

**Tassement des sols ferrallitiques *podzolico vermelho amarelo*
sous culture de canne à sucre
(État de Rio de Janeiro, Brésil)**

**Apport d'une analyse de la porosité
associée à une connaissance détaillée de la phase minérale**

Sylvio ROMERO de CARVALHO (1), Ary BRUAND (2), Michel HARDY (2),
Jean-Claude LEPRUN (3) et Marcel JAMAGNE (2)

(1) SNLCS Embrapa, Rua Jardin Botânico, 1024, 22460 Rio De Janeiro, Brésil.

(2) SESCOF - Inra Orléans, Ardon, 45160 Olivet, France.

(3) Pédologue Orstom, CP 665, 70404 Brasilia (DF), Brésil.

RÉSUMÉ

Trois parcelles ont été sélectionnées pour étudier le tassement des sols podzolico vermelho amarelo sous culture de canne à sucre. L'une est une culture de canne à sucre depuis de nombreuses années, la deuxième est une ancienne culture de canne à sucre utilisée depuis plusieurs années comme pâturage et la troisième une forêt choisie comme situation non tassée de référence. Des échantillons ont été prélevés à la profondeur potentiellement la plus tassée pour les deux situations cultivées et à la profondeur correspondante pour la situation de référence. Les valeurs de densité apparente ne sont pas différentes entre les trois situations, mais elles ne peuvent être discutées sans une étude détaillée de la nature des constituants minéraux et de leur mode d'assemblage.

Une analyse granulométrique et minéralogique a été effectuée. Elle a mis en évidence des différences de teneur en argile entre les trois situations mais, en revanche, l'absence de différence de composition minéralogique.

L'analyse de la porosité a montré la présence de deux volumes poraux distincts qui résultent, l'un de l'assemblage des particules d'argile, et l'autre d'un ensemble de pores de beaucoup plus grande taille sans qu'il soit possible de distinguer les différents types de pores qui le composent. Ces deux volumes poraux varient d'une situation à l'autre mais ces variations se compensent, expliquant ainsi l'absence de variation de densité apparente. Quant à la présence d'un horizon tassé sous culture de canne à sucre, cette analyse de la porosité a permis de montrer que le volume poral correspondant aux pores les plus grands est effectivement plus faible après culture de la canne à sucre.

Ainsi, ce n'est qu'après une analyse détaillée de la porosité que nous avons pu mettre en évidence un effet de la culture de canne à sucre sur la structure du sol, et cela alors que les mesures de densité apparente ne faisaient pas apparaître de différence suivant le mode d'utilisation.

MOTS CLÉS : Granulométrie – Minéralogie – Microscopie – Porosimétrie au mercure – Retrait-gonflement – Rétenion en eau – Bilan de volume.

ABSTRACT

SOIL COMPACTION OF ULTISOLS (*PODZOLICO VERMELHO AMARELO*) UNDER SUGAR CANE CROPS (STATE OF RIO DE JANEIRO, BRASIL). INTEREST OF A COMBINED ANALYSIS OF POROSITY AND MINERAL CONSTITUTION.

Sugar cane is commonly considered in Brasil as inducing a soil compaction. A site where sugar cane has been cultivated since many years was selected. Three plots were studied: (i) a plot where sugar cane has been

cultivated since 35 years, (ii) a plot used in pasture since 8 years after more than 20 years of sugar cane and (iii) a forest as reference. Samples were collected from the three plots in order to analyse the soil compaction. The bulk density measurements, which showed very weak differences between the three plots, required to analyse both the sample composition and porosity prior to be discussed as indicating a soil compaction.

Particle size distribution and mineralogy were analysed. Results showed differences in the clay content but no difference in the mineralogy between the three plots.

The analysis of the soil porosity showed the total pore volume as resulting from two types of porosity, (i) a pore volume resulting from the clay fabric alone and (ii) an other one resulting from a set of pores due mainly to the fabric of clay and sand particles, and secondarily to the aggregate development and biological activity. The study of the pore size distribution pointed out differences for the two types of porosity between the three plots. The variations in the pore volume due to the clay fabric were explained by clay content. As for the variations in the pore volume of pores due mainly to the fabric of clay and sand particles, they were related to soil compaction under sugar cane. The results pointed out that sugar cane induced a decrease in the latter pore volume.

Thus, although the bulk density measurements did not show any significant difference between the three plots, the combined analysis of the soil composition and porosity allowed differences in the pore size distribution to be related to sugar cane cultivation.

KEY WORDS : Particle size distribution – Mineralogy – Microscopy – Mercury porosimetry – Shrinkage – Water retention – Volume balance.

RESUMO

COMPACTAÇÃO DE SOLOS PODZÓLICOS (PVA) SOB CULTURA DE CANA DE AÇÚCAR (ESTADO DE RIO DE JANEIRO).
IMPORTANCIA DE UMA ANÁLISE DA POROSIDADE ASSOCIADA A UM ESTUDO DETALHADÓ DA FASE MINERAL

Três parcelas foram selecionadas para estudar a compactação de solos podzólicos vermelho amarelo, sob cultura de cana-de-açúcar. A primeira com cultura de cana-de-açúcar instalada há 35 anos, a segunda com antiga cultura de cana-de-açúcar utilizada atualmente como pastagem nos últimos 7 anos e a terceira com uma floresta escolhida como sendo uma situação de referência, não compactada.

Foram feitas amostragens às profundidades que potencialmente seriam mais atingidas pela compactação nas situações sob cultivo e a uma mesma profundidade para a testemunha (floresta). Os valores de densidade aparente não foram diferentes para as três situações estudadas, porém eles serviram de subsídios para o entendimento de alguns mecanismos, após um estudo detalhada da natureza dos constituintes minerais e dos seus modos de arrançamento.

A análise da porosidade mostrou a presença de dois volumes porais distintos, o primeiro resultante do arrançamento das partículas da argila, e o segundo resultante de um conjunto de poros de grande diâmetro; sem que fosse possível distinguir os diferentes tipos de poros que compoem este conjunto. Esses dois volumes porais variam de uma situação para outra, mas essas variações se compensam, explicando assim a ausência de variações de densidade aparente. Quanto à presença de um horizonte compactado sob cultura de cana-de-açúcar. A análise da porosidade mostrou que o volume poral correspondente aos grandes poros é efetivamente menor após a cultura de cana-de-açúcar. Assim, após uma análise detalhada da porosidade, conseguiu-se colocar em evidência o efeito da cultura de cana-de-açúcar sobre a estrutura do solo, sem que os valores das medidas da densidade aparente apresentassem diferentes entre os modos de utilização.

PALAVRAS CHAVES : Granulometria – Mineralogia – Microscopia – Porosidade ao mercúrio – Expansão e contração – Retenção de umidade – Balança de volume.

INTRODUCTION

Les sols cultivés en canne à sucre dans l'État de Rio de Janeiro sont généralement soit des sols de type *podzolico vermelho amarelo* (PVA) soit des sols de type *latossolo vermelho amarelo* (LVA). Les premiers correspondent aux acrisols de la classification FAO (1974) et, selon DUCHAUFOUR (1965), à des sols faiblement ferrallitiques et/ou des sols ferrallitiques lessivés de la classification française CPCS. Quant aux seconds, ils correspondent aux ferralsols de la classification FAO (1974) et aux sols ferrallitiques typiques de la classification française.

L'estimation IBGE (1987) indique que la surface cultivée en canne à sucre est d'environ $4 \cdot 10^6$ ha au Brésil, avec une production moyenne de 64 t/ha. Le premier état en surface cultivée est l'État de São Paulo avec $1,7 \cdot 10^6$ ha (production moyenne de 74 t/ha). L'État de Rio de Janeiro est le 5^e en surface cultivée ($230 \cdot 10^3$ ha) avec une production moyenne de 50 t/ha.

Les parcelles cultivées en canne à sucre sont soumises à une érosion importante qui est due à la non-observation des pratiques de conservation des sols par les agriculteurs dans des zones à relief accidenté (LEPRUN, 1988). Dans la région de São Paulo, sur des sols de type *podzolicos* et *latossolos*, la perte en terre moyenne annuelle par érosion hydrique, sous culture mécanisée de canne à sucre mesurée sur une longue période à partir de parcelles expérimentales, atteint 12,4 t/ha (BERTONI *et al.*, 1972). Dans l'État du Paraíba, sur des sols de type *podzolicos* et sous pluviométrie voisine de celle de Campos, des mesures semblables sous culture de canne à sucre suivant les courbes de niveau durant 4 années fournissent une perte moyenne de 1,6 t/ha (PINHEIRO de OLIVIERA, 1986). Les résultats de pertes par érosion obtenus sous même traitement à la station expérimentale du SNLCS à 47 km de Rio de Janeiro, sur un sol de type *podzolicos* semblable à celui de cette étude sont du même ordre de grandeur (résultats non publiés). Pouvant atteindre jusqu'à 10t/ha l'année du semis, les pertes en terre diminuent fortement lorsque la canne à sucre développe son système végétatif.

Même en l'absence d'une érosion importante des sols, on enregistre des diminutions de rendement dont la cause est attribuée au développement d'une semelle de labour (*pé de grade*) (FERNANDEZ *et al.*, 1981).

Le développement d'une semelle de labour se fait en règle générale plus rapidement pour les sols

de type PVA que pour ceux de type LVA. Cette différence de comportement serait due à une structure moins développée (absence de micro-agrégation) et moins stable (taux élevé d'argile dispersable dans l'eau) pour les sols de type PVA. Nous avons donc choisi d'étudier les sols PVA qui apparaissent être les plus sensibles au tassement lorsqu'ils sont mis en culture. Après avoir sélectionné un ensemble de situations ne variant, autant que possible, que par le mode de mise en valeur agricole, nous chercherons à mettre en évidence le tassement des sols sous culture de canne à sucre. À cette fin, nous procéderons à une analyse de la porosité après avoir décrit avec précision la constitution minérale des horizons étudiés.

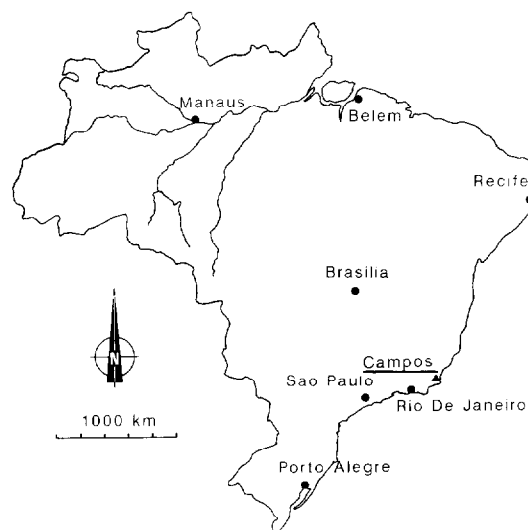


FIG. 1. – Localisation du site de Campos.
Location of the site of Campos.

LA RÉGION ÉTUDIÉE

La région étudiée est située au nord-est de l'État de Rio de Janeiro à proximité de la ville de Campos (fig. 1). Les sols y sont représentatifs des zones où la canne à sucre est cultivée depuis de nombreuses années. La région a été mise en valeur au XVIII^e siècle pour y produire du café après déboisement de la forêt tropicale subcaducifoliée. Au début du XIX^e siècle, la culture du café a progressivement été remplacée par celle de la canne à sucre (IBGE, 1959a).

Caractères généraux du milieu

Les sols de type *latossolos* et *podzolicos* représentent environ 80 % de la surface. Ils sont déve-

loppés à partir de migmatites et de gneiss du Précambrien (Grupo Paraiba do Sul) (EMBRAPA SNLCS, 1980a et b ; COMISSAO DE SOLOS, 1958). Les 20 % restants sont essentiellement des sols développés sur des colluvions hydromorphes et des alluvions.

Le climat tropical chaud et humide est du type Aw de Köppen (MENEZES *et al.*, 1974). La température moyenne annuelle est de 23,2 °C avec de faibles variations saisonnières. Le mois le plus froid est le mois de juillet (température moyenne = 20,1 °C) et le plus chaud, le mois de février (température moyenne = 26,1 °C). Les précipitations annuelles sont de 1 087 mm. Les trois mois les plus secs sont les mois de juin, juillet et août avec environ 9 % du total annuel. L'évapotranspiration potentielle mensuelle est supérieure aux précipitations durant 9 mois. Le bilan de l'ensemble de l'année est déficitaire de 95 mm.

Localisation du site et caractéristiques des situations étudiées

Le site choisi est localisé en bordure de la route RS 25 à 4 km de son intersection avec la route BR 101. Trois situations différentes par le mode d'utilisation, ont été sélectionnées :

- la première, qui doit permettre d'étudier un sol n'ayant jamais été cultivé, est une forêt secondaire exploitée partiellement pour la production du bois dans les années 1930-40 (situation CP-F). La forêt s'est depuis régénérée et elle présente maintenant des arbres de 20 à 40 cm de diamètre et de 15 à 20 m de hauteur ;
- la seconde correspond au cas type des sols tassés sous culture de canne à sucre (situation CP-C). Il s'agit d'une parcelle cultivée en canne à sucre depuis 35 ans ;
- la troisième est une variante de la seconde. Il s'agit d'une parcelle qui a été cultivée en canne à sucre jusqu'en 1980. Les rendements étant alors devenus trop faibles, elle a été laissée en jachère et une végétation de graminées, où prédomine *grama Pernambuco (Paspalum maritimum)*, s'est installée depuis. Cette végétation est pâturée depuis 1980 par des bœufs (1 UGB/ha) qui sont présents sur la parcelle toute l'année. Cette troisième situation renseignera sur la pérennité de l'état tassé sous jachère pâturée (situation CP-P).

Trois fosses de 1,70 m de profondeur ont été creusées pour chaque situation, elles sont équidistantes d'environ 100 m et situées à un même niveau sur une pente de 10 à 15 %. Les trois profils

décrits présentent des morphologies et des caractères analytiques proches. Il est intéressant de relier les différences de comportement observées au moment du creusement de la fosse (attaque verticale par la pioche) et de l'examen morphologique du profil (attaque frontale à l'aide du piochon à l'intérieur de la fosse) qui correspondent à la cohésion d'ensemble de l'horizon. Sous forêt, on note sous les premiers 26 cm, lorsque l'on entame l'horizon BA, un accroissement de la résistance à la pénétration de la pioche alors que la cohésion d'ensemble est peu différente de celle des horizons supérieurs. Sous culture de canne à sucre, à partir de 30 cm, on note un très net accroissement de la résistance à la pénétration de la pioche et du piochon. Enfin, sous jachère pâturée, la forte résistance à la pénétration de la pioche, observée entre 6 et 12 cm, ne se manifeste pas par une cohésion d'ensemble forte lors du test au piochon.

La seule différence analytique notable entre les trois profils est la teneur en argile du profil sous forêt qui est en surface plus faible que pour les deux autres situations (16 % au lieu de 25 %). Cette différence de teneur en argile est interprétée comme étant la conséquence de la mise en culture qui a homogénéisé la teneur en argile de la partie supérieure du sol.

La description du profil de sol sous forêt est donnée ci-après et les données analytiques concernant l'ensemble de ce profil sont reportées dans les tableaux Ia et Ib.

- A1 0 – 16 cm. Brun foncé (7,5 YR 3,5/2 humide) ; sableux ; structure grumeleuse peu nette de taille moyenne ; fragile ; friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et nette.
- AB 16 – 26 cm. Brun (7,5 YR 4,5/4 humide) ; argilo-sableux ; structure polyédrique subangulaire nette de taille moyenne ; fragile ; friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et nette.
- BA 26 – 40 cm. Brun intense (7,5 YR 4,5/6 humide) ; argilo-sableux ; structure polyédrique subangulaire nette de taille moyenne ; peu fragile ; friable ; plastique et adhésif ; transition plane et graduelle.
- Bt1 40 – 59 cm. Rouge-jaune (5 YR 5/5 humide) ; argileux ; structure polyédrique subangulaire nette de taille moyenne ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et graduelle.
- Bt2 59 – 112 cm. Rouge-jaune (5 YR 5/8 humide) ; argileux ; structure polyédrique subangulaire nette de taille fine à moyenne ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.
- Bt3 112 – 160 cm +. Rouge-jaune (5 YR 5/8 humide) ; argileux ; structure polyédrique subangulaire nette de taille moyenne ; fragile ; friable ; très plastique et très adhésif.

TABLEAU Ia
Caractéristiques granulométriques du profil sous forêt
Particle size distribution of the soil from the forest plot

Horizons	Prof. (cm)	Fraction > 2 mm (%)	Composition granulométrique de la fraction < 2 mm (%)				Argile disp. dans l'eau (%) [2]	Degré de floc. (%) [3]
			SG 2000µm- 200µm	SF 200- 50µm	L 50- 2µm	A <2µm [1]		
A1	0-16	6	63	15	6	16	10	38
AB	16-26	20	55	14	8	23	18	22
BA	26-40	10	37	15	10	38	34	10
Bt1	40-59	4	25	8	7	60	0	100
Bt2	59-112	5	25	7	4	64	0	100
Bt3	112-150	8	26	6	4	64	0	100

[3] Rapport de l'argile non dispersable à l'eau sur l'argile totale, exprimé en % : [3] = (([1]-[2])/([1]))x100

TABLEAU Ib
Analyse chimique du profil sous forêt
Chemical analysis of the soil from the forest plot

Horizon	pH (1:2,5)		Complexe absorbant mEq 100g ⁻¹						
	H ₂ O	KCl	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ [1]	K ⁺ [2]	Na ⁺ [3]	S [4]	Al ⁺⁺⁺ [5]	H ⁺ [6]	T [7]
A1	4,8	4,0	0,7	0,07	0,05	0,8	0,5	3,1	4,4
AB	4,4	3,9	0,2	0,03	0,03	0,3	0,9	2,1	3,3
BA	4,5	3,9	0,2	0,02	0,03	0,3	1,3	2,1	3,7
Bt1	4,4	3,9	0,2	0,01	0,02	0,2	1,7	2,6	4,5
Bt2	4,4	3,9	0,2	0,01	0,02	0,2	1,5	2,1	3,8
Bt3	4,6	4,0	0,2	0,01	0,03	0,2	1,3	2,1	3,6

Horizon	C (%)	N (%)	C/N	Attaque par H ₂ SO ₄ (1:1) (%)			
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
A1	0,78	0,10	8	5,9	5,1	2,3	0,59
AB	0,61	0,07	7	10,2	8,7	2,3	0,98
BA	0,41	0,07	6	17,1	16,0	3,7	1,03
Bt1	0,36	0,06	6	21,7	20,7	5,3	0,95
Bt2	0,35	0,06	6	23,8	22,2	7,0	0,86
Bt3	0,22	0,06	4	26,7	23,5	7,1	0,96

S somme des bases : [4] = ([1] + [2] + [3])

T capacité d'échange cationique : [7] = ([4] + [5] + [6])

Localisation des prélèvements

Deux profondeurs ont été échantillonnées pour chaque situation mais seules les données concernant la profondeur qui s'est révélée être la plus tassée sont ici présentées pour faciliter la discussion des résultats. L'ensemble des données obtenues pour les trois situations sont présentées et discutées dans la thèse de CARVALHO (1989).

Pour les situations canne à sucre et jachère pâturée, nous analyserons les échantillons prélevés à une trentaine de centimètres de profondeur, c'est-à-dire dans l'horizon directement sous-jacent à l'horizon cultivé, et là où le tassement a été le plus important. Sous forêt, seul le prélèvement effectué légèrement plus profondément, de façon à échantillonner l'horizon supposé équivalent à ceux échantillonnés sous culture de canne à sucre et jachère pâturée mais non tassé (c'est-à-dire dans l'état de référence), sera discuté.

CARACTÉRISATION GLOBALE DU TASSEMENT

Une première caractérisation globale de l'intensité du tassement a été faite en comparant les valeurs de densité apparente (d_a) entre les trois situations. d_a a été déterminée à l'aide d'anneaux volumiques dits de Kopecky et trois répétitions ont été effectuées.

Les valeurs de d_a , qui sont reportées dans le tableau II, ne mettent en évidence que de très faibles différences. En fait, nous ne pouvons pas conclure quant à l'intensité du tassement en l'absence de

données précises concernant la constitution des échantillons. En effet, les valeurs de d_a intègrent des variations de porosité qui peuvent avoir des origines très différentes. Ainsi, des variations de densité apparente peuvent n'être dues qu'à des variations de constitution. À l'inverse, des variations de constitution peuvent compenser des variations de mode d'arrangement des constituants de telle sorte qu'elles n'entraînent pas de variations de d_a .

Les valeurs de d_a enregistrées peuvent donc intégrer des variations de mode d'assemblage des constituants qui sont liées, pour partie, à l'intensité du tassement et, pour une autre partie, à des variations de nature des constituants même si celles-ci sont faibles. Pour séparer, autant que possible, ces deux sources de variation, nous allons tout d'abord étudier avec précision la composition minérale des échantillons.

COMPOSITION MINÉRALE DES ÉCHANTILLONS

Granulométrie

Les échantillons ont été dispersés selon la méthode préconisée par BARRETO (1986). L'échantillon (50 g d'échantillon tamisé à 2 mm) est mélangé avec 200 ml d'HCl 0,05 N, agité pendant 5 minutes et laissé à reposer pendant 1 nuit. Puis on ajoute 40 ml de NaOH 1N et on agite par retournement durant 8 h. La distribution granulométrique est déterminée par sédimentation à l'aide de la pipette de Robinson pour les fractions inférieures à 50 μm et par tamisage pour celles de taille supérieure.

La composition granulométrique varie entre les trois situations, la teneur en argile étant la plus faible pour la situation forêt (37,1 %) et la plus élevée pour la situation canne à sucre (41,0 %) (tabl. II).

Identification des différentes espèces minérales composant la fraction argile

Seule la fraction $<2\mu\text{m}$ est constituée de minéraux autres que du quartz. C'est pourquoi l'analyse minéralogique n'a concerné que cette fraction granulométrique. Celle-ci est obtenue par siphonage après avoir dispersé l'échantillon suivant le protocole utilisé pour les analyses granulométriques. Cette fraction argile est étudiée en diffraction des RX sous forme de poudre et de dépôt orienté sur lame de verre (concentration 10 g/l) en utilisant la raie $K\alpha$ du cobalt ($\lambda = 1,789\text{\AA}$).

Les diffractogrammes montrent la présence de kaolinite, de goethite, d'anatase et de quartz pour les trois échantillons. Compte tenu des très faibles différences entre les échantillons, seuls les diffractogrammes obtenus pour le mode d'utilisation canne à sucre sont présentés (fig. 2). Les faibles quantités d'oxyhydroxydes de fer sont à l'origine de raies de diffraction de faible intensité. Si la goethite a été aisément identifiée, un doute subsiste concernant la présence d'hématite. C'est la raison pour laquelle nous avons concentré les oxyhydroxydes de fer dans les échantillons par dissolution sélective de la kaolinite à l'aide de NaOH 5N (NORRISH et TAYLOR, 1961 ; KÄMPF et SCHWERTMANN, 1982). Les diffractogrammes obtenus confirment la présence de goethite mais ne révèlent aucune raie qui puisse être attribuée à l'hématite (fig. 2c).

Détermination des proportions pour chaque minéral

Les données qualitatives précédentes ont montré que les échantillons sont constitués de kaolinite, de goethite, d'anatase et de quartz. Pour déterminer leurs proportions massiques Q_j ($j = 1, 2, 3, 4$), nous utilisons le fait que la $i^{\text{ème}}$ propriété M_i déterminée

TABLEAU II
Densité apparente et composition granulométrique de trois situations étudiées
Bulk density and particle size distribution for the three studied samples

	Densité apparente g cm ⁻³	Granulométrie %			
		< 2 μm	2- 50 μm	50- 200 μm	200- 2000 μm
Canne à sucre	1,56	41,0	7,0	16,8	35,2
Jachère pâturée	1,53	38,3	9,4	16,1	36,2
Forêt	1,50	37,1	8,2	16,4	38,3

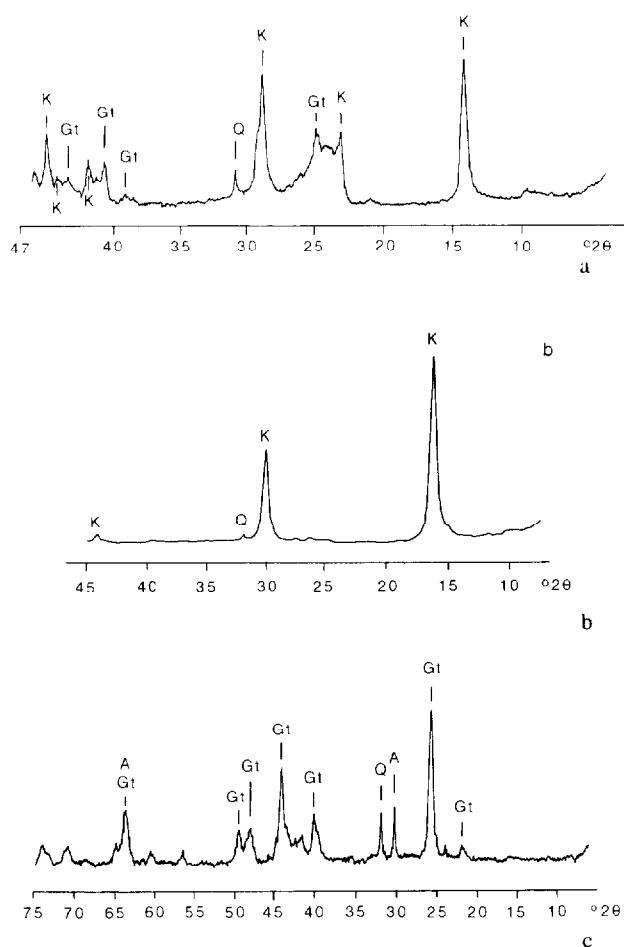


FIG. 2. – Diffractogrammes RX (Co K α) obtenus pour la fraction <2 μ m de l'échantillon prélevé dans la situation canne à sucre avec l'échantillon sous forme de poudre (a), de dépôt orienté (b) et de poudre après traitement avec NaOH 5N (c).
X ray diffractogram (Co K α) of the clay fraction (<2 μ m) from the sugar cane plot : (a) powder, (b) oriented deposit and (c) powder after retreatment with NaOH 5N.

pour le mélange peut s'écrire sous la forme d'une combinaison linéaire (PEARSON, 1978; WIEGMANN *et al.*, 1982; BRUAND et PROST, 1988).

Cette façon de procéder nécessite que les contributions des constituants à cette propriété soient additives. Le calcul implique dans notre cas, l'établissement du système de 4 équations indépendantes suivant :

$$\sum_{j=1}^{j=4} a_{ij} Q_j = M_i \quad (i = 1,2,3,4)$$

où chaque a_{ij} est le coefficient donnant la contribution du $j^{\text{ème}}$ constituant pour la $i^{\text{ème}}$ propriété de l'échantillon.

Le calcul des Q_j est effectué en utilisant les propriétés M_i qui résultent de l'analyse chimique totale de chaque échantillon. Les coefficients a_{ij} sont issus, soit de la littérature comme pour la kaolinite, le quartz et l'anatase, soit de notre analyse minéralogique comme pour la goethite. Les calculs seront effectués en se référant à la masse de l'échantillon calciné (1100 °C). De la sorte, la proportion Q_j calculée représente la proportion d'oxyde provenant du constituant j dans l'échantillon calciné.

DÉTERMINATION DES GRANDEURS NÉCESSAIRES À LA RÉOLUTION DU SYSTÈME D'ÉQUATIONS

La première étape consiste à choisir les 4 éléments chimiques pour établir les 4 équations indépendantes. Ces 4 éléments sont le titane (Ti), le fer (Fe), le silicium (Si) et l'aluminium (Al). Le choix de Ti est dû à la présence d'anatase (TiO₂), celui de Fe à la présence de goethite [Fe_{1-x}Al_xOOH], celui de Si à la présence du quartz (SiO₂) et celui de Al à la présence de kaolinite [Si₂Al₂O₅(OH)₄].

TABLEAU III
Compositions chimiques de l'anatase, du quartz et de la kaolinite utilisées pour le calcul des proportions des différents minéraux dans les échantillons
Chemical composition of anatase, quartz and kaolinite used for the quantitative mineralogical analysis

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O
Anatase	0	100	0	0
Quartz	100	0	0	0
Kaolinite	54,1	0	45,9	16,3

Les valeurs des coefficients a_{ij} pour l'anatase, le quartz et la kaolinite sont données dans le tableau III. Pour la kaolinite, la formule cristallochimique employée est celle d'une kaolinite théorique. Quant à la goethite, elle ne se trouve que rarement dans les sols à l'état de FeOOH. L'aluminium se substitue très fréquemment au fer dans le réseau cristallin. Cette substitution peut atteindre jusqu'à 32 % (FITZPATRICK et SCHWERTMANN, 1982). Pour déterminer le taux de substitution d'Al dans la goethite, nous avons utilisé la méthode

proposée par SCHULZE (1984) qui prend en compte la position des raies (110) et (111) de la goéthite bien nette après traitement NaOH 5N, (fig. 2c). Leurs positions sont utilisées pour calculer le paramètre c de la maille cristalline à l'aide de la formule :

$$c = [(1/d_{111})^2 - (1/d_{110})^2]^{-1/2}$$

Le pourcentage d'atomes d'aluminium est ensuite donné par la relation :

$$\% \text{ Al} = 1,730 - 752 c$$

La précision du calcul du taux de substitution dépend directement de la précision avec laquelle est déterminée la position des raies à (111) et (110), respectivement d_{111} et d_{110} . Les valeurs déterminées lors de l'identification des différentes espèces minérales ne peuvent pas être employées

pour ce calcul parce qu'elles sont connues de façon trop imprécise. Une nouvelle détermination a été réalisée à l'aide d'un comptage pas à pas. Le temps de comptage a été de 20 s et chaque pas correspondait à $0,005^\circ 2\theta$. Cette étude précise des intensités diffractées a été faite entre 23° et $26^\circ 2\theta$ pour d_{110} et entre 42° et $45^\circ 2\theta$ pour d_{111} . Cette opération a été répétée 10 fois et les valeurs ont été moyennées afin de minimiser des fluctuations d'intensité du faisceau de RX sur des temps de comptage courts.

Les résultats sont présentés dans le tableau IV. On note que les taux de substitution sont du même ordre de grandeur mais significativement différents. Les coefficients a_{ij} correspondant à ces différentes goéthites sont par conséquent différents pour chaque échantillon (tabl. IV).

TABLEAU IV
Taux de substitution de la goéthite et composition chimique correspondante
Al-substitution in the goethite and related chemical composition

	Taux de substitution Al-Fe en % atome Al	Composition chimique de la goéthite en % d'oxyde par rapport à la masse de l'échantillon calciné		
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	H ₂ O
Canne à sucre	23,2	83,8	16,2	12,3
Jachère pâturée	26,1	81,6	18,4	12,4
Forêt	26,9	81,0	19,0	12,5

Les valeurs des termes M_i sont issues de la composition chimique de chaque échantillon. Celle-ci a été déterminée au laboratoire Inra d'analyse des sols d'Arras. Si a été dosé par fluorescence X après préparation d'une solution solide par fusion au tétrabo-

rate de sodium, Al par émission (plasma induit), Fe, Mg, Ca, Na et Mg par absorption atomique après mise en solution avec l'acide fluorhydrique en présence de HClO₄. Les résultats de cette analyse chimique totale sont donnés dans le tableau V.

TABLEAU V
Composition chimique de la fraction argile exprimée en % d'oxyde
Chemical composition of the clay fraction expressed in % of oxyde

Echantillon	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Canne à sucre	44,4	1,8	41,9	11,3	0,1	0,1	0,1	0,5
Jachère pâturée	45,6	2,5	39,9	11,4	0,2	0,1	0,1	0,2
Forêt	45,2	2,7	40,8	10,8	0,2	0,1	0,1	0,3

RÉSOLUTION DU SYSTÈME D'ÉQUATIONS

Le système d'équations s'écrit de la façon suivante pour chaque échantillon :

$$\begin{aligned} 100 Q_1 &= M_1 \\ 100 Q_2 &= M_2 \\ 54,1 Q_3 + a_{34} Q_4 &= M_3 \\ a_{44} Q_4 &= M_4 \end{aligned}$$

avec respectivement :

- Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 : proportions massiques d'anatase, de quartz, de kaolinite et de goethite ;
- M_1, M_2, M_3, M_4 : teneurs en TiO_2, SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 de l'échantillon, exprimées en % ;

- a_{34} et a_{44} : teneurs en Al_2O_3 et Fe_2O_3 de la goethite de l'échantillon exprimées en %.

Les valeurs obtenues à la suite de ce calcul sont reportées dans le tableau VI. La somme des proportions étant égale à 1, la condition nécessaire selon laquelle cette somme doit être proche de 1 pour que la solution du système d'équations puisse être acceptée est effectivement remplie. Si l'on compare les échantillons entre eux, on note que leurs compositions sont très proches, seul le rapport des proportions en kaolinite et goethite varie de 7,9 à 5,8 entre les modes canne à sucre et jachère pâturée.

TABLEAU VI
Teneur en kaolinite, goethite, anatase et quartz de la fraction argile
Kaolinite, goethite, anatase and quartz contents in the clay fraction

	Proportions massiques				Somme
	Kaolinite	Goethite	Anatase	Quartz	
Canne à sucre	0,87	0,11	0,2	<0,01	1,00
Jachère pâturée	0,81	0,14	0,3	0,2	1,00
Forêt	0,83	0,13	0,3	0,01	1,00

Conclusion

Concernant la constitution minérale, nous avons mis en évidence de faibles différences de composition granulométrique entre les échantillons. En revanche, la fraction > 2 µm est constituée de quartz et la fraction < 2 µm ne varie que très peu entre les trois situations. Par conséquent, les valeurs de d_a intégreraient des variations de constitution minérale et éventuellement des variations de mode d'assemblage des constituants qu'il faut maintenant étudier. C'est pourquoi, dans une deuxième étape, le volume poral total sera décomposé en ses différents volumes poraux à l'aide d'une analyse de la porosité qui s'apparente à celle proposée par STENGEL (1979). De la sorte, nous pourrions identifier ce qui est dû au mode d'assemblage des constituants et ce qui est dû à la constitution granulométrique.

ANALYSE DE LA POROSITÉ

Pycnométrie

Le volume poral total peut être calculé à partir des valeurs de d_a mais il est alors nécessaire de

connaître le volume occupé par la phase solide. Celui-ci a été déterminé en pycnométrie à gaz avec de l'hélium sur les échantillons préalablement broyés. On obtient ainsi le volume massique du solide en $cm^3 g^{-1}$ ou son inverse, la masse volumique du solide (densité réelle).

La masse volumique ainsi déterminée est de 2,66 $g cm^{-3}$ pour les trois situations. Les valeurs de volume poral total qui sont alors calculées à partir des valeurs de d_a sont 0,266, 0,269 et 0,296 $cm^3 g^{-1}$ pour, respectivement, les situations canne à sucre, jachère pâturée et forêt. Les deux situations cultivées possèdent par conséquent un volume poral qui est de 10 % plus faible que celui obtenu pour la situation qui n'a jamais été cultivée.

Microscopie optique

Une fois le volume poral calculé, l'analyse de la porosité nécessite que soient caractérisés les différents types de volumes poraux. La microscopie optique permet dans un premier temps d'identifier les différents modes d'organisation des constituants minéraux et la morphologie des pores qui leur sont associés.

Des mottes de 20 à 40 cm³ ont été employées pour la microscopie optique. Les lames minces ont été confectionnées en suivant la procédure proposée par GUILLORE (1980) à partir des échantillons préalablement séchés à l'air.

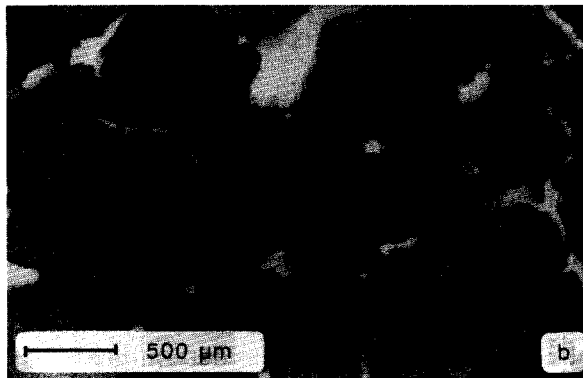
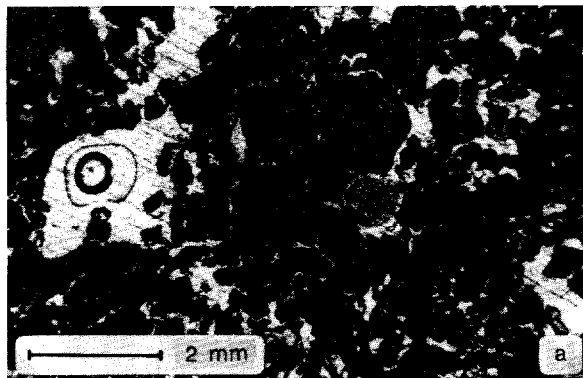


FIG. 3. – Observation de lames minces en microscopie optique (situation canne à sucre) avec a : vue générale de la structure à faible grossissement (lumière naturelle transmise ; $\times 8$; porosité en blanc, quartz en gris et phase argileuse en noir) et b : vue de détail des relations entre le squelette quartzueux et la phase argileuse, et la porosité qui en résulte (combinaison lumière naturelle transmise et épifluorescence UV, $\times 73$; porosité en blanc, quartz en gris et phase argileuse en noir).

Thin section observation by using optical microscopy (sugar cane plot) : (a) general view at low magnification (transmitted light ; $\times 8$, voids in white, quartz in grey and clayey phase in black) and (b) detailed view of the quartz and clay fabric, and the associated porosity (transmitted light and UV epifluorescence ; $\times 73$; voids in white, quartz in grey and clayey phase in black).

Les observations en microscopie optique montrent que la microstructure est à rattacher au type "microstructure en éponge" décrit par BULLOCK *et al.* (1985), STOOPS (1986), (fig. 3). La phase argileuse est suffisamment abondante pour assurer une continuité entre les grains de quartz. Les vides observables sont de taille et de morphologie très variables. Les plus fins résultent de l'assemblage de la phase argileuse et des grains de quartz (fig. 3b), ils correspondent aux vides lacunaires définis par FIES (1984). Les autres pores, c'est-à-dire ceux de taille plus grande, résultent au moins pour partie de l'assemblage d'agrégats et de l'activité biologique mais ni leur taille, ni leur morphologie ne permettent de discuter leur origine avec précision (fig. 3a).

Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure permet de déterminer la distribution des volumes poraux en fonction du diamètre des pores par lesquels ils sont accessibles au mercure. Cette technique a été appliquée à des mottes de 4 à 5 cm³ préalablement déshydratées à 105°C. La relation entre le diamètre de pore permettant l'accès au volume poral (D) et la pression (P) nécessaire pour que le mercure y pénètre est la suivante (VACHIER *et al.*, 1979 ; PELLERIN, 1980 ; FIES, 1984) :

$$D = -4 (\gamma \cos \theta) / P$$

avec γ = tension superficielle du mercure, θ = angle de raccordement du ménisque à l'interface mercure-solide.

Les valeurs de γ et θ sont respectivement 0,484 Nm⁻¹ et 130° (FIES, 1984). Les pores étudiés ont des valeurs de D comprises entre 300 μm et 7 nm.

Le volume total de mercure introduit correspond au volume poral total ($V_t[\text{Hg}]$) des mottes étudiées. Les valeurs obtenues qui sont reportées dans le tableau VII, ne révèlent pas de différence entre les trois situations. Par ailleurs, les courbes du volume poral cumulé obtenues présentent toutes la même forme générale où l'on distingue deux intrusions successives de mercure (fig. 4). La limite entre ces deux intrusions, et par conséquent entre les deux volumes poraux correspondants, est la valeur de D pour laquelle la pente de la courbe cumulée est minimale (minimum de la courbe dérivée) (BRUAND et PROST, 1987 ; BRUAND *et al.*, 1990).

TABLEAU VII
 Résultats de l'étude en porosimétrie au mercure
 Mercury porosimetry

	Volume poral (cm ³ g ⁻¹)		
	total	dû aux particules d'argile	dû au grain du squelette
	V _t [Hg]	V _{Arg} [Hg]	V _{Sq/Arg} [Hg]
Canne à sucre	0,180	0,113	0,067
Jachère pâturée	0,184	0,096	0,088
Forêt	0,188	0,082	0,106

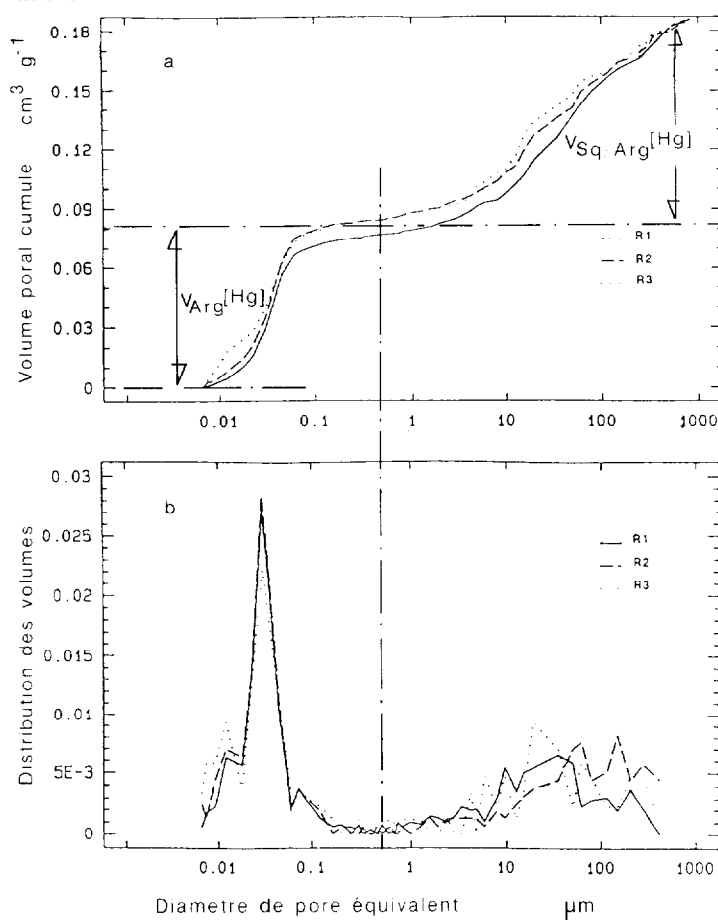


FIG. 4. – Porosimétrie au mercure pour les échantillons prélevés dans la situation forêt. Courbe de volume poral cumulé (a) et courbe de distribution des volumes (b) obtenue en dérivant la courbe cumulée (trois répétitions R1, R2 et R3).
 Mercury porosimetry of the sample from the forest plot. Cumulated curve (a) and volume distribution curve (b) obtained by derivating the cumulated curve (triplicate R1, R2 and R3).

Pour les trois situations, cette limite entre les deux volumes poraux est $D = 0,5 \mu\text{m}$. Ainsi, nous distinguerons au sein du volume poral total

(V_t [Hg]), le volume poral accessible à $7 \text{ nm} < D < 0,5 \mu\text{m}$ et le volume poral accessible à $0,5 < D < 300 \mu\text{m}$. Le premier volume est attribué aux pores

développés par les particules d'argile ($V_{Arg}[Hg]$) (DIAMOND, 1970 ; CAMBIER et PROST, 1981), c'est-à-dire par la phase fine observée en microscopie. Le second volume correspond aux pores d'entassement liés à la microstructure à "entassement de grains" et aux cavités de la microstructure "en éponge". Ce volume poral qui est par conséquent dépendant des relations entre le squelette et l'argile sera dénommé par la suite $V_{Sq/Arg}[Hg]$.

Ainsi, l'analyse des courbes cumulées révèle que $V_t[Hg]$ est composé de deux volumes poraux distincts : $V_{Arg}[Hg]$ et $V_{Sq/Arg}[Hg]$. $V_{Arg}[Hg]$ décroît dans le sens canne à sucre - jachère pâturée - forêt (tabl. VII), alors que $V_{Sq/Arg}$ croît par contre dans ce même sens. Ces variations se compensent et

expliquent que $V_t[Hg]$ ne varie pas entre les différentes situations.

Propriétés de retrait

La description de la géométrie de l'espace poral faite en porosimétrie au mercure est celle d'échantillons déshydratés. Pour savoir ce que représente une telle description par rapport à un état hydraté, il est nécessaire d'étudier les propriétés de retrait des échantillons.

Le volume massique ($cm^3 g^{-1}$) de mottes de dimensions centimétriques a été mesuré par la méthode au pétrole (MONNIER *et al.*, 1973) sur des lots de 8 mottes. Le volume massique a été mesuré pour les mottes à l'état saturé, à $pF = 3,0$, $4,2$ et après séchage à l'étuve à $105^\circ C$ pendant 24 h.

TABLEAU VIII
Volume massique des mottes à différents états hydriques
Bulk volume of the clods at different water potentials

	Volume massique ($cm^3 g^{-1}$)			
	saturé	$pF = 3,0$	$pF = 4,2$	séchage $105^\circ C$
Canne à sucre	0,583	0,584	0,584	0,579
Jachère pâturée	0,587	0,570	0,569	0,571
Forêt	0,576	0,570	0,569	0,571

Les résultats sont donnés dans le tableau VIII. Les différences de volume massique, lorsque la teneur en eau varie, sont nulles ou très faibles, et ceci indépendamment du type de situation dont proviennent les échantillons.

Si l'absence de variation de volume massique traduit effectivement une rigidité de l'espace poral lors de l'extraction de l'eau, la description obtenue en porosimétrie au mercure représenterait le volume poral quel que soit l'état d'hydratation. L'absence de variation de volume massique est en effet une condition nécessaire mais non suffisante pour que l'hypothèse de rigidité de l'espace poral lors de la dessiccation soit acceptée. En effet, des variations de géométrie de l'espace poral peuvent se produire lors de la dessiccation sans qu'elles n'entraînent de variations du volume des mottes de dimension centimétriques. Dans ce cas, un réseau de fissures se développe à l'intérieur des mottes et compense ainsi la diminution de volume due à des réorganisations à l'échelle de l'assemblage des constituants élémentaires (BRUAND, 1986).

Propriétés de rétention d'eau

Les pores autres que ceux directement liés au mode d'assemblage des constituants élémentaires (V_{Arg} et $V_{Sq/Arg}$) ne sont généralement que partiellement pris en compte en porosimétrie au mercure. L'étude des propriétés de rétention d'eau est par contre plus adaptée à l'analyse de ces autres pores, c'est-à-dire ceux liés à l'agrégation (fissures, pores d'assemblage des agrégats, ...) et à l'activité biologique (chenaux, cavités, ...). Cela est essentiellement dû à la plus grande taille des échantillons sur lesquels peut s'effectuer l'étude. Or, ce sont principalement ces pores qui sont affectés par les phénomènes de tassement et qu'il convient d'analyser (GUERIF, 1982 ; GRIMALDI, 1986).

Les horizons ont été échantillonnés à l'aide d'un extracteur équipé de trois anneaux de $117 cm^3$ (UHLAND, 1949). Pour fixer l'état énergétique de l'eau, un dispositif pneumatique d'une plus grande taille que celui proposé par TESSIER et BERRIER (1979), mais dont le principe de fonctionnement est le même, a été utilisé jusqu'à $10^3 hPa$ ($pF = 3,0$).

Chaque anneau de 117 cm³ a tout d'abord été saturé sous vide (trompe à eau) pendant 24 h puis placé sur de la kaolinite préalablement amenée à pF = 1,0. Les anneaux ont été successivement mis à l'équilibre à pF = 1,0, 1,5, 1,8, 2,0, 2,5 et 3,0 (7 jours pour chaque valeur de pF). La présence d'une très fine toile à la surface de la kaolinite permet de déplacer le cylindre sans que sa base ne soit altérée à la suite d'arrachements. Lorsque l'équilibre est atteint à pF = 3,0, le cylindre est pesé, puis séché à 105°C pendant 24 h de façon à déterminer sa masse sèche. La quantité d'eau retenue pour chaque valeur de pression est ensuite calculée et exprimée en cm³ par g de sol.

Les valeurs obtenues à partir des trois anneaux de 117 cm³ ont fait l'objet d'une analyse statistique afin de discuter l'existence d'un éventuel gradient de comportement au sein de chaque horizon échantillonné (CARVALHO, 1989). Les résultats de cette analyse ont montré que les anneaux prélevés dans un même horizon ne présentent pas de différence significative, et cela indépendamment du mode d'utilisation. Cela indique qu'il y a homogénéité au sein de chaque horizon prélevé.

Puisque les horizons sont homogènes, nous avons fait la moyenne entre les trois anneaux et nous utiliserons ces valeurs moyennes pour la suite de la discussion.

TABLEAU IX
Propriétés de rétention en eau
Water retention properties

	Teneur en eau (cm ³ g ⁻¹)						
	Etat saturé	à pF =					
		1,0	1,5	1,78	2,0	2,5	3,0
Canne à sucre	0,245	0,217	0,202	0,191	0,164	0,150	0,138
Jachère pâturée	0,240	0,203	0,174	0,152	0,136	0,121	0,105
Forêt	0,262	0,229	0,197	0,159	0,144	0,123	0,108

L'évolution de la teneur en eau en fonction de la valeur du pF est donnée dans le tableau IX. À l'état saturé, il n'y a pas de différence importante entre les situations canne à sucre et jachère pâturée. Par contre, la teneur en eau de la situation forêt est supérieure à ces deux dernières. La différence de teneur en eau entre les situations jachère pâturée et forêt décroît lorsque le pF augmente pour devenir très faible à pF = 3,0.

DISCUSSION

Chaque méthode prise isolément conduit à une caractérisation de la porosité qui n'est que partielle en raison soit d'une description uniquement globale de l'espace poral (volume poral total déduit de d_a, volume d'eau à saturation), soit d'une description partielle de la distribution des volumes poraux en fonction de leur diamètre d'entrée (taille des échantillons et diamètre des pores étudiés variables suivant les méthodes). Nous allons dans ce qui suit tenter de combiner les différents résultats de façon à obtenir une description de la géométrie de

l'espace poral qui soit la plus complète et la plus précise possible pour chaque situation. Pour ce faire, les données seront représentées sur un même graphique où l'on porte le volume poral cumulé depuis les pores les plus petits en fonction du diamètre équivalent des pores.

Synthèse des résultats sous forme d'une courbe de volume poral cumulé

Les courbes de rétention d'eau, qui traduisent l'affinité de l'échantillon pour l'eau et renseignent sur la localisation de l'eau lors de l'extraction, peuvent être transformées dans un tel mode de représentation (NEWMAN et THOMASSON, 1979 ; TESSIER, 1984 ; BRUAND, 1986). En effet, pour un système poral rigide, l'eau extraite entre deux valeurs de pF provient de pores dont les diamètres équivalents (analogie avec des pores de forme cylindrique) peuvent être calculés à l'aide de la relation suivante :

$$r = 2 \gamma \cos \theta / 10^{pF}$$

avec γ , tension interfaciale entre l'eau et l'air et θ , angle de raccordement du ménisque liquide-solide.

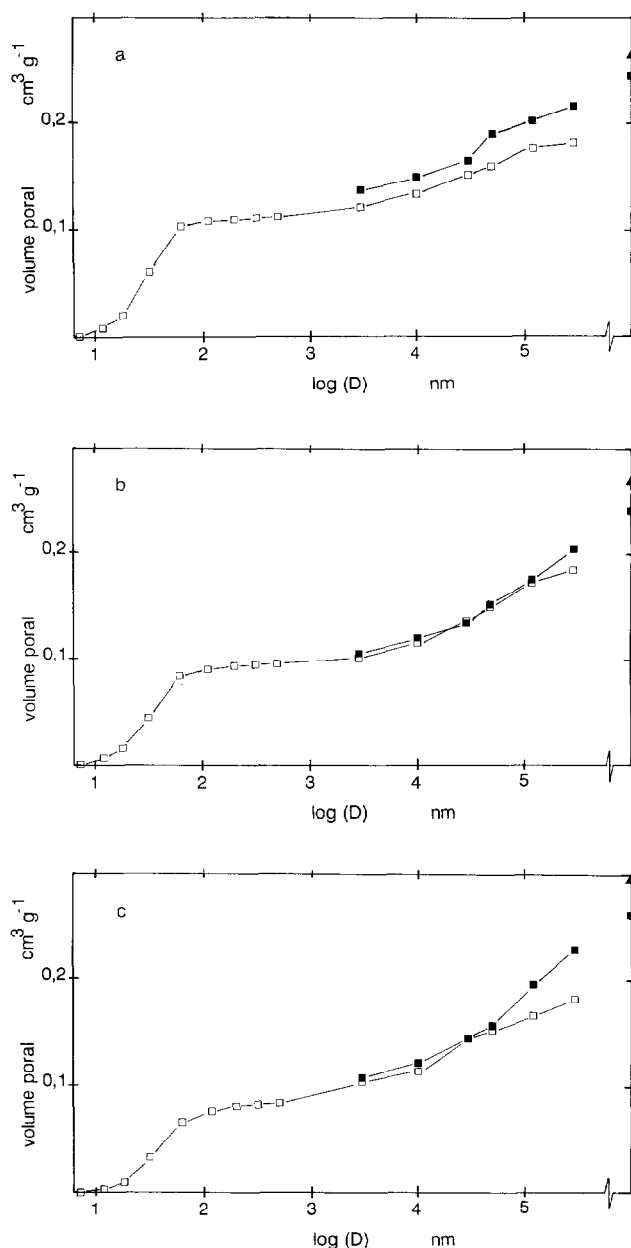


FIG. 5. — Courbes du volume poral cumulé construites à partir de l'étude des propriétés de rétention d'eau (■) et de la courbe d'injection de mercure (□) pour les situations canne à sucre (a), jachère pâturée (b) et forêt (c). Le volume poral déduit de la densité apparente est aussi porté sur les graphiques (▲).
Cumulated pore volume curves established with the results from the water retention properties (■) and from the mercury porosimetry (□) for the sugar cane (a), the pasture (b) and the forest (c) plots. The pore volume deduced from the bulk density is also given (▲).

Or, les mesures de volume massique effectuées sur des mottes pour l'état saturé et $pF = 3,0$ n'ont pas mis en évidence de phénomène de retrait entre ces deux états, et ceci quels que soient les échantillons (tabl. VIII). De la sorte, si l'on retient l'hypothèse de rigidité des volumes poraux lors de la dessiccation, les courbes de rétention d'eau peuvent être effectivement transformées en des courbes de distribution du volume poral pour des diamètres équivalents (D) compris entre 300 et 3 μm , c'est-à-dire pour D correspondant respectivement à $pF = 1,0$ et $pF = 3,0$ (fig. 5).

Quant aux courbes de volume poral cumulé obtenues en porosimétrie au mercure, elles ont été transformées de façon à cumuler le volume poral depuis les plus petits pores et non depuis les plus grands comme dans la figure 4. Le volume poral total déduit de d_a , ainsi que le volume d'eau à saturation ont aussi été portés sur la figure 5 bien que l'on ne puisse pas les mettre en relation avec une valeur de D déterminée.

Pour les situations forêt et jachère pâturée, la courbe de volume poral cumulé déduite de l'injection de mercure et celle déduite de l'étude des propriétés de rétention d'eau sont confondues entre 3 et 50 μm pour la situation forêt, et entre 3 et 120 μm pour la situation jachère pâturée (fig. 5b et c). Vers les pores de plus grande taille, les deux courbes divergent l'une par rapport à l'autre, le volume poral cumulé déduit des propriétés de rétention d'eau étant supérieur à celui déduit de la porosimétrie au mercure. Cette différence de volume poral est à attribuer à un meilleur échantillonnage des volumes poraux accessibles à des pores de diamètre équivalent supérieur à une centaine de micromètres avec les cylindres de 117 cm^3 utilisés pour l'étude des propriétés de rétention d'eau par rapport aux mottes de 4 à 5 cm^3 employées en porosimétrie au mercure.

Pour la situation canne à sucre, les deux types de courbe ne sont pas confondues comme précédemment mais la différence de volume est très faible entre 3 et 30 μm (de l'ordre de $0,010 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) (fig. 5a). Par contre, comme pour les situations forêt et jachère pâturée, les courbes divergent l'une par rapport à l'autre vers les pores les plus grands.

Le fait que les deux types de courbes de volume poral cumulé soient confondues, ou tout au moins très proches (dans un domaine de valeur de D que l'on sait concerner des volumes poraux échantillonnés de la même façon par les cylindres et les mottes), est une confirmation de l'hypothèse de rigidité de l'espace poral qui a été déduite de l'étude des propriétés de retrait.

Comparaison des courbes et mise en évidence d'un tassement

Les courbes sont ensuite comparées en séparant les différentes classes de pores. La porosimétrie au mercure a mis en évidence deux volumes poraux distincts, l'un est accessible à des diamètres de pore compris entre 0,5 et 0,007 μm , et l'autre à des diamètres de pore compris entre 0,5 et 300 μm . Les courbes synthétiques réunissant les données de la porosimétrie au mercure et de l'étude des propriétés de rétention d'eau ne montrent pas la présence d'un troisième volume poral supplémentaire, seul le volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent compris entre 0,5 et 300 μm apparaît supérieur à celui déduit de la seule porosi-

métrie au mercure. Par conséquent, les deux volumes poraux distingués à partir des courbes synthétiques vont être successivement comparés.

Le volume poral accessible à des diamètres de pore équivalents compris entre 0,5 et 0,007 μm augmente lorsque l'on passe de la situation forêt à la situation jachère pâturée puis à la situation canne à sucre (fig. 6a). Cette différence de volume poral, qui résulte de l'assemblage des particules constituant la phase argileuse, s'explique aisément par les différences de teneur en argile mises en évidence lors de l'analyse granulométrique. La figure 7 met en évidence l'étroite relation entre ce volume poral et la teneur en argile.

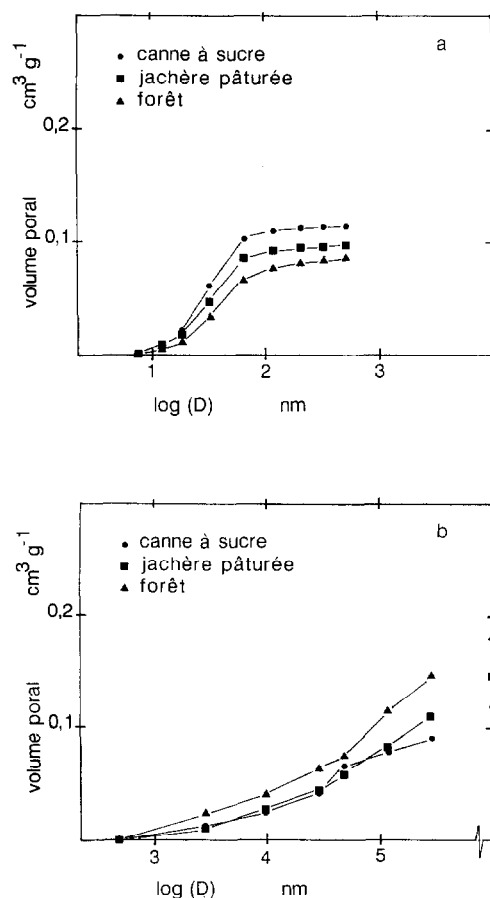


FIG. 6. – Courbe du volume poral cumulé pour les pores de diamètre équivalent compris entre 0,007 et 0,5 μm (a) et supérieurs à 0,5 μm (b).
 Cumulated pore volume curve for pores with equivalent diameters (a) between 0.007 and 0.5 μm and (b) larger than 0.5 μm .

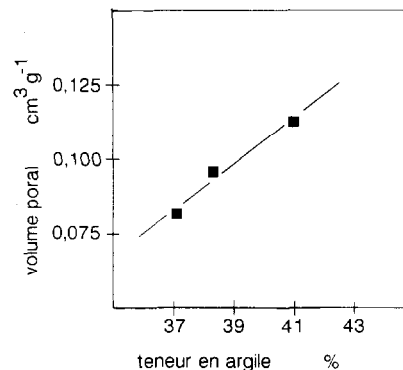


FIG. 7. – Évolution du volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent inférieur à 0,5 μm en fonction de la teneur en argile.
 Pore volume variations of pores with equivalent diameters less than 0.5 μm with clay content.

Quant au second volume poral, accessible aux pores de diamètre équivalent compris entre 300 et 0,5 μm , il est lui aussi variable suivant les situations (fig. 6b). Il en va de même lorsque l'on prend en compte le volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent supérieur à 0,5 μm , c'est-à-dire lorsque l'on considère la différence entre le volume d'eau à saturation et le volume poral accessible à des pores de diamètre inférieur à 0,5 μm . Cette dernière comparaison indique que le volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent supérieur à 0,5 μm est pour la situation forêt supérieur d'environ 35 % (0,050 cm³ g⁻¹) à celui de la situation canne à sucre, et supérieur d'environ 25 % (0,035 cm³ g⁻¹) à celui de la situation jachère pâturée. Il est clair qu'une partie du volume poral acces-

sible à des pores de $D > 0,5 \mu\text{m}$ résulte de l'assemblage des grains de quartz dans les zones de microstructure à "entassement de grains". De la sorte, une partie de la différence de volume serait à relier à la plus faible teneur en argile de la situation forêt (37,1 % contre 38,3 % et 43,0 % pour les situations jachère pâturée et canne à sucre, respectivement). En effet, une plus faible teneur en argile augmente vraisemblablement le pourcentage volumique de zones à microstructure à "entassement de grains", et par conséquent le volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent supérieur à $0,5 \mu\text{m}$. Si cela est le cas pour la situation forêt vis-à-vis des deux autres situations, cela devrait l'être aussi pour la situation jachère pâturée vis-à-vis de la situation canne à sucre, et cela d'autant plus que la différence de teneur en argile est quatre fois plus élevée entre ces deux dernières situations qu'entre les situations forêt et jachère pâturée. Or, aucune différence de volume poral n'a été mise en évidence dans la gamme de D comprise entre $0,5$ et $120 \mu\text{m}$. La différence de teneur en argile ne serait donc pas à l'origine de la différence de volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent supérieur à $0,5 \mu\text{m}$.

La différence de volume est donc due à une variation de volume poral qui peut être reliée au mode d'utilisation agricole du sol et, par conséquent, être la conséquence d'un tassement sous culture de canne à sucre. Cet état tassé serait fortement rémanent car encore bien présent sous jachère pâturée, après abandon de la culture de canne à sucre depuis 8 ans. Une telle pérennité de l'état tassé proviendrait, au moins pour partie, de l'absence d'activité structurale des sols en conditions naturelles (absence de phénomènes de retrait-gonflement) et, pour une autre part, des caractéristiques du système racinaire fasciculé de la végétation de graminées qui s'est installée.

CONCLUSION

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont montré que l'horizon directement sous-jacent à

l'horizon cultivé avait été tassé sous culture de canne à sucre. Ce résultat n'a été obtenu qu'à la suite d'une analyse très détaillée de la constitution minérale des échantillons et de la géométrie de leur espace poral. Il faut en effet noter que les valeurs de densité apparente n'avaient pas révélé de différence entre les échantillons. La densité apparente est une caractéristique globale qui intègre des variations de porosité dues à des différences de constitution et d'autres dues spécifiquement au tassement.

D'un point de vue plus général, cette étude permet de comprendre pourquoi la mise en évidence d'un état tassé sous-jacent à l'horizon cultivé nécessite une analyse détaillée de la porosité et de la constitution des échantillons. Le volume poral total est en effet constitué en majeure partie de pores résultant de l'assemblage des particules élémentaires qui ne sont pas ou peu modifiés à la suite d'un tassement : il s'agit de pores dus à l'assemblage du squelette et de la phase argileuse et de pores internes à la phase argileuse. En revanche, les pores qui sont plus aisément modifiables lorsque le sol est soumis à un compactage sont représentés par des pores liés à l'assemblage d'agrégats et à l'activité biologique. Or, dans l'horizon sous-jacent à l'horizon cultivé, ces pores ne contribuent que très peu au volume poral total. Leurs variations de volume sont par conséquent difficiles à mettre en évidence et aisément compensées par des variations induites par les caractéristiques de la constitution des échantillons. L'utilisation de la densité apparente, ou d'une autre grandeur liée au volume poral total, doit être faite avec beaucoup de prudence et, dans tous les cas, cette utilisation doit être associée à une connaissance précise de la constitution des échantillons étudiés. Dans le cas contraire, il y a un risque important à considérer des variations de comportement comme étant la conséquence directe d'un traitement agronomique alors qu'il peut s'agir de différences liées uniquement à des variations de constitution.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 juin 1992

BIBLIOGRAPHIE

- BARRETO (W. de O.), 1986. – *Eletroquímica de solos tropicais de Carga variável. Capacidade da dupla camada elétrica*. Tese de doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Brasil, 273 p.
- BERTONI (J.), PASTANA (F.I.), LOMBARDI NETO (F.) et BENATTI JUNIOR (R.), 1972. – Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agronomico de Campinas. *IAC Circular* n° 20, 56p.
- BRUAND (A.), 1986. – Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et de courbes de rétention d'eau. *Science du Sol*, 24(4) : 351-362.
- BRUAND (A.) et PROST (R.), 1987. – Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach. *J. Soil. Sci.*, 38 : 461-472.
- BRUAND (A.) et PROST (R.), 1988. – Analyse minéralogique quantitative d'un échantillon de sol. Utilisation des données concernant la composition chimique de l'échantillon. *Agronomie*, 8(1) : 15-22.
- BRUAND (A.), BRAUDEAU (E.) et FRITSCH (E.), 1990. – Évolution de la géométrie de l'espace poral des sols lors du passage du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux et hydromorphe : exemple du bassin de Booro Borotou (Côte-d'Ivoire). Séminaire Orstom. Journées Hyperbav. Montpellier, 12-13 septembre 89. *Études et thèse*, Orstom : 137-145.
- BULLOCK (P.), FEDOROFF (N.), JONGERUS (A.), STOOPS (G.), TURSINA (T.), BABEL (U.) et Coll., 1985. – *Handbook for soil thin section description*. Éd.1^e, Wayne Research publications, 150 p.
- CAMBIER (PH.) ET PROST (R.), 1981. – Étude des associations argile-oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique. *Agronomie*, 1(9) : 713-722.
- CARVALHO (S.R.), 1989. – *Tassement des sols ferrallitiques mis en culture. Apport d'une analyse comparative de l'espace poral de sols "podzolicos"* (État de Rio de Janeiro, Brésil). Thèse Univ. Paris 6, 183 p.
- Comissao de solos, Cnepa., 1958. – Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro. *Bol. do Ser. Nac. de Pesq. Agr.*, 11 : 350 p.
- DIAMOND (S.), 1970. – Pore size distributions in clays. *Clays and Clay Min.*, 18 : 7-23.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1965. – *Précis de Pédologie*. Masson, 3^e éd, 481 p.
- Embrapa, SNLCS, 1980a. – *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro*. Projeto n° 02480039-3, Escala 1/100 000.
- Embrapa, SNLCS, 1980b. – Levantamento semi-detalhado e aptidão agrícola dos solos dos municípios do Rio de Janeiro. *Bull. Tec.* n°66, 388 p.
- FAO, 1974. – *Soil map of the world*. Vol. 1, Legend Unesco, Paris.
- FERNANDEZ (J.), FURLANI NETO (V.L.) et STOLF (R.), 1981. – Sistema de plantio e a competição do solo na cana de açúcar. *Brasil Açucareiro*, 97(3), 20-31.
- FIES (J.C.), 1984. – Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4 : 891-899.
- FITZPATRICK (R.W.) et SCHWERTMANN (U.), 1982. – Al-Substituted Goethite -An indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma*, 27 : 335-347.
- GRIMALDI (M.), 1986. – Modifications structurales d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Science du Sol*, 24(3) : 269-284.
- GUERIF (J.), 1982. – Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie* 2(3) : 287-294.
- GUILLORE (P.), 1980. – *Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces*. Doc. ronéoté, Ina-PG, 22p.
- IBGE, 1959a. – *Enciclopédia dos Municípios brasileiros*. Coord. por Ferreira, J.P. Ed. Ferreira, D.P. Rio de Janeiro, 226-227.
- IBGE, 1959b. – *Enciclopédia dos Municípios brasileiros*. Coord. por Ferreira, J.P. Ed. Ferreira, D.P. Rio de Janeiro, 263-264.
- IBGE, 1987. – *Levantamento sistematico da producao agricola*. Cepagro, 85 p.
- KÄMPF (N.) et SCHWERTMANN (U.), 1982. – The 5 M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Miner.*, 30 (6) : 401-408.
- LEPRUN (J.C.), 1988. – *A situação da conservação do solo e da agua no Brasil*. O papel do SNLCS da Embrapa. Relatório interno, Embrapa, 42 p.
- MENEZES (D.M.), CEZAR (T.I.) et CARVALHO (J.F.), 1974. – Influencia de épocas de plantio e colheita sobre a produtividade de variedades de batata doce, na baixada fluminense. *Pesq. Agropec. Bras*, 9 : 145-149.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.) et FIES (J.C.), 1973. – Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse

- de système de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24 (5) : 533-545.
- NEWMAN (A.C.D.) et THOMASSON (A.J.), 1979. – Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.*, 30 : 415-439.
- NORRISH (K.) et TAYLOR (R.M.), 1961. – The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.*, 12 : 294-306.
- PEARSON (M.J.), 1978. – Quantitative clay mineralogical analyses from bulk chemistry of sediments rocks. *Clays Clay Miner.*, 26 (6) : 423-433
- PELLERIN (F.M.), 1980. – La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géochimique des sols et des roches. *Bull. Liais. Lab. Ponts et Chaussées*, 106 : 105-116
- PINHEIRO de OLIVEIRA (F.A.), 1986. – *Efeito de diferentes coberturas vegetais e de praticas conservacionistas sobre perdas por erosão*. Thèse Mestrado, UFPA, Escola de Agricultura de Areia, 52p.
- SCHULZE (D.G.), 1984. – The influence on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al – Substituted Goethites and estimation of Al from them. *Clays Clay Miner.*, 32 (1) : 36-44.
- STENGEL (P.), 1979. – Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Ann. agron.*, 30(1) : 27-51.
- STOOPS (G.), 1986. – Multilingual translation of the terminology used in the "Handbook" for soil thin section description. *Pédologie*, 3 : 337-348.
- TESSIER (D.) et BERRIER (J.), 1979. – Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol*, 1 : 67-82.
- TESSIER (D.), 1984. – *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse. Univ. Paris VII, 361p.
- UHLAND (R.E.), 1949. – Physical properties of soils as modified by crops and management. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14 : 361-366.
- VACHIER (P.), CAMBIER (Ph.) et PROST (R.), 1979. – Structure d'un milieu poreux : la craie. *Ann. Agron.*, 39 (3) : 247-263.
- WIEGMANN (J.), HORTE (Ch.) et KRANZ (G.), 1982. – *Determination of the complete mineral composition of clays*. Proc. VII Int. Clay. Conf. 1981. Bologna and Pavia. Ed. Van Ophen and F. Verniale. Dev. Sed. 35, Elsevier : 365-372.