

Effets de l'apport de fumier sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrallitique ivoirien

Paul de BOISSEZON (1) et Bernard BONZON (2)

(1) ORSTOM, Centre de Bondy, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy-France.

(2) ORSTOM, Centre de Nouméa, boîte postale A5 Nouméa Cedex Nouvelle-Calédonie.

RÉSUMÉ

Un essai de culture de manioc en parcelles subdivisées avec trois profondeurs de labour et quatre doses de fumier de ferme (0,30, 60 et 90 t.ha⁻¹) a été réalisé sur un sol ferrallitique fortement désaturé et appauvri en argile précédemment sous jachère à Panicum maximum.

L'analyse de la variance a permis d'évaluer l'effet des facteurs contrôlés — labour et fumure — sur l'évolution des caractéristiques chimiques de ce sol.

Du fait de la différenciation verticale du profil en début d'essai, le retournement des couches supérieures du sol par le labour avec une charrue à soc a pu être mis en évidence. L'analyse de la covariance montre que le labour a des effets opposés sur la capacité d'échange d'origine organique et minérale de la couche du sol qui a été labourée.

Après la récolte du manioc, dix-sept mois après l'enfouissement de la jachère et l'apport de 30 tonnes de fumier à l'hectare, l'enrichissement du sol en matières organiques et en bases est encore significatif, particulièrement dans les couches du sol correspondant au fond du labour.

Le calcul de l'évolution des stocks de matières organiques dans la couche labourée et dans la couche située sous le labour, pour chacune des doses de fumier, a permis d'ajuster un modèle suivant une cinétique du premier ordre pour l'évolution des stocks dans ces deux niveaux. Ce modèle montre que l'augmentation du stock dans la couche labourée est très transitoire et qu'un sixième de l'humus provenant de la décomposition des matières végétales enfouies migre sous le fond de labour.

Le bilan des bases montre que les pertes par lixiviation et exportation par le manioc dépassent les apports par enfouissement de la jachère sauf pour le potassium. L'apport de 12 tonnes de fumier à l'hectare paraît nécessaire pour maintenir le stock initial de bases échangeables.

En revanche, la précision limitée de la détermination analytique des teneurs du sol en azote total, n'a pas permis l'établissement d'un bilan précis de l'évolution des stocks d'azote pour les différentes fumures. De même, l'imprécision de la méthode de mesure de la capacité d'échange cationique a pu masquer l'effet de la fumure sur l'évolution des stocks de sites d'échange dans la couche labourée, alors que les stocks de carbone organique ont augmenté significativement suite à l'apport de fumier. Toutefois l'enrichissement relatif en matières organiques non-extractibles à faible capacité d'échange expliquerait que les stocks de sites d'échange dans la couche labourée n'aient pas augmenté proportionnellement à l'accroissement des stocks de carbone.

MOTS-CLÉS : Sol ferrallitique — Fumier — Labour — Matière organique — Modèle mathématique — Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

EFFECTS OF MANURING ON THE CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A FERRALLITIC SOIL IN IVORY COAST

*In a field experimentation of cassava cultivation we test the effects of four doses of farmyard manure and three ploughing depths on the chemical characteristics of a highly unsaturated and clay eluviated ferrallitic soil which, previously, lay fallow with *Panicum maximum*.*

The ploughing up of the top layers with a moldboard plow could be revealed by the vertical profile differentiation at the beginning of the experimentation. The analysis of covariance shows that ploughing has opposite effects on the organic and mineral cationic exchange capacity of the ploughed layer.

After harvesting cassava, seventeen months after fallowing and manuring with 30 t/ha, the enrichment in organic matter and exchangeable bases is still significant, particularly in the soil layers which correspond to the ploughed layer bottom. The evaluation of the organic matter stocks corresponding to each amount of manure in the ploughed layer and in the subsoil under the plough bottom allows to fit a mathematical model of first order kinetics for the organic stock evolution and humification in these two layers. This model shows that the increase in the organic carbon stock in the ploughed layer is highly short-lived and that a sixth of the humus matter which was the product of the decayed plant matter, migrates under the plough bottom.

The evaluation of the mineral bases shows that the losses by leaching and cassava output are higher than the input resulting from the fallow-grass incorporation except for potassium. Twelve tons of manure per hectare seem to be necessary to maintain the initial stock of exchangeable bases.

On the contrary, the poor accuracy of the determination of the total nitrogen content of the soil did not allow to give an accurate evaluation of the changes in nitrogen stocks according to the different amounts of manure. Likewise, the inaccurate method for measuring the cation exchange capacity could conceal the effect of manuring on the increase in the number of exchange sites in the ploughed layer, while the organic carbon stocks have increased considerably. However the relative enrichment in non-extractable organic matter with a low exchange capacity, would explain that the stocks of exchange sites in the ploughed layer did not increase with the organic carbon stocks.

KEY WORDS : Ferrallitic soil — Farmyard manure — Ploughing — Soil organic matter — Mathematical modelling — Ivory Coast.

INTRODUCTION

Le défrichement et la culture des sols tropicaux provoquent en peu d'années un net appauvrissement du sol particulièrement en matière organique, une dégradation de leurs propriétés physiques et au total une perte de fertilité. L'agriculteur peut essayer par l'apport de compost, d'engrais verts ou de fumier de restaurer les stocks. L'effet de ces amendements organiques sur les rendements des cultures est généralement significatif (PICHOT, 1975). En revanche, l'évolution des caractéristiques du sol est difficile à mettre en évidence du fait de l'hétérogénéité des sols et de la rapidité du processus de décomposition des matières végétales dans les sols tropicaux cultivés.

L'objectif de l'expérimentation mise en place sur une parcelle de la station ORSTOM d'Adiopodoumé près d'Abidjan (Rép. de Côte d'Ivoire) était de mesurer l'évolution à court terme des caractéristiques d'un sol ferrallitique à la suite de l'apport de fumier d'étable à différentes doses. Dans une autre publication (B. BONZON et P. de BOISSEZON, 1986) nous avons analysé plus en détail l'effet des facteurs contrôlés (profondeur du

labour × fumure organique) sur les caractéristiques de la plante cultivée (manioc). Par ailleurs, le réseau de relations générales susceptible d'exister entre les caractéristiques observées sur le sol et/ou sur la plante ont pu être mis en évidence aux niveaux des résidus d'ajustement du modèle linéaire d'analyse de la variance. Les corrélations entre ces résidus, nous ont permis d'affiner l'étude de l'effet des facteurs contrôlés sur certaines de ces caractéristiques en leur appliquant alors une analyse de covariance. Nous nous limiterons ici à une analyse de l'effet du labour et de la fumure organique sur les caractéristiques chimiques du sol, et nous tenterons d'estimer le bilan des stocks dans les couches superficielles du sol.

1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental consistait en un essai blocs complets randomisés en parcelles subdivisées (*split-plot*) (fig. 1). Cet essai a été conçu par les agronomes, mis en place et conduit par G. BRUN chef du service d'expérimentation biologique de la station d'Adiopodoumé

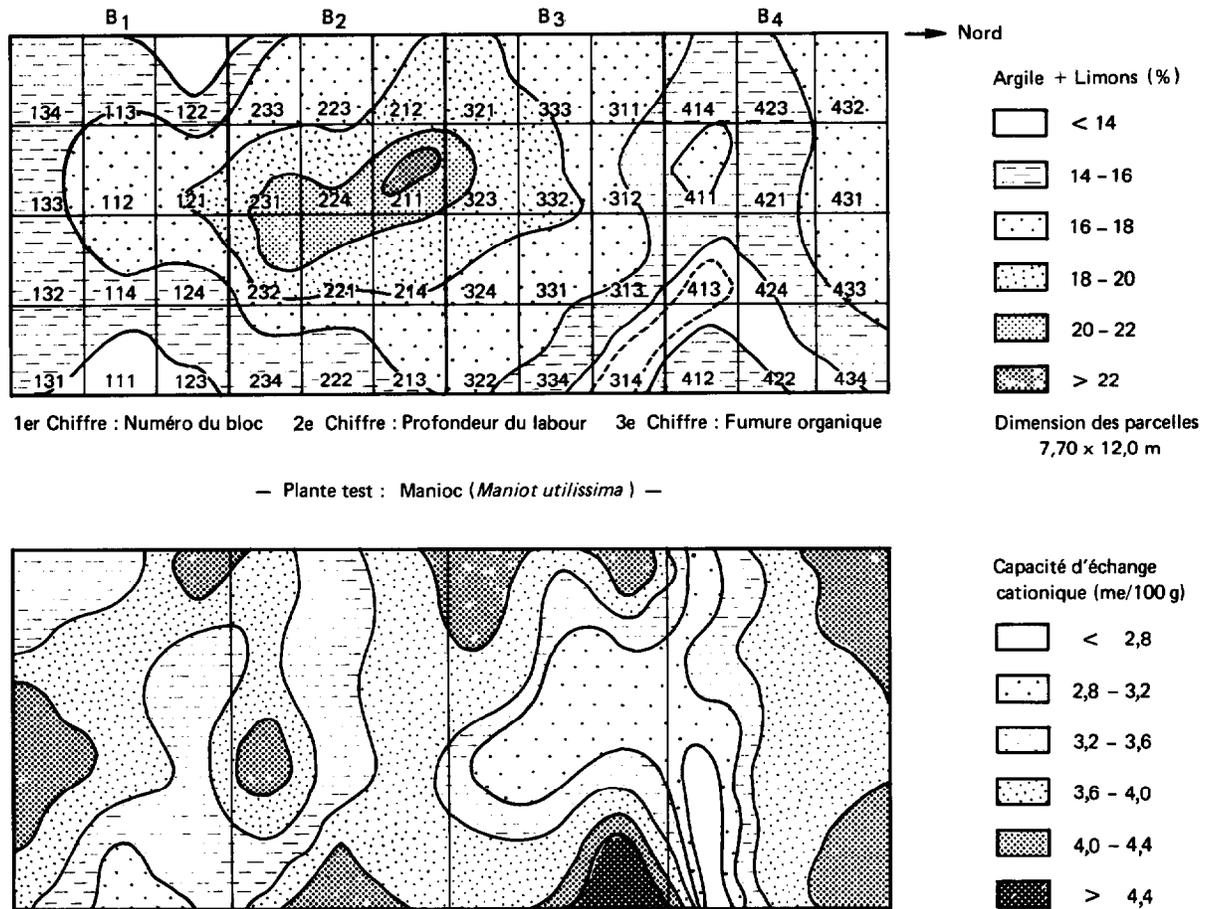


FIG. 1. — Plan de l'essai.

(Parcelle J₁). Le champ d'essai a été divisé en quatre blocs. Chacun des blocs a été partagé en trois parcelles correspondant aux trois profondeurs de labour (théoriquement : 20, 30 et 40 cm) réparties de façon aléatoire. Chacune des parcelles a été subdivisée en quatre sous-parcelles réparties également au hasard. Elles ont reçu 0, 30, 60 et 90 tonnes à l'hectare de fumier de ferme dont la composition moyenne est donnée dans le tableau I.

L'ensemble du terrain d'essai, initialement sous jachère herbacée à base de *Panicum maximum* a été tout d'abord gyrobroyé, puis soumis à un passage de covercrop. Toutes les parcelles ont reçu une fertilisation minérale de 50 kg d'urée, 110 kg de supertriple et 170 kg/ha de chlorure de potassium. Chacune des sous-parcelles a enfin reçu avant le labour les doses de fumier de ferme précédemment indiquées. Elles ont été

TABLEAU I
Composition chimique de l'amendement organique (fumier pailleux de bovins)

Humidité %	61	Carbone total %	277
pH	7,2	Azote total %	15
Matières minérales %	52	Calcium total (CaO) %	11,2
Matières organiques %	48	Magnésium total (MgO) %	5,3
		Potassium total (K ₂ O) %	13,5
		Phosphore total %	8,5

labourées avec une charrue à soc à trois profondeurs différentes (cf. § 3). Un manioc (*Manihot utilisima*, variété tabouca) a été utilisé comme plante test.

1.1. Prélèvements des échantillons de sol

Pour chaque parcelle, trois séries de cinq prélèvements ont été réalisées, en croix aux quatre coins et au centre d'un carré de 2 mètres de côté, dans la partie médiane des parcelles :

- avant la mise en place de l'essai en mai,
- huit mois plus tard en février de l'année suivante,
- après la récolte, au dix-septième mois, en octobre de la deuxième année.

Avant l'essai et après la récolte, les échantillons ont été prélevés à la tarière dans les couches 0-20, 20-30, 30-40 et 40-60 cm. Les cinq prélèvements d'une même couche et d'une même parcelle ont été réunis pour constituer un échantillon composite moyen.

Précisons que la première série de prélèvement a été effectuée après l'enfouissement de la jachère, mais avant l'application des doses de fumier et l'exécution du labour. Après la récolte, les échantillons ont été prélevés après passage d'une herse à disque (*covercrop*) afin d'aplanir les restes des billons rendus irréguliers par le déterrage des tubercules de manioc. Enfin au huitième mois, seule la couche 0-15 cm a été prélevée à la sonde cylindrique dans les billons entre les plants de manioc, afin de perturber le moins possible la culture. Les cinq échantillons recueillis sur chaque parcelle ont été également regroupés.

1.2. Techniques d'analyse du sol

Les déterminations analytiques ont été réalisées par le laboratoire commun d'analyse du centre d'Adiopodoumé selon les techniques classiques en usage dans les laboratoires de l'ORSTOM :

— *Granulométrie* à l'aide de la pipette ROBINSON (argile A, limons fins C) après dispersion par le pyrophosphate de sodium, et tamisage des sables à sec. Résultats en pourcent.

— *Carbone organique* (C) par la méthode WALKLEY et BLACK (10^{-3}).

— *Azoté total* (N) par la méthode KJELDAHL modifiée (10^{-3}).

— Le carbone des *acides humiques* (CAH) et *fulviques* (CAF), extraits par une solution 0,1 M de pyrophosphate de sodium, a été dosé par le mélange sulfochromique à chaud. Les matières humiques non-extractibles par les solvants alcalins (ou humine) ont été évaluées par différence : $CHU = C - CAH - CAF$ ($C \cdot 10^{-3}$).

— Le *pH* du sol en suspension dans l'eau (rapport 1 : 2,5) a été mesuré par une méthode électrométrique.

— *Les bases échangeables*, calcium, magnésium, potassium et sodium, ont été extraites par une solution normale d'acétate d'ammonium neutre et dosées par photométrie de flamme (me/100 g de sol) - S est la somme des bases échangeables.

— *La capacité d'échange cationique* à pH : 7 a été mesurée par saturation du sol par une solution de $CaCl_2$ normale, tamponnée par la triéthanolamine, les ions Ca fixés sur le complexe absorbant ont été déplacés par une solution de KNO_3 normale, puis dosés par complexométrie. La capacité d'échange (T) est exprimée en me/100 g de sol. La mesure de la capacité d'échange après longue calcination (6 heures) des échantillons de sols, à température modérée ($350^\circ C$) (P. de BOISSEZON 1970) permet d'évaluer la capacité d'échange des matières minérales (TRS) et des matières organiques ($TMO/C = (T - TRS)/(C - CRS)$) exprimé en me/100 g de carbone organique.

— *Le déficit de saturation* est estimé par la différence : $DS = T - S$ et exprimée en me/100 g de sol.

2. LE SOL

Il s'agit d'un sol ferrallitique fortement désaturé et appauvri sur sédiments sablo-faiblement argileux d'âge néogène. Les résultats analytiques présentés dans le tableau II précisent les caractéristiques de ce type de sol sous végétation naturelle (forêt dense ombrophile à *Turraeanthus*). L'accroissement progressif avec la profondeur des teneurs en éléments fins et également en fer sont caractéristiques de ces sols dont les horizons supérieurs sont appauvris en argile.

La fraction argileuse contient essentiellement de la kaolinite et de la goéthite. La capacité d'échange à pH 7, rapportée aux teneurs en argile dans l'horizon B, varie entre 11 et 13 me/100 g d'argile. Dans l'horizon plus sableux de surface, la capacité d'échange due aux matières organiques est plus importante, mais la somme des bases échangeables, le taux de saturation $V = S/T$ restent faibles et la réaction très acide (pH inférieur à 5).

En relation avec la texture légère, les teneurs en matières organiques sont faibles, sauf dans les tous premiers centimètres du profil sous forêt. Toutefois la pénétration humifère en profondeur est homogène et relativement importante. La fraction de l'humus extractible par les solvants alcalin ne représente qu'un tiers des matières organiques. Les acides humiques dominent dans l'horizon A_1 . Inversement dans l'horizon A_3 les acides fulviques représentent les deux tiers des matières humiques extractibles.

Les caractéristiques moyennes du sol au début de l'essai diffèrent assez peu de celles sous forêt naturelle. La teneur en matière organique de la couche supérieure du champ d'essai est sensiblement plus faible, mais le taux de matières humiques extractibles $(CAH + CAF)/C$ est un peu plus élevé. La somme des bases échangeables est significativement plus importante ainsi que le taux de saturation, mais la réaction reste très acide.

TABLEAU II
Sol ferrallitique fortement désaturé appauvri sur sables néogènes

Végétation	Sous forêt dense ombrophile				Sous jachère à <i>Panicum</i>			
	0 20	60 70	140 160	240 260	0 20	20 30	30 40	40 60
profondeur min. cm	0	60	140	240	0	20	30	40
profondeur max. cm	20	70	160	260	20	30	40	60
Argile (10^{-2})	12,6	18,8	21,5	36,6	9,4	10,0	12,7	17,8
Limon fin (10^{-2})	2,9	2,6	3,9	3,4	3,8	3,6	3,6	3,7
Limon grossier (10^{-2})	2,7	2,4	3,6	3,1	5,5	5,9	5,3	5,2
Sable fin (10^{-2})	23,8	16,5	24,1	17,0	28,6	28,2	26,6	22,9
Sable grossier (10^{-2})	57,9	59,6	46,7	39,7	51,9	51,6	51,1	50,2
Carbone (10^{-3})	7,00	3,81	2,13	-	6,20	4,71	4,66	4,52
Azote (10^{-3})	0,79	0,42	0,32	-	0,62	0,46	0,46	0,46
Ac. humiques (10^{-3})	1,39	0,31	-	-	1,20	0,92	0,77	0,70
Ac. fulviques (10^{-3})	1,01	0,70	-	-	1,10	1,09	1,22	1,36
pH eau	4,8	4,6	5,0	4,9	5,02	5,03	4,95	4,9
Ca éch. (me/100 g)	0,17	0,15	0,13	0,08	0,54	0,42	0,39	0,40
Mg éch. (me/100 g)	0,05	0,02	0,11	0,11	0,31	0,22	0,20	0,19
K éch. (me/100 g)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Na éch. (me/100 g)	0,06	0,05	0,05	0,11	0,02	0,02	0,02	0,02
Sommes des bases éch. (me/100 g)	0,31	0,25	0,32	0,32	0,90	0,68	0,63	0,63
Capacité d'échange (T) (me/100 g)	4,69	4,72	2,77	3,99	3,13	3,27	3,26	3,42
V = S/T (%)	6,6	5,3	11,6	8	29,4	21,6	19,4	19,2
C/N	9,9	9,2	6,5	-	10,1	10,4	10,3	10,0

2.1. Hétérogénéité du champ d'essai

Malgré une topographie presque plane, le champ d'essai présente une certaine hétérogénéité qui est en partie liée aux variations texturales du matériau originel d'origine sédimentaire (fig. 1). Les caractéristiques chimiques des 48 sous-parcelles sont également assez variables en particulier pour la somme des bases échangeables, le taux de saturation $V = S/T$, et le rapport entre les acides fulviques et les acides humiques CAF/CAH. Les coefficients de variation sont en général du même ordre de grandeur dans la couche 0-20 cm que dans les couches plus profondes.

2.1.1. VARIATIONS HORIZONTALES (cf. tabl. III)

L'analyse de la variance présentée dans ce tableau blocs \times couches avec 12 mesures par cases (correspondant aux caractéristiques analytiques des échantillons composites moyens prélevés avant le labour et l'apport de fumier dans chaque parcelle élémentaire) montre que l'hypothèse d'égalité des moyennes pour les quatre blocs est le plus souvent à rejeter pour la plupart des caractéristiques chimiques, en particulier celles relatives aux teneurs en matières organiques. Les caractéristiques moyennes du bloc B4 sont le plus souvent significativement différentes des valeurs moyennes des autres blocs au niveau $p = 0,05$ (test de NEWMAN et KEULS). Ce bloc B4 est plus riche que les autres blocs en une matière organique dont le rapport C/N est un peu plus faible avec des teneurs en humine plus élevées. La capacité d'échange moyenne du sol pour les différentes couches, et la capacité d'échange des matières organiques sont significativement plus faibles dans le bloc B4.

Pour chaque couche prise séparément, l'analyse de la variance est à un seul facteur (les blocs) ; et chaque bloc comporte 12 mesures. Si CMb et CMr représentent respectivement les variances factorielles (effet bloc) et résiduelle, la variabilité entre les blocs peut être appréciée par le coefficient de variation entre les blocs $CV_b : \sqrt{(CMb - CMr)/12/\bar{x}}$, tandis que le coefficient de variation dans les blocs $CV = \sqrt{CMr/\bar{x}}$ mesure la dispersion des résultats analytiques à l'intérieur des blocs. Les résultats rapportés dans

TABLEAU III
Caractéristiques initiales du champ d'essai

Déterminations analytiques	Variations verticales dans les couches prélevées (0-20, 20-30, 30-40, 40-60 cm)			Caractéristiques moyennes des blocs (0-60 cm)			
	Couches	Teneurs moyennes	Analyse variance	Blocs	Teneurs moyennes	Analyse variance	Moyenne générale
C Carbone (10^{-3})	C 1 C 2 C 3 C 4	6,197 4,710 4,659 4,520	*** $F_c=106,98$	B ₃ B ₁ B ₂ B ₄	4,904 4,996 5,030 5,605	*** $F_B=14,30$ $F_{BC}=0,88$ NS	5,134
N Azote (10^{-3})	C 1 C 2 C 3 C 4	0,622 0,462 0,459 0,464	*** $F_c=88,19$	B ₃ B ₂ B ₁ B ₄	0,486 0,496 0,501 0,579	*** $F_B=21,13$ $F_{BC}=0,65$ NS	0,5156
CAF/CAH (%)	C 1 C 2 C 3 C 4	94,38 123,02 164,79 204,29	*** $F_c=144,13$	B ₁ B ₄ B ₂ B ₃	125,07 144,97 150,77 169,08	*** $F_B=16,43$ $F_{BC}=0,59$ NS	147,46
Taux d'extraction (%) des matières humiques	C 1 C 2 C 3 C 4	37,26 42,92 43,01 46,00	*** $F_c=93,38$	B ₄ B ₂ B ₁ B ₃	38,87 41,45 41,64 45,74	*** $F_B=51,89$ $F_{BC}=0,21$ NS	42,07
CHU (10^{-3}) matières organiques non extractibles	C 1 C 2 C 3 C 4	3,898 2,700 2,669 2,457	*** $F_c=152,6$	B ₃ B ₂ B ₁ B ₄	2,717 2,900 2,951 3,447	*** $F_B=27,4$ $F_{BC}=0,53$ NS	3,0143
S bases échangeables (me/100 g)	C 1 C 2 C 3 C 4	0,911 0,683 0,631 0,645	*** $F_c=19,59$	B ₁ B ₄ B ₂ B ₃	0,601 0,740 0,786 0,824	** $F_B=9,22$ $F_{BC}=0,38$ NS	0,738
Capacité d'échange du sol T (me/100 g)	C 1 C 2 C 3 C 4	3,129 3,271 3,260 3,425	NS $F_c=1,65$	B ₄ B ₁ B ₃ B ₂	2,985 3,204 3,345 3,559	* $F_B=4,92$ *** $F_{BC}=5,91$	3,273
Capacité d'échange des matières organiques TMO/C me/g. C.orga.)	C 1 C 2	3,122 3,667	* $F_c=6,83$	B ₄ B ₁ B ₃ B ₂	2,181 3,311 3,768 3,954	*** $F_B=16,39$ $F_{BC}=1,36$ NS	3,304
pH (H ₂ O)	C 1 C 2 C 3 C 4	5,021 5,025 4,948 4,944	1/10 $F_c=2,92$	B ₁ B ₄ B ₂ B ₃	4,913 4,915 4,989 5,118	*** $F_B=13,66$ $F_{BC}=0,44$ NS	4,984

#,] : Caractéristiques moyennes des couches ou blocs significativement différentes, ou non.

F_c , F_B et F_{BC} : Quotient des variances dues à l'effet couche, à l'effet bloc et à l'interaction bloc-couche par la variance résiduelle. La signification est obtenue en comparant avec la variable F de Snedecor.

le tableau IV montrent que l'hétérogénéité à l'intérieur des blocs est très élevée pour la somme des bases échangeables et le taux de saturation, puisque le coefficient de variation entre les sous-parcelles dépasse 40 %.

L'analyse de la variance pour les teneurs moyennes de l'ensemble du profil (0-60 cm) montre également (tabl. III) que l'hypothèse d'égalité des moyennes par

bloc doit être écartée pour les caractéristiques indépendantes. En particulier, le test de NEWMAN et KEULS montre que les caractéristiques moyennes relatives aux matières organiques pour le bloc B₄ sont significativement différentes de celles des autres blocs.

Les analyses granulométriques ont seulement été réalisées sur les échantillons prélevés en fin d'essai. II

TABLEAU IV
Hétérogénéité initiale du champ d'essai

Couches prélevées	0-20 cm			20-30 cm			30-40 cm			40-60 cm		
Caractéristiques	Effet bloc	CVb	CV	Effet bloc	CVb	CV	Effet bloc	CVb	CV	Effet bloc	CVb	CV
Carbone (10^{-3})	*	6,6	11,8	NS	4,1	14,0	**	7,2	12,5	NS	3,9	10,9
Azote (10^{-3})	*	8,7	15,5	*	8,7	16,8	*	6,6	15,1	NS	3,8	17,2
Capacité d'échange	***	10,7	14,0	***	14,4	13,0	*	3,8	8,1	NS	3,5	10,4
Sommes des bases échangeables	NS	12,6	42,4	NS	-	52,7	NS	-	55,6	NS	-	53,6
pH eau	NS	1,7	5,9	NS	1,1	5,5	NS	-	5,8	NS	1,6	4,8

Effet bloc : la signification des différences entre les caractéristiques moyennes de chaque bloc est calculée en comparant le quotient de la variance de l'effet bloc par la variance résiduelle à la variable F de Snedecor. NS : non significatif ; * : significatif ($p = 0,05$) ; ** : hautement significatif ($p = 0,01$) ; *** : très hautement significatif.

CVb : Coefficient de variation entre les blocs (%). CV : Coefficient de variation dans les blocs (%).

Il n'est donc pas possible d'estimer l'hétérogénéité texturale initiale dans les couches qui ont été remaniées par le labour. Toutefois l'analyse de la variance pour la couche 40-60 cm située en-dessous de la couche labourée et celle du stock dans l'ensemble du profil (0-60 cm) montrent que les teneurs moyennes du bloc 2 bien que supérieures aux teneurs en éléments fins des autres blocs, ne sont pas significativement différentes. Le bloc 4, qui est le plus riche en matière organique, ne présente pas une texture moyenne particulière (cf. fig. 1).

2.1.2. VARIATIONS VERTICALES (tabl. III)

L'analyse de la variance montre que les caractéristiques moyennes des différentes couches prélevées avant le labour, sont significativement différentes pour la plupart des caractéristiques chimiques sauf pour le pH, le rapport C/N et la capacité d'échange T. Pour les autres caractéristiques, ce sont les valeurs moyennes relatives à la couche superficielle 0-20 cm qui diffèrent significativement de celles des autres couches. Cette couche supérieure du champ est donc nettement plus riche en matière organique (C et N) et en bases échangeables (S) au début de l'expérimentation. On notera par ailleurs l'augmentation avec la profondeur du taux de matières humiques extractibles (CAH + CAF)/C et le doublement du rapport CAF/CAH entre les couches 0-20 et 20-40 cm).

2.2. Complexe absorbant

Un des objectifs de l'essai était de mesurer l'effet de l'apport de fumier sur la capacité d'échange à pH : 7 de ce sol sablonneux faiblement argileux, avec des minéraux argileux à faible capacité d'échange. Nous avons

donc mesuré le rôle apparent des matières organiques et des matières minérales par comparaison des capacités d'échange cationique avant (T) et après (TRS) calcination des échantillons à température modérée (P. de BOISSEZON 1970). Bien que l'augmentation de la capacité d'échange avec la profondeur ne soit pas significative, on notera que la capacité d'échange des matières minérales (TRS) est significativement plus importante dans la couche 20-30 cm que dans la couche 0-20 cm. Ceci est à mettre en relation avec l'appauvrissement en argile de la couche supérieure du sol (cf. § 3.1 et fig. 2).

Le rôle apparent des matières organiques du point de vue du complexe absorbant (T - TRS)/T qui est en moyenne de 58 % pour la couche 0-20 cm passe à 49 % dans la couche 20-30 cm. Mais paradoxalement c'est dans le bloc B4, qui est en moyenne le plus riche en matières organiques, que la capacité d'échange d'origine organique joue le rôle le plus faible (52 et 42 % pour les couches 0-20 et 20-30 cm).

Lorsque la variation de capacité d'échange, avant et après calcination est rapportée aux teneurs en matières organiques détruites, on constate d'ailleurs que la capacité d'échange des matières organiques TMO = (T - TRS)/(C - CRS) est significativement plus faible pour le bloc B4 : 380 et 368 me/100 g de matière organique respectivement pour les couches 0-20 et 20-30 cm, alors que les moyennes générales sont respectivement de 538 et 632 me/100 g de matière organique (tabl. III).

Cette anomalie est donc à mettre en parallèle avec la présence dans ce bloc d'une matière organique plus abondante et plus évoluée avec un rapport C/N un peu plus faible, des teneurs en matières humiques extractibles

plus faibles et des teneurs en humine bien supérieures. L'hétérogénéité des matières organiques dans ce champ d'essai explique peut-être l'absence de corrélation significative entre la capacité d'échange du sol et les teneurs en carbone total, comme entre TMO = T — TRS et (C — CRS).

2.3. Conclusions sur les caractéristiques initiales du champ d'essai

Pour estimer la part de l'hétérogénéité, qui est due aux erreurs d'analyse, nous avons comparé, pour les teneurs initiales moyennes dans la couche qui sera labourée, la variance de l'effet bloc avec la variance de la détermination analytique. Ces dernières valeurs ont été obtenues sur un échantillon témoin provenant de la

même série de sols, qui a été analysé en routine de nombreuses fois par le laboratoire qui a réalisé toutes les analyses de cet essai (M. GOUZY, Communication personnelle) (tabl. V).

Logiquement, la variance résiduelle devrait être supérieure à la variance de l'erreur d'analyse. On constate en effet que pour les échantillons prélevés dans un même bloc et analysés dans la même série, la dispersion des résultats analytiques est en général plus importante que pour l'analyse d'un même échantillon témoin dans des séries d'analyses successives. Toutefois ceci n'est pas vrai pour le magnésium et le potassium échangeables, ni pour l'azote total.

Par ailleurs, la variance de l'effet bloc est en général bien supérieure à la variance de l'erreur analytique, sauf

TABLEAU V

Analyse de la variance : effet bloc — erreurs d'analyse (teneurs initiales moyennes de la couche qui sera labourée)

Variabes	Variance de l'effet bloc (b)	Variance résiduelle (r)	F observé b/r	Variance de l'erreur d'analyse (a)	F observé b/a
Capacité d'échange	1,5144	0,2037	7,44 *	0,0713	2124 ***
Sommes des bases échangeables	0,2286	0,1006	2,27 NS	0,0465	4,92 **
Déficit de saturation	1,3998	0,2067	6,77 *	0,1178	11,88 ***
Calcium échangeable	0,1048	0,0501	2,09 NS	0,0161	6,51 ***
Magnésium échangeable	0,0220	0,0145	1,52 NS	0,0154	1,43 NS
Potassium échangeable	0,00042	0,00035	1,20 NS	0,0149	0,028 NS
Carbone total	1,5854	0,8595	1,84 NS	0,3721	4,26 **
Azote total	0,0303	0,0037	8,12 *	0,0729	0,416 NS

pour l'azote, le magnésium et le potassium échangeables. Ceci jette un doute sur la signification de l'effet bloc pour les teneurs en azote, mais n'explique pas l'effet bloc sur la capacité d'échange. Pour ces deux paramètres, on constate que le bloc n° 4 a une teneur moyenne en azote significativement supérieure à celle des autres blocs et un capacité d'échange significativement plus faible.

L'hétérogénéité horizontale entre les différents blocs paraît donc être liée essentiellement aux teneurs et à la nature des matières organiques du bloc B4 qui diffèrent significativement de celles contenues dans les trois autres blocs. Il y a en revanche peu de différences significatives entre les caractères des trois autres blocs.

Les variations des caractéristiques à l'intérieur des blocs (tabl. IV) sont cependant relativement importantes, en particulier pour les bases échangeables et le taux de saturation du complexe absorbant.

Les variations des caractéristiques chimiques avec la profondeur (tabl. III) sont moins marquées que sous forêt (tabl. II). L'hétérogénéité verticale est surtout significative entre les caractéristiques de la couche 0-20 cm et les couches plus profondes, non seulement pour les teneurs en bases échangeables, mais aussi pour celles relatives aux matières organiques. Toutefois des différences significatives existent plus en profondeur pour les matières humiques extractibles. Leur importance relative s'accroît avec la profondeur et il y a une dominance de

plus en plus marquée des acides fulviques. Ce gradient de différenciation des matières humiques dans le profil cultural initial permet, comme nous le verrons, de confirmer les remaniements dus au labour.

3. EFFETS DU LABOUR

Dans ce sol de texture légère et dépourvu d'éléments grossiers, il a été possible de mesurer la profondeur réelle du labour (Pfl) dans les différentes parcelles, en enfonçant une série de neuf aiguilles jusqu'à la sole du labour qui offre une résistance nettement plus grande à la pénétration. L'analyse des valeurs moyennes pour chaque parcelle montre que les profondeurs du labour diffèrent sensiblement de celles prévues dans le protocole d'essai pour le labour le moins profond (tabl. VI).

TABLEAU VI
Profondeurs du labour (cm)

Profondeurs (cm)	théoriques	réelles (valeurs moyennes)
P 1	20	25,34
P 2	30	28,20
P 3	40	39,45

Bien que l'analyse de la variance montre que les profondeurs du labour sont significativement différentes, les deux premières sont très proches. Il en résulte, comme nous le verrons, que les effets de P₁ et P₂ sur les diverses caractéristiques ne sont pas toujours significativement différents, par contre l'effet P₃ diffère en général de celui de P₁ ou P₂.

TABLEAU VII
Effet du labour sur les teneurs en éléments fins (A+L) dans la couche labourée

Profondeur moyenne du labour (cm)	P ₁ : 25,3	P ₂ : 28,2	P ₃ : 39,5	Moy. : 31,0
Teneurs moyennes (10 ⁻²)	12,81 ** →	12,62	14,91	13,45
Stocks moyens (kg/m ²)	32,20 *** →	35,58	58,85	42,21

deux fois plus important pour le traitement P₃ que pour P₁, bien que l'épaisseur de la couche labourée soit seulement dans le rapport 3/2 pour ces deux traitements. Le stock moyen en argile de la couche labourée est intermédiaire pour la profondeur de labour P₂, mais

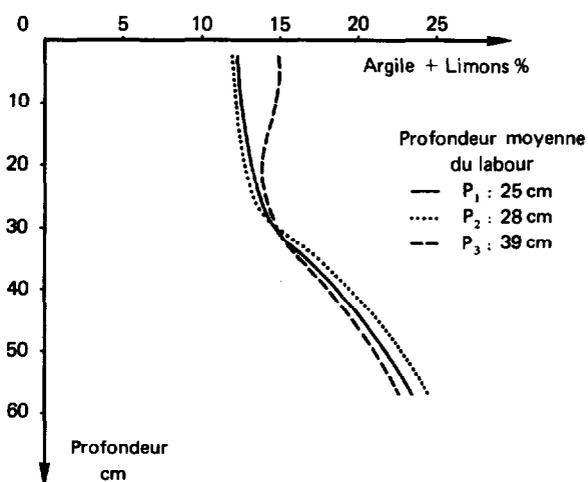


FIG. 2. — Influence de la profondeur de labour sur la texture.

3.1. Influence du labour sur la texture

L'absence d'analyse granulométrique sur les prélèvements réalisés en début d'essai, ou de traitement sans labour permet seulement de faire des comparaisons relatives (fig. 2). L'analyse de la variance pour chacune des couches (tabl. VII) permet de vérifier que le labour le plus profond P₃ entraîne un enrichissement significatif en argile de la couche supérieure du sol (0-20 cm). Au contraire, en profondeur 30-40 et 40-60 cm les teneurs en éléments fins sont un peu plus faibles pour le labour P₃. Ce labour a donc bien pour effet de remonter en surface la terre plus argileuse de profondeur et d'enfouir la terre plus légère initialement en surface. Au total le stock moyen en argile de la couche labourée est

elle est plus proche de P₁.

Le stock moyen dans la couche labourée correspond à la somme des produits des teneurs de chaque couche prélevée par son épaisseur (en dm) jusqu'au fond du labour (densité apparente supposée égale à 1, cf. chap. 5).

En résumé, le labour P₃ homogénéise la texture dans les quarante premiers centimètres du sol en remontant en surface la terre plus argileuse provenant d'horizons plus profonds. L'indice d'appauvrissement, quotient des teneurs en éléments fins de chaque couche par rapport à la teneur de la couche la plus argileuse (40-60 cm), reste pour P₃ de l'ordre de 0,7 dans les trois couches 0-20, 20-30 et 30-40 cm. Pour les labours P₁ et P₂, l'indice d'appauvrissement est de l'ordre de 0,6 dans la couche 20-30 cm et décroît à 0,5 dans la couche superficielle (0-20 cm).

3.2. Influence du labour sur les caractéristiques chimiques du sol.

3.2.1. MATIÈRES ORGANIQUES

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés dans

le billon, au neuvième mois de culture, montrent que les teneurs moyennes en matières organiques décroissent lorsque la profondeur du labour augmente (tabl. IX). Il en est de même dans les prélèvements provenant de la couche supérieure du profil ou des teneurs moyennes dans la couche labourée au 17^e mois en fin d'essai (tabl. VIII). Inversement, dans les couches 30-40 et 40-60 cm les teneurs en matière organique augmentent significativement avec la profondeur du labour.

Il existe donc une interaction très hautement significative entre la profondeur du labour et la profondeur des couches du sol qui ont été prélevées et analysées (tabl. VIII). Cette interaction résulte d'une variation en sens inverse pour P₁, P₂ et P₃ des teneurs en carbone (ou azote) qui diminuent dans la couche 0-20 cm d'une part,

TABLEAU VIII
Effet du labour sur les teneurs en carbone et azote (valeurs moyennes en fin d'essai en 10⁻³)

Couches	CARBONE				AZOTE			
	Prof. du labour			Moy.	Prof. du labour			Moy.
	P ₁	P ₂	P ₃		P ₁	P ₂	P ₃	
0-20 cm	*** 6.85 ↓ * →	*** 6.27 ↓	*** 5.96 ↓	*** 6.36 ↓	*** 0.67 ↓ * →	*** 0.63 ↓	0.1 0.58 ↓	*** 0.63 ↓
20-30	6.21 NS →	6.55	6.31	6.36	0.59 NS →	0.64	0.58	0.60
30-40	4.88 * →	5.26	6.12	5.42	0.49 ** →	0.54	0.59	0.54
40-60	4.06 ** →	4.50	5.17	4.58	0.46 NS →	0.50	0.52	0.49
Moy. 0-60 cm	5.49 NS →	5.56	5.78	5.61	0.56 NS →	0.57	0.56	0.56
Couche labourée	6.75 ** →	6.35	6.06	6.39	0.66 * →	0.63	0.59	0.62

→ Effet profondeur du labour

↓ Effet couches

et augmentent dans les couches 30-40 et 40-60 cm d'autre part. Dans la couche 20-30 cm il n'y a pas d'effet significatif de la profondeur du labour sur les teneurs en matières organiques. En outre les teneurs moyennes en acides humiques (tabl. X) diminuent avec la profondeur du labour dans la couche billonnée ou dans la couche superficielle du sol (0-20) en fin d'essai, tandis que les teneurs en acides fulviques restent analogues ou augmentent légèrement comme les teneurs en matières organiques non extractibles. Le parallélisme existant entre les caractéristiques moyennes des échantillons de surface provenant de parcelles ayant subi un labour de plus en plus profond, et les variations verticales de ces caractéristi-

ques dans les différentes couches avant le labour, montrent clairement que le labour provoque une remontée dans la couche superficielle de terre plus argileuse et relativement moins riche en matières humiques provenant essentiellement de profondeurs de plus en plus grandes. Inversement, le labour enfouit à des profondeurs croissantes de la terre plus humifère provenant en grande partie de l'horizon précédemment en surface.

Il existe d'ailleurs une corrélation significative entre les résidus d'ajustement de l'analyse de la variance au premier niveau pour les teneurs en carbone dans le billon et pour les teneurs en éléments fins dans la couche superficielle du sol. L'ajustement des teneurs en carbone de

la couche billonnée sur les teneurs en argile plus limons de la couche superficielle du sol permet de réduire le coefficient de variation et rend d'autant plus signifi-

tif l'effet sur C 10 du traitement profondeur du labour (tabl. IX).

Autrement dit, on observe une remontée par le labour

TABLEAU IX

Effet de la profondeur du labour sur les teneurs moyennes en carbone dans le billon (C 10) au 9^e mois — (10⁻³)

Moyenne générale : 5,70 Analyse de la variance C 1 0	Profondeur du labour			Fp	CV ₁ (%)
	P1	P2	P3		
	6,21	5,56	5,32	2,91 ^{NS}	18,9
Analyse de la co- variance C 1 0 ajusté sur AL21	6,49	5,99	4,60	26,8 ^{**}	13,3
A 21 teneur en argile de la couche 0-20 cm	8,95	8,59	10,69	6,32 [*]	18,9
A+L 21 teneur en argile plus limon de la couche 0-20 cm	12,63	12,31	14,76	9,18 [*]	40,3

Fp : quotient de la variance de l'effet profondeur de labour par la variance résiduelle du premier niveau d'analyse de la variance (bloc × profondeur du labour).

CV₁ : coefficient de variation, quotient de l'écart-type résiduel au premier niveau par la moyenne.

de terre d'autant moins humifère, mais d'autant plus riche en éléments fins qu'elle provient d'une couche profonde. Le processus d'appauvrissement en matière organique de la couche supérieure du sol est donc partiellement compensé par le rôle protecteur ou stabilisateur de la fraction argileuse.

Le dosage des matières humiques extractibles par le pyrophosphate de sodium n'a été réalisé que sur les échantillons prélevés en fin d'essai dans les couches 0-20 et 20-30 cm. Les teneurs moyennes en acides humiques CAH

et fulviques CAF correspondant aux différentes profondeurs de labour ne diffèrent pas d'une manière significative. En revanche pour la couche 0-20 cm le rapport CAF/CAH augmente avec la profondeur du labour, tandis que inversement le taux de matière organique non extractible ou d'humine diminue significativement (tabl. X). La comparaison de ces nombres avec le gradient de différenciation des matières organiques en profondeur dans le profil initial confirme donc la remontée en surface de terre de profondeur.

TABLEAU X

Influence du labour sur les matières humiques mgC/100 g. Valeurs moyennes en fin d'essai

Caractéristiques	Profondeur du labour			Moyenne
	P1	P2	P3	
CAH 21 (0-20 cm)	1,06 ^{NS}	1,04	0,93	1,01
CAH 22 (20-30 cm)	0,93 ^{NS}	1,10	0,97	1,00
CAF 21 (0-20 cm)	1,04 ^{NS}	1,08	1,11	1,08
CAF 22 (20-30 cm)	1,05 ^{NS}	1,09	1,11	1,08
CAF/CAH 21 en %	100 ^{**}	105	128	111
CAF/CAH 22 en %	117 ^{NS}	104	118	113
CHU 21 (0-20 cm)	4,75 [*]	4,14	3,93	4,27
CHU 22 (20-30 cm)	4,23 ^{NS}	4,37	4,23	4,28

CAH et CAF teneurs en carbone des acides humiques et fulviques.

CHU = C — (CAH + CAF) teneurs en carbone des matières organiques non extractibles.

TABLEAU XI
Influence du labour sur le rapport C/N (valeurs moyennes)

C/N fin d'essai Couches	Profondeur du labour			Moyennes
	P1	P2	P3	
0-20 cm	NS → 10,3 ↓ **	10,1 ↓ 0,1	10,3 ↓ NS	10,2 ↓ **
20-30	→ 10,5	10,3	10,9	10,6
30-40	0,1 → NS → 10,2	9,7	10,4	10,1
40-60	NS → 8,8 * →	9,1	9,9	9,3

→ effet profondeur du labour

↓ effet couche

L'effet du labour sur le rapport C/N dans les diverses couches du sol est faible et les différences entre les valeurs moyennes ne sont pas significatives (tabl. XI). On constate que la diminution du rapport C/N avec la profondeur est hautement significative pour le labour P₁, à peine significative pour P₂ et n'est plus significative pour P₃. Il y a donc une homogénéisation du degré d'évolution des matières organiques dans les horizons qui ont été remaniés par le labour.

3.2.2. INFLUENCE DU LABOUR SUR LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LA SATURATION DU COMPLEXE ABSORBANT.

Les teneurs moyennes, pour chacune des profondeurs du labour, de la somme des bases, du pH et du taux

de saturation du complexe d'échange ne diffèrent pas significativement lorsque l'on considère les moyennes pour l'ensemble du profil (0-60 cm). En revanche, l'effet du labour est significatif pour les couches superficielles 0-20 et 20-30 cm ainsi que pour les teneurs moyennes de la couche labourée (2TL). Dans ces couches, S, pH et V décroissent lorsque la profondeur du labour s'accroît (tabl. XII).

Plus en profondeur, dans les couches 30-40 et 40-60 cm, nous observons inversement des valeurs légèrement croissantes avec la profondeur du labour, mais ces variations sont limitées et non significatives.

Dans l'ensemble, il existe donc pour les teneurs en bases échangeables une interaction hautement significative entre la profondeur du labour et les couches du sol.

TABLEAU XII
Effet du labour sur les teneurs moyennes en bases échangeables

S me/100 g en fin d'essai Couches prélevées	Profondeur du labour			Moyenne
	P1	P2	P3	
0-20 cm	1.16 *** ↓ **	1.03 *** ↓	0.75 ** ↓	0.98 *** ↓
20-30	** → 1.12	1.17	0.83	1.04
30-40	** → 0.81	1.09	1.02	0.97
40-60	NS → 0.64 NS →	0.79	0.90	0.78
Moyenne (0-60)	0.92 NS →	0.98	0.86	0.92
Couche labourée 2TL	1.15 ** →	1.07	0.82	1.015

→ Effet profondeur du labour

↓ Effet couche

Ceci confirme la remontée en surface de terre d'autant plus pauvre en bases qu'elle provient d'horizons plus profonds et inversement l'enfouissement au fond du labour de terre de surface initialement plus riche en bases.

L'effet de la profondeur du labour sur la capacité

d'échange à pH : 7 n'est pas significatif ni dans chacune des couches, ni dans l'ensemble du profil (tabl. XIII). Ceci peut s'expliquer par les effets opposés du labour sur la capacité d'échange d'origine minérale et organique. Le labour remonte en surface une terre plus argileuse, mais plus pauvre en matière organique. Il

TABLEAU XIII
Effet du labour sur la capacité d'échange cationique à pH : 7 (me/100 g)

Teneurs moyennes en fin d'essai Couches prélevées	Profondeur du labour			Moyennes	
	P ₁	P ₂	P ₃		
T 21 0-20 cm	3.12** NS→	3.25** ↓	3.43* ↓	3.27*** ↓	
T 22 20-30 cm	3.32 NS→	3.35	3.36	3.34	
T 23 30-40 cm	3.43 NS→	4.07	3.92	3.81	
T 24 40-60 cm	4.02 NS→	4.19	4.03	4.08	
Moyennes 0-60	3.51 NS→	3.72	3.70	3.64	
Teneurs finales dans la couche labourée T 2TL Analyse de la variance	P ₁	P ₂	P ₃	F _{pL}	CV ₁
	3.17	3.29	3.52	1.18 NS	19.61
Covariance (T 2TL ajusté sur AL 2TL)	3.42	3.62	2.93	24.7 **	8.59
Covariance (TE 2TL ajusté sur C 2TL)	2.72	3.34	3.92	26.6 **	14.01

enfouit à différentes profondeurs la terre provenant de la surface moins argileuse, mais plus humifère.

L'effet du labour P₃ sur la capacité d'échange moyenne de la couche labourée est pleinement démonstratif à ce sujet. L'analyse de la variance de T 2TL montre que la capacité d'échange moyenne de la couche labourée n'augmente que très faiblement avec la profondeur du labour et l'effet profondeur du labour n'est pas significatif. En revanche, l'ajustement de T 2TL sur la teneur en argile plus limons AL 2TL montre que la covariance devient hautement significative. L'élimination des variations de la capacité d'échange qui sont liées aux taux d'éléments fins, entraîne donc une diminution significative de la capacité d'échange pour le traitement P₃, qui correspond au labour le plus profond. Inversement si on retranche les variations de la capacité d'échange qui sont liées aux variations des taux de matières organiques (ajustement sur C 2TL), on observe une augmentation hautement significative de la capacité d'échange moyenne avec la profondeur du labour.

Ces variations en fonction de la profondeur du labour

des teneurs moyennes en bases échangeables et de la capacité d'échange dans la couche labourée ont pour résultat une augmentation du déficit de saturation de 34 % entre P₃ et P₁. Parallèlement la concentration moyenne en ions [H⁺] dans la couche labourée augmente de 45 %, c'est-à-dire que le pH correspondant décroît significativement de 5.16 pour P₁ à 4.99 pour P₃.

4. EFFETS FUMURE

4.1. Influence de l'apport du fumier sur les matières organiques du sol

On ne constate (tabl. XIV) aucune différence significative en relation avec les doses de fumier enfouies pour les teneurs en matières organiques des échantillons de sols prélevés dans le billon (0-15 cm) au neuvième mois. En revanche par les échantillons prélevés en fin d'essai après planage du terrain par la herse à disques, on constate une augmentation des teneurs moyennes en carbone

TABLEAU XIV
Influence de la fumure sur les teneurs moyennes en carbone (10^{-3})

FUMURES	Billon 9e mois	Couche labourée fin d'essai	couches (en fin d'essai)				
			0-20	20-30	30-40	40-60cm	
F ₁	5.33 ^{NS} ↓	5.86 ^{**} ↓	5.94 [*] ↓	5.84 ^{**} ↓	5.26 ^{NS} ↓	4.47 ^{NS} ↓	
F ₂	5.87	6.29	6.27	6.47	5.40	4.65	
F ₃	5.72	6.55	6.56	6.14	5.29	4.49	
F ₄	5.85	6.86	6.67	6.98	5.74	4.69	
Moyennes	5.695	6.39	6.36 *** →	6.36	5.42	4.58	
	teneurs moyennes dans le profil (0-60 cm)		teneurs moyennes pour l'ensemble du profil et chacune des profondeurs de labour				
F ₁	5.32 ^{0.1} ↓		P1 5.34	NS ↓	P2 5.60	NS ↓	P3 5.02 ^{**} ↓
F ₂	5.62		5.57		5.63		5.66
F ₃	5.59		5.44		5.38		5.93
F ₄	5.91		5.60		5.61		6.51
Moyennes	5.61		5.49 NS →		5.56		5.78

↓ Effet fumure → effet couche (haut) ou profondeur du labour
(bas)

avec la fumure qui est significative dans la couche 0-20 cm et hautement significative dans la couche 20-30 cm ou dans l'ensemble de la couche labourée (2TL). Ces résultats indiquent que le labour réalisé est plutôt de type couché. La terre superficielle rassemblée pour former les billons n'a donc pas été enrichie significativement par le fumier enfoui. L'enrichissement des couches situées plus en profondeur est en revanche très net.

L'analyse de l'effet fumure sur les échantillons prélevés en fin d'essai (17^e mois) montre une augmentation des teneurs moyennes dans l'ensemble du profil (0-60 cm) qui est presque significative ($p = 0,10$) pour le carbone (tabl. XIV) et hautement significative pour les teneurs en azote (tabl. XV). Cet effet fumure est très net pour le labour le plus profond P₃, mais n'est pas significatif pour P₁ et P₂.

Dans le détail, l'analyse de la variance de l'effet fumure pour chacune des profondeurs du labour montre :

- pour la profondeur de labour P₁, un effet presque significatif ($p = 0,10$) pour l'augmentation des teneurs en carbone avec la fumure dans la couche 0-20 cm,
- pour la profondeur de labour P₂, un effet fumure significatif pour la couche 20-30 cm,
- pour la profondeur de labour P₃, un effet fumure significatif pour la couche 20-30 cm et très hautement significatif pour 30-40 cm.

C'est donc essentiellement dans la couche du sol correspondant au fond du labour que l'enrichissement en matière organique est encore décelable dix-sept mois après l'enfouissement du fumier. D'ailleurs on constate que l'effet fumure est hautement significatif pour les teneurs moyennes en carbone ou en azote dans la couche labourée (tabl. XVI).

Si l'on ajuste ces teneurs en carbone C 2TL et en azote N 2TL dans la couche labourée sur les teneurs initiales dans la couches qui sera labourée, respectivement C 0 TL et N 0 TL, l'analyse de la covariance

TABLEAU XV
Influence de la fumure sur les teneurs moyennes en azote (10^{-3})

FUMURES	Billon 9e mois	Couche labourée fin d'essai	Différentes couches en fin d'essai			
			0-20	20-30	30-40	40-60 cm
F ₁	0.50 ^{NS} ↓	0.58 ^{**} ↓	0.58 ^{0,1} ↓	0.56 ^{**} ↓	0.52 ^{NS}	0.49 ^{NS}
F ₂	0.54	0.63	0.63	0.63	0.54	0.50
F ₃	0.53	0.63	0.64	0.57	0.53	0.48
F ₄	0.54	0.66	0.65	0.65	0.57	0.52
Moyennes	0.525	0.624	0.63 ^{***} →	0.60	0.54	0.49

FUMURES	Moyenne générale dans le profil	Moyennes pour chacune des profondeurs du labour		
		P ₁	P ₂	P ₃
F ₁	0.54 ^{**} ↓	0.55 ^{NS} ↓	0.57 ^{NS} ↓	0.50 ^{**} ↓
F ₂	0.57	0.57	0.58	0.57
F ₃	0.56	0.55	0.54	0.57
F ₄	0.59	0.57	0.59	0.62
Moyennes	0.564	0.56 ^{NS} →	0.57	0.56

TABLEAU XVI
Effet fumure sur les teneurs moyennes en carbone et en azote dans la couche labourée en fin d'essai (10^{-3})

C 2TL	Effet fumure (moyennes)				Ff	Fpf	CV ₂
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄			
Analyse de la variance	5.86	6.29	6.55	6.85	7.09 ^{**}	1.19 ^{NS}	8.59
Analyse de la covariance, ajustement sur les teneurs initiales							
C ∅ TL	5.92	6.22	6.57	6.83	10.35 ^{***}	1.30 ^{NS}	6.70
N 2TL Analyse de la variance	0.58	0.63	0.63	0.66	5.05 ^{**}	1.26 ^{NS}	8.11
Analyse de la covariance, ajustement sur les teneurs initiales							
N ∅ TL	0.58	0.63	0.64	0.66	7.30 ^{***}	0.82 ^{NS}	6.83

Ff et Fpf : quotients de la variance de l'effet fumure et de l'interaction profondeur du labour × fumure par la variance résiduelle (2^e niveau). Ces quotients sont comparés avec la variable F de Snedecor. Le nombre de degrés de liberté des variances résiduelles des variables ajustées est réduit d'une unité par ajustement.

CV₂ : coefficient de variation de l'écart-type résiduel (2^e niveau) en pourcent de la moyenne.

(tabl. XVI) montre que l'effet fumure est très hautement significatif. Cet ajustement sur les teneurs moyennes en début d'essai ne modifie que faiblement les teneurs moyennes en carbone et en azote correspondant aux doses du fumier. En revanche l'ajustement diminue le coefficient de variation en éliminant une partie des variations dues à l'hétérogénéité initiale.

L'influence de l'apport de fumier sur le rapport C/N des échantillons prélevés dans les différentes couches n'est pas significatif. On constate seulement une légère augmentation de ce rapport avec les doses de fumier

dans les couches où la fumure marque d'une manière significative pour chacune des profondeurs de labour.

Pour les matières humiques extractibles par le pyrophosphate de sodium, on constate que l'apport de fumier provoque une diminution des teneurs en acides fulviques dans les couches superficielles du sol. Cette diminution de CAF avec la fumure est très hautement significative pour le labour P₁. Inversement l'augmentation des teneurs en acides humiques (CAH) avec la fumure est très hautement significative dans la couche 20-30 cm.

TABLEAU XVII

Effet fumure sur les teneurs en acides humiques et fulviques CAH et CAF (mg de carbone pour 100 g de sol)

FUMURES	CAH Couches		Moyenne 0-30cm	CAF Couches		Moyenne 0-30cm
	0-20cm	20-30cm		0-20cm	20-30cm	
F ₁	0.91 NS	0.84 ***	0.89 **	1.14 NS	1.16 NS	1.15 NS
F ₂	1.04 ↓	1.02 ↓	1.03 ↓	1.05 ↓	1.12 ↓	1.07 ↓
F ₃	1.03	0.96	1.01	1.05	1.00	1.03
F ₄	1.07	1.16	1.10	1.07	1.05	1.06
Moyennes	1.01	1.00	1.01	1.08	1.08	1.08

↓ Signification de l'effet fumure

Au total, le rapport CAF/CAH diminue fortement avec la fumure (tabl. XVIII). D'autre part les teneurs en matières organiques non extractibles, c'est-à-dire

essentiellement l'humine, augmentent significativement avec la fumure dans les couches superficielles du sol.

En résumé, dix sept mois après le défrichement de la

TABLEAU XVIII

Effet fumure sur le rapport acides fulviques/acides humiques (CAF/CAH) (%) et sur les teneurs en carbone des matières organiques non extractibles (C - CMH) (10⁻³)

FUMURES	CAF/CAH % couches		Moyenne 0-30 cm	C - CMH couches		Moyenne 0-30 cm
	0-20 cm	20-30cm		0-20 cm	20-30 cm	
F ₁	128 NS	141 **	132 *	3.89 *	3.83 *	3.87 *
F ₂	106 ↓	113 ↓	109 ↓	4.18 ↓	4.34 ↓	4.24 ↓
F ₃	107	106	107	4.50	4.17	4.38
F ₄	103	92	99	4.53	4.76	4.61
Moyennes	111	113	112	4.27	4.28	4.27

↓ effet fumure

jachère à *Panicum maximum* et l'enfouissement du fumier à différentes doses, on observe un effet significatif de la fumure sur les teneurs en carbone et azote des couches superficielles du sol (0-20 et 20-30 cm).

L'enrichissement en carbone est un peu plus important que celui en azote. Les teneurs en acides humiques et en humines augmentent avec la fumure, celles en acides fulviques diminuent.

L'enrichissement en matières organiques des couches du sol qui correspondent au fond du labour est particulièrement net. Il en résulte en effet fumure hautement significatif sur les teneurs moyennes en carbone ou azote de la couche labourée.

4.2. Influence de la fumure organique sur la capacité d'échange

La mesure de la capacité d'échange à pH : 7 sur les

échantillons prélevés en fin d'essai montre des variations significatives de T entre les différentes couches du sol en début d'essai. En revanche l'analyse de la variance montre l'absence d'effet fumure significatif sur la capacité d'échange non seulement dans les différentes couches prélevées, mais aussi pour les teneurs moyennes dans la couche labourée ou dans l'ensemble du profil (tabl. IXX).

Dans les couches correspondant au fond du labour, où l'enrichissement en matière organique est significatif,

TABLEAU IXX

Effet fumure sur la capacité d'échange cationique du sol. T 2 (me/100 g teneurs moyennes au 17^e mois en fin d'essai)

T 2 Fumures	Couches				couche labourée (T 2TL)	profil 0-60cm (T 2TP)
	0-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-60 cm		
F ₁	3,29 NS	3,37 NS	3,92 NS	4,05 NS	3,40 NS	3,66 NS
F ₂	3,37 ↓	3,46 ↓	3,61 ↓	3,96 ↓	3,39 ↓	3,62 ↓
F ₃	3,26	3,19	3,64	3,97	3,27	3,55
F ₄	3,16	3,36	4,04	4,35	3,24	3,74
Moyennes	3,27 *** →	3,34	3,81	4,08	3,32	3,64

→ effet couche

↓ effet fumure

on n'observe pas d'augmentation de la capacité d'échange cationique. Dans la couche labourée, la capacité d'échange moyenne a même tendance à décroître avec la fumure.

La capacité d'échange due aux matières organiques a été mesurée par différence avant et après calcination sur les échantillons prélevés en fin d'essai dans les couches supérieures du sol 0-20 et 20-30 cm. On constate (tabl. XX) que la capacité d'échange due aux matières

organiques TMO = T-TRS, représente plus de la moitié de la capacité d'échange de ces échantillons des couches supérieures de ce sol. Néanmoins il n'y a pas d'effet fumure significatif sur TMO.

La capacité d'échange moyenne des matières organiques du sol TMO/C = (T-TRS)/C-CRS) des échantillons prélevés en fin d'essai a tendance à décroître lorsque les doses de fumier apportées augmentent. Par exemple, si la teneur en carbone des matières organiques est

TABLEAU XX

Effet fumure sur la capacité d'échange des matières organiques. TMO = T - TRS (me/100 g de sol). TMO/C (me/100 g de carbone)

Fumures	TMO			TMO/C		
	0-20 cm	20-30 cm	0-30 cm (moyenne)	0-20 cm	20-30 cm	0-30 cm (moyenne)
F ₁	1,91 NS	1,91 NS	1,91 NS	346 NS	355 NS	349 0,1
F ₂	1,96 ↓	2,10 ↓	2,01 ↓	336 ↓	346 ↓	339 ↓
F ₃	1,83	1,81	1,83	303	315	307
F ₄	1,81	2,14	1,92	293	330	305
Moyennes	1,88	1,89	1,92	319	336	325

↓ Signification de l'effet fumure

est de 58 %, dans la couche superficielle (0-20 cm) la capacité d'échange passe de 596 me/100 g matières organiques pour les parcelles sans fumier (F1) à 506 me/100 g de matière organique pour les parcelles qui ont reçu la dose de fumier maximale (F4). Ces différences de capacité d'échange des matières organiques quoique importantes ne sont pas statistiquement significatives, en raison sans doute du manque de précision de la mesure de la capacité d'échange des sols (cf. § 5.4). Néanmoins la diminution de la capacité d'échange des matières organiques s'explique par leur enrichissement relatif en humine héritée aussi récente (cf. § 4.1) dont la capacité d'échange est plus faible, et par

l'appauvrissement relatif en acides fulviques dont le degré d'oxydation et la capacité d'échange sont en général plus élevés.

4.3. Influence de la fumure sur la saturation du complexe absorbant

Les résultats analytiques sur les échantillons prélevés en fin d'essai montrent des variations hautement significatives de la somme des bases échangeables (tabl. XXI), du déficit de saturation, du pH et du taux de saturation, en fonction des doses de fumier apportées dans chacune des sous-parcelles.

TABLEAU XXI
Influence de la fumure sur la somme des bases échangeables (me/100 g)

Fumures	Couches				couche labourée	dans le profil (0-60)
	0-20 cm	20-30cm	30-40 cm	40-60cm		
F ₁	0,67** ↓	0,64*** ↓	0,51*** ↓	0,43** ↓	0,65*** ↓	0,56*** ↓
F ₂	0,98 ↓	1,11 ↓	0,93 ↓	0,75 ↓	1,02 ↓	0,91 ↓
F ₃	1,16	1,14	1,13	0,96	1,18	1,08
F ₄	1,11	1,26	1,33	0,96	1,21	1,12
moyennes	0,98 *** →	1,04	0,97	0,78	1,02	0,92

↓ effet fumure → effet couche

L'analyse de la variance pour chacune des profondeurs de labour montre des effets fumures généralement significatifs dans les couches qui correspondent au fond du labour (cf. § 4.1), mais également dans les couches sous-jacentes. Les éléments minéraux apportés par le fumier se répartissent donc mieux que les matières organiques dans les différentes couches du profil et sont partiellement lixiviés sous la sole du labour.

5. BILAN DE L'EFFET FUMURE

5.1. Evolution des « stocks »

L'analyse de la variance des caractéristiques chimiques des échantillons de sols prélevés dans le billon au neuvième mois, puis dans les différentes couches du profil en fin d'essai (17^e mois) ont permis de mettre en évidence différents effets significatifs dus à l'apport du fumier de ferme. Néanmoins l'hétérogénéité initiale du champ d'essai et l'enfouissement à différentes profondeurs d'une part des résidus végétaux de la jachère à *Panicum maximum*, d'autre part de la fumure organique ne permettent pas de faire une comparaison

de l'évolution des caractéristiques chimiques pour chacune des couches prélevées et analysées.

Nous avons donc évalué l'évolution des stocks S dans la couche remaniée par le labour SL, dans l'ensemble du profil SP (0-60 cm) et sous la couche labourée SSL.

En fonction des mesures de densité apparente faites par I.-C. TALINEAU et G. HAINNAUX sur les parcelles cultivées de la station d'Adiopodoumé, on peut supposer que la densité moyenne est égale à 1,45 pour la couche labourée et $d = 1,60$ pour la partie du profil qui est sous la couche labourée.

Si x_i est la teneur pondérale de chaque couche i , d'épaisseur h_i (dm), pf/l l'épaisseur moyenne de la couche labourée dans cette sous-parcelle, l correspond à l'indice de la couche prélevée dans laquelle se trouve le fond du labour, le stock dans la couche labourée peut être estimé par la formule suivante :

$$SL = \sum_{i=1}^{i=l-1} x_{i,h_i} \cdot d + x_l \cdot (pf/l - \sum_{i=1}^{i=l-1} h_i) \cdot d$$

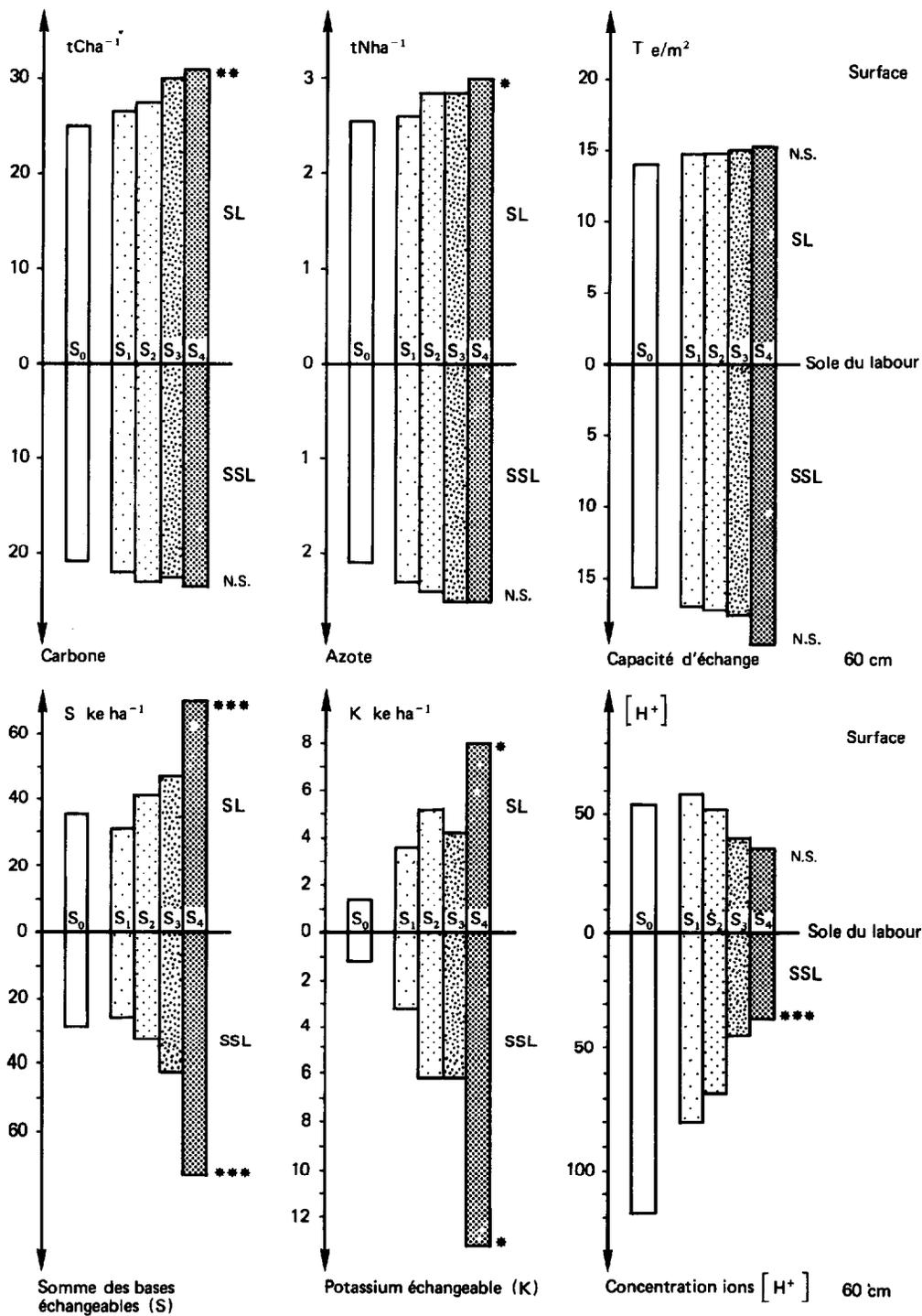


FIG. 3. — Effet fumure sur la variation des stocks.

NS non significatif, * significatif ($p = 0,05$), ** hautement significatif ($p = 0,01$), *** très hautement significatif ($p = 0,001$).
 So : stock moyen en début d'essai ; S₁, S₂, S₃, S₄, stocks moyens en fin d'essai correspondant aux doses de fumier apportées.
 SL : stock dans la couche labourée ; SSL : stock sous le labour.

Pour chacune des sous-parcelles, on peut donc comparer la variation des stocks dans la couche labourée, dans le profil et sous le labour, avant le labour en début d'essai S_0 et au bout de 17 mois S_2 juste après la récolte. L'effet des traitements fumures sur les stocks seront donc évalués en faisant le produit du stock moyen initial S_0 par la variation relative moyenne $\frac{S_2 - S_0}{S_0}$ pour chacune des fumures.

L'analyse de la variance relative à l'évolution des stocks de carbone et d'azote (fig. 3) est significative pour

les stocks dans la couche labourée (SL). Par contre l'estimation des stocks d'acides humiques et fulviques dans la couche labourée ne permet pas de mettre en évidence un effet fumure sur les stocks de matières humiques extractibles (tabl. XXII). Autrement dit l'apport de fumier aboutit essentiellement à une augmentation du stock de matières organiques non extractible $CHU = C - (CAH + CAF)$. L'enrichissement en humine héritée de la couche labourée est encore très net 17 mois après l'enfouissement de la jachère F_1 et du fumier F_2, F_3, F_4 .

TABLEAU XXII

Estimation de l'effet moyen de l'enfouissement de la jachère à *Panicum* et du fumier de ferme sur les stocks de matières humiques et d'humine dans la couche labourée (d = 1,45)

Kg de C à l'ha dans la couche labourée	CAH-SL acides humiques	CAF-SL acides fulviques	CHU = C - CAH-CAF humine
So Stock initial	4901	5033	15560
S2 Stock final			
Dose de fumier 0t/ha	4263	5192	17300
- 30t/ha	4674	4950	18030
- 60t/ha	4752	5014	19980
- 90t/ha	4815	4949	21160

Pour l'évolution des stocks de carbone et d'azote, sous le labour (SSL), et dans l'ensemble du profil (SP), l'analyse de la variance ne montre pas d'effet fumure significatif. Néanmoins les stocks moyens en carbone et azote augmentent avec la fumure, ce qui indique une migration de matières humiques sous le labour.

5.2. Estimation des coefficients isohumiques et de destruction de la matière organique de ce sol

Appelons A_0 l'apport de matières végétales, c'est-à-dire d'une part l'enfouissement de la jachère à *Panicum maximum*, d'autre part du fumier de ferme aux différentes doses. En se basant sur les mesures réali-

TABLEAU XXIII

Effet fumure sur les stocks de matière organique

Fumures	A_0		SP	SL	SSL
Stock initial		So	80,716	43,957	36,459
F1 0t/ha	23,240	S1	84,547	46,126	38,126
F2 30t/ha	28,856	S2	87,252	47,674	39,854
F3 60t/ha	34,328	S3	90,327	51,286	38,730
F4 90t/ha	40,088	S4	94,155	53,318	40,359

A_0 : Apports (jachère + fumier) t. de matières végétales/ha.

SP : Stocks dans le profil (0-60 cm) d = 1,52, t. matières organiques/ha.

SL : Stocks dans la couche labourée (0-Pf1) d = 1,45, t. matières orga./ha.

SSL : Stocks sous la couche labourée (Pf1-60 cm) d = 1,60, t. matières orga./ha.

sées en Côte d'Ivoire par FILLONNEAU (1974) et TALINEAU *et al.* (1981), l'apport de la matière végétale par la jachère peut être estimé à 28 tonnes de matières sèches à l'hectare, soit, en retranchant le poids de cendres, à 23,24 tonnes de matières organiques à l'hectare. Les analyses de fumier pailleux de bovins réalisées à Adiopodoumé (GOUZY et HAINNAUX com. personn., tabl. I) permettent d'estimer que 30 tonnes de fumier apportent 5,616 tonnes de matières organiques.

Appelons SL, SSL et SP respectivement les stocks de matières organiques ($C \times 1,724$) dans les couches labourées, en dessous de la couche labourée et dans le profil.

On peut considérer que les matières végétales apportées A_0 se minéralisent en partie et se transforment en humus suivant une cinétique du premier ordre ; c'est-à-dire que le flux de matières végétales qui se transforme en humus est proportionnel au stock A de matières végé-

tales encore présent dans le sol à cet instant soit :

$$\frac{dA}{dt} = -\alpha A.$$

L'intégration de cette équation différentielle indique que la quantité de matières végétales restant dans le sol à l'instant t est $A = A_0 e^{-\alpha t}$. La quantité transformée en humus sera une fraction h des matières végétales disparues, soit : $hA_0(1-e^{-\alpha t})$.

Une partie (j) de cet humus formé dans la couche labourée migre dans la couche sous le labour.

Appelons K_2 , K_3 , et K_4 les coefficients moyens de destruction des matières organiques du sol (ou humus) respectivement dans la couche labourée, dans la couche sous le labour et dans l'ensemble du profil. Les deux schémas de la figure 4 résument la cinétique des matières organiques dans deux modèles à un ou deux compartiments.

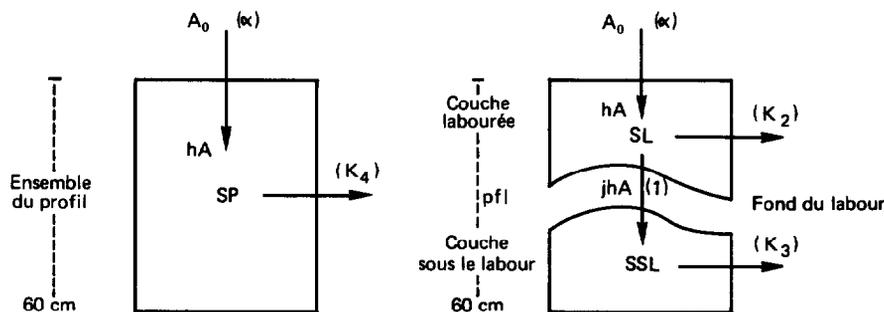


FIG. 4. — Diagramme des deux modèles : dans l'ensemble du profil, dans la couche labourée et sous le labour.

On peut écrire que la minéralisation des matières organiques du sol (ou humus) dans les différentes couches suit également une cinétique du premier ordre. C'est-à-dire que $\frac{dSL}{dt} = -K_2 SL$ pour l'évolution du stock

de matière organique dans la couche labourée. De même sous le labour $\frac{dSSL}{dt} = -K_3 SSL$ et dans l'ensemble

du profil $\frac{dSP}{dt} = -K_4 SP$.

En intégrant ces trois équations différentielles on obtient :

Pour la couche labourée :

$$(1) \quad SL = (hA_0(1-e^{-\alpha t}) (1-j) + SL_0) e^{-K_2 t}$$

Pour la couche sous le labour :

$$(2) \quad SSL = (hA_0(1-e^{-\alpha t}) j + SSL_0) e^{-K_3 t}$$

Dans l'ensemble du profil :

$$(3) \quad SP = (hA_0(1-e^{-\alpha t}) + SP_0) e^{-K_4 t}$$

Il convient d'ajuster ces trois équations en fonction des stocks initiaux ($t=0$) et en fin d'essai au 17^e mois

($t = 17/12$). Si l'on pose :

$$G = \frac{1}{e^{-K_4 \frac{17}{12}}} \text{ et } h(1-e^{-\alpha \frac{17}{12}}) = K_1,$$

qui correspond d'ailleurs au coefficient moyen d'humification des différentes matières végétales enfouies résidus de la jachère et fumier (coefficient isohumique du HÉNIN *et al.* 1945, 1959), on peut estimer ces deux coefficients en résolvant le système d'équations de régression simultanées qui associe les stocks moyens mesurés dans le profil au 17^e mois pour les quatre doses de matières organiques apportées (équation 3) :

$$K_1 = 0,64611 \quad \text{et} \quad K_4 = 0,089773$$

En utilisant cette estimation de K_1 et en éliminant le coefficient j entre les deux équations (1) et (2), nous pouvons de la même manière résoudre le système d'équations de régression simultanées, ce qui permet d'évaluer :

$$E = \frac{1}{e^{-K_2 \frac{17}{12}}} \text{ et } F = \frac{1}{e^{-K_3 \frac{17}{12}}}$$

en associant les stocks dans la couche labourée et dans la couche sous le labour au 17^e mois pour les quatre doses de matières végétales apportées.

Les estimations des coefficients de décomposition moyens dans la couche labourée et sous le labour sont les suivantes :

$$K_2 = 0,14693 \quad K_3 = 0,008979$$

Temps de demi-vie :

De la relation $h(1 - e^{-\alpha \frac{17}{12}}) = K_1 = 0,64611$, on peut déduire que $(1 - \frac{0,64611}{h})$ est ≥ 0 donc h est compris entre $0,64611$ et par définition 1 ; par conséquent α est $\geq 0,7332$. Le temps de demi-vie des matières végétales enfouies dans ce sol $T_{1/2} = \frac{LN2}{\alpha}$

$\leq 0,9454$ est inférieur à un an. En d'autres termes plus de la moitié des débris végétaux sont transformés en humus ou minéralisés et ont donc disparu à la fin de la première année.

D'une manière analogue, on peut calculer le temps

de demi-vie des matières organiques du sol (ou humus) dans les différentes couches. Le temps de demi-vie pour la couche labourée est de 4,7 ans c'est-à-dire que SL diminuera de moitié en 57 mois. Les temps de demi-vie pour les stocks de matière organique contenus dans les soixante premiers centimètres du profil est de 7,7 ans. Enfin pour le stock de matière organique de la couche sous le labour, le temps de demi-vie serait de l'ordre de 77 ans.

Ces résultats permettent par ailleurs d'estimer j , fraction de l'humus issue de la décomposition des matières végétales enfouies qui migrent sous le labour. J est en moyenne compris entre 13 et 21 % de l'humus formé au 17^e mois.

Fumure	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
J Moyen (%)	14,4	20,9	13,0	16,6

On remarque par ailleurs que le coefficient isohumique moyen $K_1 = 0,646$ a une valeur relativement élevée. Cette estimation confirme celle faite par TALINEAU et al. (1981) pour la décomposition des racines de prairie à *Panicum* à Adiopodoumé.

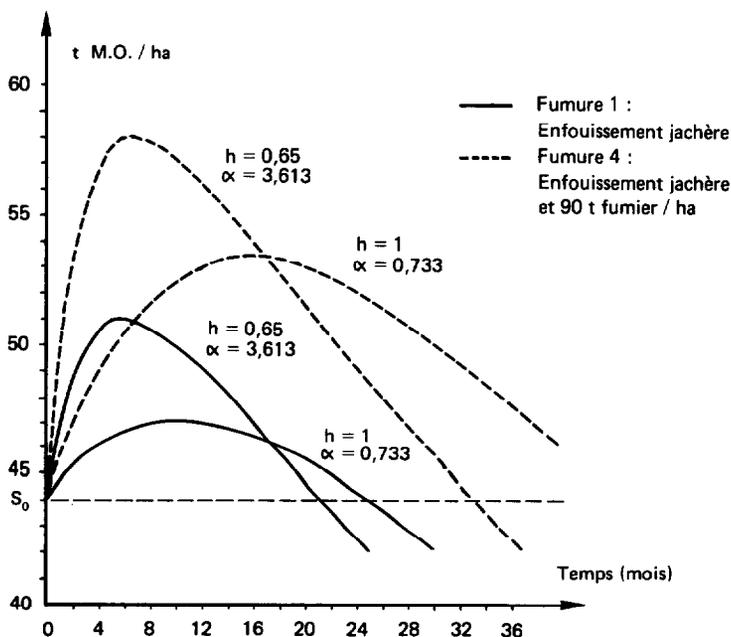


FIG. 5. — Évolution des stocks dans la couche labourée.

Si l'on suppose que tous les résidus de récolte du manioc ont été enlevés du champ au moment de la récolte et si l'on néglige les radicules et exudats racinaires, on peut évaluer le temps maximum ($h = 1$ et $\alpha = 0,73$) ou minimum ($h = 0,65$ et $\alpha = 3,6$) nécessaire pour retrouver le stock initial (sol nu). Par exem-

ple, pour les parcelles sans fumier (F₁), le stock de matière organique dans la couche labourée sera inférieur au stock initial, au bout de 21 à 24 mois après l'enfouissement de la jachère soit moins de six mois après la récolte du manioc. Pour les parcelles qui ont reçu la dose maximale de fumier (F₄), le retour au

stock initial serait moins rapide (3 à 4 ans) (fig. 5). Toutefois, il va de soi que le travail du sol pour l'établissement d'une autre culture provoquerait une minéralisation plus rapide du stock de matière organique. Donc malgré les fortes doses d'amendement organique, l'enrichissement de ce sol de texture légère en milieu tropical humide sera de brève durée ; ce qui confirme les observations réalisées par TALINEAU *et al.* (1981).

5.3. Bilan de l'azote

Une estimation de l'apport d'azote par enfouissement en début de cycle de la jachère à *Panicum maximum* a été réalisée par FILLONNEAU (1974) sur la base des

immobilisations en éléments minéraux dans les tiges, feuilles, chaume, litière et racines pour une prairie à *Panicum maximum* non fertilisée à Bouaké (République de Côte d'Ivoire). L'apport total d'azote par enfouissement de la prairie est de 423 kg N à l'hectare.

Les évaluations de l'exportation d'azote par le manioc (racines et bois) qui ont été publiées sont relativement concordantes. Nous avons pris, pour esquisser ce bilan, les chiffres rapportés dans le mémento d'agronomie édité par le BPDA, soit : 253 kg N/ha pour une récolte de 40 tonnes de racines. Nous supposons que les exportations par le manioc sont proportionnelles aux rendements (tabl. XXIV).

TABLEAU XXIV
Bilan de l'azote (en kg d'azote par hectare)

a) Apports et exportations d'azote.

Fumures	Apports d'azote			Rendements t/ha tubercules	Exportations d'azote	Bilan Kg N/ha
	Jachère	Urée	Fumier			
F ₁	423	22	0	38,83 t/ha	246	+ 199
F ₂	423	22	176	43,99 t/ha	278	+ 343
F ₃	423	22	351	48,34 t/ha	306	+ 490
F ₄	423	22	527	50,45 t/ha	319	+ 653

b) Evolution du stock dans les couches du sol.

Fumures	N-SL dans la couche labourée (0-pf cm)			N-SP dans le profil (0-60 cm)			N-SSL sous le labour (pf-60 cm)
	SL ₀ initial	SL ₂ final	Δ SL	SP ₀ initial	SP ₂ final	Δ SP	
F ₁	2549	2611	+ 62	4702	4920	+ 218	+ 156
F ₂	2549	2869	+320	4702	5238	+ 536	+ 216
F ₃	2549	2875	+326	4702	5244	+ 542	+ 216
F ₄	2549	3000	+451	4702	5459	+ 757	+ 306

La comparaison des apports et exportations d'azote par le manioc donne un solde positif. Les variations des stocks d'azote dans le sol, qui ont été évaluées sur la base des teneurs moyennes mesurées, sont également positives pour la couche labourée, comme pour l'ensemble du profil. Nous pouvons cependant faire les remarques suivantes :

— Pour les parcelles sans apport de fumier, l'estimation de l'apport d'azote par enfouissement de la jachère à *Panicum maximum* n'est pas tout à fait suffisante pour expliquer les augmentations du stock d'azote dans le profil. Les valeurs données par FILLONNEAU sont donc un peu faibles pour notre essai, d'autant que les pertes d'azote par lixiviation hors du profil, ou sous

forme d'azote gazeux n'ont pas été prises en compte. — Pour les parcelles fertilisées, l'augmentation du stock d'azote dans le profil dépasse de beaucoup l'apport net d'azote. Le fumier pailleux de bovins devait être en moyenne plus « fait » que celui analysé (tabl. I) avec des teneurs en azote plus proche de 18 que de 15 pour cent. Si nous prenons une évaluation légèrement majorée pour l'apport d'azote par la jachère (440 kg N/ha), et pour l'apport d'azote par le fumier (210 kg N pour 30 tonnes de fumier à l'hectare), le bilan de l'azote apporté devient très proche de l'augmentation du stock d'azote dans le profil pour les fumures F₁, F₃ et F₄. Les écarts observés pour F₂ peuvent être raisonnablement attribués soit à l'imprécision de la détermination analytique des teneurs en azote total dans les échantillons de sol (cf. § 2.3.), soit à des variations de la teneur en azote du fumier épandu.

On remarque enfin que 60 % de l'enrichissement du sol en azote est stocké dans la couche labourée et 40 % est lixivié sous le fond du labour.

Ceci explique la diminution du rapport C/N dans la couche 40-60 cm.

5.4. Bilan de la saturation du complexe absorbant

On vérifie tout d'abord que malgré l'augmentation du stock de matière organique dans la couche labourée, il n'y a pas d'effet fumure significatif sur la capacité d'échange (fig. 5). Plus exactement les stocks de sites d'échange cationique dans la couche labourée ne varient pas significativement avec la fumure organique. L'évolution des stocks de sites d'échange sous le labour (T SSL) et dans l'ensemble du profil (T SP) ne fait pas non plus apparaître d'effet significatif de l'apport de fumier. C'est le résultat le plus surprenant de cet essai. Nous tenterons de l'expliquer à la fin de ce chapitre.

Pour les parcelles sans fumier, on observe un net appauvrissement des stocks de bases échangeables tant dans la couche labourée (S SL) que dans l'ensemble du profil, (S SP), sauf pour le potassium. Il en résulte une augmentation du déficit de saturation et de la concentration en ions (H⁺), donc une baisse du pH dans la couche labourée pour les parcelles non fertilisées. L'estimation de l'apport de bases (Ca, Mg et K) par la jachère qui a été faite en se basant sur les mesures de FILLONNEAU (1974) paraît donc indiquer qu'une partie ne passe

TABLEAU XXV
Effet fumure sur les bases échangeables (kilo équivalents/ha)

a) Apports et exportations d'éléments minéraux (Ca, Mg, et K).

Fumures	Apports (Ke/ha)				Immobilisation dans le manioc	Bilan Ke ha ⁻¹
	Jachère	Engrais	Fumier	Total		
F ₁	30,537	2,473	0	33,010	10,477	+ 21,533
F ₂	30,537	2,473	11,111	44,121	11,869	+ 32,252
F ₃	30,537	2,473	22,222	55,232	13,044	+ 41,188
F ₄	30,537	2,473	33,343	65,343	13,613	+ 51,730

b) Evolution des stocks de bases échangeables dans le sol (Ke ha⁻¹).

Fumures	Stocks dans le profil S, SP			Stocks dans la couche labourée S, SL			Bilan sous le labour Δ S,SSL
	Stock initial	Stock final	Bilan Δ S,SP	Stock initial	Stock final	Bilan Δ S,SL	
F ₁	67,272	59,554	- 7,718	36,801	32,377	- 4,424	- 3,294
F ₂	67,272	78,177	+10,905	36,801	43,778	+ 6,977	+ 3,928
F ₃	67,272	91,428	+24,156	36,801	48,591	+11,790	+12,366
F ₄	67,272	143,204	+75,932	36,801	74,414	+37,613	+38,319

pas sous forme échangeable ou bien est lixiviée hors du profil (fumure F₁) ; la plus faible dose de fumier (F₂ : 30t/ha) suffit pour compenser les exportations par le manioc et cette lixiviation des bases échangeables dans les différentes couches du sol.

L'augmentation des stocks de bases échangeables en fonction de la fumure organique est par contre très hautement significative non seulement dans la couche labourée, mais également dans l'ensemble du profil et sous le labour. Le lessivage sous le fond du labour d'une partie de l'humus qui provient des résidus végétaux enfouis (cf. § 5.2.) s'accompagne d'une lixiviation des bases. Il y a donc un enrichissement significatif en nutriments des horizons inférieurs du profil pour les parcelles fertilisées par le fumier de ferme.

On peut se demander si le processus de lixiviation des bases apportées par le fumier ne se poursuit pas en dessous des horizons prélevés et analysés. Cela expliquerait les pertes, qui correspondent aux différences entre le bilan des apports nets et l'augmentation du stock de bases échangeables dans le profil. Toutefois on constate que pour F₁, F₂ et F₃, c'est pertes dimi-

nuent lorsque la fumure augmente. Il est donc probable que ces différences correspondent plutôt à une surconsommation de cations par le manioc qui provoque des immobilisations plus que proportionnelles aux rendements. Pour la fumure F₄, l'estimation de l'apport net de bases par le fumier est insuffisante pour expliquer la forte augmentation du stock de bases dans le profil.

L'influence de la fumure sur le potassium échangeable présente quelques particularités singulières. Pour les parcelles qui n'ont pas reçu de fumier, nous observons (tabl. XXVI) une augmentation significative du stock de potassium échangeable. Contrairement à ce qui se passe pour les autres éléments minéraux, les immobilisations de potassium dans le manioc sont couvertes par les apports dus à la décomposition des résidus végétaux provenant de la jachère à *Panicum maximum*.

L'apport du fumier de ferme provoque une augmentation du stock de potassium échangeable dans le profil. Toutefois l'évolution des stocks avec la fumure n'est pas régulière particulièrement pour les stocks de potassium correspondant aux traitements F₂ et F₃ qui ne sont pas significativement différents. Comme pour l'azote, nous ver-

TABLEAU XXVI
Effet fumure sur le potassium

a) Apports et exportations de potassium.

Fumure	Apports (Ke de K ha ⁻¹)				Immobilisation dans le manioc	Bilan -1 Ke K ha ⁻¹
	Jachère	Engrais	Fumier	Total		
F ₁	15,138	1,805	0	16,943	6,121	+ 10,822
F ₂	15,138	1,805	3,354	20,297	6,935	+ 13,362
F ₃	15,138	1,805	6,707	23,650	7,621	+ 16,029
F ₄	15,138	1,805	10,061	27,004	7,953	+ 19,051

b) Evolution des stocks de potassium échangeable (Ke-ha⁻¹).

Fumure	Stocks dans le profil K, SP			Stocks dans la couche labourée K, SL			Bilan sous le labour K, SSL
	Stock initial	Stock final	Bilan	Stock initial	Stock final	Bilan	
F ₁	2,520	6,390	+ 3,870	1,383	3,500	+ 2,117	+ 1,753
F ₂	2,520	10,751	+ 8,231	1,383	5,235	+ 3,852	+ 4,379
F ₃	2,520	9,406	+ 6,886	1,383	4,122	+ 2,739	+ 4,147
F ₄	2,520	18,231	+ 14,711	1,383	7,946	+ 6,563	+ 8,148

rons que l'anomalie de ces résultats peut résulter du manque de précision de la détermination analytique du potassium échangeable dans ces sols très pauvres en bases. Comme au paragraphe 2.3., la variance de l'erreur d'analyse a été estimée à partir des résultats d'analyses d'un échantillon témoin provenant de la même série de sols qui a été analysé en routine de nombreuses fois par le laboratoire (GOUZY com. person.). Logiquement la variance résiduelle devrait être supérieure à la variance de l'erreur d'analyse. On constate (tabl. XXVII) que ce n'est pas le cas pour le magnésium ni pour le potassium échangeable, ni pour le carbone et l'azote total. Pour ces déterminations analyti-

ques, la dispersion des résultats pour les échantillons correspondant au même traitement est moins grande que pour l'analyse d'un même échantillon témoin réalisées dans des séries d'analyses successives.

On constate d'autre part que la variance de l'effet fumure est en général bien supérieure à la variance de l'erreur d'analyse sauf pour le potassium échangeable, la capacité d'échange et l'azote total. Il est donc possible que les valeurs moyennes de l'effet fumure pour ces trois caractéristiques soient entachées par des erreurs d'estimation relativement importantes susceptibles de masquer totalement (T), ou partiellement (K et N) l'effet de l'apport de fumier sur ces caractéristiques.

TABLEAU XXVII

Analyse de la variance (2^e niveau) : effet fumure-erreur d'analyse (teneurs finales moyennes dans la couche labourée)

Variables	Variance(f) de l'effet fumure	Variance(r) résiduelle	F observé f/r	Variance(a) erreur d'analyse	F f/a
Calcium éch.	0,2246	0,0424	5,29 **	0,0161	13,95 ***
Magnésium éch.	0,1285	0,0127	10,15 ***	0,0154	8,35 *
Potassium éch.	0,0111	0,0011	9,89 ***	0,0149	0,74 NS
Sommes des bases éch.	0,7826	0,0990	7,91 ***	0,0465	16,83 ***
Capac. d'éch.	0,0763	0,0962	0,79 NS	0,0713	1,07 NS
Déficit de saturation	1,2633	0,1231	10,26 ***	0,1178	10,72 ***
Carbone total	2,1352	0,3012	7,09 **	0,3721	5,73 ***
Azote total	0,0129	0,0026	5,05 **	0,0729	0,177 NS

Nous avons vu que la méthode KJELDAHL modifiée, telle qu'elle est pratiquée dans les laboratoires de l'ORSTOM, manque de précision pour déterminer la teneur en azote total des sols tropicaux. Du fait de ces erreurs d'analyse le bilan de l'évolution des stocks d'azote, de potassium et de capacité d'échange ne peuvent être que très approximatifs et les effets de la fumure sur les caractéristiques de ces stocks risquent d'être masqués.

CONCLUSION

Les résultats de cet essai ont permis de préciser l'évolution à court terme des principales caractéristiques chimiques de ce sol ferrallitique à la suite de l'enfouissement de la jachère à *Panicum maximum* et de l'apport de fumier de ferme. Toutefois l'hétérogénéité horizontale et verticale du champ d'essai, notamment d'un des blocs, et l'imprécision de certaines déterminations analytiques (azote total, potassium échangeable, capacité

d'échange cationique) masquent en partie l'effet des facteurs contrôlés sur ces caractéristiques.

Du fait de la différenciation verticale des différents horizons du sol en début d'essai, l'effet du labour, avec une charrue à soc et versoir, est remarquablement net. Les résultats analytiques mettent en évidence la remontée en surface d'une terre plus argileuse et moins humifère de profondeur, et l'enfouissement de terre plus sableuse et plus humifère provenant de surface. Le labour a donc des effets opposés sur la capacité d'échange d'origine organique et minérale de la couche labourée.

Par ailleurs, après la récolte, dix-sept mois après l'enfouissement de la jachère et l'apport de 30 tonnes de fumier de ferme à l'hectare, l'enrichissement en matière organique et en bases est encore significatif, particulièrement dans les couches correspondant au fond du labour. La migration de matières humiques et de bases sous le labour a néanmoins pu être observée. Elle s'explique par la texture légère de ce sol.

La modélisation de la cinétique d'humification des

résidus végétaux provenant de la jachère à *Panicum maximum* et du fumier de ferme confirme les valeurs élevées du coefficient isohumique (K_1) déjà estimé pour les prairies à *Panicum maximum* par TALINEAU *et al.* (1981). Le temps de résidence des matières organiques dans la couche labourée est assez faible ($T_{1/2} = 57$ mois). Au total l'augmentation du stock organique par enfouissement des résidus de la jachère n'aura pas duré deux ans.

L'apport de 30 tonnes de fumier à l'hectare suffit pour compenser la minéralisation des matières organiques du sol et les pertes d'éléments minéraux (exportation par la culture de manioc et lixiviation). L'augmentation des stocks de matières organiques, d'azote et de bases échangeables dans la couche labourée est encore nette en fin d'essai au dix-septième mois. Le modèle montre qu'elle est très transitoire. La fumure organique ne paraît pas avoir augmenté significativement la capacité d'échange cationique à pH : 7 de ce sol.

La modélisation a également permis d'estimer la migration de matières humiques dans les couches sous le labour. Environ un sixième de l'humus formé par décomposition des matières végétales apportées migre dans ce compartiment. Le temps de résidence moyen des matières organiques de la couche sous le labour est seize fois plus important que dans la couche labourée.

Nous avons vu que le remaniement des horizons du sol par le labour et l'enfouissement du fumier essentiellement dans la partie inférieure de la couche labourée limitent l'intérêt de la comparaison des caractéristiques moyennes des couches prélevées en début et fin d'essai. La mesure de la profondeur du labour dans chaque parcelle nous a permis de calculer les stocks dans

la couche labourée. La comparaison des stocks pour le carbone a même permis l'ajustement d'un modèle qui prévoit l'évolution des stocks pour les différentes doses de fumier apportées.

La précision des méthodes analytiques qui ont été utilisées et l'hétérogénéité du champ d'essai n'ont pas permis l'établissement d'un bilan précis des stocks d'azote. De même l'imprécision de la mesure de la capacité d'échange cationique peut expliquer l'absence d'effet fumure significatif sur les stocks de sites d'échange dans la couche labourée. Toutefois, nous avons observé surtout un enrichissement du sol en matières organiques non-extractibles (humine héritée) à faible capacité d'échange. Ceci expliquerait le fait que les stocks de sites d'échange dans la couche labourée n'aient pas augmenté proportionnellement à l'accroissement des stocks de carbone organique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement M. BRUN et le personnel du Service d'Expérimentation Biologique de la station d'Adiopodoumé (République de Côte d'Ivoire) qui ont réalisé cette expérimentation relativement complexe, M. GOUZY et le personnel du laboratoire commun d'analyse qui ont effectué avec beaucoup de conscience les nombreuses analyses chimiques des échantillons de sol prélevés sur cet essai avec le concours de J.-C. JEANNERET, enfin B. DABIN, J.-C. TALINEAU et J. DEJARDIN qui nous ont aidé pour l'interprétation des résultats obtenus.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 24 octobre 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- BOISSEZON (P. de), 1970. — Etude du complexe absorbant des sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 4 : 391-418.
- BONZON (B.), BOISSEZON (P. de), 1986. — Recherches sur l'influence de la fumure organique sur quelques caractéristiques d'un sol ferrallitique cultivé sous manioc dans le sud de la Côte d'Ivoire (sous presse).
- FILLONNEAU (C.), 1974. — Les résidus de récolte de quelques cultures fourragères dans le centre de la Côte d'Ivoire. In : « Atelier du 14 janv. 1974 sur les résidus de récolte des principales plantes cultivées en Côte d'Ivoire » Min. Rech. Scientifique (Rép. de Côte d'Ivoire), Annexe 5, 9 p. *multigr.*
- HENIN (S.), DUPUIS (M.), 1945. — Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.* XV, 17-29.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), TURC (L.), 1959. — Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Sci. Paris* 248 : 138-141.
- PICHOT (J.), 1975. — Rôle de la matière organique dans la fertilité du sol. *Agron. tropic.* 30(2) : 170-175.
- TALINEAU (J.-C.), BONZON (B.), FILLONNEAU (C.) et HAINNAUX (G.), 1979. — Contribution à l'étude d'un agrosystème prairial dans le milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire. 1. Analyse de quelques paramètres de l'état physique du sol. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 2 : 141-157.
- TALINEAU (J.-C.) BONZON (B.), FILLONNEAU (C.), HAINNAUX (G.), 1981. — Contribution à l'étude d'un agrosystème prairial dans le milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire. 2. Analyse des données relatives à l'état de la matière organique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVIII, n° 1 : 29-48.