L'influence du passage à l'éleviculture sur le site 1 se traduit principalement par une baisse des quantités de matières organiques contenues dans la fraction sableuse. Par contre, les quantités de C et N contenues dans les fractions limoneuses et argileuses décroissent faiblement. Sur le site 2, la diminution des quantités de C et de N porte encore principalement sur la fraction sableuse mais les quantités de C et N contenues dans les fractions limons et argile décroissent un peu plus nettement que sur le site 1.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La décroissance des stocks organiques dans les sols cultivés par rapport aux sols forestiers peut être expliquée par la diminution des apports de matières végétales et par une décomposition plus rapide des matières organiques qui est due aux façons culturales. Mais l'effet de ces différentes techniques de culture crée une hétérogénéité intraparcellaire quant à la localisation des restitutions et aux conditions de leur évolution.

Nous avons observé une inégale répartition des stocks organiques dans les horizons supérieurs des sols cultivés en billons et dans les plantations de palmiers à huile. Cette hétérogénéité spatiale apparaît analogue à celle liée à la présence du palmier à huile qui a été décrite par KANG (1977) au Nigéria pour des jachères forestières dans lesquelles les palmiers à huile ne sont pas abattus.

Dans les parcelles sous palmiers à huile que nous avons étudiées, les teneurs en matière orga-

nique sous andains illustrent localement l'influence des restitutions végétales sur le statut organique des sols. Les teneurs en carbone dans les horizons humifères des sols sous andains sont nettement plus élevées que dans les interlignes, mais elles restent inférieures aux teneurs observées dans les sols forestiers. L'entassement des feuilles d'élagage dans les andains et leur faible contact avec la matière minérale du sol, ainsi que l'action des termites, semblent limiter les possibilités d'incorporation et de stabilisation des produits issus de la biodégradation des palmes.

Dans les parcelles sous cultures vivrières, l'enfouissement des résidus végétaux des cultures précédentes ou des adventices et l'entassement des mottes plus humifères prélevées dans l'interbillon provoquent une augmentation significative des teneurs en matière organique dans le billon ; mais cet accroissement localisé des teneurs en matière organique n'est que temporaire, car l'année suivante, les billons seront refaits dans l'interbillon. Cette étude de l'hétérogénéité spatiale liée aux techniques culturales nous a permis d'estimer avec plus de précision les stocks organiques moyens contenus dans les parcelles élémentaires sous plantation de palmiers à huile et sous cultures vivrières.

Sur les trois sites étudiés, les stocks organiques sous différents systèmes de cultures se rangent dans l'ordre suivant : F > PF > CV > PSC > PSN. Le défrichement et la mise en culture continue ou sous plantations pérennes, après 20 à 30 ans, se traduit par une décroissance de 40 à 70 % du stock de matière organique contenu dans le profil. Ce déclin assez important des stocks organiques après le défrichement a été observé sur des sols analogues par FAUCK *et al.* (1969) puis SIBAND (1974) au Sénégal et AYANABA *et al.* (1976) au Nigéria. Il s'explique par la diminution des restitutions végétales.

Pour les parcelles sous palmiers à huile, les estimations effectuées par HARTMANN (1991) en Côte-d'Ivoire indiquent que les apports de palmes élaguées concernent des quantités de biomasse végétale assez importantes, environ 10 tonnes de matières sèches/ha/an. Dans les conditions du Bénin où le déficit hydrique limite le développement végétatif, les quantités de matières végétales restituées par les plantations de palmier à huile doivent être plus faibles que les apports annuels de litière dans les écosystèmes forestiers. La chute de litière a été évaluée par SOKPON et LEJOLY (1991) au Bénin à 9,4 t/ha et au Ghana par NYE (1961) à 9,66 t/ha. Cependant, les teneurs en matière orga-

nique des sols sous andains restent inférieures à celles de la parcelle forestière. L'exportation d'une partie des palmiers comme bois de feu et la biodégradation aérienne des palmiers restantes paraissent expliquer la diminution des stocks moyens de matières organiques dans ces parcelles.

La baisse des teneurs en carbone ou en azote dans les plantations de palmiers à huile conduites en sol nu au jeune âge, parcelles PSN, est encore significative 20 à 30 ans plus tard, bien que cette technique favorise le développement végétatif des palmiers et la précocité de la production des arbres (BENARD et DANIEL, 1971). L'entretien mécanisé du sol pour supprimer le recrû dans les interlignes et l'absence d'écran thermique favorisent la décomposition des matières organiques des horizons humifères de surface. D'autre part, l'absence de plante de couverture sur les parcelles PSN permet d'expliquer la baisse des teneurs en éléments fins sous PSN par rapport à celles observées dans les parcelles avec plantes de couverture au jeune âge PSC. Ceci serait dû à l'impact des gouttes de pluie sur le sol nu, qui provoque une désagrégation du sol et une dispersion plus forte des éléments fins que dans les plantations protégées par une plante de couverture. Il en résulte une érosion sélective de l'argile et des matières organiques plus marquée dans les parcelles PSN que PSC.

Par ailleurs, on s'aperçoit que la diminution des stocks organiques dans les sols cultivés est d'autant plus importante que les horizons humifères sont plus sableux. Si pour l'ensemble des situations forestières et cultivées étudiées la corrélation entre le stock d'éléments fins (argile + limons fins) et le stock de matière organique dans la couche 0-35 cm n'est pas significative, on remarque que sur le site 1 la diminution des stocks organiques dans les sols cultivés par rapport au sol forestier est plus faible que sur les deux autres sites. La richesse en éléments fins un peu plus grande sur ce site 1 a donc favorisé une certaine stabilisation des matières organiques à un niveau d'équilibre dynamique un peu plus élevé.

Le fractionnement granulométrique par tamisage humide et dispersion par les ultrasons des échantillons provenant de l'horizon humifère de surface montre que c'est principalement les matières organiques contenues dans les fractions grossières (>50 µm) et, secondairement, celles des fractions 2-50 µm qui ont diminué au cours des cultures. Par contre, les quantités de matières organiques contenues dans la fraction argileuse ont peu varié. Ces dernières paraissent donc relativement stables, mais

dans cet horizon, leur contribution au stock total de carbone et d'azote organique de ces sols est faible. Ces résultats sont en accord avec les données de la littérature concernant le renouvellement des matières organiques associées aux différentes fractions granulométriques des sols (CERRI *et al.*, 1985 ; MARTIN *et al.*, 1990 ; DESJARDINS, 1991 pour les situations tropicales, BALESSENT *et al.*, 1987 pour les situations tempérées). Ces différents auteurs, en utilisant l'isotope ¹³C en abondance naturelle comme traceur du carbone lors de succession de végétation de type C₃-C₄ ou C₄-C₃, ont en effet montré qu'en première approximation, le taux de renouvellement des débris végétaux résiduels associés aux sables est plus élevé que celui des matières organiques liées aux limons et aux argiles.

Les débris organiques figurés plus ou moins humifiés de la fraction grossière des horizons humifères paraissent en grande partie biodégradés lors de la mise en culture. Ils constituent le compartiment organique le plus important dans l'horizon supérieur sableux de ces sols forestiers sur terre de barre, mais c'est également le compartiment organique qui varie le plus sous l'influence des systèmes de culture.

Ces comparaisons du statut organique sous forêt et sous culture montrent que la décroissance des stocks organiques dans ces sols sableux ne peut être évitée ou corrigée que par une bonne gestion des restitutions. En particulier, on notera l'effet très défavorable pour les stocks de carbone et d'azote du travail du sol et de l'absence de plantes de couverture dans les plantations de palmiers à huile, spécialement pour les sols les plus sableux. Inversement, les plantations forestières permettent de remonter le stock organique de ces sols à un niveau intermédiaire avec celui des sols sous jachère ou forêt secondaire (GREENLAND et NYE, 1959).

Il apparaît donc que la durabilité des systèmes de culture continue sur terres de barre passe par :

- une politique de régénération des stocks organiques par la jachère ou des plantations forestières dans les sols les plus sableux ou les plus épuisés ;
- une intensification de la production de biomasse par fertilisation minérale, irrigation d'appoint et façons aratoires minimales dans les sols les moins dégradés ;
- la recherche d'associations ou de succession de cultures favorisant les restitutions organiques, en particulier racinaires. À ce sujet, les effets de divers systèmes agro-forestiers devraient être étudiés sur ces terres de barre.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 5 avril 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLISON (F.E.), 1973. – *Soil organic matter and its role in crop production. Development in Soil Science 3*. New York, Elsevier Science Publishing Co.
- ANDERSON (D.W.), SAGGAR (S.), BETTANY (J.R.), STEWART (J.W.B.), 1981. – Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 767-772.
- AYANABA (A.), TUCKWELL (S.B.), JENKINSON (D.S.), 1976. – The effects of clearing and cropping on the organic reserves and biomass of tropical forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 8 : 519-525.
- BALESSENT (J.), MARIOTTI (A.), GUILLET (B.), 1987. – Natural ¹³C abundance tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 19 (1) : 25-30.
- BENARD (G.), DANIEL (C.), 1971. – Économie de l'eau en jeunes palmeraies sélectionnées du Dahomey. Castration et sol nu. *Oléagineux*, 26 (4) : 225-232.
- BOISSEZON (P. de), 1973. – « Les matières organiques des sols ferrallitiques », in *Les sols ferrallitiques*, T. 1 : 9-66, Paris, Orstom, I.D.T. 21, 146 p.
- BONNEAU (M.), SOUCHIEZ (B.) (éd.), 1979. – *Pédologie II*, Paris, Masson.
- BOYER (J.), 1982. – *Les sols ferrallitiques. Facteurs de fertilité et utilisation des sols*, Tome X. Paris, Orstom, I.D.T. 52, 384 p.
- BRUCKERT (S.), 1979. – « Analyse des complexes organo-minéraux des sols » in M. BONNEAU et B. SOUCHIER (éd), 1979 : 181-208.
- CERRI (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. Sci. Paris*, 300, 9 : 423-428.
- CPCS, 1967. – *Classification des sols*. Rapp. Ensa Grignon, 87 p., multigr.
- DABIN (B.), 1956. – Contribution à l'étude de la fertilité des terres de barre. *Agron. trop.*, 11(4) : 490-506.
- DESJARDINS (T.), 1991. – *Variation de la distribution de la matière organique (carbone total et I3C) dans les sols ferrallitiques du Brésil. Modifications consécutives à la déforestation et à la mise en culture en Amazonie orientale*. Thèse Univ. Nancy-1, 137 p. + annexes.
- DJEGUI (N.), 1982. – *Essai de caractérisation de l'état de dégradation des terres de barre*. Irat-Cirad Montpellier, 35 p., multigr.
- FAO-UNESCO, 1989. – Carte mondiale des sols. Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde, n° 60, FAO (Rome), 125 p.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.R.), THOMANN (C.), 1969. – Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agron. trop.* (3) : 263-301.
- FAUCK (R.), 1972. – *Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale*. Mémoire Orstom n° 61, 257 p.
- FELLER (C.), 1979. – Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux à texture grossière très pauvres en humus. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4 : 339-346.
- FELLER (C.), FRANÇOIS (C.), VILLEMIN (G.), PORTAL (J.-M.), TOUTAIN (F.), MOREL (J.-L.), 1991a. – Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, Série II : 1491-1497.
- FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.), VALENTIN (C.), 1991b. – Effet 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.*, vol. XXVI, n° 1 : 25-36.
- GREENLAND (D.J.), NYE (P.H.), 1959. – Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.*, 10 (2) : 284-299.
- HARTMANN (C.), 1991. – *Évolution et comportement des sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile. Cas de la plantation R. Michaux à Dabou (Côte-d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-VI, 201 p.
- HUMBEL (F.-X.), MULLER (J.-P.), RIEFFEL (J.-M.), 1977. – Quantités de matières organiques associées aux sols du domaine ferrallitique au Cameroun. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 3 : 259-274.
- IRHO, 1964. – *Plan palmier à huile*. Étude de base. Annexe, 1, 55 p., multigr.
- KANG (B.T.), 1977. – Effect of some biological factors on variability in the tropics. 2. Effect of oil palm tree (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Plant and Soil* 47 : 451-462.
- LAL (R.), KANG (B.), 1982. – « Management of organic matter in soils of the tropics and sub tropics », in *Non-Symbiotic Nitrogen Fixation and Organic Matter in the Tropics*. Trans. 12th Intern. Congr. Soil Sci. (New Delhi 8-16 fév. 1982) : 153-178.
- MARTIN (J.-P.), HAIDER (K.), 1986. – Influence of mineral colloid on turnover rates of soil organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J. Spec. Pub.* n° 17.
- MARTIN (A.), MARIOTTI (A.), BALESSENT (J.), LAVELLE (P.), VUATTOUX (R.), 1990. – Estimates of organic matter turnover rate in a savanna soil by ¹³C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22 : 517-523.
- NYE (P.H.), 1961. – Organic matter and nutrient cycle under moist tropical forest. *Plant and soil*, 13 : 333-346.
- PERRAUD (A.), 1970. – Note sur les différents types d'humus des sols ferrallitiques forestiers de la Côte-d'Ivoire. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 270 : 1302-1305.
- PFEIFFER (V.), 1988. – *Agriculture au Sud-Bénin. Passé et perspectives*. Paris, L'Harmattan, 172 p.

- RAUNET (M.), 1973. – Contribution à l'étude pédoagronomique des « terres de barre » du Dahomey et du Togo. *Agron. Trop.*, 28(1) : 1049-1069.
- SANCHEZ (P.A.), GICHURU (M.-P.), KATZ (L.B.), 1982. – « Organic matter in major soils of Tropical and Temperate regions », in *Non-Symbiotic Nitrogen Fixation and Organic Matter in the Tropics*. Trans. 12th Intern. Congr. Soil Sci. (New Delhi 8-16 fév. 1982) : 99-114.
- SIBAND (P.), 1974. – Évolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *Agron. trop.*, 29 (12) : 1228-1248.
- SOKPON (N.), LEJOLY (J.), 1991. – Phénologie et production de litière dans la forêt dense semi-décidue de Pobè (Sud-Est Bénin). *Revue Forestière Française*, Hors série, 2 : 171-176.
- TIESSEN (H.), STEWART (J.W.B.), 1983. – Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 509-514.
- WERTS (R.), 1979. – *Dossier pour une synthèse des résultats de la recherche agronomique au Bénin en maïsiculture*. Irat-Cirad (Cotonou), 241 p., multigr.