

TH - M36

GF-10

UNIVERSITE DE PARIS 6

## **THESE**

présentée pour l'obtention du  
Doctorat de l'Université Paris 6

par

**Sylvio ROMERO DE CARVALHO**

### **TASSEMENT DES SOLS FERRALLITIQUES MIS EN CULTURE**

**APPORT D'UNE ANALYSE COMPARTIMENTALE  
DE L'ESPACE PORAL  
DE SOLS "PODZOLICOS"  
(Etat de Rio de Janeiro, Brésil)**

Soutenu le 30 mai 1990 devant le jury composé de

MM. G. PEDRO           Président  
A. MARIOTTI  
C. CHEVERRY   Rapporteur  
D. TESSIER       Rapporteur  
A. BRUAND  
J.C. LEPRUN



## AVANT PROPOS

Dès le début de mon séjour en France, j'ai remarqué que le mot "merci" était utilisé pour de nombreuses situations alors qu'il l'est très peu en portugais. Plus tard, je compris qu'il s'agissait fréquemment d'une forme de politesse. Je ne voudrais pas ici que mes remerciements soient compris comme étant seulement une forme de politesse. C'est pourquoi j'utiliserai les termes en portugais qui sont sans équivoque.

Je dois tout d'abord "agradecer" à Mr. Leprun qui est à l'origine de cette thèse, à Mr. Pedro qui a été mon directeur de thèse, à Mr. Bruand qui a assuré l'encadrement scientifique et m'a conseillé au cours de ces trois années, à Mr. Cheverry et Mr. Tessier qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail et à Mr. Mariotti qui me fait l'honneur de participer à mon jury.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire INRA du Service d'Etudes des Sols et de la Carte Pédologique de France (SESCPF). De nombreuses personnes ont contribué à sa réalisation, je leur dit très sincèrement "muito abrigado". J'ai particulièrement bénéficié de l'aide de Mr. Gaillard et Melle Moulin pour l'étude des propriétés de rétention en eau et de retrait-gonflement, de Mr. Le Lay et Mr. Isambert pour la préparation des lames minces et leurs descriptions, de Melle Mit pour la porosimétrie au mercure, de Mr. Courtemanche pour la fabrication du dispositif de conductivité hydraulique, de Mr. Hardy et de Mme Le Berre pour les déterminations minéralogiques, de Melle Noirtin et Mr. Rousset pour la réalisation des illustrations, de Mr. Velly pour la mise en forme des tableaux, de Mr. Yart pour l'utilisation des moyens informatiques et Melle Moreau et Mme Cabourdin pour la frappe et la mise en forme du texte. Cette longue liste montre à quel point mon travail est le résultat d'un travail d'équipe.

Je dois "agradecer" Mr. Jamagne qui m'a toujours permis de bénéficier des moyens nécessaires à la réalisation de mon travail au sein du SESC PF qu'il dirige. Je lui suis aussi "grato" pour ses conseils et le temps qu'il m'a consacré lors de la rédaction.

Je ne peux pas oublier mes compagnons du SNLCS au Brésil. Pour eux, je me permets de m'exprimer en Portugais : Osorio, Aroaldo e Leprun pela descrição dos perfis e amostragens, pessoal da química que fizeram parte das análises, J. Lopes e o pessoal da física, Evanda e pessoal da mineralogia pela análise mineralógica das areias, Roberto da importação, Penha, Idare, Palmieri, Washington (meu procurador e irmão) e prof. Ademar da UFRRJ pela orientação em estatística.

*Je suis tout particulièrement "grato" à quatre personnes : Béatrice Noirtin, Michel Velly, Ary Bruand et J.C. Leprun pour leur amitié. Leur aide a été essentielle au bon développement de mon séjour en France.*

*Enfin, je veux "agradecer" ma femme Silvia qui m'a beaucoup aidé et qui a dû travailler durement durant notre séjour pour que je puisse rester en France et réaliser ce travail.*





# **SOMMAIRE**

**INTRODUCTION**

**CHAPITRE 1: LES SITES ETUDIES**

**CHAPITRE 2: CARACTERISATION DES CONSTITUANTS MINERAUX**

**CHAPITRE 3: ANALYSE DES MODES D'ORGANISATION**

**CHAPITRE 4: ETUDE DU COMPORTEMENT HYDRIQUE**

**CHAPITRE 5: DISCUSSION GENERALE**

**CONCLUSION**



## DEFINITION DES SYMBOLES UTILISES

$d_a$ :	densité apparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ).
$D_e$ :	diamètre équivalent de pore.
$d_r$ :	densité réelle ( $\text{g cm}^{-3}$ ).
$K_0$ :	conductivité hydraulique en saturé ( $\text{cm h}^{-1}$ ).
$V_{\text{air}}$ :	volume poral libre à l'air ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_{\text{air}} [d_a]$ :	volume poral libre à l'air obtenu à partir de la densité apparente des anneaux de Kopecky et du volume d'eau retenu à $\text{pF}=1,78$ ( $V_{\text{eau}}[\text{pF}=1,78]$ ) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_{\text{arg}}$ :	volume poral dû à l'assemblage des particules d'argile ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_{\text{arg}} [\text{Hg}]$ :	volume poral dû à l'argile obtenu à partir des courbes d'injection de mercure ( $0,5\mu\text{m} > D_e > 0,006 \mu\text{m}$ ) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_{\text{arg}} [\text{pF}=3,7]$ :	volume poral dû à l'argile et obtenu à partir du volume d'eau retenu à $\text{pF}=3,7$ ( $D_e = 0,5\mu\text{m}$ ) (courbes de rétention en eau) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_{\text{eau}} [\text{pF}=1,78]$ :	volume d'eau retenu à $\text{pF}=1,78$ (60 hPa) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_m$ :	volume massique ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) ( $V_m = V_t + 1/d_r$ ).
$V_m [105]$ :	volume massique à l'état déshydraté ( $105^\circ\text{C}$ ) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_m [\text{pF}=3,0]$ :	volume massique à $\text{pF}=3,0$ ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).
$V_m [S_{\text{at}}]$ :	volume massique de mottes à saturation ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ).

$V_{str}$ :	volume poral structural des pores d'entassement de grains, pores biologiques, pores structuraux, pores lacunaires...) ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_{str} [Hg]$ :	volume poral structural obtenu à partir des courbes d'injection de mercure ( $300 \mu m > D_e > 0,5 \mu m$ ) ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_{str} [M]$ :	volume poral libre à l'air à $pF=3,7$ obtenu à partir de la relation ( $cm^3 g^{-1}$ ). $V_{str} [pF=3,7] = (V_m [pF=3,0]) - (1/d_r) - (V_{arg} [pF=3,7])$
$V_{str} [d_a]$ :	volume poral structural obtenu à partir de la différence entre $V_t [d_a]$ et $V_{arg} [pF=3,7]$ ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_t$ :	volume poral total ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_t [Hg]$ :	volume poral total obtenu à partir des courbes d'injection de mercure ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_t [d_a]$ :	volume poral total obtenu à partir de la densité apparente à l'aide des anneaux de Kopecky ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_t [eau]$ :	volume poral total obtenu à partir du volume d'eau présent dans les cylindres à saturation ( $cm^3 g^{-1}$ ).
$V_t [V_m 105]$ :	volume poral total à l'état déshydraté obtenu à partir de la relation : $V_t [V_m 105] = V_m [105] - 1/d_r$ ( $cm^3 g^{-1}$ ).





## **ABREVIATIONS UTILISEES POUR LES ECHANTILLONS**

CP-P-1 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation pâturage. Profondeur 1.
CP-P-2 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation pâturage. Profondeur 2.
CP-F-1 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation forêt. Profondeur 1.
CP-F-2 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation forêt. Profondeur 2.
CP-C-1 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation canne à sucre. Profondeur 1.
CP-C-2 :	Site de "Campos". Mode d'utilisation canne à sucre. Profondeur 2.
UR-N-1 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation sol nu. Profondeur 1.
UR-N-2 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation sol nu. Profondeur 2.
UR-P-1 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation pâturage. Profondeur 1.
UR-P-2 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation pâturage. Profondeur 2.
UR-C-1 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation canne à sucre. Profondeur 1.
UR-C-2 :	Site de "l'Universidade Rural". Mode d'utilisation canne à sucre. Profondeur 2.



## INTRODUCTION

L'état de Rio de Janeiro est un état de 32 247 km<sup>2</sup> situé au sud-est du Brésil (8 500 000 km<sup>2</sup>) (fig. 1). Il est entouré par les états de Sao Paulo, Minas Gerais et Espirito Santo. Sa vocation agricole est limitée par plusieurs facteurs socio-historique et édaphique, et en particulier par une topographie accidentée. La production est insuffisante pour couvrir les besoins alimentaires de la ville de Rio et de ses villes satellites (environ 15 millions d'habitants).

Seule la production de canne à sucre est auto suffisante. La majeure partie de la culture de canne à sucre est développée sur deux types de sols ferrallitiques.

Le premier est un sol de type "podzolic vermelho amarelo" (PVA) ; il correspond aux Acrisols de la classification FAO (1974) et selon DUCHAUFOR (1965), à des sols faiblement ferrallitiques et/ou des sols ferrallitiques lessivés de la classification française CPCS.

Le second est un sol de type "latossolo vermelho amarelo" (LVA) ; il correspond aux Ferralsoles de la classification FAO (1974) et aux sols ferrallitiques typiques de la classification française. Les surfaces occupées par ces deux types de sols sont soumises à une érosion importante qui est liée à l'existence d'un relief accidenté, mais aussi à la non observation des pratiques de conservation des sols par les agriculteurs.

L'estimation IBGE (1987) donne pour le Brésil une surface cultivée en canne à sucre d'environ 4 10<sup>6</sup> ha, avec une production moyenne de 64 t/ha. La surface de canne à sucre est la plus importante dans l'état de Sao Paulo avec 1,7 10<sup>6</sup> ha et une production moyenne de 74 t / ha. L'état de Rio de Janeiro est le 5<sup>eme</sup> en surface cultivée (230 10<sup>3</sup> ha) avec une production moyenne de 50 t/ha.

Les variétés de canne à sucre utilisées possèdent un cycle végétatif de 12 à 18 mois. Elles sont choisies de façon que l'ensemble de la récolte se répartisse durant la période de raffinage (avril à novembre, période sèche).

La plantation est effectuée de janvier à mars (période des pluies), dans des sillons (30 cm de largeur et 20 à 25 de profondeur) espacés de 1,40 à 1,50 m (FERNANDES et al., 1981a). Selon FERNANDES et al. (1981b), cet espacement est tel que les lignes de canne à sucre sont partiellement roulées par les camions qui transportent la récolte, entraînant ainsi un compactage des horizons sous-jacents.

Généralement, l'implantation d'une culture de canne à sucre débute par un travail du sol à l'aide d'une charrue à disques. On procède ensuite à un ou plusieurs passages de "grade lourde" (herse), puis intervient la plantation en lignes. La première récolte est faite après 18 mois. Elle est suivie de 3 ou 4 récoltes à raison d'une chaque année. La canne à sucre est coupée manuellement et ramassée à la machine.

De nombreux agronomes affirment qu'il existe une différence importante de croissance initiale entre une canne à sucre plantée après préparation du sol à la charrue à disques et une culture de canne à sucre pour laquelle le sol a été préparé à la charrue à soc tractée par des boeufs. Cette différence est attribuée à la présence, à la base de l'horizon cultivé, d'un horizon tassé que l'on dénomme habituellement au Brésil "pé de grade" (semelle de labour). Celui-ci serait dû aux passages répétés de la charrue à disques lors de chaque nouvelle implantation de canne. Les passages de machines lourdes, lors de la récolte, pourraient aussi en être en partie la cause.

Bien que ce comportement défavorable soit sensiblement le même pour les deux types de sols précités, il existe néanmoins des différences. Pour le PVA, le développement d'une "pé de grade" serait plus important que pour le LVA, ce dernier étant naturellement poreux en raison de sa structure micro-agrégée. Par ailleurs, le PVA ne possède pas cette structure micro-agrégée et contient un taux élevé d'argile dispersable dans l'eau par simple agitation mécanique. Cette aptitude à la dispersion de l'argile expliquerait que le "sous-solage" ne puisse donner de résultats satisfaisants dans ces sols. En effet, dès les premières pluies qui suivent cette opération culturale, l'argile facilement mobilisable obturerait de nouveau les vides créés par le sous-solage.

Nous avons choisi d'étudier le cas des sols PVA qui sont donc les plus sensibles au phénomène de dégradation physique qui vient d'être évoqué. A ce propos, RANEY et al., (1955), décrivent deux types d'horizons denses, à forte compacité. Ceux qui sont d'origine génétique et qui se sont formés par une action lente et continue des processus pédogénétiques et ceux qui résultent d'une pression appliquée sur la surface du sol.

Cependant ces deux types de processus, qui aboutissent à la formation d'un horizon sous-jacent de densité apparente élevée, sont difficilement dissociables pour de nombreuses situations.

L'objectif de cette étude est la recherche de données qui permettront d'analyser les valeurs de densité apparente et, en particulier, sa valeur élevée dans les horizons à la base des horizons cultivés. Cette dernière doit être, au moins en partie, considérée comme étant la conséquence de la mécanisation de la culture de canne à sucre. A cet effet, nous allons comparer des sols soumis à différentes utilisations agricoles et présentant des développements de profil pédologiques aussi proches que possible.

La démarche consistera dans un premier temps à caractériser :

– les constituants. Il s'agit de savoir s'il y a des différences de constitution (teneur, nature...), parce que c'est la condition indispensable pour discuter de l'organisation et du comportement des sols ;

– le mode d'organisation des constituants qui résulte de différents facteurs qui sont liés à la nature de ces constituants, mais aussi aux facteurs du milieu. Il s'agit de montrer l'importance de ces facteurs sur l'organisation parce qu'ils jouent un rôle essentiel sur le comportement ;

– le comportement. Il convient d'en aborder les différents aspects (rétention en eau, aération, conductivité hydraulique, fissuration) et d'en analyser les causes.

Dans un second temps, la discussion générale conduira à une synthèse de l'ensemble des résultats. Nous pourrons alors discuter de l'origine des valeurs de densité apparente, et de la relation avec les baisses de rendement de la canne à sucre.

Cette comparaison concernera l'horizon cultivé de surface et l'horizon sous-jacent. Nous pourrons ainsi, par la suite, discuter si les éventuelles différences de densité apparente sont à mettre en relation avec des différenciations d'origine pédogénétique ou avec la mise en valeur agricole.

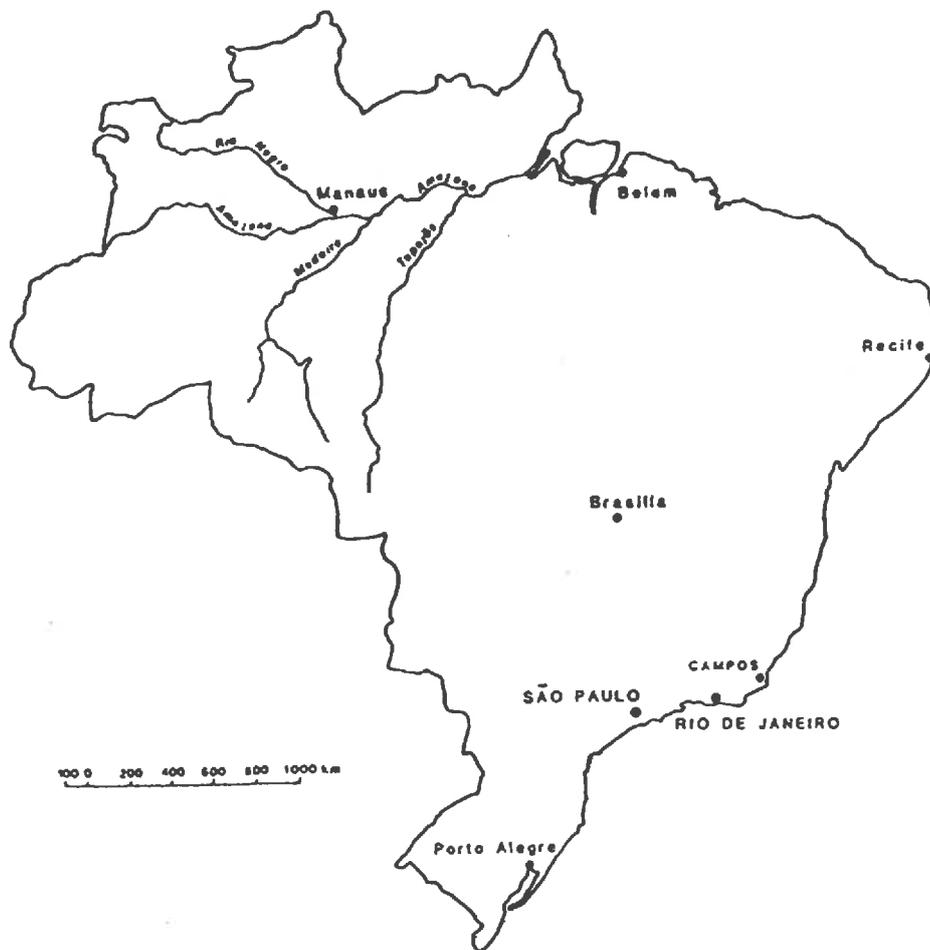


Figure 1: Carte schématique du Brésil.

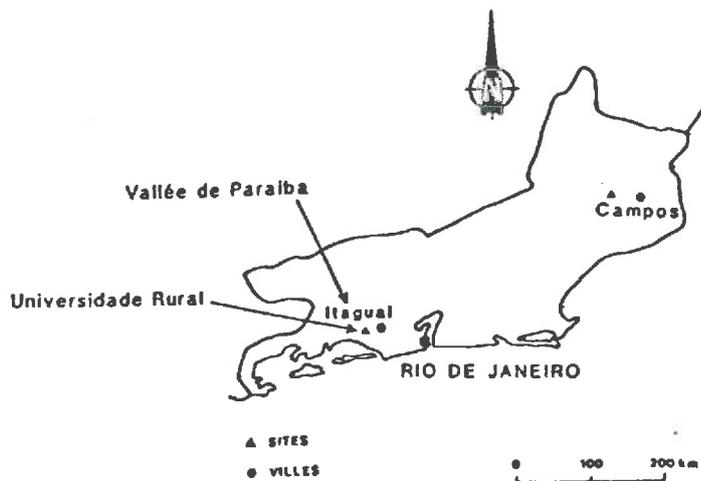


Figure 2: Localisation des deux sites étudiés dans l'état de Rio de Janeiro.





# Chapitre 1

## LES SITES ETUDIÉS

### 1.1 Introduction

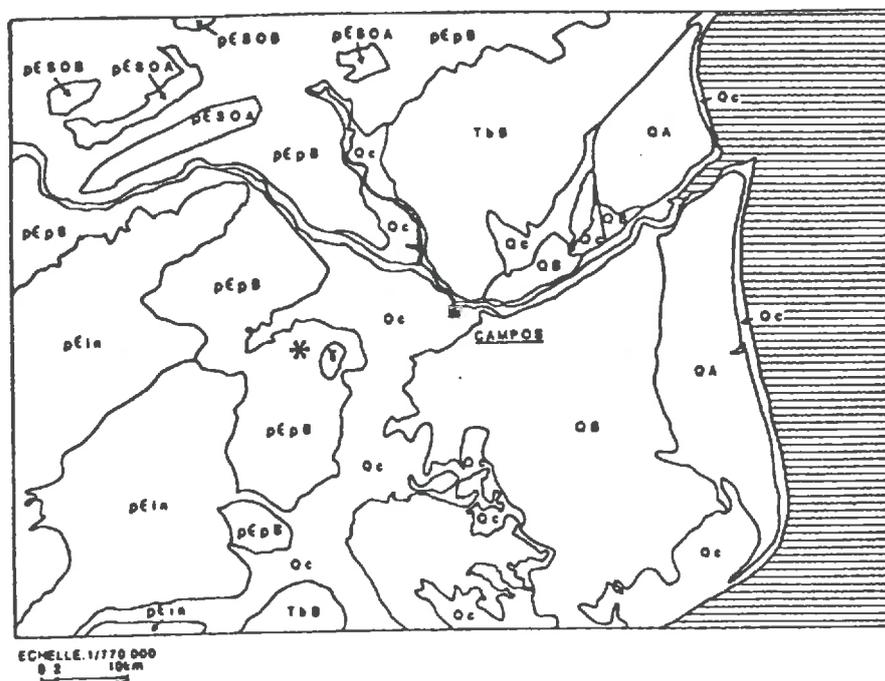
Deux régions de l'état de Rio de Janeiro se distinguent par leurs bonnes potentialités agricoles : la région de "Campos", ville située au nord-est de l'état, où l'on cultive le riz et la canne à sucre, et la vallée du "Paraíba", au sud-ouest, qui est fortement orientée vers la production laitière (fig.2). Dans la région de "Campos", sur les sols à drainage défavorable, on cultive du riz irrigué (environ 30 000 ha) et sur les zones à relief plus marqué (sols podzolicos et latossolicos), de la canne à sucre (environ 230 000 ha – IBGE, 1987).

Dans la vallée du "Paraíba", la topographie accidentée limite la mise en valeur agricole. L'activité traditionnelle est la production de lait. Les sols de cette région présentent beaucoup de similitudes avec les sols de la région de "Campos", tant du point de vue de leur genèse que de leur composition chimique. Néanmoins, leurs comportements sont considérés comme étant différents. La fertilité des sols de la région du "Paraíba" serait supérieure à celle des sols de la région de "Campos", mais la topographie y demeure un facteur limitant très important.

Deux sites ont été sélectionnés pour notre étude. Le premier est situé dans la région de "Campos", où les sols sont représentatifs des zones où la canne à sucre est cultivée depuis de nombreuses années. Le second site est situé à "l'Universidade Rural", c'est à dire hors de la région vallée du "Paraíba". Les sols y sont néanmoins du même type que dans cette région, et ce site présente l'avantage d'être un dispositif expérimental installé et suivi depuis 1979.

Au plan de leur classification, les sols du Brésil ne sont pas encore clairement définis. Cependant CAMARGO et al., (1987) ont publié un article sur les critères et les principes de cette classification. Elle est basée sur des concepts adoptés pour l'ancien

système américain de 1938 et 1949. Le système est dynamique et évolue en fonction des besoins et cherche à se rapprocher d'autres systèmes internationaux. Beaucoup de concepts sont dérivés de la 7<sup>me</sup> approximation (1960), de la légende de la carte de sols du monde FAO (1974) et de la "soil taxonomy" (1975). Les "latossolos" de la classification brésilienne se rapportent bien aux ferralsols (FAO) et aux oxisols (soil taxonomy), mais les "podzolicos" peuvent être des acrisols, luvisols ou nitosols pour la FAO ; et des ultisols ou alfisols pour la soil taxonomy.



<u>QUATERNAIRE</u>		<u>PRECAMBRIEN MOYEN ET SUPERIEUR</u>	
[ Qc ]	SEDIMENTS ACTUELS ET SUB-ACTUELS	[ Y ]	.GROUPE "SERRA DOS ORGAOS" GRANITE
[ Qb ]	DEPOTS FLUVIO LACUSTRES	[ pÉSOB ]	ASSOCIATION DE GNEISS GRANITIQUE, MIGMATITE ET GNEISS
[ Qa ]	CORDONS LITTORAUX	[ pÉSOA ]	MIGMATITES PREDOMINANTES, ASSOCIEES A DES GNEISS GRANITIQUES
<u>TERTIAIRE</u>		[ pÉpB ]	.GROUPE "PARAIBA DO SUL" GNEISS "BANDADOS"
[ Tbb ]	GROUPE "BARRAIRAS" ARENITE ET ARENITE LATERALISEE ARGILEUSE	[ pÉin ]	.COMPLEXO DO LITORAL FLUMINENSE ASSOCIATION DE GNEISS, GRANITE ET DE MIGMATITE
[ λ ]	INTRUSIONS ALCALINES CRETACE	*	SITE DE "CAMPOS"

Figure 1.1: Carte géologique de la région de "Campos".

## **1.2 Le site de la région de “Campos”**

La région a été mise en valeur au XVIII<sup>e</sup> siècle pour y produire du café, et ceci après déboisement de la végétation naturelle qui était une forêt tropicale subcaducifoliée. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, la main-d'oeuvre étant devenue rare avec la fin de l'esclavage (I.B.G.E., 1959a), la culture du café a progressivement été remplacée par celle de la canne à sucre.

### **1.2.1 Caractères généraux du milieu**

Les “latossolos” et “podzolicos” représentent environ 80 % de la surface. Les 20 % restant sont des sols développés sur des colluvions hydromorphes et des alluvions (COMISSAO DE SOLOS, 1958). Les “latossolos” et “podzolicos” sont formés à partir de migmatites et de gneiss du Précambrien (Grupo Paraiba do Sul) (fig. 1.1).

La distribution de ces deux types de sol dans le paysage est encore mal connue. La cartographie au 1/50 000 est actuellement en cours (EMBRAPA – SNLCS 1980a). Elle montre que ces deux types de sol sont associés au sein des mêmes unités de paysage. La proportion de “latossolos” apparaît avoir été largement surestimée lors d'une première cartographie (COMISSAO DE SOLOS, 1958, EMBRAPA – SNLCS et 1980b) à la suite du rattachement des sols de la région à ceux développés sur des roches du “grupo Barreiras”. Les études récentes (cartographie pédologique en cours et carte géologique) montrent que les “podzolicos” dominent dans le paysage.

Le climat tropical chaud et humide est du type Aw de Koëppen (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) (tableau 1.1). Les précipitations annuelles sont de 1087 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 (fig. 1.2). Le bilan de l'ensemble de l'année est déficitaire de 95 mm. Pour les “podzolicos”, le bilan ne serait en fait déficitaire que durant les mois de juin, juillet, août et septembre, période pendant laquelle il est généralement nécessaire d'irriguer.

Tableau 1.1: Moyennes des précipitations et températures. Région nord ("Campos"). Période d'observation : 35 ans.

MOIS	TEMPERATURE		PLUIE	
	$\bar{X}$ C°	$\bar{X}$ mm	MIN. OBS.	MAX. OBS.
Janvier	25.8	143.4	0.7	302.0
Février	26.1	97.7	0.3	243.6
Mars	25.7	99.1	6.1	316.0
Avril	23.9	92.6	5.2	203.5
Mai	22.0	59.4	3.7	228.6
Juin	20.9	32.9	1.2	165.2
Juillet	20.1	37.5	0.8	98.6
Août	20.8	26.2	0.1	109.2
Septembre	21.6	52.7	0.0	196.3
Octobre	22.7	103.0	14.0	273.0
Novembre	23.6	161.8	51.1	423.7
Décembre	24.7	180.5	44.0	408.7
T. ANNUEL	23.2	1086.7	-	-

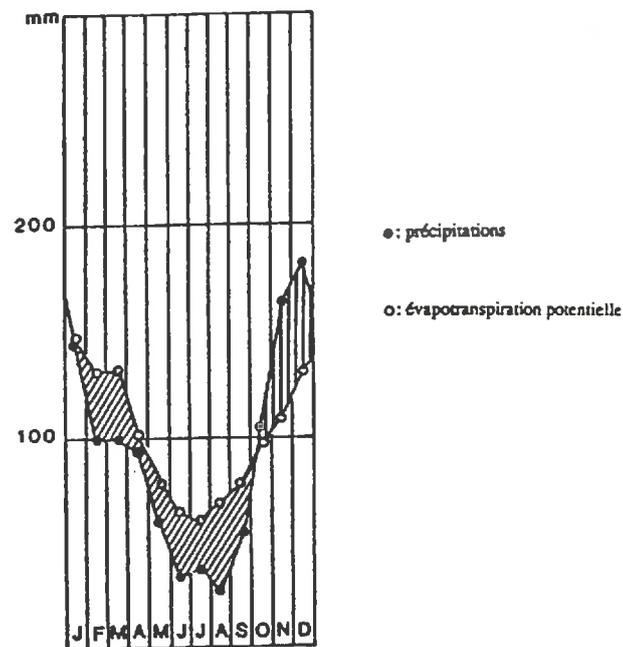


Figure 1.2: Bilan hydrique pour la région de "Campos".

## 1.2.2 Les situations étudiées

Le site choisi est localisé en bordure de la route R.S. 25 à 4 km de son intersection avec la route BR 101. Trois situations ne devant être différentes que par le mode d'utilisation, ont été sélectionnées. La première est une forêt secondaire, la seconde est une culture de canne à sucre continue depuis de nombreuses années et la troisième, une prairie de graminées pérennes depuis 1980. Trois fosses de 1,70 m de profondeur équidistantes d'environ 100 m ont été creusées à un même niveau sur une pente de 10 à 15 % (fig. 1.3).

Un sondage à la tarière jusqu'à 2,5 m de profondeur a été effectué dans le fond de chaque fosse.

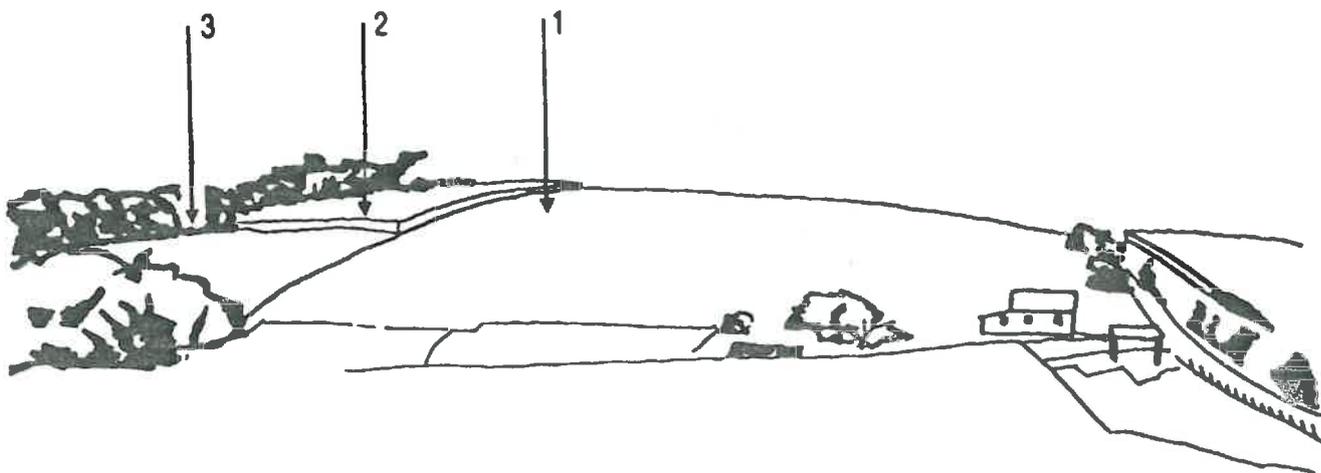


Figure 1.3: Situation des profils dans le paysage : 1. Pâturage, 2. Canne à sucre et 3. Forêt secondaire.

#### A) Sol sous forêt

La forêt a été exploitée pour la production du bois dans les années 1930-1940, mais n'a jamais été déboisée pour être cultivée. La forêt s'est depuis régénérée. Elle présente maintenant des arbres de 20 à 40 cm de diamètre et de 15 à 20 m de hauteur. Les caractères du profil sont les suivants :

Description et prélèvements : Osorio, Leprun et Aroaldo; Date : 15/01/87 ; Description morphologique à partir d'une description en brésilien suivant les normes USDA (1951) – FAO (1968) et traduite en français en utilisant STIPA (1982).

- A<sub>1</sub>** 0 – 16 cm Brun foncé (7,5 YR 3,5/2 humide) ; sableux franc ; structure grumeleuse peu nette, moyenne granulaire ; fragile ; friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et nette.
- AB** 16 – 26 cm. Brun (7,5 YR 4,5/4 humide) ; argile sableuse franc ; structure nette, moyenne blocs subangulaires et grains simples ; 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 nette, moyenne, blocs subangulaires ; peu fragile ; friable ; plastique et adhésif ; transition plane et graduelle.
- Bt<sub>1</sub>** 40 – 59 cm Rouge-Jaune (5 YR 5/5 humide) ; argile ; structure nette, fine, moyenne, blocs subangulaires ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et graduelle.

Bt<sub>2</sub> 59 – 112 cm. Rouge-Jaune (5 YR 5/8 humide) ; argile ; structure nette, fine, moyenne, blocs subangulaires ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.

Bt<sub>3</sub> 112 – 160 cm +. Rouge-Jaune (5 YR 5/8 humide) ; argile ; structure nette, moyenne, blocs subangulaires ; fragile ; friable ; très plastique et très adhésif.

Classification : "Podzolic Vermelho Amarelo-Latossolico". Dystrophe. A modéré (épipedon ochrique). Texture argileuse moyenne. Forêt tropicale subcaducifoliée, Relief ondulé.

Remarque : Racines très nombreuses (1-4 cm de diamètre) dans A<sub>1</sub> ; nombreuses dans AB et très peu nombreuses dans les autres horizons.

Les résultats des analyses granulométriques et chimiques sont présentés dans les tableaux 1.2 et 1.3.

Tableau 1.2: Analyse granulométrique du profil de sol sous forêt (PVA "Campos").

HORIZONS		COMPOSITION GRANULOMETRIQUE % TERRE FINE < 2 mm				>2mm	Argile disp. (eau) %	Degré de floc. (1) %
Symbole	Prof. (cm)	Sable grossier 2 - 0,20mm	Sable fin 0,20-0,05mm	Limon 0,05-0,002mm	Argile < 0,002mm			
A1	0 - 16	63	15	6	16	6	10	38
AB	16 - 26	55	14	8	23	20	18	22
BA	26 - 40	37	15	10	38	10	34	10
Bt1	40 - 59	25	8	7	60	4	0	100
Bt2	59 - 112	25	7	4	64	5	0	100
Bt3	112 - 150+	26	6	4	64	8	0	100

(1) : Rapport de l'argile non dispersable à l'eau sur l'argile totale, exprimé en %

Tableau 1.3: Analyse chimique du profil de sol sous forêt (PVA "Campos")

HORIZONS	pH(1:2,5)		COMPLEXE ABSORBANT meq/100g SOL								V% (sat base)	P ppm assimilable
	H <sub>2</sub> O	KCl 1N	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S (norme)	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>	T CEC	T/S x 100	
A1	4.8	4.0	0.7	0.07	0.05	0.8	0.5	3.1	4.4	18	2	
AB	4.4	3.9	0.2	0.03	0.03	0.3	0.9	2.1	3.3	9	<1	
BA	4.5	3.9	0.2	0.02	0.03	0.3	1.3	2.1	3.7	8	<1	
Bt1	4.4	3.9	0.2	0.01	0.02	0.2	1.7	2.6	4.5	4	<1	
Bt2	4.4	3.9	0.2	0.01	0.02	0.2	1.5	2.1	3.8	5	<1	
Bt3	4.6	4.0	0.2	0.01	0.03	0.2	1.3	2.1	3.6	6	<1	
HORIZONS	C ORG %	N %	C N	ATTAQUE PAR H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1)				SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	SiO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
A1	0.78	0.10	8	5.9	5.1	2.3	0.59	1.97	1.53	3.47		
Ab	0.61	0.07	7	10.2	8.7	3.7	0.98	1.99	1.57	3.69		
BA	0.41	0.07	6	17.1	16.0	5.3	1.03	1.82	1.50	4.74		
Bt1	0.36	0.06	6	21.7	20.7	7.0	0.95	1.78	1.47	4.64		
Bt2	0.35	0.06	6	23.8	22.2	7.1	0.86	1.82	1.51	4.90		
Bt3	0.22	0.06	4	26.7	23.5	8.0	0.95	1.93	1.59	4.61		

### B) Sol sous pâturage

Cette parcelle a été cultivée en canne à sucre jusqu'en 1980. Les rendements étaient alors devenus si bas que l'agriculteur a décidé de cesser la culture de canne à sucre. Laisser en jachère, une végétation de graminées, où prédomine "grama Pernambuco" (*Paspalum maritimum*), s'est installée. Cette végétation est pâturée depuis 1980 par des boeufs (1 UGB/ha) présents sur la parcelle toute l'année. Les caractères du profil sont les suivantes :

Description et prélèvements : Osorio, Leprun et Aroaldo ; Date : 5/01/87 ; Description morphologique à partir d'une description au brésilien suivant les normes USDA (1951) -FAO (1968) et traduite en français en utilisant STIPA (1982).

- Ap<sub>1</sub> 0 - 6 cm. Brun foncé (7,5 YR 4/3 humide) ; sableux franc ; structure peu nette, granulaire fine ; très fragile ; très friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et nette.
- Ap<sub>2</sub> 6 - 26 cm. Brun foncé (7,5 YR 4/3 humide) : argilo-sableux franc ; structure nette granuleuse moyenne et structure nette et fine, blocs subangulaires ; fragiles ; très friables ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et abrupte.
- BA 26 - 40 cm. Rouge-Jaune (5 YR 4,5/6 humide). Brun intense (7,5 YR 6/5 sec). Argilo-sableux ; structure très nette, fine et moyenne, blocs angulaires non fragile ; très friable ; plastique et adhésif ; transition plane et diffuse.
- Bt<sub>1</sub> 40 - 73 cm ; Rouge-Jaune (5 YR 5/7 humide), rouge-jaune (5 YR 6/8 sec) ; argile ; structure très nette, fine et moyenne, blocs angulaires ; peu fragile ; très friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.

- Bt<sub>2</sub>** 73 – 104 cm. Rouge-Jaune (5 YR 5/7 humide) rouge-jaune (5 YR 6/8 sec) ; argile ; structure très nette, fine et moyenne, blocs angulaires ; peu fragile ; très friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.
- Bt<sub>3</sub>** 104 – 142 cm. Rouge-Jaune (5 YR 5/8 humide) ; rouge-jaune (5 YR 6/6 sec) ; argile ; structure nette, fine et moyenne, blocs sub angulaires ; peu fragile ; très friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.
- Bc<sub>1</sub>** 142 – 165 cm + ; Rouge-Jaune (YR 5/8 humide) ; rouge-jaune (5 YR 6/6 sec) ; argile ; structure nette, fine et moyenne, blocs sub angulaires ; fragile ; très friable ; très plastique et très adhésif.

Classification : "Podzolic Vermelho Amarelo – Latossolico". Dystrophe. A Modéré (épipedon ochrique). Texture moyenne argileuse. Forêt tropicale subcaducifoliée. Relief ondulé.

Remarques :

1. De 6 à 12 cm, horizon à densité apparente élevé, résistante à la pénétration de la pioche. L'effet d'un tassement est beaucoup moins évident lorsqu'on étudie le profil à l'intérieur de la fosse (pénétration latérale et non verticale).
2. La graminée qui prédomine (*Paspalum maritimum*) est indicatrice de sol dégradé (acide et de faible fertilité).
3. Activité biologique localisée uniquement dans l'horizon Ap<sub>1</sub>.
4. Présence de surfaces sombres sur les blocs dans l'horizon Bt<sub>2</sub>.
5. Racines très nombreuses (fasciculées et fines) dans Ap<sub>1</sub>, peu nombreuses dans Ap<sub>2</sub>, très peu nombreuses dans BA et absence dans les autres horizons.

Les résultats des analyses granulométriques et chimiques sont présentées dans les tableaux 1.4 et 1.5.

Tableau 1.4: Analyse granulométrique du profil de sol sous pâturage (PVA "Campos").

HORIZONS		COMPOSITION GRANULOMETRIQUE % TERRE FINE < 2 mm				>2mm	Argile disp. (eau) %	Degré de floc. %
Symbole	Prof. (cm)	Sable grossier 2 - 0,20mm	Sable fin 0,20-0,05mm	Limon 0,05-0,002mm	Argile < 0,002mm			
Ap1	0 - 6	50	16	9	25	9	19	24
Ap2	6 - 26	51	14	8	27	8	23	15
BA	26 - 40	36	17	9	38	8	31	18
Bt1	40 - 73	22	6	6	66	4	0	100
Bt2	73 - 104	24	5	6	65	5	0	100
Bt3	104 - 142	24	6	3	67	4	0	100
Bc1	142 - 165+	25	5	3	67	4	0	100

Tableau 1.5: Analyse chimique du profil de sol sous pâturage (PVA "Campos").

HORIZONS	pH(1:2,5)		COMPLEXE ABSORBANT meq/100g SOL								V% (sat bases)	P ppm assimilable
	H <sub>2</sub> O	KCl 1N	Ca ++	Mg ++	K+	Na+	S (somme)	Al+++	H+	T CEC	T/S x 100	
	Ap1	5.5	4.3	1.2	0.4	0.14	0.06	1.8	0.1	2.6	4.5	40
Ap2	4.8	4.0		0.5	0.04	0.04	0.6	0.5	2.3	3.4	18	2
BA	4.7	4.0		0.5	0.02	0.02	0.5	0.9	2.5	3.9	13	< 1
Bt1	4.7	4.1		0.7	0.01	0.02	0.7	0.7	2.2	3.6	19	< 1
Bt2	4.8	4.1		0.5	0.01	0.02	0.7	0.7	2.1	3.3	15	< 1
Bt3	4.7	4.1		0.4	0.01	0.02	0.8	0.8	2.2	3.4	12	< 1
BC1	4.7	4.1		0.4	0.01	0.02	0.7	0.7	2.2	3.3	12	< 1

HORIZONS	C ORG %	N %	C N	ATTAQUE PAR H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1)				SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
								(Ki)	(Kr)	F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ap1	0.90	0.15	6	8.7	7.7	3.0	0.79	1.92	1.54	4.04
Ap2	0.54	0.09	6	10.3	9.3	3.5	0.79	1.88	1.52	4.16
BA	0.46	0.08	6	18.9	17.3	6.2	0.95	1.86	1.51	4.38
Bt1	0.33	0.06	6	24.4	23.4	7.9	0.94	1.77	1.46	4.64
Bt2	0.21	0.06	4	23.3	22.4	7.6	0.92	1.77	1.45	4.62
Bt3	0.17	0.06	3	24.5	22.3	7.9	0.86	1.87	1.52	4.43
BC1	0.14	0.04	4	23.2	21.6	8.2	0.87	1.83	1.47	4.14

### C) Sol sous culture de canne à sucre

Cette parcelle est cultivée en canne à sucre depuis 35 ans. Cette monoculture correspond au cas type où se développe une semelle de labour très nette à la base de l'horizon cultivé. Les caractères du profil sont les suivants :

Description et prélèvement : Osorio, Leprun et Aroaldo ; Date : 15/01/87 ; Description morphologique en brésilien suivant les normes USDA (1951) – FAO (1968) et traduite en français en utilisant STIPA (1982).

**Ap** 0-20 cm. Brun foncé (7,5 YR 4/3 humide) ; sableux franc; structure grumeleuse, peu nette, moyenne, blocs sub angulaires ; fragile ; friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et nette.

**AB** 20-28 cm Brun foncé (7,5 YR 4/4 humide) argile sableuse franc ; structure peu nette et fine ; blocs sub angulaires ; fragile ; friable ; peu plastique et peu adhésif ; transition plane et abrupte.

**BA** 28 – 47 cm. Rouge – jaune (5 YR 4.5/6 humide) ; argile sableuse ; structure nette, moyenne et fine ; blocs sub angulaires ; non fragile ; friable ; plastique et adhésif ; transition plane et graduelle.

**Bt<sub>1</sub>** 48-83 cm. Rouge-jaune (5 YR 5/7 humide) ; argile, structure nette, moyenne, blocs angulaires ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.

**Bt<sub>2</sub>** 83-127 cm. Rouge-jaune (5 YR 5/8 humide) ; argile ; structure nette, fine, moyenne, blocs angulaires ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif ; transition plane et diffuse.

Bt<sub>3</sub> 127-163 cm + ; Rouge-jaune (5 YR 8/5 humide) ; argile ; structure nette, fine, moyenne, blocs sub angulaires ; fragile ; friable ; très plastique et très adhésif.

Classification : "Podzolic Vermelho Amarelo – Latossolico". Dystrophe. A modéré (épipedon ochrique). Texture moyenne argileuse. Forêt tropicale subcaducifoliée. Relief ondulé.

Remarques : Racines nombreuses et de tailles moyennes (2- 5 cm de diamètre) dans Ap<sub>1</sub> ; peu nombreuses et moyennes dans AB ; très peu nombreuses dans BA et absence dans les autres horizons.

Les analyses granulométriques et chimiques sont présentées dans les tableaux 1.6 et 1.7.

Tableau 1.6: Analyse granulométrique du profil de sol sous canne à sucre (PVA "Campos").

HORIZONS		COMPOSITION GRANULOMETRIQUE % TERRE FINE < 2 mm				>2mm	Argile disp. (eau) %	Degré de floc. %
Symbole	Prof. (cm)	Sable grossier 2 - 0,20mm	Sable fin 0,20-0,05mm	Limon 0,05-0,002mm	Argile < 0,002mm			
Ap	0 - 20	56	15	7	22	9	17	23
AB	20 - 29	51	14	8	27	11	22	18
BA	29 - 47	35	15	8	42	3	36	14
Bt1	47 - 83	25	8	6	61	5	0	100
Bt2	83 - 127	26	6	4	64	3	0	100
Bt3	127 - 165+	23	6	4	67	5	0	100

Tableau 1.7: Analyse chimique du profil de sol sous canne à sucre (PVA "Campos").

HORIZONS	pH(1:2,5)		COMPLEXE ABSORBANT meq/100g SOL							V% (sat bases) 7/3 x 100	P ppm assimilable
	H <sub>2</sub> O	KCl 1N	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S (somme)	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>		
Ap	4.6	3.9	0.2	0.07	0.08	0.4	0.8	3.1	4.3	9	3
AB	4.2	3.8	0.2	0.05	0.03	0.3	0.8	2.4	3.5	9	2
BA	4.3	3.9	0.2	0.02	0.03	0.3	1.3	2.6	4.2	7	<1
Bt1	4.4	3.9	0.2	0.01	0.03	0.2	1.5	2.7	4.4	5	<1
Bt2	4.4	4.0	0.2	0.01	0.02	0.2	1.5	2.5	4.2	5	<1
Bt3	4.1	4.0	0.2	0.01	0.02	0.2	1.5	2.4	3.9	5	<1
HORIZONS	C ORG %	N %	C N	ATTAQUE PAR H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1)				SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Ap	0.73	0.11	7	9.1	8.1	3.2	0.86	1.91	1.53	3.97	
AB	0.58	0.08	7	9.1	8.3	3.2	0.89	1.99	1.59	4.07	
BA	0.50	0.07	7	16.9	15.2	5.5	1.06	1.89	1.54	4.33	
Bt1	0.45	0.07	6	20.6	19.0	7.0	0.95	1.84	1.49	4.26	
Bt2	0.31	0.06	5	23.8	23.4	7.7	0.95	1.73	1.43	4.77	
Bt3	0.28	0.06	5	25.7	24.1	8.3	0.98	1.81	1.49	4.55	

### 1.2.3 Discussion

Les trois profils décrits présentent des morphologies et des caractères analytiques proches. La teneur en argile est pour chacun d'eux voisine de 25 % jusqu'à 25-30 cm de profondeur, de 40 % entre 25-30 et 40-45 cm, et de 60-65 % à plus grande profondeur. Le squelette est grossier avec prépondérance de la classe des sables grossiers et présence de graviers pour les trois profils. La seule différence importante entre les trois profils est la teneur en argile du profil sous forêt qui possède en surface une teneur en argile beaucoup plus faible que pour les deux autres situations (16 %). Cette ressemblance des trois profils a été représentée de façon schématique à l'aide de la figure 1.4. Il y a une évolution du milieu physicochimique clairement visible pour le sol de la situation pâturage par rapport à ceux des situations forêt et à la canne à sucre. Elle se traduit par une augmentation, dans les horizons de surface de la teneur en cations échangeables Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> et K<sup>+</sup>, du degré de saturation en bases du complexe d'échange, du P assimilable et par une diminution de Al<sup>+++</sup> et H<sup>+</sup> échangeables.

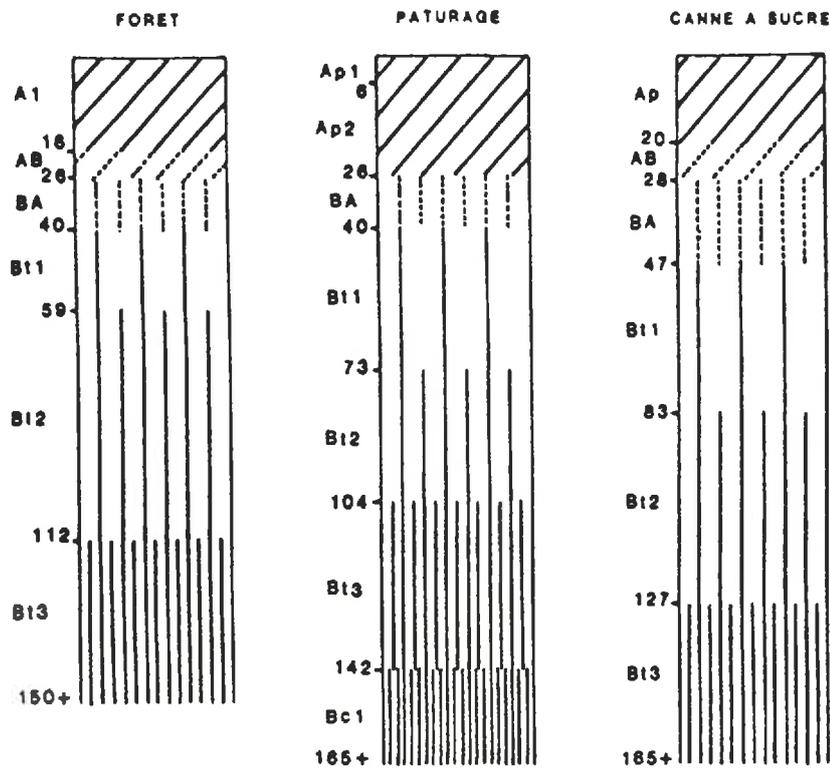


Figure 1.4: Schéma des trois profils de sols étudiés pour le site de "Campos".

### 1.3 Le site de "l'Universidade Rural"

Après défrichage de la forêt tropicale subpérénifoliée, la première culture implantée a été, comme à "Campos", le café (I.B.G.E., 1959b). Après l'abandon de cette culture et en raison de la topographie très accidentée, la région a été ensuite exploitée pour l'élevage de vaches laitières. Le site choisi pour notre étude est localisé dans le périmètre de "l'Universidade Rural".

#### 1.3.1 Caractères généraux du milieu

Comme pour le site de "Campos", les sols sont essentiellement des "latossolos" et des "podzolicos". Ils se développent ici aussi sur des migmatites et des gneiss du précambrien (Groupe Paraiba do Sul, fig. 1.6). Néanmoins, ils sont généralement plus rouges et présentent une différenciation des horizons (vis-à-vis de la couleur) plus marquée. Sur la carte géologique (fig.1.6), le site est localisé dans une unité correspondant à une association de gneiss, granites et migmatites du "complexo do litoral fluminense". L'affleurement des roches du groupe "Paraiba do Sul" était de trop faibles dimensions pour être représenté.

Le climat est du type Aw de Koëppen (MENEZES et al., 1974). La température moyenne annuelle est de 22,7° C avec 19,6°C de moyenne en juillet (mois le plus froid) et de 26,0° C en février (mois le plus chaud). La pluviométrie moyenne est de 1 292 mm et les trois mois les plus secs (juin – juillet et août) reçoivent environ 8 % des précipitations annuelles (tableau 1.8). L'évapotranspiration potentielle mensuelle est supérieure aux précipitations durant six mois (fig. 1.5). Le bilan de l'année est excédentaire de 150 mm.

Tableau 1.8: Moyennes des précipitations et températures. Région de Rio. Période d'observation : 35 ans.

MOIS	TEMPERATURE		PLUIE	
	$\bar{X}$ C°	$\bar{X}$ mm	MIN. OBS.	MAX. OBS.
Janvier	25.8	207.4	17.8	427.0
Février	26.0	163.3	13.1	326.7
Mars	25.2	181.2	36.3	471.5
Avril	23.1	95.1	16.2	204.5
Mai	21.2	55.1	2.0	214.8
Juin	20.2	36.7	4.2	90.7
Juillet	19.6	28.3	0.3	64.5
Août	20.6	36.2	3.6	110.5
Septembre	21.4	59.4	0.0	203.5
Octobre	22.2	95.4	32.0	191.1
Novembre	23.0	136.0	48.5	261.6
Décembre	24.4	189.1	87.7	288.3
T. ANNUEL	23.7	1291.7	-	-

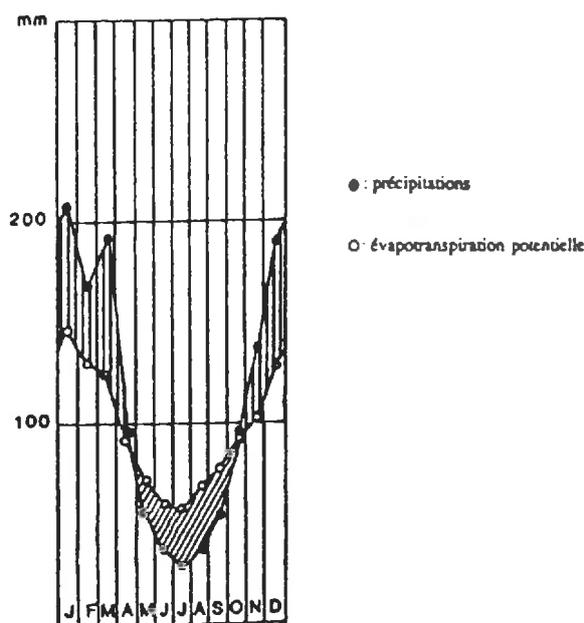


Figure 1.5: Bilan hydrique pour la région de Rio.



ECHELLE: 1/1770 000  
0 2 10 km

<u>QUATERNAIRE</u>		<u>PRECAMBRIEN MOYEN ET SUPERIEUR</u>	
<b>Qc</b>	SEDIMENTS ACTUELS ET SUB-ACTUELS	<b>γ</b>	. GROUPE "SERRA DOS ORGAOS" GRANITE
<b>Qb</b>	DEPOTS FLUVIO LACUSTRES	<b>pεSOB</b>	ASSOCIATION DE GNEISS GRANITIQUE, MIGMATITE ET GNEISS
<b>Qa</b>	CORDONS LITTORAUX	<b>pεSOA</b>	MIGMATITES PREDOMINANTES, ASSOCIEES A DES GNEISS GRANITQUES
<b>λ</b>	INTRUSIONS ALCALINES CRETACE	<b>pεpb</b>	. GROUPE "PARAIBA DO SUL" GNEISS "BANDADOS"
		<b>pεin</b>	. COMPLEXO DO LITORAL FLUMINENSE ASSOCIATION DE GNEISS, GRANITE ET DE MIGMATITE
		*	SITE DE L'UNIVERSITE RURALE

Figure 1.6: Carte géologique de la région de "l'Universidade Rural".

### 1.3.2 Les trois situations étudiées

Le site de "l'Universidade Rural" est un dispositif expérimental conçu pour étudier l'importance de l'érosion en fonction du mode d'occupation du sol (fig. 7).

Le dispositif est constitué de parcelles de 20 m de long sur 3,85 m de large et ayant une pente de 9 %. Ce dispositif a été installé en 1979 et a permis de montrer (CARVALHO, 1984 ; LEPRUN, 1988) que la parcelle sol nu perd environ 200 tonnes sol/ha/an. 38 % de l'eau qui tombe sur cette parcelle ruisselle ; par contre, pour les autres parcelles (pâturage et canne à sucre incluse), 2,5 tonnes/sol/ha sont perdues en moyenne chaque année et à peine 0,8 % de l'eau reçue ruisselle (CARVALHO, 1989).

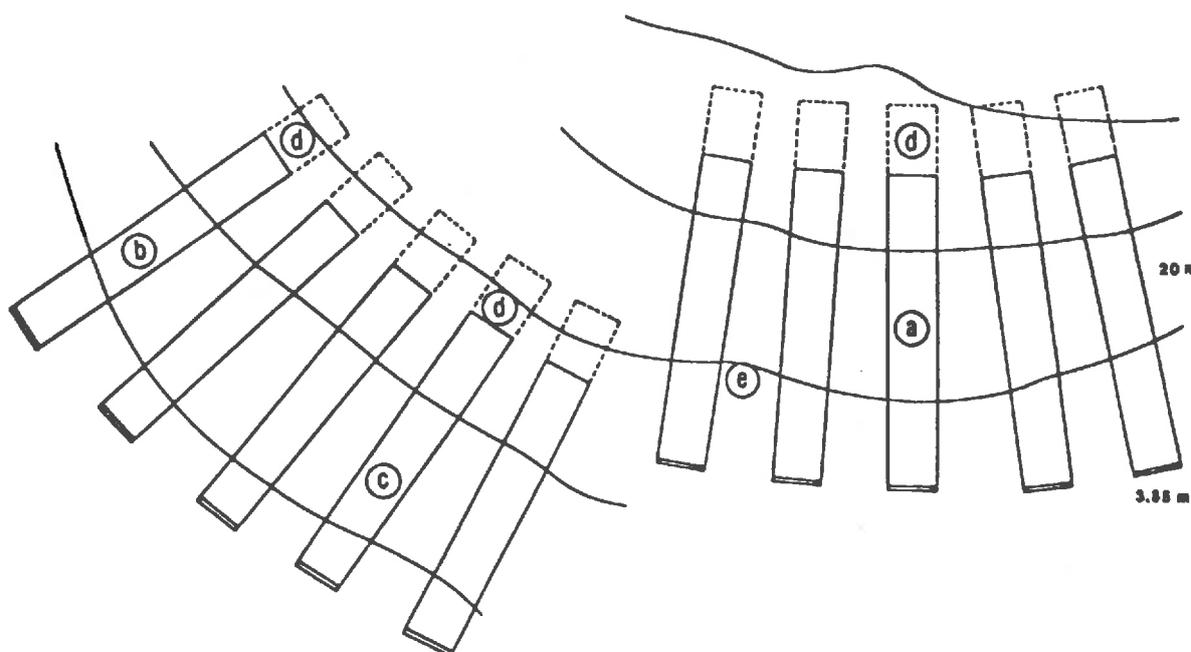


Figure 1.7: Schéma du dispositif expérimental conçu pour étudier l'érosion à "l'Universidade Rural" : a. sol nu, b. pâturage, c. canne à sucre, d. localisation des prélèvements et e. localisation du profil décrit.

Pour notre étude, trois parcelles ont été sélectionnées. Il s'agit des parcelles "sol nu", "pâturage" et "canne à sucre". A noter que la parcelle dénommée "pâturage" est en faite une prairie fauchée. Un seul profil a été décrit en bordure du dispositif sous pelouse. Il permet de caractériser le sol de chaque parcelle au moment de la mise en place du dispositif. En effet, compte tenu de pertes en terre dues à l'érosion hydrique, les sols sont maintenant différents (profils tronqués).

## Le profil observé et analysé présente les caractères suivants:

Description et Prélèvement : Osorio, Leprun et Aroaldo ; Description Morphologique à partir d'une description en brésilien suivant les normes USDA (1951) – FAO (1968) et traduite en français en utilisant STIPA (1982).

A<sub>1</sub> 0-15 cm. Brun foncé (7,5 YR 4/3 humide) argile franc : structure grumeleuse et granulaire, moyenne ; peu fragile ; très friable ; plastique et adhésif ; transition plane et nette.

BA 15-40 cm. Rouge-Jaune (5 YR 4,5/6 humide) ; argile, structure faible, moyenne, blocs sub angulaires ; peu fragile ; très friable ; plastique et adhésif ; transition plane et diffuse.

Bw<sub>1</sub> 40-93 cm. Rouge-Jaune (5 YR 4/6 humide) ; argile ; structure faible, moyenne, blocs sub angulaires ; fragile ; très friable ; plastique et adhésif ; transition plane et diffuse.

Bw<sub>2</sub> 93-133 cm. Rouge-Jaune (5 YR 5/6 humide) ; argile ; structure modéré, moyenne, blocs sub angulaires ; fragile ; très friable ; plastique et adhésif ; transition plane et graduelle.

Bt<sub>1</sub> 133-160 cm +. Rouge (2,5 YR 4/8 humide) ; taches de réduction peu nombreuses (environ 2 % de la surface), fines (petites) et nettes ; argile ; structure modérée à forte, petite et moyenne, blocs sub angulaires ; cerosité modérée, peu nombreuse ; peu fragile ; friable ; très plastique et très adhésif.

Classification : "Podzolic Vermelho Amarelo – Latossolic". Dystrophe. A modéré (épipedon ochrique). Texture argileuse. Forêt tropicale subperenifoliée. Relief ondulé.

Les résultats des analyses granulométriques et chimiques sont présentés dans les tableaux 1.9 et 1.10.

Tableau 1.9: Analyse granulométrique du profil de sol sous pelouse (PVA "Universidade Rural").

HORIZONS		COMPOSITION GRANULOMETRIQUE % TERRE FINE < 2 mm				>2mm	Argile disp. (eau) %	Degré de floc. %
Symbole	Prof. (cm)	Sable grossier 2 - 0,20mm	Sable fin 0,20-0,005mm	Limon 0,05-0,002mm	Argile < 0,002mm			
A1	0 - 15	40	17	12	31	1	27	13
BA	15 - 40	30	13	9	48	1	42	13
Bw1	40 - 93	29	14	10	47	1	0	100
Bw2	93 - 133	29	11	8	61	1	0	100
Bt1	133 - 160+	17	6	10	67	1	0	100

Tableau 1.10: Analyse chimique du profil de sol sous pelouse (PVA "Universidade Rural").

HORIZONS	pH(1:2,5)		COMPLEXE ABSORBANT meq/100g SOL								V% (sat base)	P ppm assimilable
	H <sub>2</sub> O	KCl 1N	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S (somme)	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>	T CEC	T/S x 100	
A1	5.2	4.2	2.2	0.5	0.10	0.05	2.9	0.2	3.1	6.2	47	1
BA	5.2	4.4	2.3	0.2	0.04	0.03	2.6	0.1	2.6	5.3	49	<1
Bw1	5.9	5.4	2.3	0.2	0.02	0.03	2.6	0	0.4	3.0	87	1
Bw2	6.0	5.7	2.7	0.3	0.02	0.03	3.1	0	1.3	4.4	70	2
Bt1	6.3	5.9	2.8	0.5	0.02	0.05	3.4	0	1.0	4.4	77	2

HORIZONS	C ORG %	N %	C N	ATTAQUE PAR H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1)				SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ki)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> (Kr)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
A1	1.06	0.10	7	11.5	9.3	5.1	1.66	2.10	1.56	2.86
AB	0.68	0.15	6	17.7	15.9	8.1	1.90	1.89	1.43	3.08
Bw1	0.29	0.11	6	17.3	15.6	7.8	1.07	1.89	1.43	3.14
Bw2	0.28	0.05	6	23.9	19.9	10.4	1.73	2.04	1.53	3.00
Bt1	0.25	0.05	5	26.9	23.7	11.7	1.73	1.93	1.47	3.18

### 1.3.3 Discussion

Le site de "l'Universidade Rural" présente l'avantage d'être un dispositif expérimental. L'histoire culturale et les pertes en terre sont connues pour chaque parcelle. La teneur en argile est voisine de 25 % jusqu'à 25-30 cm de profondeur, de 40 % entre 25-30 cm et 45-50 cm, et de 65-70 % jusqu'à 160 cm.

Les caractères morphologiques et analytiques du profil décrit et analysé pour le site de "l'Universidade Rural" sont présentés de façon schématique à l'aide de la figure 1.8.

## 1.4 Localisation des prélèvements d'échantillons

Pour chaque situation étudiée, des échantillons ont été prélevés dans l'horizon cultivé et dans l'horizon sous-jacent non travaillé, où la densité apparente doit être maximale. La localisation de ces prélèvements et leur dénomination sont présentés à l'aide de la figure 1.9.

Pour chaque horizon nous avons prélevé des mottes de dimensions décimétriques, des cylindres de  $347,5 \text{ cm}^3$  ( $h=7,62 \text{ cm}$ ,  $\varnothing=7,62 \text{ cm}$ ), des petits cylindres de  $116,9 \text{ cm}^3$  ( $h=7,62 \text{ cm}$ ,  $\varnothing=2,56 \text{ cm}$ ) et des anneaux de Kopecky de  $50 \text{ cm}^3$ .

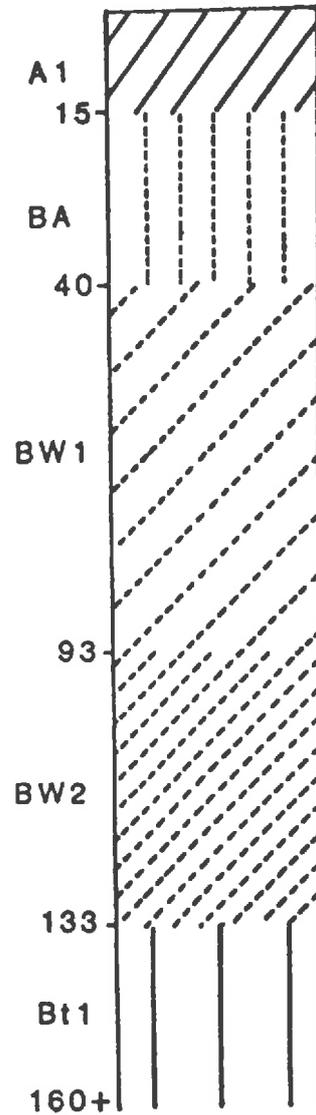
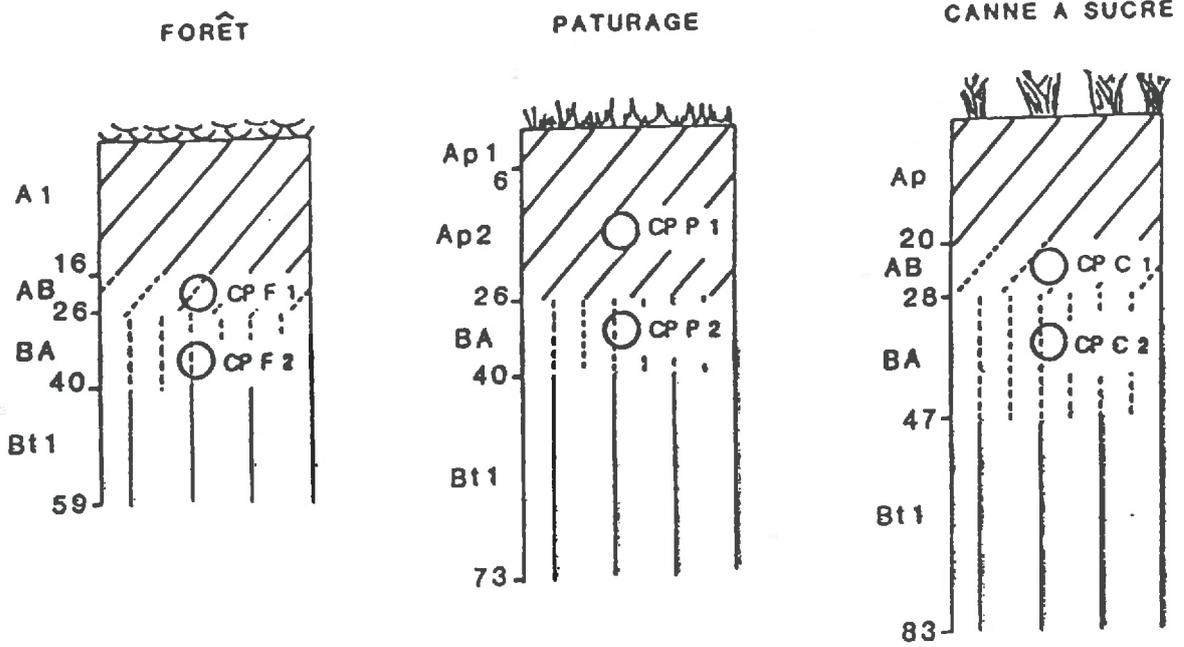
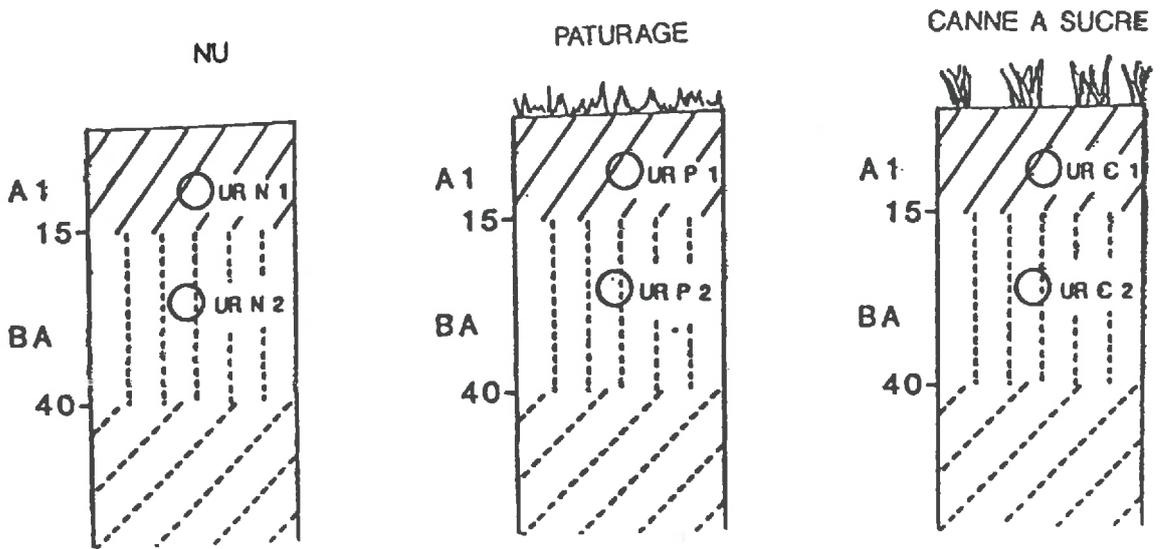


Figure 1.8: Schéma du profil de sol étudié pour le site de "l'Universidade Rural".

Site de "Campos"



Site de "l'Universidade Rural"



○ localisation des prélèvements

Figure 1.9: Localisation et dénomination abrégée des échantillons prélevés dans les profils de sols étudiés à "Campos" et à "l'Universidade Rural".

## 1.5 Conclusion

Notre objectif était de sélectionner deux sites où les sols étudiés présenteraient des développements de profil pédologique similaires. Les 40 premiers centimètres devaient présenter, en revanche, des états de compacité différents suivant le mode d'utilisation.

Pour le site de "Campos", nous disposons de trois modes d'utilisation du sol qui devraient permettre d'étudier un profil de sol non soumis à un compactage (profil forêt), horizon compacté peu développé (profil pâturage), ou nettement développé (profil canne à sucre).

Pour le site de "l'Universidade Rural", un seul profil a été observé. Il représente l'état initial avant toute mise en valeur agricole. Les prélèvements effectués dans les parcelles sol nu, pâturage et canne à sucre devraient, à la différence de ceux faits pour le site de "Campos", nous permettre de discuter les modifications de structure provoquées par une seule mise en culture de canne à sucre sans mécanisation.

Bien qu'ayant été choisis aussi ressemblants que possible dans chaque site, des différences dans les développements de profils ont été enregistrées pour le site de "Campos". On peut aisément supposer qu'il en existe aussi pour le site de "l'Universidade Rural", et ceci en raison des pertes de terres par érosion qui sont enregistrées dans le dispositif expérimental.

Si l'on compare les sols de ces deux sites, on note qu'ils possèdent de nombreux caractères morphologiques et analytiques en commun. Néanmoins, la fraction sable est beaucoup plus grossière pour les profils de "Campos" que pour le profil de "l'Universidade Rural". Ceci apparaît nettement dans les résultats des analyses granulométriques, non seulement la proportion de sables grossiers est plus élevée à "Campos" qu'à "l'Universidade Rural", mais de nombreux graviers sont aussi présents.

## **Chapitre 2**

# **CARACTERISATION DES CONSTITUANTS MINERAUX**

### **2.1 Introduction**

Les propriétés d'un sol dépendent de la nature de ses constituants, et de faibles différences de constitution peuvent entraîner des comportements très contrastés (BRADFIELD, 1950 ; CHAUVEL et al., 1976). En matière de compactage, le comportement est lié à la teneur en eau et à la localisation de cette eau au sein du système poral, à la pression appliquée, et à la nature des constituants (FAURE, 1976 ; GUERIF, 1982 ; GRIMALDI, 1986 ; AZZAOU, 1988).

Pour de telles raisons il apparaîtrait alors justifié de chercher à préciser la nature des constituants minéraux. En fait, la caractérisation des constituants minéraux qui va être effectuée a pour objectif essentiel de discuter dans quelle mesure les différences de densité apparente entre les horizons étudiés doivent être attribuées à des différences de nature des constituants minéraux, ou à des différences concernant leur mode d'organisation.

C'est pourquoi nous allons dans ce deuxième chapitre effectuer une caractérisation détaillée des constituants minéraux de chaque horizon prélevé en nous intéressant à leurs compositions granulométrique et minéralogique.

### **2.2 Analyse granulométrique**

Les sols étudiés ont été considérés dans les années 60 (COMISSAO DE SOLOS, 1958) comme étant de type LVA ("latossolo vermelho amarelo") et sont actuellement classés comme "podzolic vermelho amarelo" (PVA-latossolico), ou comme intergrade "podzolic - latossolico".

CUNHA et NASCIMENTO (1985) rappellent que les sols dénommés “Tabuleiros” dans la région de “ Campos”, généralement considérés comme résultants du processus de latosolisation, présentent des variations texturales suffisamment importantes pour être considérés comme étant des profils de type PVA ou intergrade PVA-LVA. Pour ces sols, l’argile des horizons Bt n’est pas dispersable par simple agitation dans l’eau. C’est par contre le cas pour une partie de l’argile des horizons A. Les particules élémentaires des échantillons étudiés seraient donc partiellement cimentées par des oxyhydroxydes de fer. L’analyse granulométrique nécessite alors l’utilisation de traitements dispersants sélectifs de tels ciments.

### **2.2.1 Méthodes**

Le laboratoire du “SNLCS – EMBRAPA – BRASIL” utilise NaOH 1N comme dispersant en association avec une agitation mécanique énergique pendant 15 minutes. Le laboratoire INRA d’Analyses de Sols d’Arras utilise de l’héxamétaphosphate comme dispersant et Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> pour élever le pH (ROBERT et TESSIER, 1974). La méthode que nous avons utilisée est celle préconisée par BARRETO (1986). L’échantillon (50g < 2mm) est mélangé avec 200 ml d’HCl 0,05 N, agité pendant 5 minutes et laissé reposer pendant 1 nuit. Puis on ajoute 40 ml de NaOH 1N et on agite par retournement durant 8 h. BARRETO (1986) affirme que HCl employé en faible concentration (0,05 N) est suffisant pour détruire les “effets ciments” des oxyhydroxydes de fer sans altérer la composition par solubilisation. Par ailleurs, 40 ml de NaOH contre 30 ml utilisé par le SNLCS, permettent de neutraliser HCl et d’élever le pH de la suspension jusqu’à 11-11,5. Cette valeur est nécessaire pour effectuer une bonne dispersion.

On peut ajouter que QUANTIN et BOULEAU (1983), étudiant la solubilisation des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d’andosols, ont montré que la dissolution des oxydes de fer avec HCl diminuait avec la diminution de la concentration d’acide et devenait négligeable à partir de 0,1 N.

### **2.2.2 Résultats et discussion**

Les teneurs en argile obtenues à partir des trois modes de dispersion sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Effets de différents traitements sur la teneur en argile mesurée pour les sites de "Campos" et de "l'Universidade Rural". 1. Laboratoire INRA d'ARRAS, dispersant hexamétaphosphate + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; 2. Laboratoire SNLCS-EMBRAPA-Brásil, dispersant NaOH 1N; 3. Laboratoire INRA-SESCPF, 200 ml HCl 0,05N + 40 ml NaOH 1N.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET			SOL NU			CANNE A SUCRE			PATURAGE		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
CAMPOS	PROF 1	11.5	23.0	22.8				21.0	27.0	33.5	26.9	27.0	30.4
	PROF 2	21.7	38.0	37.1				31.1	42.0	41.0	29.6	38.0	38.3
UNIV.	PROF 1				29.9	31.0	34.8	32.2	38.0	39.4	30.5	34.0	37.3
RURAL	PROF 2				41.4	48.0	47.5	35.0	41.0	41.5	35.6	36.0	38.8

On note que l'hexamétaphosphate associé à Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (traitement 1) ne disperse pas toute l'argile contenue dans les échantillons. Par contre, les résultats obtenus avec NaOH et NaOH plus pré-traitement HCl (traitements 2 et 3) sont similaires. BARRETO (1986) a montré que, pour les sols kaoliniques dont la teneur en oxyde de fer est faible, il n'y a pas de différence de teneur en argile après le pré-traitement avec HCl. Néanmoins, il n'explique pas pourquoi il a obtenu des différences de teneur en argile pour l'échantillon LVE (latossol vermello escuro) qui possède environ 13 % de fer total. De plus, il n'a pas enregistré de différence pour le "latossol bruno alio" qui possède la même quantité de fer total que cet échantillon LVE. A ce propos, CHAUVEL et al., (1976) indiquent que le type de kaolinite et la forme cristalline du fer jouent un rôle plus important sur la cimentation des sols que la quantité de fer total.

Si on analyse les résultats de la dispersion associant HCl et NaOH, on remarque pour le site de "Campos" que CP-F-1 (fig.1.9) a moins d'argile que CP-P-1 et CP-C-1 (tableau 2.1). Cette différence s'explique vraisemblablement par un enrichissement en argile de l'horizon cultivé, et ceci par incorporation de la partie supérieure de l'horizon BA. Par contre, il n'y a pas de différence marquante de teneur en argile entre CP-F-2, CP-P-2 et CP-C-2.

Pour le site de "l'Universidade Rural", UR-N-1 possède moins d'argile que UR-C-1 et UR-P-1. Par contre, pour la profondeur 2, c'est le contraire, avec plus d'argile dans UR-N-2. Ces différences seraient dues à l'érosion qui exporte 200 t/an/ha (LEPRUN, 1988)

pour la parcelle sol nu. En effet, pour la parcelle sol nu, les fractions les plus fines seraient préférentiellement transportées en surface par la lame d'eau qui ruisselle et le profil serait ainsi non seulement tronqué mais enrichi aussi en fractions sable en surface. UR-N-2 aurait alors été prélevé dans la partie supérieure de l'horizon Bt et non dans l'horizon BA comme pour UR-C-2 et UR-P-2.

## 2.3 Analyse minéralogique de la fraction argile

L'analyse minéralogique de la fraction granulométrique argile consistera dans un premier temps à identifier les différents minéraux présents, puis à préciser leurs caractéristiques cristallographiques et enfin, à déterminer leurs proportions dans les échantillons.

### 2.3.1 Identification des différents minéraux

#### A) Méthodologie

La fraction granulométrique argile ( $< 2\mu\text{m}$ ) est obtenue par siphonage après avoir dispersé l'échantillon à l'aide de la méthode proposée par BARRETO (1986). La fraction argileuse est étudiée en diffraction des RX sous forme de dépôt orienté sur lame de verre (concentration 10 g/l) et sous forme de poudre en utilisant la raie K du Cobalt ( $\lambda = 1,789\text{\AA}$ ). L'appareil utilisé est de type Phillips PM 8203 A. L'angle de réflexion, la distance interreticulaire (en  $\text{\AA}$ ) et l'intensité des pics sont donnés par un ordinateur couplé à l'appareil.

Des dissolutions sélectives ont été effectuées, soit pour concentrer les oxyhydroxydes de fer et ainsi faciliter leur identification, soit les éliminer et ainsi faciliter l'étude de la kaolinite. La dissolution de la kaolinite est effectuée à l'aide d'une méthode mise au point par NORRISH et TAYLOR (1961) et discutée récemment par KÄMPF et SCHWERTMANN (1982). Elle consiste à faire bouillir l'échantillon dispersé dans la soude 5 N. Les oxyhydroxydes de fer sont alors concentrés sans être modifiés. La dissolution des oxyhydroxydes est faite par la méthode CDB (MEHRA et JACKSON, 1960). Cette méthode a pour résultat de concentrer la kaolinite. L'analyse thermopondérale est effectuée sur 100 mg d'échantillon, avec la fraction argileuse non traitée et après traitement CDB. La vitesse de chauffage est de  $3^\circ\text{C}$  par minute.

## B) Résultats et discussion

Les déterminations ont été réalisées pour les 12 échantillons, mais on ne présentera les données détaillées que pour quelques échantillons aux caractéristiques extrêmes en terme de mode de mise en valeur. Les courbes obtenues sont en effet très ressemblantes pour les différents échantillons lorsqu'ils appartiennent à un même site.

### a) Diffraction des RX à partir de lames orientées.

La préparation de dépôts provoque l'orientation des phyllites dans un même plan et accentue l'intensité diffractée de leurs raies  $00l$ . Ceci permet la détection de très faibles quantités de minéraux argileux et d'étudier le comportement au gonflement de l'espace interfoliaire (ROBERT, 1975).

Les diffractogrammes présentés (fig. 2.1) indiquent la présence de la kaolinite avec les raies  $001$  (7,17 à 7,21 Å),  $002$  (3,57 à 3,58 Å) et  $003$  (2,38 Å) et l'absence de minéraux argileux 2:1. On observe aussi la raie  $101$  du quartz (3,34 Å) avec une faible intensité. Enfin, ces diffractogrammes ne montrent pas de différences importantes entre les échantillons.

### b) Diffraction des RX à partir d'échantillons sous forme de poudre.

Les diffractogrammes des échantillons sous forme de poudre, à la différence des dépôts orientés, ne privilégient pas les minéraux phylliteux. D'autres minéraux tel que le quartz ou les oxyhydroxydes sont alors plus facilement identifiables (BRINDLEY et BROWN, 1980 ; GRIM, 1968). En plus des raies caractéristiques du quartz et de la kaolinite (fig. 2.2), on note la présence de raies  $111$  (4,14 Å),  $130$  (2,67° Å) et  $110$  (2,43 Å) de la goéthite. Les raies caractéristiques de l'hématite n'ont pas été observées. Par contre, on observe un pic à 3.53 Å qui est dû à la présence d'anatase (TiO<sub>2</sub>).

La faible cristallinité des particules d'oxyhydroxydes de fer est à l'origine de raies de diffraction de faible intensité. Si la goéthite 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, et ceci à la suite d'une dissolution presque totale de la kaolinite (KÄMPF et SCHWERTMANN, 1982). Les diffractogrammes présentés (fig. 2.3), confirment la présence de goéthite. De nombreuses raies caractéristiques de ce minéral sont maintenant de forte intensité. On note aussi l'existence des raies du quartz (3,34 Å) et de l'anatase (3,52, 1,90 et 1,70 Å), mais pas de raie qui puisse révéler la présence d'hématite.

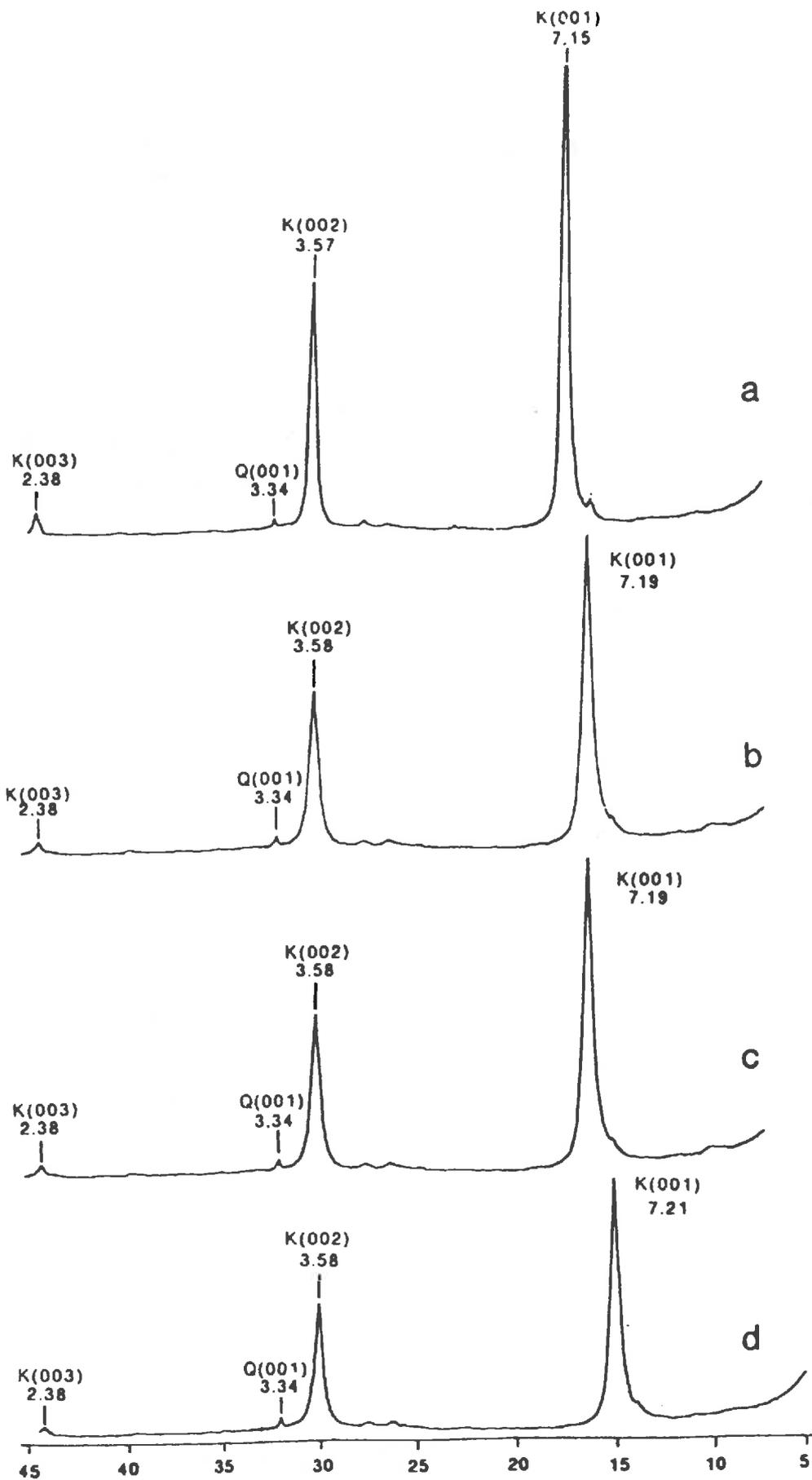


Figure 2.1: Diffractogrammes RX obtenus à partir de lames orientées (Co K $\alpha$ ) (Fraction < 2 $\mu$ m) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2.

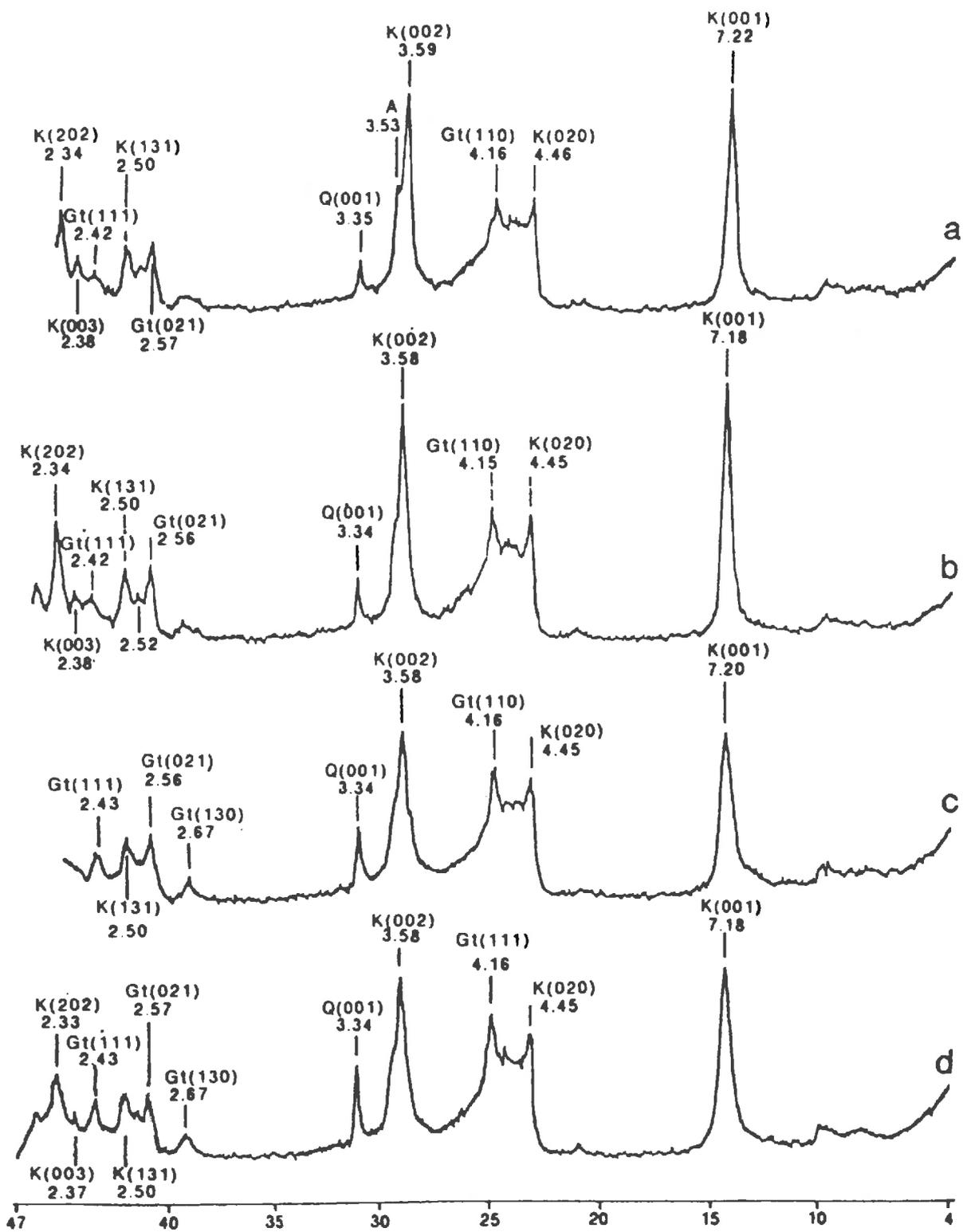


Figure 2.2: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre (Co K $\alpha$ ) (Fraction < 2 $\mu$ m) : a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2.

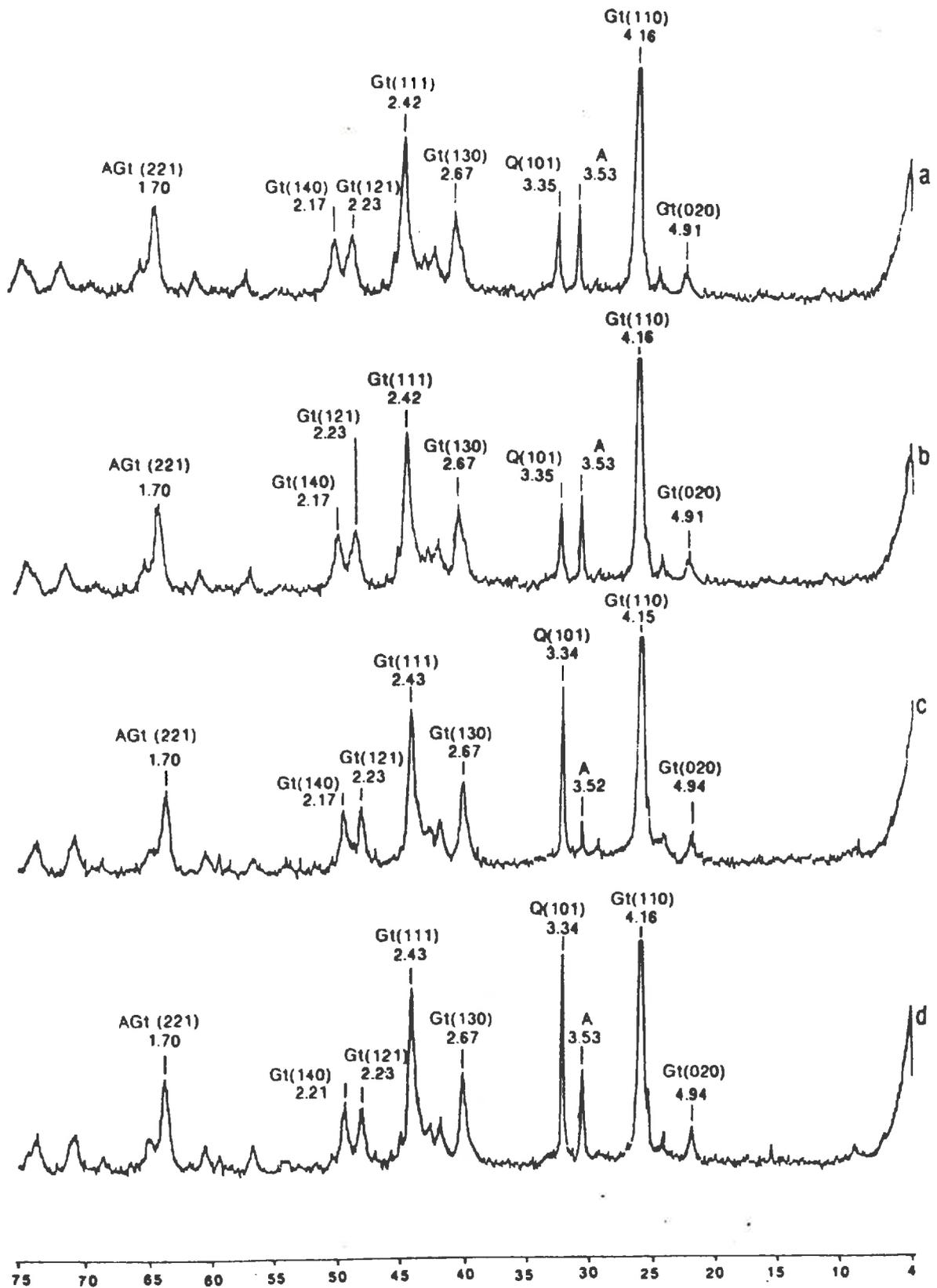


Figure 2.3: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre après traitement NaOH 5N (Co K $\alpha$ )(Fraction < 2 $\mu$ m) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2.

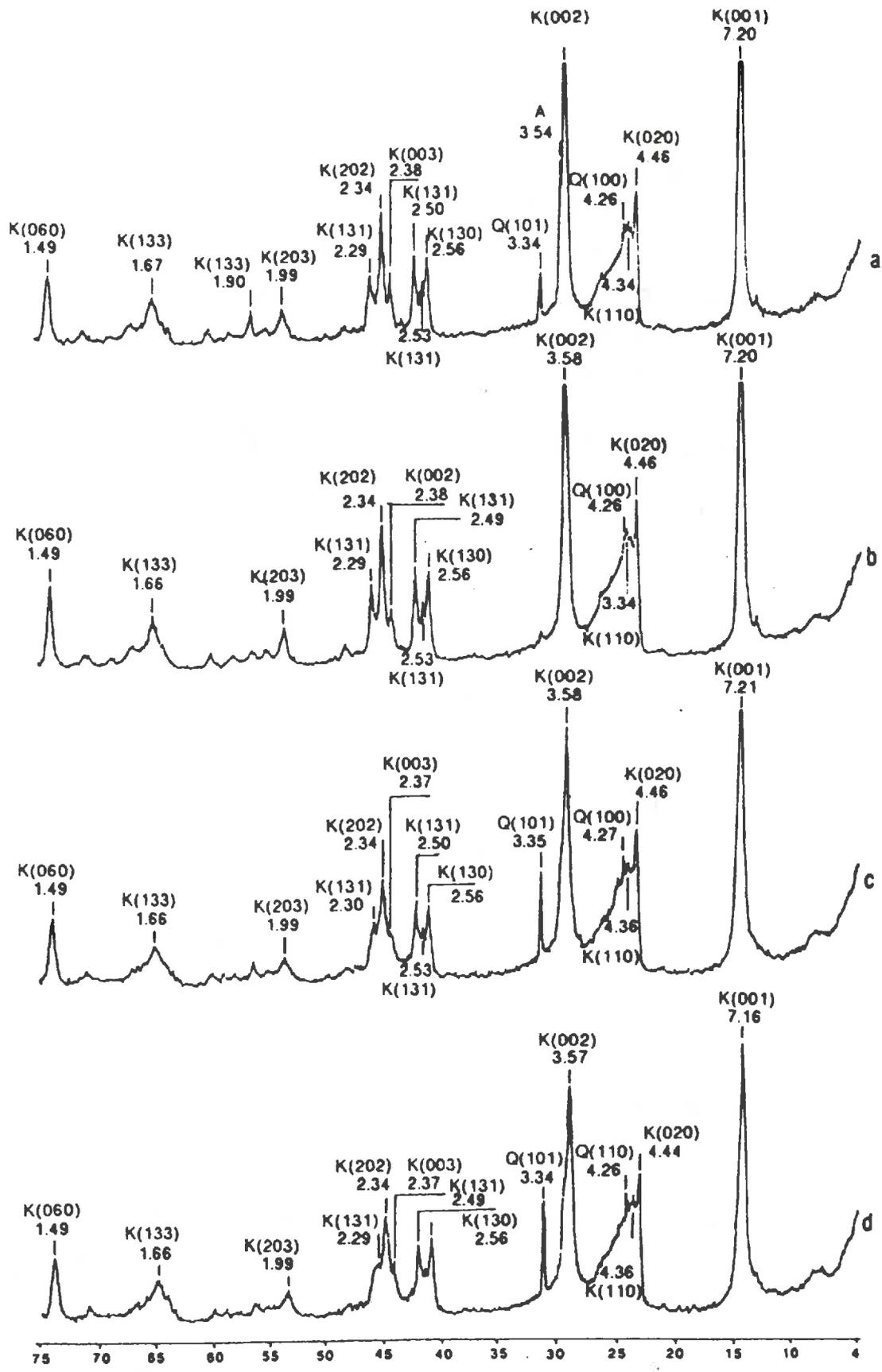


Figure 2.4: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre après traitement CDB (Co  $K\alpha$ ) (Fraction  $< 2\mu\text{m}$ ) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2.

### C) Conclusion

Les résultats de cette première étape de l'analyse minéralogique montrent la présence de kaolinite, de goethite, de quartz et d'anatase pour tous les échantillons étudiés. Des faibles différences d'intensité relative ont été notées pour certaines raies entre les sites de "Campos" et de "l'Universidade Rural", mais elles ne seront pas discutées comme étant révélatrices de proportions différentes dans les mélanges. De telles différences d'intensité peuvent, en effet, être dues à des tailles de cristaux différentes et non à des proportions différentes dans les échantillons.

### 2.3.2 Caractérisation des kaolinites et des goethites

L'identification des minéraux présents dans les échantillons n'a pas montré de différence entre les échantillons. Nous allons maintenant rechercher si d'éventuelles différences peuvent être mises en évidence concernant la nature des kaolinites et celle des goethites.

#### A) Taille apparente des cristaux de kaolinite

La taille des cristallites élémentaires qui compose un minéral peut être caractérisée par diffraction des RX aux grands angles en mesurant la largeur à mi-hauteur d'une raie de diffraction et en appliquant la formule de Scherrer (TCHOUBAR et al., 1982) :

$$L = (0,9 \lambda) / [(\Delta_1 - \Delta_0) \cos \theta]$$

L = dimension apparente des cristallites selon la direction considérée.

$\lambda$  = longueur d'onde du rayonnement utilisé (en Å).

$\Delta_1$  = largeur à mi-hauteur de la raie considérée et pour l'échantillon étudié.

$\Delta_0$  = largeur à mi-hauteur de la même raie pour un cristal étalon.

$\theta$  = angle de diffraction de la raie.

La mesure  $\Delta_1$  s'effectue en intégrant la surface de la raie et en divisant la valeur obtenue par la hauteur.  $\Delta_1$  est donc la largeur d'un rectangle de longueur égale à la hauteur de la raie considérée et de surface identique à celle de cette raie.  $\Delta_0$  permet d'introduire dans la formule un terme correctif par référence à un cristal étalon théoriquement parfait. Il tient compte de l'élargissement des raies dû à la géométrie du montage et aux caractéristiques de l'enregistrement (THIRY et WEBER, 1977).

Pour les minéraux mal cristallisés, comme pour les minéraux des sols, la largeur L, représente en fait, non seulement la taille des cristallites, mais aussi la densité de défauts structuraux selon la direction considérée. C'est pourquoi on parlera de "taille apparente".

Pour estimer la taille apparente du cristal selon une direction, on utilise les raies dont les plans atomiques sont perpendiculaires à cette direction ( $00l$  pour l'épaisseur et  $0k0$  pour la largeur). Les raies utilisées pour ce calcul sont les raies  $001$  (7,15 – 7,20 Å) et  $060$  (1,49 Å). D'autres raies ne peuvent pas être utilisées en raison d'interférences avec les raies de diffraction d'autres minéraux ou parce qu'elles sont de faibles intensité (fig. 2.4). Ainsi, on considérera que la raie  $001$  contient une information relative à l'épaisseur des cristallites élémentaires, et la raie  $060$  à leur diamètre (THIRY, 1982) (fig. 2.5).

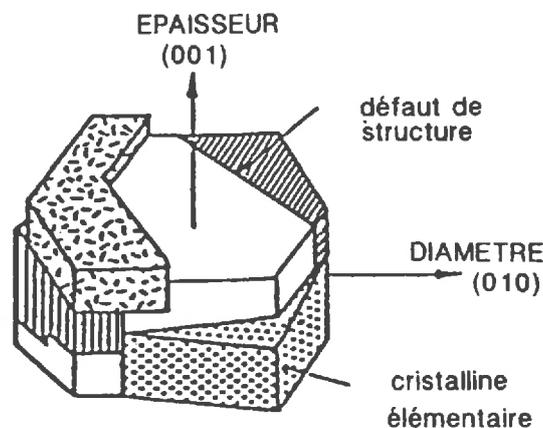


Figure 2.5: Représentation schématique des dispositions cristallographiques dans une particule de kaolinite (d'après THIRY, 1982).

#### a) Importance de l'analyse statistique

On ne peut comparer et discuter les résultats qu'à partir d'une analyse statistique des données. L'écart type ne peut être utilisé que quand on admet à "priori" qu'une seule source de variation peut intervenir (ex : l'échantillonnage). Dans notre cas, on sait que les différences entre sols, modes d'utilisations et profondeurs peuvent aussi intervenir. C'est-à-dire que chaque échantillon peut varier indépendamment. Si on admet qu'une telle variation existe, on peut augmenter la précision des comparaisons par une analyse statistique adaptée.

Nous avons douze traitements qui correspondent à la combinaison : sols, modes d'utilisation et profondeurs. Selon les cas, des répétitions ont été faites lors de l'échantillonnage. Cette configuration constitue un schéma expérimental que SNEDECOR et COCHRAN (1957) appellent "classification à deux entrées" ou "analyse de variance". L'analyse de variance permet donc de comparer les écarts types de toutes les sources que varient indépendamment en les testant avec l'écart type du résidu (erreur résiduelle). Cet écart type du résidu est la somme de toutes les erreurs expérimentales attribuées au hasard (échantillonnages, erreurs de déterminations, limitations des méthodes,...).

Si on a deux variables à comparer (ex : 2 sols) la signification du test F (student) suffit pour discuter le degré de signification de la différence en ces deux variables. Cependant, si on a plus de deux variables à comparer (ex : 3 modes d'utilisation), il est nécessaire d'appliquer des tests complémentaires pour comparer les moyennes de ces variables. Dans notre cas, on a opté pour l'utilisation du test de Tukey, cité par GOMES (1973). Le coefficient de variation obtenu donne une indication sur la précision de la mesure ou de l'échantillonnage. S'il est élevé, il faut que les différences soient importantes pour qu'elles soient significatives. Par contre, s'il est faible, de petites différences seront suffisantes pour être significatives.

### b) Résultats

Les résultats de ces calculs sont présentés sur le tableau 2.2. Les valeurs moyennes sont obtenues après 6 répétitions sur la fraction < 2 $\mu$ m traitée CDB. Le schéma expérimental adopté pour analyser les résultats est un dispositif en "blocs randomisés" ou "blocs au hasard" (SNEDECOR et COCHRAN, 1957). Le dispositif est constitué de douze "traitements" : deux sites, trois modes d'utilisation pour chaque site, et deux profondeurs pour chaque mode d'utilisation.

Les différences de taille apparente des kaolinites sont discutées à partir des analyses de variance présentées dans les tableaux 2.3 et 2.4. Seules les différences enregistrées entre les 12 traitements sont significatives. Pour discuter et comparer les sources de variation, il est nécessaire de décomposer les 11 degrés de liberté des traitements (tableaux 2.3 et 2.4).

**Tableau 2.2:** Epaisseur apparente et diamètre apparent selon respectivement les raies 001 et 060, des cristaux de kaolinite (épaisseur et diamètre en Å).

Utilisations Sols et profondeurs		FORET		SOL NU		CANNE A SUCRE		PATURAGE	
		001	060	001	060	001	060	001	060
CAMPOS	PROF 1	271	355			268	387	281	376
	PROF 2	267	353			247	409	250	386
UNIV. RURAL	PROF 1			158	339	158	334	159	330
	PROF 2			150	338	151	338	150	338

**Tableau 2.3: Analyse de variance. Taille apparente des cristaux selon la raie 001 (épaisseur).**

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	71	221960,49			
Traitement	11	221161,99	20105,99		1437,14 **
Bloc	5	29,07	5,81		< 1
Résidu	55	769,43	13,99	3,74	

CV% = 1,79 (coefficient de variation en pourcentage)

\*\* significatif au risque de 1%

D.L. : degré de liberté

D.L. = n-1

S.C.E. : somme des carrés des écarts à la moyenne

$$S.C.E. = \sum (X_i - \bar{X})^2 = \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / n - 1$$

C.M. : carré moyen ou variance

$$C.M. = (S.C.E.) / (D.L.)$$

s : écart type

$$s = (C.M.)^{1/2}$$

F : test utilisé pour discuter la significativité d'une source de variation

$$F = (C.M. \text{ de la source de variation testée}) / (C.M. \text{ du résidu})$$

CV : coefficient de variation de l'échantillon

$$CV = (s/X) \times 100$$

**Tableau 2.4: Analyse de variance. Taille apparente des cristaux selon la raie 060 (diamètre).**

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	71	48798,00			
Traitement	11	44895,00	4081,36		62,92 **
Bloc	5	334,92	66,98		
Résidu	55	3568,08	64,87	8,0	

CV% = 2,25

\*\* significatif au risque de 1%

Le premier résultat important de cette décomposition est que les cristaux de kaolinite sont de "taille apparente" différente (autant pour l'épaisseur que pour le diamètre) entre les deux sites, indépendamment du mode d'utilisation et de la profondeur.

Pour le site de “l’Universidade Rural” les cristaux de kaolinite sont d’une plus grande épaisseur pour UR-N-1 que pour UR-N-2. Ceci n’est pas le cas pour les modes d’utilisation pâturage et canne à sucre. Pour le diamètre, aucune différence significative n’a été mise en évidence (tableau 2.6).

Pour le site de “Campos”, toutes les sources de variation interviennent de façon significative que ce soit pour le diamètre ou l’épaisseur (tableaux 2.5 et 2.6).

**Tableau 2.5:** Décomposition des degrés de liberté des traitements (modes d’utilisation et profondeurs) pour la raie 001.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M	F	
Sols	1	215496,12	215496,12	15403,58	** *
Prof. dans CP	1	3098,77	3098,77	221,49	** *
Util. dans CP	2	853,77	426,69	30,50	** *
Int.P.xUt.dans CP	2	1120,39	560,20	40,04	** *
Prof. dans UR	1	584,72	584,72	41,80	** *
Util. dans UR	2	1,08	0,54	< 1	
Int.xP.xUt. dans UR	2	7,14	3,57	< 1	
Résidu	55	769,43	13,99		

\*\* significatif au risque de 1%

**Tableau 2.6:** Décomposition des degrés de liberté des traitements (modes d'utilisation et profondeurs) pour la raie 060.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	F	
Sols	1	31793,38	31793,38	490,11	* *
Prof. dans CP	1	1078,06	1078,06	16,16	* *
Util. dans CP	2	10936,72	5468,36	82,00	* *
Int.P.xUt. dans CP	2	726,72	363,36	5,45	*
Prof. dans UR	1	113,78	113,78	1,75	
Util. dans UR	2	113,17	56,58	< 1	
Int.xP.xUt.dans UR	2	133,17	66,69	1,02	
Résidu	55	3568,08	64,87		

\* \* significatif au risque de 1%

\* " " " 5%

Si l'on compare les trois modes d'utilisation, on note que l'épaisseur des cristaux de kaolinite est plus grande pour les modes d'utilisation forêt et pâturage que pour le mode d'utilisation canne à sucre. Le diamètre est par contre plus grand pour le mode d'utilisation canne à sucre que pour les modes d'utilisation forêt et pâturage. Si l'on compare maintenant les kaolinites de la profondeur 1 à celles de la profondeur 2, les premières présentent une tendance (faible signification du test F) à être d'une plus grande épaisseur et d'un plus petit diamètre.

L'interaction significative mode d'utilisation – profondeur indique que l'épaisseur et le diamètre n'ont pas le même comportement en fonction de la profondeur et en fonction du mode d'utilisation. C'est pourquoi on a ensuite décomposé les trois degrés de liberté des sources de variation profondeurs (1 degré de liberté) et modes d'utilisation (2 degrés de liberté) pour étudier comment se comporte la source de variation profondeur dans chaque mode d'utilisation (tableaux 2.7 et 2.8).

**Tableau 2.7:** Décomposition des degrés de liberté de l'interaction (raie 001) pour tester la source de variation profondeur dans chaque mode d'utilisation.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	F
Prof. dans CP - F	1	44,08	44,08	3,15
Prof. dans CP - C	1	1323,00	1323,00	94,54 **
Prof. dans CP - P	1	2952,08	2852,08	203,86 **
Résidu	55	769,43	13,99	

\*\* significatif au risque de 1%

**Tableau 2.8:** Décomposition des degrés de liberté de l'interaction (raie 060) pour tester la source de variation profondeur dans chaque mode d'utilisation.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	F
Prof. dans CP - F	1	2,08	2,08	
Prof. dans CP - C	1	1541,33	1541,33	23,76 **
Prof. dans CP - P	1	261,33	261,33	4,02 *
Résidu	55	3568,08	64,87	

\*\* significatif au risque de 1%

\* " " " " 5%

Pour le mode d'utilisation forêt, il n'y a pas de différence significative en fonction de la profondeur. Par contre, pour le mode d'utilisation canne à sucre et pâturage, les cristaux sont significativement de plus petit diamètre à la profondeur 1, qu'ils ne le sont à la profondeur 2.

## B) *Teneur en eau de constitution des kaolinites*

Les cristaux de kaolinites sont constitués de feuillets dont les caractéristiques cristallochimiques sont généralement considérées comme constantes. La distinction entre les différentes espèces est essentiellement cristallographique et basée sur le mode d'empilement des feuillets (PEDRO, 1979). De très faibles variations de composition chimique ont néanmoins été mises en évidence (CAILLERE et al., 1982) sans que la localisation des substitutions ait été clairement définie.

Une façon de caractériser la composition chimique consiste à étudier la teneur en eau de constitution des kaolinites à partir des analyses thermopondérales. Cette donnée nous sera par ailleurs nécessaire pour l'analyse minéralogique quantitative qui suivra.

En effet, l'analyse minéralogique quantitative à partir des données des analyses chimiques nécessite une connaissance précise de la composition chimique des différents minéraux présents dans les échantillons. Pour les kaolinites de gisement, cette composition chimique varie peu et reste très proche de celle d'une kaolinite théorique (CAILLERE et al., 1982; CAMBIER, 1976). Nous pourrions ainsi comparer la composition chimique des kaolinites des échantillons étudiés ici à celle d'une kaolinite théorique.

La figure 2.6 montre que la courbe se décompose en 3 domaines de température, limités par 2 points d'inflexion sub-horizontaux (BRUAND et PROST, 1988). Le premier domaine (I) est à attribuer à l'eau d'hydratation des cations, le second (II), à la déshydroxylation de la goethite, et le troisième (III), à la déshydroxylation de la kaolinite.

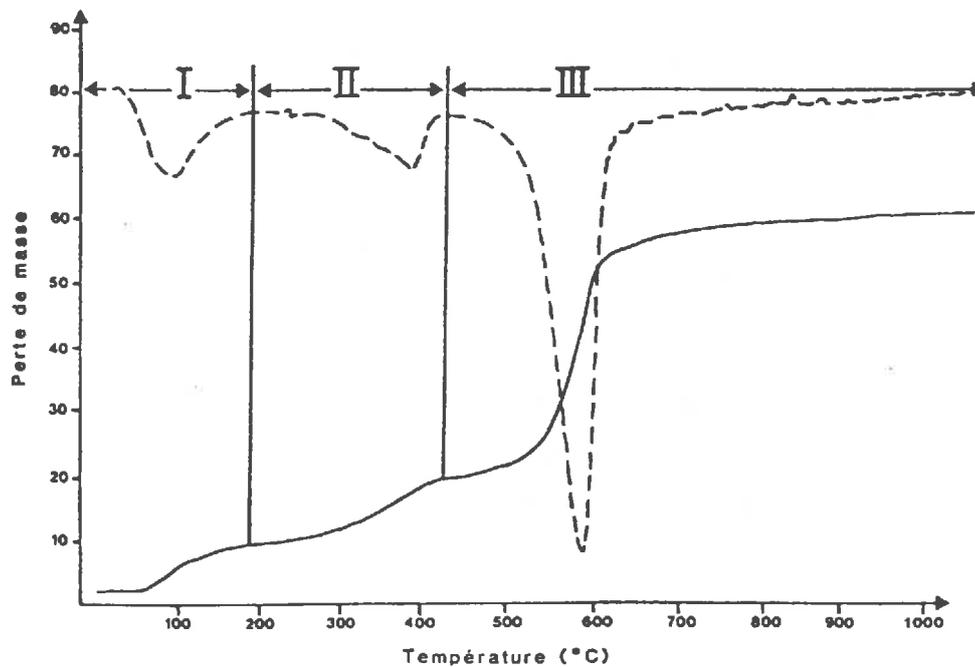


Figure 2.6: Analyse thermopondérale de la fraction argileuse.

Figure 2.6: Analyse thermopondérale de la fraction argileuse pour UR-C-1 (courbe de perte de masse en mg : —, et sa courbe dérivée : ----).

Cependant les limites d'un domaine à l'autre sont peu nettes et par conséquent difficiles à fixer. L'observation des courbes montre que les différents domaines se chevauchent (absence de palier rigoureusement horizontal), de sorte qu'il est difficile d'évaluer les limites de ces domaines et d'attribuer en totalité la perte de masse à tel ou tel minéral.

Si le domaine de température de déshydroxylation des minéraux peut être notablement différent en fonction de leur nature minéralogique, il peut aussi varier pour un même minéral en fonction de sa cristallinité. Le début de la déshydroxylation se fait à une température d'autant plus basse que le minéral est à structure désordonnée et comporte des défauts (LIETARD, 1957; SCHULZE et SCHWERTMANN, 1984). Il n'est pas possible d'utiliser ici les valeurs théoriques fournies dans la littérature comme les limites de ces domaines de température (CAILLERE et al., 1982). Un traitement CDB a été appliqué à chaque échantillon pour éliminer la goethite et par conséquent le domaine II.

La figure 2.7 montre que le domaine II subsiste entre les domaines I et III. Il est, certes, moins important qu'avant le traitement CDB, mais encore bien net. Or, nous avons vu précédemment (fig.2.4) que ce traitement éliminait effectivement la goethite des échantillons. Il s'agirait donc d'autres composés. On peut supposer qu'il s'agit de composés organiques ayant pour origine les ions citrates utilisés lors du traitement CDB. Compte tenu de cette incertitude liée vraisemblablement à la présence de composés organiques, nous avons calculé la teneur en eau de constitution des kaolinites de deux façons.

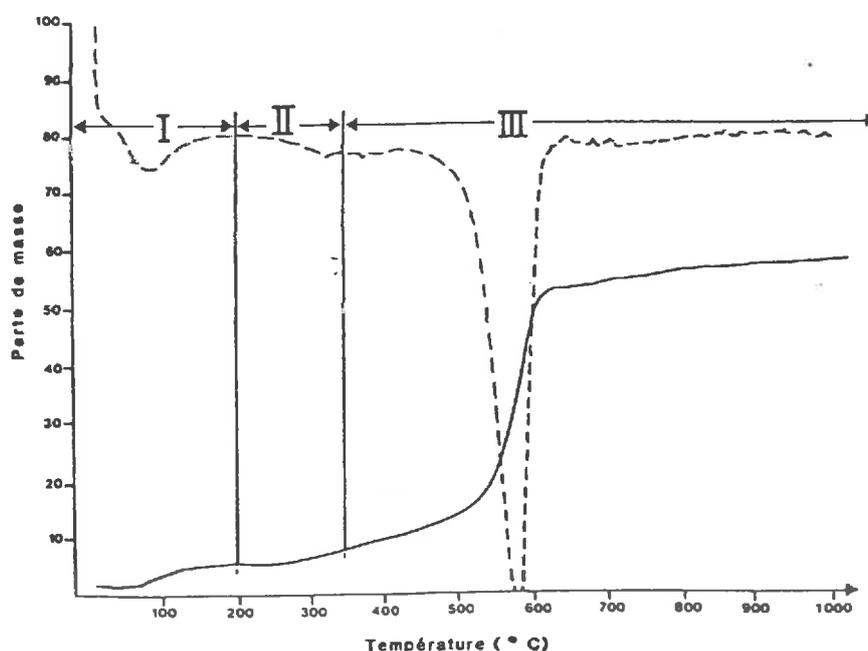


Figure 2.7: Analyse thermopondérale de la fraction argileuse après traitement CDB pour UR-C-1 (courbe de perte de masse en mg : —, et sa courbe dérivée : ----).

Dans un premier cas, le début de la déshydroxylation de la kaolinite a été fixé à la limite entre les domaines I et II après traitement CDB. Ceci conduit à surévaluer la teneur en eau de constitution, puisque nous prenons en compte une perte de masse due vraisemblablement à des composés organiques.

Dans un deuxième cas le début de la déshydroxylation a été fixé entre les domaines II et III. Ceci nous conduit maintenant à sous évaluer la teneur en eau de constitution, puisque la déshydroxylation de la kaolinite débute très vraisemblablement avant que ne finisse celle des composés organiques fixés lors du traitement CDB.

Les résultats de ce calcul sont donnés dans le tableau 2.9. Sachant que la teneur en eau d'une kaolinite théorique est 16,3 % par référence à la masse d'oxydes, les valeurs obtenues sont proches de cette valeur.

**Tableau 2.9:** Teneur en eau de la kaolinite déduite de l'analyse thermopondérale (cf figures 2.6 et 2.7) (teneur en eau exprimée en % de la masse d'oxyde). 1. en considérant les domaines II et III. 2. en considérant le domaine II.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET		SOL NU		CANNE A SUCRE		PATURAGE	
		1	2	1	2	1	2	1	2
CAMPOS	PROF 1	16,63	14,15			16,67	14,66	16,74	14,50
	PROF 2	15,67	14,00			15,27	14,49	15,67	14,03
UNIV. RURAL	PROF 1			16,15	14,65	16,01	14,47	16,54	14,18
	PROF 2			16,94	14,08	14,89	13,48	15,84	13,85

### C) Taux de substitution Al-Fe dans le réseau des goethites

La goethite 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). Celle-ci prend en compte la position des raies (110) et (111) de la goethite bien nette après traitement NaOH 5N, (fig. 2.3). 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'Al 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 sont déterminées 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  $23^\circ$  et  $26^\circ 2\theta$  pour  $d_{110}$  et entre  $42^\circ$  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 2.10. On note que, pour chaque site, les taux de substitution sont du même ordre de grandeur. Il sont par contre plus élevés pour le site de "Campos" que pour celui de "l'Universidade Rural". Cependant, à ce niveau de la discussion, il n'est pas possible de dire quelle est l'origine, ni quelles sont les conséquences sur le comportement de ces différences de la constitution de la goethite.

### 2.3.3 Analyse minéralogique quantitative

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  $Q_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ), les travaux effectués montrent que l'on utilise de façon très générale le fait que la  $i^{\text{ème}}$  propriété  $M_i$  déterminée pour le mélange peut s'écrire sous la forme d'une combinaison linéaire (PEARSON, 1978; WIEGMANN et al., 1982; HODGSON et DUDENEY, 1984; PAWLOSKI, 1985; 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 :

Tableau 2.10: Taux de substitution Al-Fe dans le réseau de la goethite. Pourcentage d'atome d'aluminium.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET	SOL NU	CANNE A SUCRE	PATURAGE
					.
CAMPOS	PROF 1	24.00		25.05	25.54
	PROF 2	26.90		23.17	26.10
UNIV. RURAL	PROF 1		18.17	18.25	18.50
	PROF 2		18.21	18.30	18.54

$$j = 4$$

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

$$j = 1$$

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).

*A) Détermination des grandeurs nécessaires à la résolution du système d'équations.*

La première étape a consisté à choisir les 4 éléments chimiques pour établir les 4 équations indépendantes. Ces 4 éléments sont le Titane (Ti), le Fer (Fe), la Silice (Si) et l'Aluminium (Al). Le choix de Ti est dû à la présence d'anatase ( $\text{Ti O}_2$ ), celui de Fe à la présence de goethite [ $\text{Fe}_{1-x} \text{Al}_x \text{OOH}$ ], celui de Si à la présence du quartz ( $\text{Si O}_2$ ) et celui de Al à la présence de kaolinite [ $\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$ ]. Il faut noter dans ce dernier cas que la formule cristallographique de la kaolinite employée est celle d'une kaolinite théorique. Les valeurs des coefficients  $a_{ij}$  pour l'anatase, le quartz et la kaolinite sont données dans le tableau 2.11.

**Tableau 2.11:** Compositions chimiques utilisées pour l'établissement du système d'équation linéaire.

	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$
Anatase	0	100	0	0
Quartz	100	0	0	0
Kaolinite	54,1	0	45,9	16,3

Pour la goethite, les taux de substitution déterminés précédemment ont été employés pour le calcul des compositions chimiques présenté dans le tableau 2.12. Les coefficients  $a_{ij}$  correspondant à la goethite seront par conséquent différents pour chaque échantillon.

Tableau 2.12: Composition de la goethite en fonction du taux de substitution Al-Fe. Résultats exprimés en % par rapport à l'état calciné.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET			SOL NU			CANNE A SUCRE			PATURAGE		
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
CAMPOS	PROF 1	83.26	16.74	12.35				82.46	17.54	12.39	82.07	17.93	12.42
	PROF 2	80.98	19.02	12.49				83.84	16.16	12.30	81.61	18.39	12.41
UNIV. RURAL	PROF 1				87.56	12.44	12.06	87.56	12.44	12.06	87.34	12.66	12.08
	PROF 2				87.56	12.44	12.06	87.49	12.51	12.07	87.34	12.66	12.08

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. Le Si a été dosé par fluorescence X après préparation d'une solution solide par fusion au tétraborate 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 HClO<sub>4</sub>. Les résultats de cette analyse chimique totale sont donnés dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13: Analyse chimique de la fraction argile exprimée en % d'oxyde.

	Ca O	Mg O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si O <sub>2</sub>	Ti O <sub>2</sub>	Total
CP - F.1	0,06	0,24	0,25	0,06	11,03	39,10	45,93	3,33	100
CP - F.2	0,08	0,18	0,26	0,06	10,75	40,78	45,17	2,72	100
CP - C.1	0,07	0,16	0,26	0,11	10,96	40,98	44,74	2,72	100
CP - C.2	0,08	0,06	0,45	0,08	11,28	41,85	44,40	1,80	100
CP - P.1	0,06	0,16	0,21	0,06	10,35	40,71	45,98	2,47	100
CP - P.2	0,08	0,18	0,22	0,06	11,42	39,91	45,62	2,51	100
UR - N.1	0,08	0,44	0,15	0,12	14,41	36,82	45,94	2,04	100
UR - N.2	0,08	0,30	0,13	0,15	15,53	37,44	44,50	1,87	100
UR - C.1	0,08	0,34	0,15	0,15	14,77	37,10	45,53	1,88	100
UR - C.2	0,08	0,30	0,15	0,15	15,40	37,20	44,74	1,98	100
UR - P.1	0,08	0,32	0,13	0,15	15,45	37,67	44,12	2,08	100
UR - P.2	0,08	0,32	0,13	0,16	15,07	36,76	45,52	1,96	100

B) *Résolution du système d'équation.*

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 goéthite ;
- $M_1, M_2, M_3, M_4$  : teneurs en  $Ti O_2, Si O_2, Al_2 O_3$  et  $Fe_2 O_3$  de l'échantillon, exprimées en % ;
- $a_{34}$  et  $a_{44}$  : teneurs en  $Al_2 O_3$  et  $Fe_2 O_3$  de la goéthite de l'échantillon exprimées en %.

Les valeurs obtenues à la suite de ce calcul sont reportées dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14: Proportions de kaolinite (K), goéthite (Gt), anatase (A) et quartz (Q) dans la fraction argile.

	K	Gt	A	Q	Total
CP- F.1	80,35	13,25	3,36	2,46	99,39
CP- F.2	83,35	13,27	2,72	0,84	100,18
CP- C.1	84,09	13,34	2,72	0,70	100,85
CP- C.2	86,60	11,28	1,80	0,32	100,00
CP- P.1	83,77	12,61	2,47	0,66	99,51
CP- P.2	81,34	13,99	2,51	1,62	99,46
UR- N.1	75,76	16,56	2,04	4,95	99,31
UR- N.2	76,76	17,84	1,87	2,97	99,44
UR- C.1	76,26	16,90	1,88	4,16	99,20
UR- C.2	76,44	17,30	1,98	3,38	99,10
UR- P.1	77,19	17,69	2,08	2,36	99,32
UR- P.2	75,33	17,25	1,96	4,78	99,32

C) *Discussion et conclusion.*

La somme des proportions doit être proche de 100, ce qui est le cas pour chaque échantillon. Si l'on compare les échantillons entre eux, on note que les compositions sont semblables au sein d'un même site, quelle que soit la profondeur ou le mode d'utilisation. Par contre, le site de "Campos" se distingue de celui de "l'Universidade Rural" par une teneur légèrement plus faible en kaolinite et plus élevée en goéthite.

## 2.4 Conclusion

Les analyses granulométriques des échantillons prélevés confirment ce que nous avons déjà noté à propos de l'ensemble des profils : il existe des différences de teneur en argile entre les échantillons provenant d'une même profondeur au sein d'un même site. De telles différences seraient à mettre en relation avec des phénomènes d'érosion ayant entraîné la troncature des profils de sol.

L'analyse minéralogique de la fraction granulométrique argile a montré que les minéraux constituant cette fraction sont les mêmes pour les échantillons des deux sites (kaolinite, goethite, quartz et anatase). Néanmoins, certaines de leurs caractéristiques sont différentes entre les deux sites :

- les cristaux de kaolinite sont d'une plus grande taille pour le site de "Campos", que pour celui du site de "l'Universidade Rural" ;

- le taux de substitution Al-Fe dans la goethite est plus élevé pour le site de "Campos" (25 %) que pour celui de "l'Universidade Rural" (18 %), mais la teneur en ce minéral est par contre plus élevée pour ce dernier site (17 % contre 13 %).

Compte tenu des résultats de l'analyse granulométrique, on peut s'attendre à ce que des différences de densité apparente soient au moins en partie liées à des variations de teneur en argile.

Quant aux différences mises en évidence pour la taille apparente de kaolinites et le taux de substitution Al-Fe dans les goethites, il est clair qu'elles interviendront dans la géométrie de l'espace poral et le comportement de ce dernier en fonction de l'état d'hydratation.

Les différences de teneur en argile mises en évidence, à une même profondeur et pour un même site, invalident l'hypothèse de non variation de constitution qui devait faciliter notre analyse de l'espace poral.

En effet, en l'absence de variation de constitution minérale et de mise en culture, nous pouvions penser que la géométrie de l'espace poral était la même pour chaque profondeur au sein d'un même site, puisque qu'il s'agissait des mêmes types de sol. De la sorte, toute variation de géométrie de l'espace poral après mise en culture pouvait être raisonnablement attribuée à cette dernière. Or, nous avons enregistré des variations de teneur en argile pour une même profondeur et un même site. Nous ne pourrions donc plus utiliser le même schéma de raisonnement.

Par contre, il est d'ores et déjà très probable, que les variations de géométrie de l'espace poral pour des teneurs en argile de 48, 42 et 39 % du site de "l'Universidade Rural" soient essentiellement d'origine pédogénétique. En effet, pour ce site et pour la profondeur 2, nous pouvons considérer que la géométrie de l'espace poral a été très peu modifiée par la mise en culture en l'absence de mécanisation.

Pour le site de "Campos", nous pourrions utiliser ces trois horizons de la profondeur 2 du site de "l'Universidade Rural" comme étant des états de référence, et ceci d'autant plus facilement, que la variabilité de teneur en argile est plus faible à "Campos" qu'à "l'Universidade Rural". Néanmoins, des différences de taille pour les fractions grossières et les particules de kaolinite, ainsi que des différences de nature cristalochimique des goethites ont été mises en évidence. Elles devront être prise en compte lors des comparaisons entre les sites de "Campos" et de "l'Universidade Rural".



## **Chapitre 3**

### **ANALYSE DES MODES D'ORGANISATION**

#### **3.1 Introduction**

Il existe plusieurs façons d'aborder l'étude de l'organisation des constituants des sols. Leur analyse peut notamment être réalisée de trois façons :

- par des mesures de densité apparente et le calcul du volume poral total des différents types d'échantillons (STENGEL 1979).
- par l'observation directe en microscopie (microscope optique) du mode d'arrangement des constituants et de l'espace poral associé (BULLOCK et al., 1986).
- par l'analyse indirecte de la géométrie de l'espace poral par injection de mercure (porosimétrie au mercure) (VACHIER et al., 1979 ; FIES, 1984).

Ces trois aspects seront abordés successivement.

#### **3.2 Volume poral total déduit des valeurs de densités apparente et réelle**

##### *A) Introduction*

La densité apparente est très généralement mesurée pour caractériser l'intensité du tassement dans un horizon. Ses variations sont liées à celles du volume poral total si la densité réelle du sol ne varie pas.

La densité apparente ( $d_a$ ) a été obtenue à l'aide d'anneaux volumiques dits de Kopecky. Trois répétitions ont été faites. La teneur en eau lors des prélèvements était en

moyenne de  $0,13 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  pour le site de “Campos” et de  $0,18 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  pour le site de “l’Universidade Rural”. La densité réelle ( $d_r$ ) à été obtenue à l’aide d’un pycnomètre à gaz (MICROMERITICS – multivolume picnometer 1305). Les échantillons ont été étudiés sous la forme de terre tamisée à 2 mm.

Le volume poral total  $V_t [d_a]$  est calculé à l’aide de la relation :

$$V_t [d_a] = (1/d_a) - (1/d_r)$$

$d_r$  étant déterminé cinq fois, mais sur le même échantillon, nous n’avons pas discuté les résultats à partir d’une analyse de variance.

## B) Résultats

Les valeurs de  $d_a$  et  $d_r$  et  $V_t [d_a]$  sont reportées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Densité apparente ( $d_a$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ), densité réelle ( $d_r$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en volume poral total  $V_t (d_a)$  ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) obtenus à l’aide des anneaux volumiques (Kopecky).

Utilisations Sols et profondeurs		FORET			SOL NU			CANNE A SUCRE			PATURAGE		
		$d_a$	$d_r$	$V_t$	$d_a$	$d_r$	$V_t$	$d_a$	$d_r$	$V_t$	$d_a$	$d_r$	$V_t$
CAMPOS	PROF 1	1.48	2.66	0.299				1.49	2.66	0.295	1.56	2.66	0.265
	PROF 2	1.50	2.67	0.296				1.56	2.67	0.266	1.53	2.67	0.269
UNIV. RURAL	PROF 1				1.40	2.70	0.345	1.38	2.71	0.355	1.41	2.71	0.340
	PROF 2				1.48	2.70	0.305	1.45	2.71	0.320	1.48	2.71	0.306

Ces résultats mettent en évidence des différences de  $d_a$  entre les horizons étudiés. Bien qu’elles soient d’importance inégale suivant les cas, elles sont dans leur ensemble, faibles. Cela ne signifie pas obligatoirement que les horizons ont été faiblement compactés lors de la mise en valeur agricole.

Les données de densité apparente révèlent des similitudes ou des différences qui ne peuvent être interprétées à ce niveau. Cependant, des variations de densité et donc de porosité identiques peuvent correspondre à des organisations différentes que nous

analyserons par la suite. Ceci étant, la densité apparente du sol est une donnée physique fondamentale qui va nous permettre de faire des bilans volumiques avec différents types de volumes poreux.

Nous avons vu dans le chapitre 2 que la constitution des horizons variait au sein du même site. Cela peut avoir pour conséquence un “effet compensateur” et expliquer ainsi que les valeurs de  $d_a$  soient proches. C’est pour cette raison que notre analyse du tassement des horizons sera basée sur une analyse compartimentale de l’espace poral. Les valeurs de  $V_t [d_a]$  sont supérieures pour le site de “l’Universidade Rural” à celle du site de “Campos”.

Pour le site de “l’Universidade Rural”,  $V_t [d_a]$  pour la profondeur 1 est supérieur à  $V_t [d_a]$  pour la profondeur 2, et à une même profondeur, les différences de  $V_t [d_a]$  entre les modes d’utilisation sont très faibles.

Pour le site de “Campos”, les différences de  $V_t [d_a]$  entre les profondeurs 1 et 2 sont faibles, excepté pour CP-C. A la profondeur 1, la valeur minimale de  $V_t [d_a]$  est enregistrée pour CP-P-1. A la profondeur 2, CP-C-2 et CP-P-2 ne sont pas différents, lorsque CP-F-2 est beaucoup plus élevé.

### **3.3 Microscopie optique et typologie des organisations et pores associés**

#### **3.3.1 Introduction**

Si les différents horizons peuvent avoir des densités apparentes comparables, il est essentiel de s’assurer que leurs structures sont elles aussi comparables. Dans le cas contraire, il faut alors décrire les différences de mode d’organisation des constituants. La microscopie optique va permettre d’étudier la structure des échantillons.

C’est ainsi que le mode d’arrangement des constituants et la géométrie des vides qui en résulte ont été décrits à partir de l’observation de lames minces en microscopie optique (FITZPATRICK, 1984 ; BULLOCK et al., 1985). Cette méthode permet l’étude des relations entre constituants grossiers (squelette) et constituants fins (plasma argileux).

Quant aux vides, ou pores, une typologie peut être établie à partir de leur morphologie. Néanmoins, compte tenu de l’épaisseur des lames minces (environ 25 $\mu$ m), cette typologie ne concerne essentiellement que les pores de dimension supérieure à 25  $\mu$ m.

### **3.3.2 Méthodologie**

Une première série de lames minces ont été confectionnées sur des mottes orientées de 5 à 7 cm de diamètre (lames parallèles à la surface du sol). Une seconde série a été réalisée à partir d'échantillons prélevés dans des boîtes de Kubiena (lames parallèles et perpendiculaires à la surface du sol).

Après séchage à 30°C pendant 16 h, les échantillons sont soumis à une dépression de 400 hPa pour l'imprégnation proprement dite. Le mélange utilisé est de un volume de solvant (styrene) pour deux volumes de résine (Raigipol). Un accélérateur et un durcisseur sont ajoutés au mélange. Les échantillons une fois imprégnés et recouverts par le mélange résine-solvant, sont mis à la pression atmosphérique. Après environ 4 jours, ils sont placés dans une étuve à 30°C, jusqu'à ce que la résine se soit durcie. Cela demande généralement un mois (LE LAY, comm. orale).

Par la suite, les blocs sont coupés de façon à obtenir des plaques minces d'environ 25 µm d'épaisseur et la procédure suivie pour la fabrication des lames minces est celle décrite par GUILLORE (1980).

### **3.3.3 Résultats et discussions**

Les lames minces ont été observées à la loupe binoculaire à des grossissements de 4 à 25x, et au microscope optique à des grossissements de 31 à 125x.

La description a été faite à l'aide du manuel de description de BULLOCK et al., (1986) et de la traduction en français de la terminologie par STOOPS (1986).

Les descriptions détaillées sont données en annexe. Nous ne rapporterons dans ce qui suit, que les éléments qui nous sont apparus directement nécessaires à notre étude.

*A) Site de Campos .*

Quels que soient les échantillons, ils sont faiblement à très faiblement structurés (au sens macroscopique du terme) et l'on note toujours la présence de deux types de microstructure.

– une microstructure à “entassement de grains” de quartz (figs.3.1 et 3.2). Ces derniers sont au contact les uns avec les autres, et les constituants fins sont présents en faibles proportions. La quasi-totalité des vides résulte de l'espace laissé libre entre les grains de quartz ;

– une microstructure en “éponge” (figs. 3.1, 3.3 et 3.4). Les constituants fins sont suffisamment nombreux pour constituer une phase continue entre les grains de quartz. Les vides correspondent essentiellement dans ce cas, à des vides qui se répartissent indépendamment des grains de quartz et se localisent au sein de la phase minérale fine sous la forme de “cavités”.

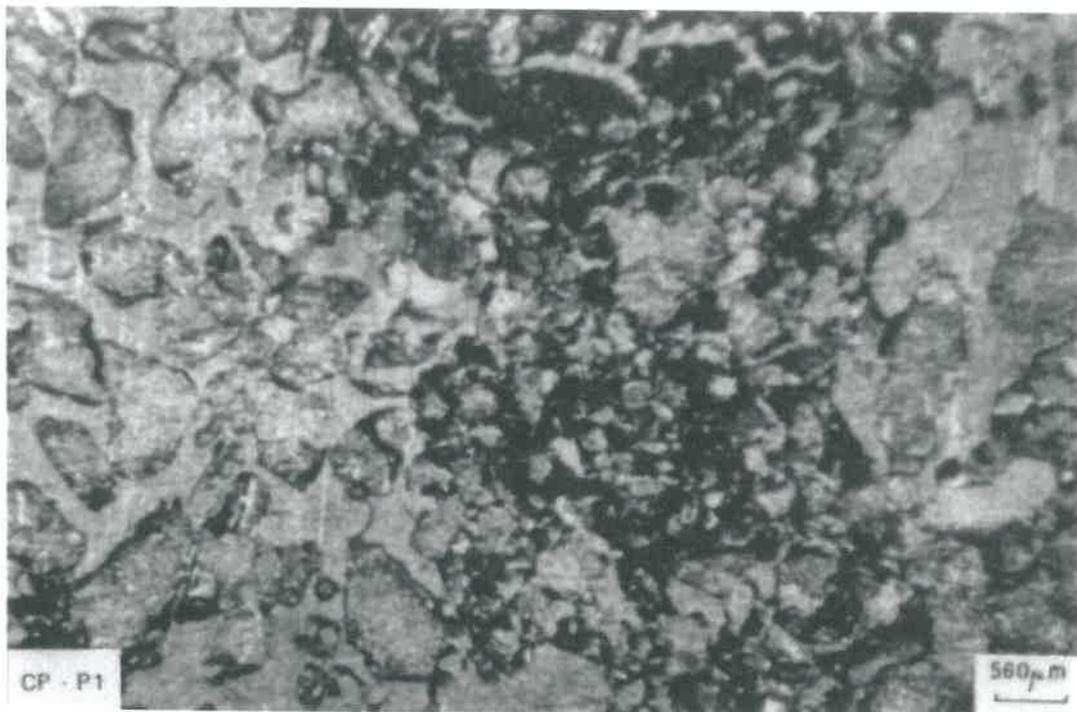


Figure 3.1: Microstructure à “entassement de grains” et microstructure en “éponge”. Site de “Campos”.



Figure 3.2: Microstructure à "entassement de grains". Site de "Campos".

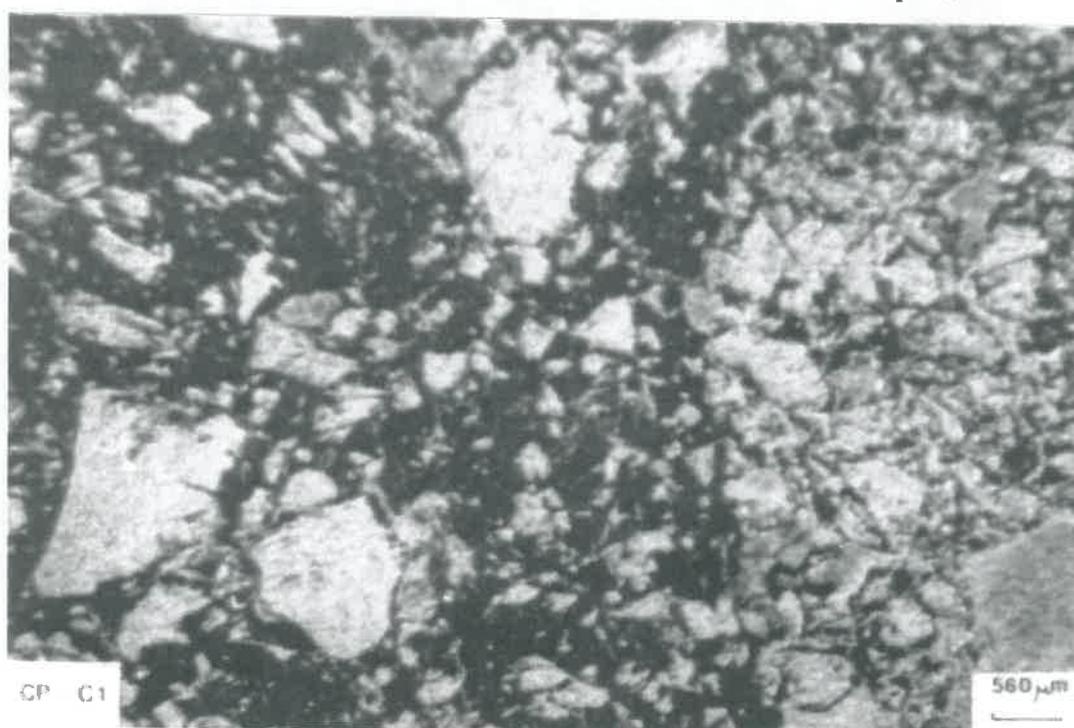


Figure 3.3: Microstructure à "entassement de grains" et microstructure en "éponge". Site de "Campos".



Figure 3.4: Microstructure en “éponge”. Site de “Campos”.

Concernant les vides, il faut ajouter la présence de vides “planaires” peu nombreux qui sont indépendants de deux types de microstructure et dont l’importance, en surface et largeur, est directement liée au développement de la structure.

Certains échantillons se distinguent par les proportions surfaciques de chaque type de microstructure. Le cas le plus fréquent est la présence de 10 – 20 % de microstructure de type à “entassement de grains” de quartz et de 80 – 90% de microstructure en “éponge”.

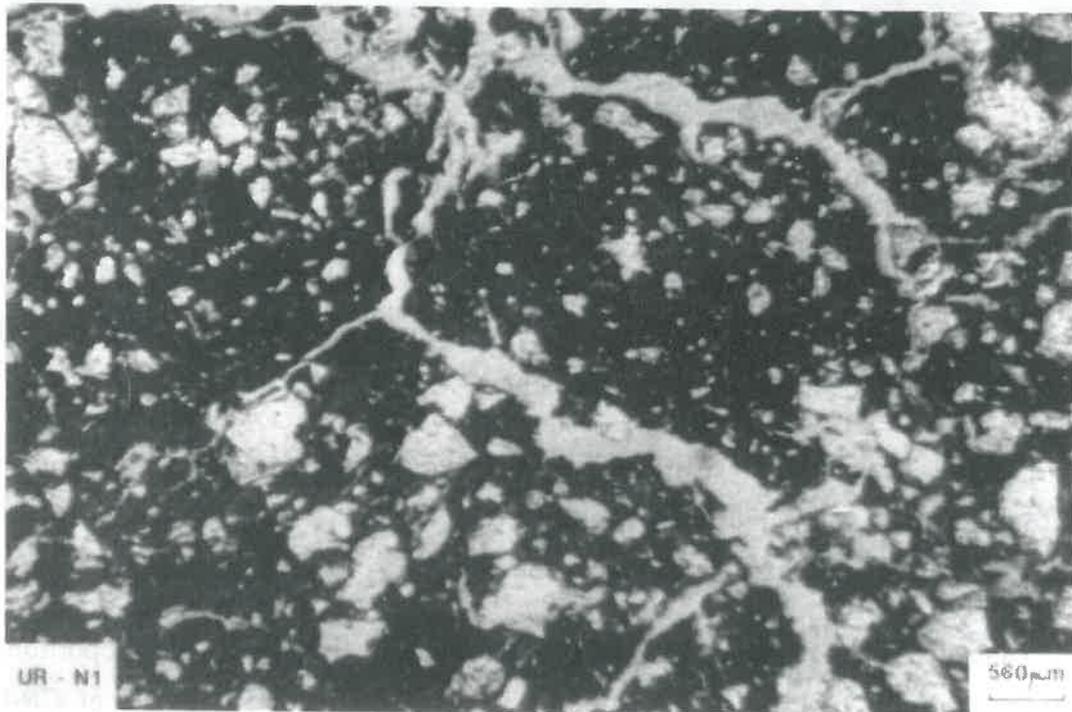
Cependant, CP-F-1 se distingue par une inversion complète de ces proportions, avec 90 % du premier type de microstructure et 10 % du second. CP-C-1 et CP-C-2 se distinguent eux par la présence de très peu de microstructure à “entassement de grains” (3 % pour CP-C-1) ou même absence (c’est le cas de CP-C-2).

Les proportions des deux types de vides liés à ces microstructures varient bien évidemment de la même façon. La taille des vides dus à “l’entassement de grains” de quartz varie généralement de 500 à 2000  $\mu\text{m}$ , celles des vides de type “cavité”, de 50 à 200  $\mu\text{m}$  et la largeur des vides “planaires”, de 50 à 200  $\mu\text{m}$ .

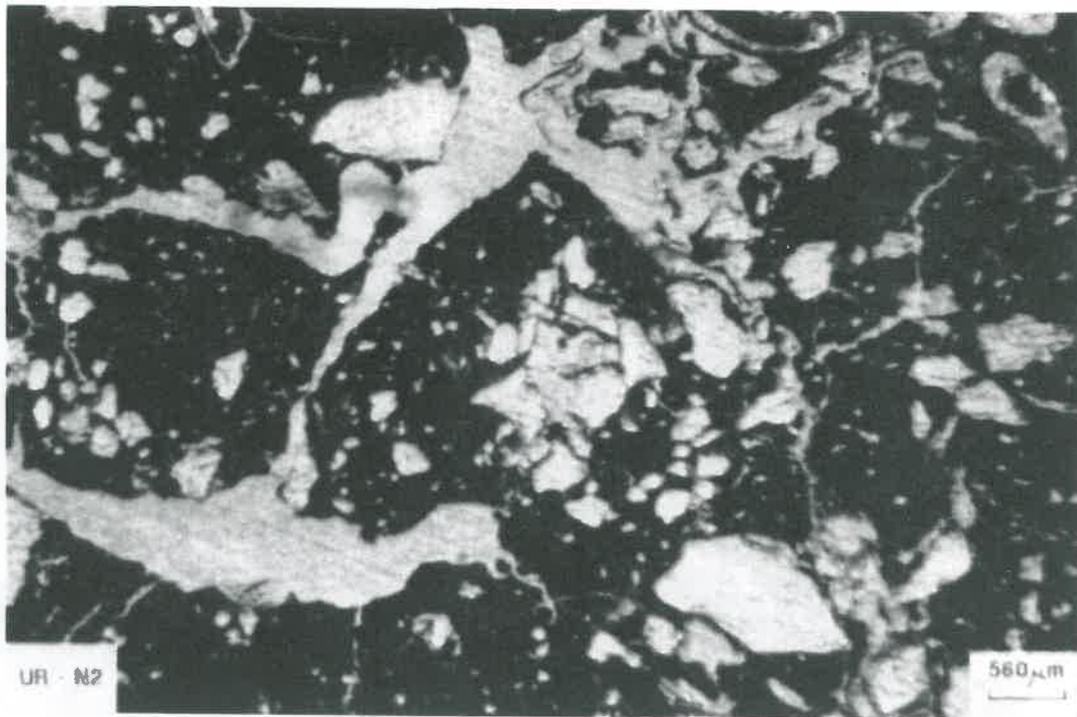
Quant à la répartition surfacique entre vides, constituants grossiers (grains de quartz) et constituants fins (essentiellement constituants de la taille des argiles granulométriques), elle est pour l’ensemble des échantillons de respectivement 20, 50 et 30 %, excepté pour CP-F-1 où elle est de 30, 60 et 10 %.

*B) Site de "l'Universidade Rural"*

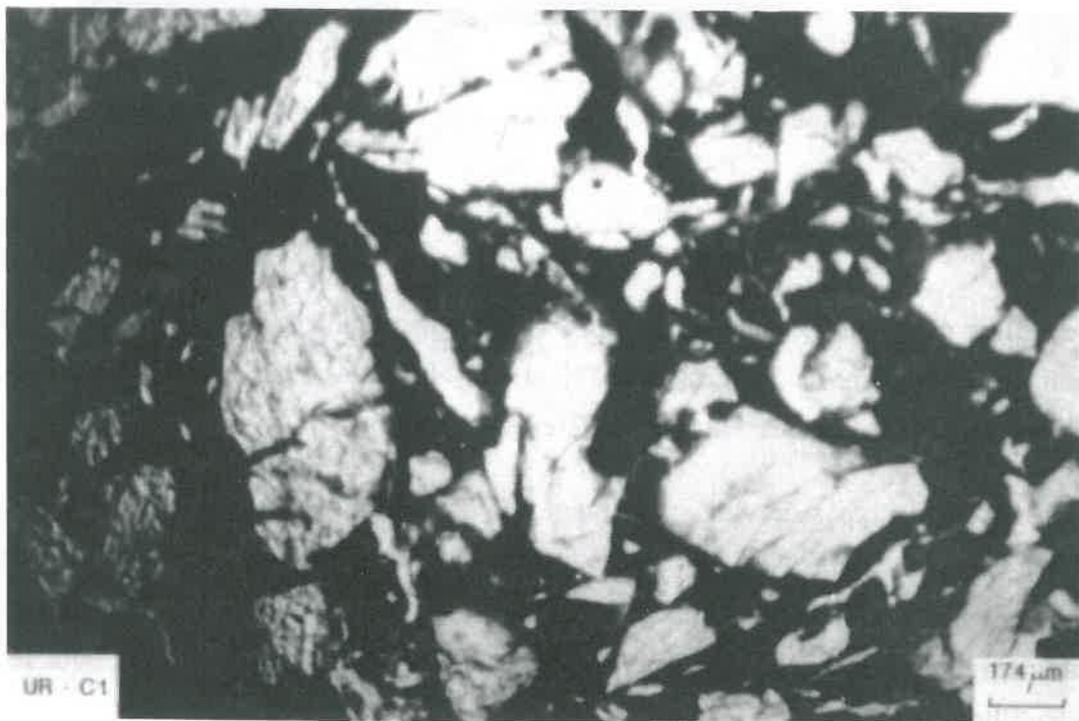
Les échantillons présentent une structure en mottes et/ou agrégats modérément développée. La microstructure est de type "complexe" associant microstructure "fissurale" et microstructure en "éponge" (figs. 3.5, 3.6, 3.7 et 3.8). Par conséquent les vides sont, soit des vides "planaires" de dimensions très variables, soit des "cavités".



**Figure 3.5:** Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale". Site de "l'Universidade Rural".



**Figure 3.6:** Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale". Site de "l'Universidade Rural".



**Figure 3.7:** Microstructure en "éponge". Site de "l'Universidade Rural".

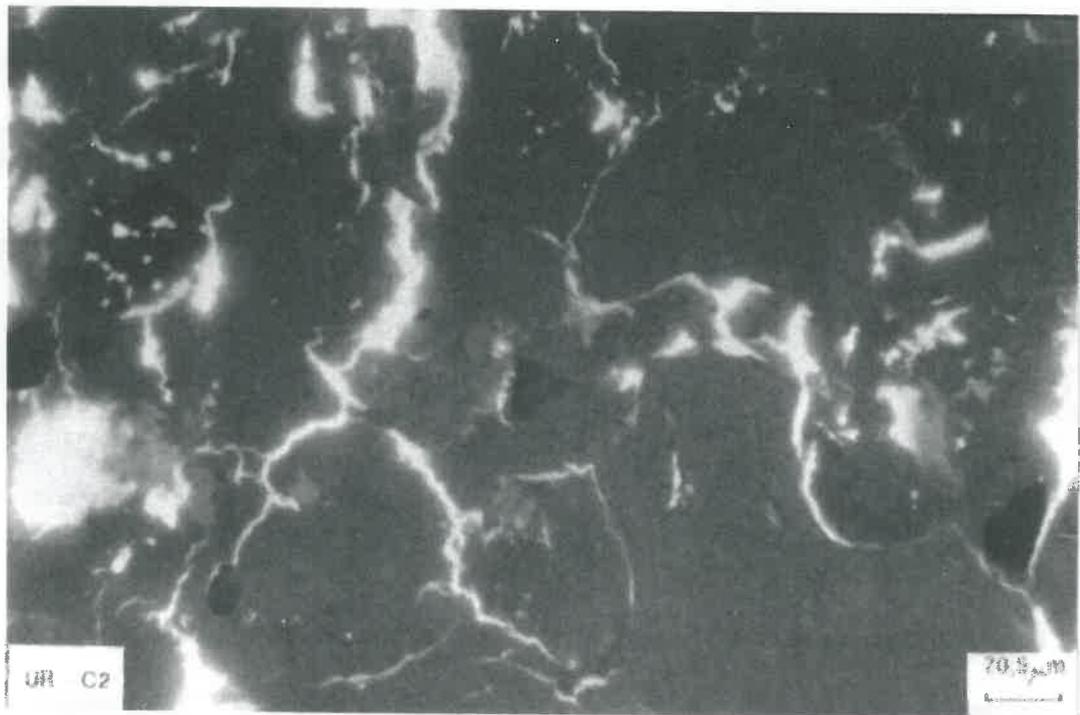


Figure 3.8: Microstructure “fissurale” (épifluorescence U.V.). Site de “l’Universidade Rural”.

Les proportions surfaciques entre vides, constituants grossiers et constituants fins sont respectivement de 20 – 30 %, 40 % et 30 – 40 %. Aucune différence concernant ces proportions n’a été relevée entre les différents échantillons.

Les deux types de vides présentent des proportions surfaciques proches, quels que soient les échantillons. Néanmoins, des différences existent à propos de la largeur des vides “planaires”. Ils sont les plus larges pour UR-P-1 et UR-C-2 (1500 à 1800  $\mu\text{m}$ ), de largeur intermédiaire pour UR-N-1 et UR-P-2 (400 à 900  $\mu\text{m}$ ) et les moins larges pour les autres échantillons (de l’ordre de 100  $\mu\text{m}$ ).

La taille des “cavités” est de l’ordre de quelques centaines de microns, quels que soient les échantillons. Quant à la répartition surfacique entre vides, constituants grossiers et constituants fins, elle est pour l’ensemble des échantillons de respectivement 30, 40 et 30 %, excepté pour UR-N-2 et UR-P-2 où elle est de 20, 40 et 70 %.

A noter que la prise en compte de l'orientation des lames indique que les vides "planaires" sont développés en majeure partie dans les plans horizontaux, c'est-à-dire qu'ils sont parallèles à la surface du sol.

### C) Conclusion

Les principales caractéristiques de l'organisation peuvent être représentées de la façon suivante :

SITE DE "CAMPOS"	SITE DE "L'UNIVERSIDADE RURAL"
phase minérale fine : jaune-rouge	phase minérale fine : rouge-jaune
quasi-absence de pores "planaires"	présence de pores "planaires"
"cavités" nombreuses	"cavités" moyennement nombreuses
vides "d'entassement" nombreux	quasi-absence de vides "d'entassement"
microstructure de deux types : à "entassement de grains" et en "éponge"	microstructure de type "complexe" associant microstructure en "éponge" et "fissurale"
organisation homogène (répartition des deux types de microstructure)	organisation homogène
porosité totale voisine de 20 %	porosité totale voisine de 30 %

Les sols des deux sites se distinguent nettement par des organisations de la phase minérale différentes. Au sein de chaque site, les différences sont plus difficiles à discuter. Pour le site de "Campos", à la différence du site de "l'Universidade Rural", nous avons pu relever des différences entre les échantillons, mais elles demeurent tenues. Quoi qu'il en soit, rappelons que notre objectif n'était pas ici de quantifier, dans l'absolu, certaines caractéristiques des échantillons, mais de les quantifier de façon relative pour comparer les organisations. Ce chapitre a surtout permis de visualiser et d'identifier les différents types d'organisation et de vides associés, qui seront étudiés quantitativement par la suite, notamment avec la porosimétrie à mercure.

## 3.4 Porosimétrie au mercure et géométrie de l'espace poral

### 3.4.1 Introduction

La porosimétrie par injection de mercure est une méthode d'analyse indirecte du milieu poreux (PELLERIN, 1980). Le mercure, comme tout liquide non mouillant, peut pénétrer dans le réseau poral d'un solide poreux sous l'effet d'une pression (VAN BRAKEL et al., 1981 ; MORDRY et al., 1981). Cette pénétration se fait dans les pores de diamètre de plus en plus petit lorsque la pression augmente (LOZET, 1972 ; VACHIER et al., 1979 ; FIES, 1984 ; LAWRENCE, 1978).

Cette technique a été très souvent utilisée pour analyser l'espace poral d'échantillons de sol (SILLS et al., 1974 ; LAWRENCE, 1977 ; CAMBIER et PROST, 1981 ; CHURCHMAN et PAYNE, 1983 ; BRUAND, 1985 ; GRIMALDI, 1986 ; COULON, 1988).

### 3.4.2 Méthodologie

La relation entre le diamètre d'un pore ( $D$ ) et la pression nécessaire ( $p$ ) pour que le mercure y pénètre est donnée par la relation :

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

$\gamma$  = tension superficielle du mercure

$\theta$  = angle de raccordement du ménisque à l'interface mercure – solide.

Les valeurs de  $\gamma$  et  $\theta$  sont respectivement  $0,484 \text{ Nm}^{-1}$  et  $130^\circ$  (FIES, 1984). L'appareil utilisé est un "MICROMIRITICS PORE SIZE 9310". Il permet d'étudier les pores de  $300 \mu\text{m}$  à  $7 \text{ nm}$  de diamètre.

La caractéristique du réseau poral qui est mesurée n'est pas le diamètre des pores ( $D$ ), mais leur diamètre de constriction ( $D_c$ ) au cours de la progression du mercure dans le réseau (VACHIER et al., 1979). Très souvent, l'analogie avec un réseau de pores cylindriques conduit à l'utilisation de la notion de diamètre équivalent ( $D_e$ ), que nous emploierons dans ce qui suit. Par ailleurs, selon la théorie de la percolation (RENAULT, 1988), l'image du système poral d'un échantillon est déformée puisque la possibilité que le mercure pénètre dans un pore de diamètre  $D_e$ , lorsque la pression  $p$  correspondant à  $D_e$  est atteinte, peut être très inférieure à 1.

Nous considérerons que le réseau poral des échantillons étudiés est hiérarchisé et va des pores de plus grande taille vers ceux de plus petite taille et que les effets décrits par la théorie de la percolation peuvent être négligés.

Des mottes de dimensions centimétriques (2 à 4 cm<sup>3</sup>) et séchées à l'air ont été étudiées après avoir comparé les courbes ainsi obtenues à celles, non différentes et plus difficiles à obtenir, d'échantillons de plus grande taille (5 à 8 cm<sup>3</sup>).

### 3.4.3 Résultats et discussion

Les résultats sont exprimés en cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>, car le poids sec est expérimentalement la grandeur mesurée avec le plus de précision (PELLERIN, 1980). Les courbes du volume poral cumulé en fonction de D<sub>e</sub> présentent toujours la même forme générale (fig. 3.9) où l'on distingue deux intrusions successives de mercure (fig. 3.10). La limite entre ces deux intrusions, et par conséquent entre les deux volumes poreux correspondants, est la valeur de D<sub>e</sub> pour laquelle la pente de la courbe cumulée est minimale (minimum de la courbe dérivée) (BRUAND et PROST, 1987).

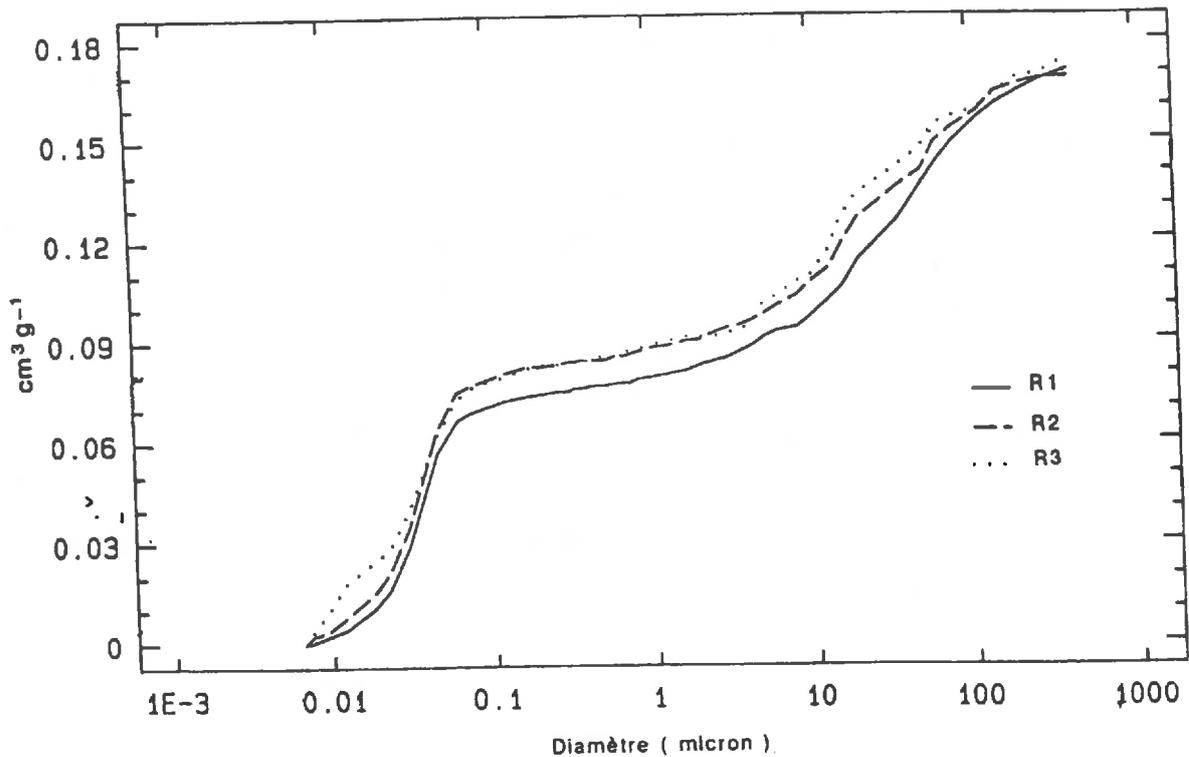


Figure 3.9: Courbe d'intrusion de mercure pour l'échantillon CP-P-1.(Trois répétitions R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub>).

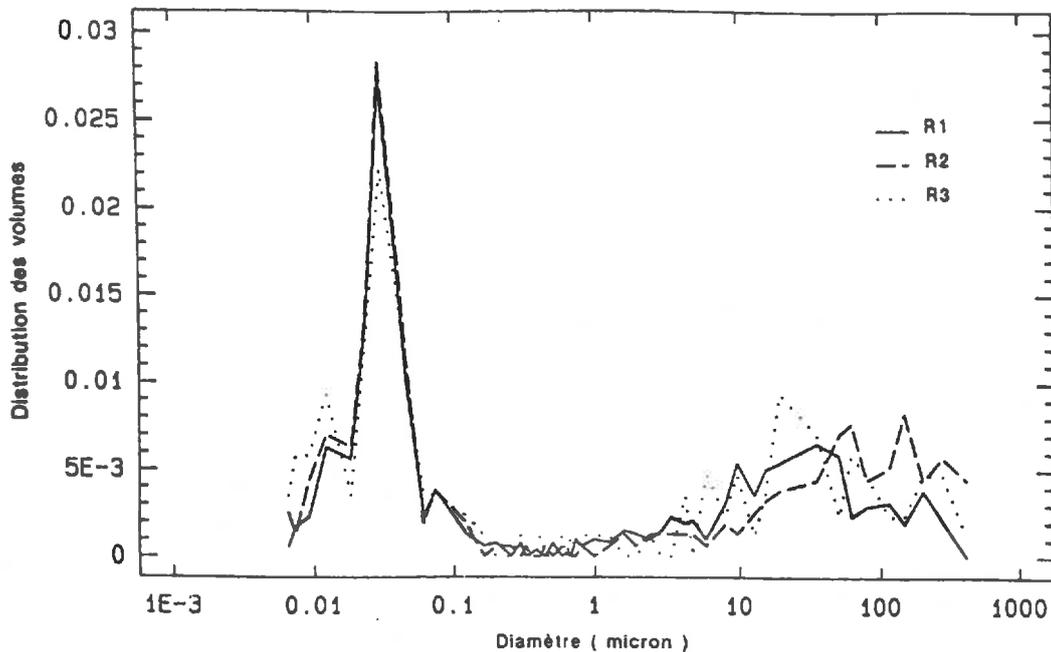


Figure 3.10: Intrusion de mercure. Courbe dérivée de la courbe du volume poral cumulé. (cf. Figure 3.9).

Pour l'ensemble des courbes, cette valeur de  $D_c$  a été prise à  $0,5 \mu\text{m}$ . Ainsi, nous distinguerons au sein du volume poral total ( $V_t$  [Hg]), le volume poral accessible à  $7 \text{ nm} < D_c < 0,5 \mu\text{m}$  et le volume poral accessible à  $0,5 < D_c < 300 \mu\text{m}$ .

Le premier volume est attribué aux pores développés par les particules d'argile ( $V_{\text{arg}}$  [Hg]) (DIAMOND, 1970). Le second correspond à un ensemble de pores pour l'essentiel d'origine structurale auxquels il faut ajouter des pores d'origine biologiques ( $V_{\text{str}}$  [Hg]). Ce deuxième ensemble de pores n'est que très partiellement pris en compte, en raison de la faible taille des mottes et des limites de la méthode pour les pores de grande taille (CAMBIER et PROST, 1981 ; BRUAND et PROST, 1987).

Trois répétitions ont été faites pour chaque horizon étudié et les différences observées sont très faibles (fig. 3.9). C'est pourquoi nous ne présenterons qu'un exemple graphique de ces trois répétitions et nous nous limiterons à reporter les valeurs moyennes. Avec les données de trois répétitions (tableau 3.2), nous avons fait l'analyse de variance pour  $V_t$  [Hg],  $V_{\text{arg}}$  [Hg] et  $V_{\text{str}}$  [Hg]. On a choisi, pour cette analyse, un schéma en factoriel qui permet d'étudier chaque source de variation et ses interactions pour chaque sol isolé. Notre objectif est ici de comparer les valeurs de  $V_t$  [Hg],  $V_{\text{arg}}$  [Hg] et  $V_{\text{str}}$  [Hg] entre les différents modes d'utilisation et les profondeurs.

**Tableau 3.2:** Données de l'intrusion de mercure : Volume poral total ( $V_t$  [Hg]), volume dû à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{arg}$  [Hg]) et volume poral structural ( $V_{str}$  [Hg]) ; moyenne de 3 répétitions.

(2A<sub>3</sub>)

Utilisations Soils et profondeurs		FORET			SOL NU			CANNE A SUCRE			PATURAGE		
		$V_t$	$V_{arg}$	$V_{str}$	$V_t$	$V_{arg}$	$V_{str}$	$V_t$	$V_{arg}$	$V_{str}$	$V_t$	$V_{arg}$	$V_{str}$
CAMPOS	PROF 1	0,174	0,062 (12) (23)	0,112				0,185	0,085 (21) (34)	0,100	0,171	0,083 (27) (33)	0,088
	PROF 2	0,182	0,91 (22) (37)	0,91				0,192	0,114 (31) (41)	0,078	0,183	0,091 (30) (38)	0,92
UNIV. RURAL	PROF 1				0,207	0,100 (30) (35)	0,107	0,211	0,112 (32) (39)	0,096	0,205	0,104 (31) (37)	0,101
	PROF 2				0,204	0,120 (41) (48)	0,084	0,205	0,116 (35) (42)	0,089	0,204	0,107 (36) (39)	0,097

Pour le site de "Campos", l'analyse de variance (tableaux 3.3, 3.4 et 3.5) montre qu'il y a des différences significatives en fonction de la profondeur, autant pour  $V_t$  [Hg] que pour  $V_{arg}$  [Hg]. Par contre, il n'y a pas de différence pour  $V_{str}$  [Hg] (tableau 3.5) quelles que soient les sources de variation testées.

**Tableau 3.3:** Analyse de variance (Site de "Campos"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_t$  [Hg]). Moyenne des 3 répétitions.

S.Variation	D.L.	S.C.E	C.M.	s	F
Total	17	1576			
Profondeur	1	364	364		6,26 *
Mode d'ut.	2	492	246		4,23 *
Prof.xM.d'ut.	2	21	10,5		< 1
Résidu	12	699	58,2	7,63	

CV% = 4,21

\* significatif au risque de 5%

**Tableau 3.4:** Analyse de variance (Site de "Campos"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_{\text{pr}}$  [Hg]). Moyenne des 3 répétitions.

S.Variation	D.L	S.C.E	C.M.	s	F
Total	17	5801			
Profondeur	1	2026	2026		11,82 **
Mode d'ut.	2	1365	682,5		3,98 *
Prof.xM.d'ut.	2	354	177		1,03
Résidu	12	2056	171,3	13,1	

CV% = 15,09

\* significatif au risque de 5%

\*\* " " " " 1%

**Tableau 3.5:** Analyse de variance (Site de "Campos"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume de l'argile ( $V_{\text{st}}$  [Hg]). Moyenne de 3 répétitions.

S.Variation	D.L	S.C.E	C.M.	s	F
Total	17	6015			
Profondeur	1	939	939		2,86
Mode d'ut.	2	445	222,5		< 1
Prof.xM.d'ut.	2	692	346		1
Résidu	12	3939	328	18,11	

CV% = 19,06

**Tableau 3.6:** Test de Tukey pour le volume poral total (site de Campos). Comparaison des modes d'utilisation.

Mode utilisation	Moyennes
Canne à sucre	188,5a
Foret	178,3ab
Pâturage	176,7b
Tukey 5% (p.p.d.s.)	11,7

Les lettres indiquent :

- même lettre : pas de différence significative au risque de 5%
- lettre différente : différence significative au risque de 5%
- p.p.d.s. : plus petite différence significative pour le test de Tukey au risque de 5%

Pour  $V_t$  [Hg], le test de Tukey permet de classer les résultats suivant un ordre de signification, alors que le test F ne classe seulement deux valeurs (selon GOMES, 1973) (tableau 3.6). Il montre que CP-C est supérieur à CP-P. Par contre  $V_t$  [Hg] n'est pas différent entre CP-C et CP-F, et  $V_t$  [Hg] pour ce dernier est égale à  $V_t$  [Hg] pour CP-P. Pour  $V_{arg}$  [Hg] (Tukey, tableau 3.7), CP-C est supérieur à CP-F et chacun des deux n'est pas différent de CP-P.

**Tableau 3.7:** Test de Tukey pour le volume poral de l'argile (Site de "Campos"). Comparaison des modes d'utilisation.

Mode utilisation	Moyennes
Canne à sucre	97,8a
Pâturage	86,8ab
Foret	76,5b
Tukey 5%	20,10

Pour le site de "l'Universidade Rural" (tableaux 3.8, 3.9 et 3.10), il n'existe des différence significative que pour  $V_{arg}$  [Hg] (tableau 3.9), qui est supérieur à la profondeur 2 à ce qu'il est pour la profondeur 1.

**Tableau 3.8:** Analyse de variance (Site de "l'Universidade Rural"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_t$  [Hg]). Moyenne des 3 répétitions.

S.Variation	D.L.	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	17	3282			
Profondeur	1	162	162		< 1
Mode d'ut.	2	190	95		< 1
P.xM.d'ut.	2	149	75		< 1
Résidu	12	2781	232	15,23	

CV% = 7,35

**Tableau 3.9:** Analyse de variance (Site de "l'Universidade Rural"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral de l'argile ( $V_{arg}$  [Hg]). Moyenne des 3 répétitions.

S.Variation	D.L.	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	17	1656			
Profondeur	1	365	365		5,53 *
Mode d'ut.	2	209	104		1,57
P.xM.d'ut.	2	291	146		2,21
Résidu	12	796	66	8,12	

CV% = 7,38

\* significatif au risque de 5%

**Tableau 3.10:** Analyse de variance (Site de "l'Universidade Rural"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral structural ( $V_{\text{str}} [\text{Hg}]$ ). Moyenne de 3 répétitions.

S.Variation	D.L.	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	17	5292			
Profondeur	1	1168	1168		3,53
Mode d'ut.	2	2	1		< 1
P.xM.d'ut.	2	151	76		< 1
Résidu	12	3972	331	18,2	

CV% = 18,95

### 3.5 Conclusion

Il est clair que, même si les différents horizons ont des densités apparentes similaires, ils ne possèdent pas le même type d'organisation de leurs constituants minéraux. A partir des observations en microscopie optique, nous avons montré la présence d'une juxtaposition de deux types de microstructure ("entassement de grains" et en "éponge") pour les échantillons du site de "Campos", et d'un seul type de microstructure ("complexe"-association "fissurale" et en "éponge") pour le site de "l'Universidade Rural".

Une autre différence importante existe entre les deux sites : les échantillons du site de "l'Universidade Rural" possèdent de nombreux pores planaires, ou fissures, formant un réseau de taille centimétrique, alors que ces pores sont absents pour les échantillons du site de "Campos".

La caractérisation du volume poral total ( $V_t$ ) à l'état déshydraté indique, comme le laissaient déjà penser les observations en microscopie optique, que celui-ci est plus élevé pour le site de "l'Universidade Rural" que pour celui de "Campos".

Il existe par ailleurs des différences de  $V_t$  en fonction de la profondeur et du mode d'utilisation au sein de chaque site. Néanmoins ces différences apparaissent être uniquement dues au volume poral résultant de l'assemblage des particules d'argile ( $V_{\text{arg}}$ ). En effet l'étude du volume poral structural ( $V_{\text{str}}$  égal à la différence entre  $V_t$  et  $V_{\text{arg}}$ ) en

porosimétrie au mercure n'a pas fait apparaître de variation de  $V_{str}$ , mais cette étude de  $V_{str}$  n'a été que partielle pour les grands pores. Par conséquent, il est clair que les différences de géométrie de l'espace poral sont au moins en partie dues aux différences de nature des constituants et non pas uniquement à des différences de mode d'organisation de ces constituants. Les données de cette analyse des modes d'organisation seront confrontées à celles de la caractérisation des constituants lors de la discussion générale.

## **Chapitre 4**

### **ETUDE DU COMPORTEMENT HYDRIQUE**

#### **4.1 Introduction**

L'analyse des modes d'organisation qui vient d'être effectuée l'a été à partir d'échantillons déshydratés. De la sorte, les données obtenues ne concernent la géométrie de l'espace poral que dans cet état d'hydratation particulier. Notre analyse doit donc être considérée comme étant très partielle. Pour la compléter, une analyse de la géométrie de l'espace poral des échantillons hydratés a été effectuée à partir de l'étude :

- des propriétés de rétention en eau ;
- des propriétés de retrait ;
- et de la conductivité hydraulique en saturé.

#### **4.2 Etude des propriétés de rétention en eau**

L'étude des propriétés de rétention en eau consiste en la détermination des quantités d'eau retenues par les échantillons lorsque l'on fait varier l'état énergétique de l'eau. Les résultats obtenus sur un échantillon sont utilisés pour construire la courbe de rétention en eau, ceci en portant les quantités d'eau retenue en fonction de l'état énergétique de l'eau. Ces courbes pourront être utilisées pour discuter de la géométrie de l'espace poral puisque l'on peut établir, à l'aide de la loi de JURIN, une relation entre une valeur de l'état énergétique de l'eau et une valeur de diamètre de pore équivalent.

##### **4.2.1 Méthodologie**

Les horizons étudiés ont été échantillonnés à l'aide de l'extracteur de UHLAND (1949). Pour chaque prélèvement, nous avons mis dans l'extracteur 3 anneaux de 116,9 cm<sup>3</sup> (soit 7,62 cm de diamètre pour 2,56 cm de hauteur). Le cylindre de sol ainsi prélevé a été

coupé au laboratoire à l'aide d'un fil d'acier en trois sous-cylindres de 116,9 cm<sup>3</sup>. On pourra ainsi discuter l'éventuelle présence d'un gradient de comportement au sein de chaque horizon. Par ailleurs, en divisant la hauteur des échantillons, on évitait l'influence du potentiel gravitaire de l'eau pour les faibles valeurs de potentiel.

Pour fixer l'état énergétique de l'eau, les cylindres ont été soumis à des pressions pneumatiques. Par la suite, l'état énergétique de l'eau sera exprimé à l'aide de la notation  $pF$  qui est le logarithme décimal de la pression exprimée en 10<sup>2</sup> Pa (hPa). Un dispositif à membrane 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 1000 hPa.

Les cylindres sont tout d'abord saturés sous vide (trompe à eau) pendant 24 h. Ils sont ensuite placés sur de la kaolinite préalablement amenée à  $pF=1,0$ . Cette kaolinite assure la continuité de l'eau entre le cylindre de sol et la membrane du dispositif. Les cylindres ont été soumis à des pressions croissantes de 10, 30, 60, 100, 320 et 1000 hPa (respectivement  $pF = 1,0, 1,5, 1,78, 2,0, 2,5$  et  $3,0$ ).

Pour les valeurs de pression étudiées, nous avons vérifié que la perte de masse était inférieure à 1g à partir de 5 jours. C'est pourquoi les cylindres ont été mis en équilibre pendant une période légèrement supérieure à cette durée (7 jours) pour chaque valeur de pression. 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 (présence de kaolinite à la base).

Lorsque l'équilibre est atteint à 1000 hPa ( $pF = 3,0$ ), le cylindre est pesé, puis séché à 105°C pendant 24 h de façon à déterminer sa masse sèche. Les quantités d'eau retenue pour chaque valeur de pression sont ensuite calculées.

La quantité d'eau retenue à la pression de 60 hPa a été déterminée, car cette valeur de pression est considérée comme étant une valeur limite. A 60 hPa, le volume poral occupé par l'air représente ce que l'on appelle au Brésil la macroporosité, et celui occupé par l'eau représente par conséquent la microporosité (GROHMANN 1960 ; OLIVEIRA et al., 1968). La quantité d'eau retenue à 60 hPa est aussi considérée comme étant la donnée de laboratoire qui se rapproche le plus de la capacité de rétention au champ (FERREIRA et MARCOS, 1983).

Nous avons déterminé la courbe de rétention en eau avec des échantillons non perturbés jusqu'à seulement 1000 hPa ( $pF = 3,0$ ). En effet, pour des sols semblables à ceux que nous étudions, il n'y a pas de différence de teneur en eau entre des échantillons de différente taille pour  $pF > 3,0$  (MARCOS, 1968). Pour déterminer les quantités d'eau retenues pour  $pF > 3,0$ , nous avons utilisé des échantillons de terre séchée à l'air et tamisée

à 2 mm. Les déterminations sont alors beaucoup plus faciles à réaliser. Pour les pressions de  $2 \cdot 10^3$ ,  $3 \cdot 10^3$  et  $5 \cdot 10^3$  hPa, nous avons utilisé un dispositif à plaque poreuse et pour les pressions de  $10^4$  et  $1,6 \cdot 10^4$  hPa, un dispositif à membrane de RICHARDS (1947).

Pour les sols de “Campos”, des éléments grossiers de taille supérieure à 2 mm sont présents de manière significative dans les cylindres. Un calcul correctif a été fait pour en tenir compte et rendre homogène les valeurs obtenues à partir de la terre tamisée à 2 mm à celle obtenue à partir des anneaux.

#### **4.2.2 Résultats**

Les teneurs en eau ont été exprimées en  $\text{cm}^3$  d'eau par gramme de sol sec à  $105^\circ\text{C}$ . On a opté pour ce mode d'expression, car les exprimer en  $\Theta$  (% d'eau volumique) ou en indice d'eau, impliqueraient d'autres déterminations comme la densité apparente et la densité réelle. Or, pour la densité apparente, les cylindres n'étant pas totalement remplis par le sol, ils ne peuvent pas être utilisés pour estimer la densité apparente.

Pour la densité réelle (obtenue par la pycnométrie à gaz), elle a été déterminée avec 5 répétitions, mais à partir d'un seul échantillonnage. Dans ces deux cas, on ajoutait donc de nouvelles sources d'erreurs dans les données expérimentales. Les résultats obtenus avec les deux types d'échantillons “cylindre” et “terre tamisée” ont été portés dans le même graphique pour construire les courbes de rétention en eau (figs. 4.1 et 4.2).

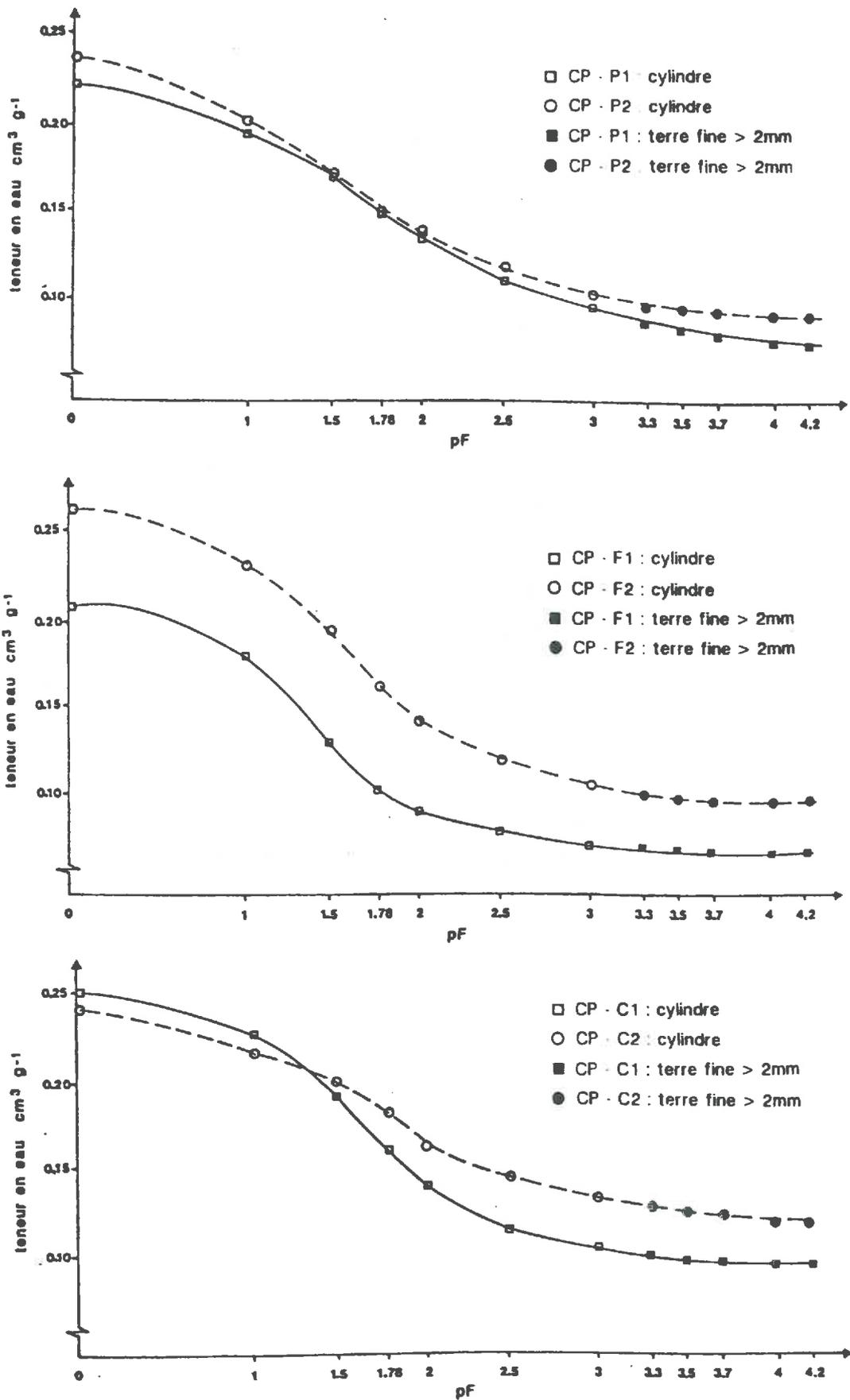


Figure 4.1: Courbes de rétention en eau au cours de la déshydratation. Site de "Campos".

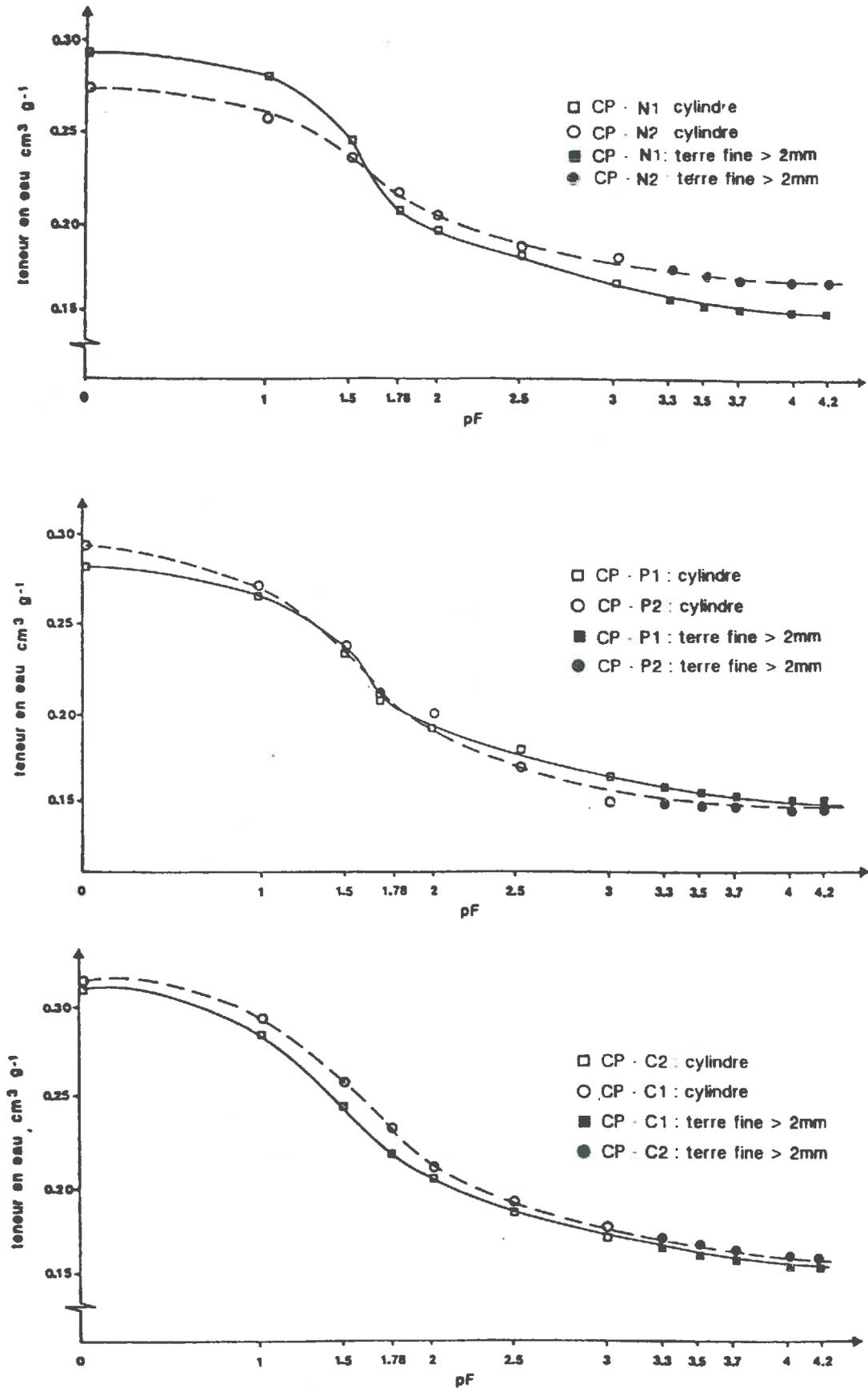


Figure 4.2: Courbes de rétention en eau au cours de la déshydratation. Site de "l'Universidade Rural".

Les valeurs de teneur en eau obtenues à  $pF = 3,0$  avec les cylindres et la terre tamisée à 2 mm ne sont pas différentes (tableau 4.1).

**Tableau 4.1:** Comparaison à  $pF=3,0$  des teneurs en eau de cylindres (C) et de la terre tamisée à 2mm (TF).

Utilisations Sols et profondeurs		FORET		SOL NU		CANNE A SUCRE		PATURAGE	
		C	TF	C	TF	C	TF	C	TF
CAMPOS	PROF 1	0,074	0,078			0,110	0,114	0,092	0,097
	PROF 2	0,108	0,108			0,138	0,144	0,105	0,103
UNIV. RURAL	PROF 1			0,161	0,160	0,167	0,153	0,172	0,175
	PROF 2			0,187	0,190	0,152	0,156	0,178	0,177

Compte tenu des valeurs des écarts type pour chaque valeur moyenne calculée (6 répétitions), les différences entre les courbes correspondant aux profondeurs 1 et 2 d'une même situation sont difficilement interprétables. C'est pourquoi nous allons discuter ces résultats à partir de leur analyse de variance.

### 4.2.3 Discussion

Nous allons tout d'abord nous intéresser aux 3 valeurs obtenues à partir des anneaux de 116,9 cm<sup>3</sup>. Cette analyse ne concernera que les valeurs obtenues pour les cylindres jusqu'à  $pF = 3,0$ .

#### A) Homogénéité des horizons échantillonnés

Notre objectif est ici de discuter s'il existe un gradient de comportement au sein de chaque horizon échantillonné.

Pour analyser les résultats, nous avons utilisé un dispositif expérimental en "split-plot" (parcelles sous-divisées). Les 3 anneaux provenant d'un même cylindre correspondent

bien à des sous parcelles. Le dispositif en factoriel nécessiterait que ces anneaux aient été prélevés au hasard, ce qui n'est pas le cas.

L'analyse de variance a été faite pour chaque valeur de pF individuellement. Les résultats simplifiés de cette analyse sont donnés dans le tableau 4.2. Seules les valeurs obtenues pour le test F et les coefficients de variation sont présentés.

**Tableau 4.2:** Analyse de variance résumée. Influence des couches dans chaque horizon aux différents pF.

S.Variation	Saturé	pF = 1,0	pF = 1,5	pF = 1,78	pF = 2,0	pF = 2,5	pF = 3,0
Traitement	17,41 <sup>**</sup>	27,18 <sup>**</sup>	33,22 <sup>**</sup>	32,02 <sup>**</sup>	37,41 <sup>**</sup>	46,59 <sup>**</sup>	71,40 <sup>**</sup>
Blocs	1,43	2,59	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Couches	< 1	2,68	1,45	2,68	3,08	2,48	< 1
Cou.xTrait.	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
CV% (a)	3,18	3,04	3,14	3,75	3,84	3,74	3,22
CV% (b)	4,56	4,88	5,79	4,21	4,21	4,34	4,94

<sup>\*\*</sup> significatif au risque de 1%

a) - coefficient de variation pour les parcelles

b) - " " " " sous-parcelles

Les anneaux dans un même horizon ne présentent pas de différences significatives, et ceci indépendamment des traitements.

Ceci 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. Celle-ci consistera en une nouvelle analyse de variance où sera discuté le rôle de toutes les sources de variations intervenant dans notre étude (traitements et pressions appliqués).

## B) Propriétés de rétention en eau et traitements appliqués

Les valeurs moyennes sont présentées dans le tableau 4.3. Pour discuter les résultats, il est nécessaire de réaliser une analyse de variance. Nous avons utilisé une nouvelle fois le dispositif en "split-plot". Les traitements (combinaison sol – mode d'utilisation – profondeur) correspondent aux parcelles et les valeurs de pF aux sous-parcelles (tableau 4.4).

**Tableau 4.3:** Teneurs en eau ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) aux différentes valeurs de pF (ST : état saturé).

	ST	1,0	1,5	1,78	2,0	2,5	3,0
<b>CP - P.1</b>	0,225	0,198	0,178	0,158	0,135	0,112	0,098
<b>CP - P.2</b>	0,240	0,203	0,174	0,152	0,136	0,121	0,105
<b>CP - F.1</b>	0,208	0,189	0,129	0,102	0,093	0,083	0,074
<b>CP - F.2</b>	0,262	0,229	0,197	0,159	0,144	0,123	0,108
<b>CP - C.1</b>	0,254	0,230	0,185	0,154	0,141	0,118	0,110
<b>CP - C.2</b>	0,245	0,217	0,202	0,191	0,164	0,150	0,138
<b>UR - N.1</b>	0,298	0,279	0,250	0,210	0,202	0,186	0,161
<b>UR - N.2</b>	0,278	0,261	0,242	0,224	0,208	0,190	0,187
<b>UR - P.1</b>	0,286	0,270	0,240	0,207	0,197	0,181	0,167
<b>UR - P.2</b>	0,297	0,275	0,240	0,212	0,202	0,173	0,152
<b>UR - C.1</b>	0,317	0,292	0,247	0,222	0,208	0,190	0,172
<b>UR - C.2</b>	0,319	0,302	0,263	0,224	0,215	0,196	0,178

**Tableau 4.4:** Analyse de variance. Teneur en eau en fonction du pF. Pour les deux sites, pour les deux profondeurs et pour les modes d'utilisation.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M	s	F
Total des parcelles	35	345499			
Traitement	11	329855	29986		45,70 <sup>**</sup>
Bloc	2	1213	606		< 1
Résidu (a)	22	14431	656	25,70	
Total des sous-parcelles	251	880268			
Total des parcelles	35	345499			
Tension(pF)	6	511236	85206		1398 <sup>**</sup>
Int.pFxTrait.	66	14759	223		3,70 <sup>*</sup>
Résidu (b)	144	8774	60,93	7,80	

CV(a)% = 13,06

CV(b)% = 3,98

<sup>\*\*</sup> significatif au risque de 1%

<sup>\*</sup> " " " " 5%

#### a) Comparaison des parcelles (traitements)

Les premiers résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 4.4. Au niveau des parcelles, on observe une haute signification (1 % pour les traitements à la suite du test F). Pour mieux comparer les traitements, nous avons décomposé les 11 degrés de liberté de la manière indiquée dans le tableau 4.5. Cette décomposition indique que les teneurs en eau des horizons prélevés sur le site de "l'Universidade Rural" sont supérieures à celle des horizons prélevés dans le site de "Campos" et ceci indépendamment des modes d'utilisations, de la profondeur et de toutes les valeurs de pF testées comme l'indique le tableau 4.3.

**Tableau 4.5:** Décomposition des 11 degrés de liberté de traitements (sites, profondeurs et modes d'utilisation).

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	s	F
Traitement	11	329855			
Sols	1	276809	276809		421,90 * *
Prof. CP	1	16802	16802		25,60 * *
Mode CP	2	17664	8832		13,50 * *
P.xM. CP	2	11373	5686		8,70 * *
Prof. UR	1	254	254		< 1
Mode UR	2	6653	3326		5,10*
P.xM. UR	2	300	150		< 1
Résidu (a)	22	14431	656	25,61	

\* \* significatif au risque de 1%

\* " " " " 5%

Pour le site de “Campos”, la signification de l’interaction profondeur-mode d’utilisation indique que les profondeurs 1 et 2 ont un comportement (rétention en eau) différent en fonction du mode d’utilisation. Du fait de cette non uniformité, nous avons décomposé encore les degrés de liberté correspondant à de l’interaction profondeur-mode d’utilisation . Ceci permet d’analyser le comportement de la source de variation profondeur dans chaque mode d’utilisation (tableau 4.6).

**Tableau 4.6:** Décomposition des degrés de liberté de l’interaction (profondeurs-modes d’utilisation). Comparaison des profondeurs dans chaque mode d’utilisation (Site de “Campos”).

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	s	F
Prof dans F.	1	25210	25210		38,42 * *
Prof dans P.	1	164	165		< 1
Prof dans C.	1	2801	2801		4,27*
Résidu (a)	22	14431	656	25,61	

\* \* significatif au risque de 1%

\* - - - - 5%

On observe que pour la situation CP-P, nous n’avons pas de différence de teneur en eau entre les profondeurs 1 et 2. Par contre, CP-F-2 présente une teneur en eau supérieure

(forte signification) à celle de CP-F-1. Pour CP-C, on note une faible signification (5 %) indiquant que la profondeur 2 a une teneur en eau plus élevée que la profondeur 1.

Pour comparer les modes d'utilisation, nous avons eu besoin d'appliquer le test de Tukey. Celui-ci permet de comparer les valeurs moyennes de plus de deux traitements (GOMES, 1973), alors que le test F ne compare que deux valeurs. A la suite de ce test (tableau 4.7), on observe que la situation CP-C présente une teneur en eau moyenne (toutes valeurs de pF confondues) supérieure à celle des situations CP-P et CP-F. Ces deux derniers modes d'utilisation ne présentent pas de différence significative entre eux.

**Tableau 4.7:** Test de Tukey pour la teneur en eau (Site de "Campos"). Comparaison des modes d'utilisation.

Traitement	Moyennes
Canne à sucre	178,5a
Pâturage	159,5b
Forêt	150,0b
Tukey 5%	14,1

Pour le site "l'Universidade Rural" on n'observe de différence significative qu'entre les modes d'utilisation. La comparaison des moyennes à l'aide du test de Tukey (tableau 4.8), indique que la teneur en eau pour UR-C est égale à celle enregistrée pour UR-N et supérieure à celle enregistrée pour UR-P. En effet, car ces deux derniers (UR-N et UR-P) ne présentent pas de différence significative entre eux.

**Tableau 4.8:** Test de Tukey pour la teneur en eau (Site de "l'Universidade Rural"). Comparaison des modes d'utilisatio

Traitement	Moyennes
Canne à sucre	238,7a
Sol nu	226,8ab
Pâturage	221,3b
Tukey	14,1

*b) Comparaison de sous-parcelles (différentes valeurs de pF)*

Nous allons discuter maintenant les teneurs en eau pour les différentes valeurs de pF. La signification enregistrée pour les pF était attendue, puisque en augmentant la pression la teneur en eau diminue. L'uniformité de cette diminution dépend de la géométrie du système poral et la signification de l'interaction pF – traitements indique qu'il y a des variations (diminution de la teneur en eau) en fonction des sources de variation testées dans les sous-parcelles (modes d'utilisation et profondeurs).

Pour étudier le rôle de la pression appliquée dans chaque traitement et comparer les traitements dans chaque pF, on a décomposé les degrés de liberté de l'interaction de deux manières : les pF dans chaque traitement et les traitements dans chaque pF, puis on a appliqué le test de Tukey (tableaux 4.9, 4.10 et 4.11).

**Tableau 4.9:** Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des différents états hydriques dans chaque traitement.

Traitement	Saturé	pF = 1,0	pF = 1,5	pF = 1,78	pF = 2,0	pF = 2,5	pF = 3,0
CP - P.1	224,7a	198,0b	177,8c	157,7d	135,5e	111,7f	97,7f
CP - P.2	239,0a	202,7b	174,0c	152,3d	136,3de	121,0ef	105,5f
CP - F.1	208,0a	189,3a	128,7b	102,3c	93,3cd	83,3cde	73,7e
CP - F.2	262,0a	229,0b	197,0c	158,7d	143,7d	123,0e	108,0e
CP - C.1	254,3a	229,0b	185,3c	154,3d	141,0d	118,3e	109,7e
CP - C.2	245,3a	217,3b	201,7bc	191,0c	163,7d	150,0de	137,7e
UR - N.1	297,7a	278,6a	249,3b	209,3c	202,0c	186,3d	161,0e
UR - N.2	278,3a	261,0ab	242,0bc	224,0cd	207,7de	190,7ef	187,0f
UR - P.1	286,0a	270,7a	239,3b	206,7c	197,3c	181,3d	166,3e
UR - P.2	297,3a	275,0b	239,6c	211,7d	201,7d	173,3e	152,0f
UR - C.1	317,3a	291,7b	246,7c	221,7de	207,7ef	189,7fg	171,3g
UR - C.2	319,0a	301,7a	263,0b	224,3cd	214,7de	196,0ef	177,7f

Tukey 5% = 19,1

**Tableau 4.10:** Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des profondeurs 1 et 2 à chaque état hydrique et chaque mode d'utilisation.

Traitement	Saturé	pF = 1,0	pF = 1,5	pF = 1,78	pF = 2,0	pF = 2,5	pF = 3,0
CP - P.1	224,7a	198,0a	177,8a	157,7a	135,5a	111,7a	97,7a
CP - P.2	239,0a	202,7a	174,0a	152,5a	136,3a	121,0a	105,0a
CP - F.1	208,0b	189,3b	128,7b	102,3b	93,3b	83,3b	73,7b
CP - F.2	262,0a	229,0a	197,0a	158,7a	143,7a	123,0a	108,0a
CP - C.1	254,3a	229,0a	185,3a	154,3b	141,0a	118,3a	109,7a
CP - C.2	245,3a	217,3a	201,7a	191,0a	163,7a	150,0a	137,7a
UR - N.1	297,7a	278,6a	249,3a	209,3a	202,0a	186,3a	161,0a
UR - N.2	278,3a	261,0a	242,0a	224,0a	207,7a	190,7a	187,0a
UR - P.1	286,0a	270,7a	239,3a	206,7a	197,3a	181,3a	166,3a
UR - P.2	297,3a	275,0a	239,6a	211,7a	201,7a	173,3a	152,0a
UR - C.1	317,3a	291,7a	246,7a	221,7a	207,7a	189,7a	171,3a
UR - C.2	319,0a	301,7a	263,0a	224,3a	214,7a	196,0a	177,7a

Tukey 5% = 31,8

**Tableau 4.11:** Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des modes d'utilisation à chaque profondeur et chaque état hydrique.

Traitement	Saturé	pF = 1,0	pF = 1,5	pF = 1,78	pF = 2,0	pF = 2,5	pF = 3,0
CP - P.1	224,7ab	198,0ab	177,8a	157,7a	135,5a	111,7a	97,7a
CP - F.1	208,0b	189,3b	128,7b	102,3b	93,3b	83,3a	73,7a
CP - C.1	254,3a	229,0a	185,3a	154,3a	141,0a	118,3a	109,7a
UR - N.1	297,7a	278,6a	249,3a	209,3a	202,0a	186,3a	161,0a
UR - P.1	286,0a	270,7a	239,3a	206,7a	197,3a	181,3a	166,3a
UR - C.1	317,3a	291,7a	246,7a	221,7a	207,7a	189,7a	171,3a
CP - P.2	239,0a	202,7a	174,0a	152,5a	136,3a	121,0a	105,0a
CP - F.2	262,0a	229,0a	197,0a	158,7a	143,7a	123,0a	108,0a
CP - C.2	245,3a	217,3a	201,7a	191,0a	163,7a	150,0a	137,7a
UR - N.2	278,3b	261,0b	242,0a	224,0a	207,7a	190,7a	187,0a
UR - P.2	297,3ab	275,0ab	239,6a	211,7a	201,7a	173,3a	152,0a
UR - C.2	319,0a	301,7a	263,0a	224,3a	214,7a	196,0a	177,7a

Tukey 5% = 38,5

Lors de l'application du test de Tukey pour comparer les valeurs moyennes de teneur en eau des 12 traitements prélevés (parcelles), nous avons utilisé l'écart type du résidu "a" ( $s_a$ ). Pour tester la source de variation pF pour chaque traitement donné, on a utilisé l'écart type du résidu "b" ( $s_b$ ). Cependant pour tester la source de variation traitement (parcelles) à un pF donné, il faut utiliser de manière simultanée les écarts types et les degrés de liberté des deux résidus ("a" et "b"). L'écart type utilisé est alors calculé avec la relation suivante :

$$s' = (s_a^2 + s_b^2) / 2$$

Pour calculer les nouveaux degrés de liberté et utiliser le tableau de Tukey, on utilisera l'estimation proposé par SATTERTHWAITTE (cité par GOMES, 1973) où :

$$n' = [(s_a^2 + s_b^2)^2] / [(s_a^2/n_a) + (s_b^2/n_b)]$$

Avec ces nouveaux écarts types et degrés de liberté, on utilise alors la formule de Tukey :

$$\Delta = q (s'/r)$$

Dans ce cas :  $q = n/n'$ , avec,  $n$ =nombre de moyennes que l'on veut tester.

$n_a$  = degré de liberté des résidus "a"

$n_b$  = degré de liberté du résidu "b"

$n'$  = nouvelle valeur de degré de liberté estimée par la formule présentée ci-avant ;

$s'$  = est le nouvel écart type et

$r$  = nombre de répétitions utilisées pour obtenir la moyenne que l'on veut tester.

La plus petite différence significative (p.p.d.s.) obtenue est ici plus élevée que précédemment. Les comparaisons de moyennes, sont faites par conséquent, avec une sensibilité inférieure.

### *c) Signification des courbes de rétention en eau sur la base de données statistiques*

On utilisera les résultats des comparaisons faites dans les tableaux 4.9, 4.10 et 4.11 pour discuter de façon synthétique les courbes de rétention en eau (figs. 4.1 et 4.2). Cette discussion ne concerne que les teneurs en eau pour  $pF < 3$  et par conséquent uniquement la partie des courbes pour  $pF < 3$ .

CP-P-1 (fig. 4.1) présente une perte en eau significative jusqu'à  $pF = 2,5$ , où la teneur en eau n'est pas significativement différente de celle à  $pF = 3,0$  (tableau 4.9). CP-P-2 (fig. 4.1) présente une perte en eau significative jusqu'à  $pF=1,78$  puis la perte en eau est moins marquée (tableau 4.9). La comparaison de CP-P-1 et CP-P-2 (tableau 4.10) a montré que les courbes peuvent être considérées comme semblables dans toute la gamme de  $pF$  concernée par notre analyse.

CP-F-1 (fig. 4.1) présente une perte en eau très marquée entre  $pF=1$  et  $pF=1,78$ . Ensuite les pertes en eau sont beaucoup plus faibles (tableau 4.9). Pour CP-F-2 (fig. 4.1), la perte en eau est significative jusqu'à  $pF=1,78$  où la teneur en eau n'est pas différente de celle à  $pF=2,0$ . La perte en eau est ensuite significative (tableau 4.9). Quant à la comparaison des courbes de CP-F-1 et CP-F-2 (tableau 4.10), elle a montré que les courbes sont différentes avec la teneur en eau de CP-F-2 supérieure à celle de CP-F-1.

CP-C-1 (fig. 4.1) présente une perte significative jusqu'à  $pF=1,78$  (tableau 4.9), où la teneur en eau n'est pas différente de celle à  $pF=2,0$ . Ensuite la perte en eau est de nouveau significative. Pour CP-C-2 (fig. 4.1) la perte en eau la plus marquée se produit entre  $pF=1,78$  et  $2,0$ . Quand on compare CP-C-1 et CP-C-2 (tableau 4.10), la teneur en eau n'est significativement différente qu'à  $pF=1,78$ .

Ainsi, pour le site de “Campos”, les courbes de rétention en eau ne sont pas différentes pour les trois modes d’utilisation à la profondeur 2. Les variations de géométrie de l’espace poral sont par conséquent les mêmes lors de la dessiccation (TESSIER, 1984 ; BRUAND, 1986). Pour la profondeur 1, la teneur en eau enregistrée pour CP-C est supérieure à celle de CP-F ; jusqu’à  $pF=2,5$ . Les teneurs en eau de CP-C-1 et CP-P-1 sont égales pour toutes les valeurs de  $pF$  (tableau 4.11).

Pour le site de “l’Universidade Rural”, les courbes de rétention en eau sont (fig. 4.2) toutes semblables. La remarque faite à propos de la profondeur 2 de “Campos” s’applique donc aussi aux échantillons de “l’Universidade Rural”. Cependant, quand le mode d’utilisation canne à sucre est testé en prenant l’ensemble des deux profondeurs, celui-ci présente une teneur en eau légèrement supérieure (faible signification) à celle du mode d’utilisation pâturage.

## **4.3 Les propriétés de retrait**

### **4.3.1 Introduction**

On ne trouve pas de données dans la littérature brésilienne concernant les propriétés de retrait-gonflement des sols où la kaolinite et les oxy-hydroxydes de fer sont associés. Ces sols étant considérés comme ne présentant pas de gonflement – retrait, celui-ci n’est généralement pas mesuré. Or, pour que les courbes de rétention en eau puissent être utilisées pour discuter de l’espace poral, il faut savoir si les pores se déforment lorsque l’état énergétique de l’eau varie.

A ce propos, rappelons que l’étude des lames minces a montré la présence de fissures pour le site de “l’Universidade Rural” et leur absence pour ce site de “Campos”. Il semble donc bien que les phénomènes de retrait ainsi caractérisés seraient absents des échantillons du site de “Campos”.

Dans le cadre des travaux pratiques du cours de physique du sol, CARVALHO (1974) a étudié les propriétés de retrait de sols de type “podzólico vermelho amarelo” (PVA) et “terra roxa estruturada”. Les valeurs obtenues indiquent selon CARVALHO (1974) que le retrait est non significatif. Cependant, CHAUVEL (1977) a montré que les sols rouges de “Casamance” (ferrallitiques) présentent un gonflement potentiel faible dans le cas d’agrégats naturels (micronodules) constitués d’argile “cimentée” par des oxyhydroxydes de fer. Le gonflement peut en effet aller jusqu’à 11,2 % (par rapport au

volume initial) pour l'argile dispersée après des traitements chimiques appropriés et jusqu'à 12,4 % pour l'argile dispersable dans l'eau. Or, nous avons montré dans la partie concernant la granulométrie des échantillons que les sols étudiés possédaient beaucoup d'argile dispersable par agitation dans l'eau.

### 4.3.2 Méthodologie

Nous avons mesuré les variations de volume massique ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) en utilisant la méthode où l'on détermine le volume de pétrole déplacé (MONNIER et al., 1973). Des mottes d'environ 3 cm de diamètre sont utilisées. Chaque valeur moyenne de volume massique est obtenue à partir de 8 mottes. L'analyse statistique a été faite en ne considérant que les mottes 5 dont le volume massique était le plus proche de la valeur moyenne.

Nous avons mesuré le volume massique pour 4 états hydriques différents : saturation (vide crée par une trompe à eau pendant 24 h),  $\text{pF}=3,0$  (cellule à pression pneumatique et plaque poreuse),  $\text{pF} = 4,2$  (cellule à pression pneumatique et membrane cellulosique) et dessiccation à  $105^\circ\text{C}$  (étuve pendant 24 h).

### 4.3.3 Résultats et discussion

Les valeurs de volume massique, densité apparente et teneur en eau sont reportés dans les tableaux 4.12, 4.13 et 4.14. La représentation graphique du retrait des mottes (fig. 4.3) et l'analyse de variance montrent que :

– pour le site de “Campos” (tableau 4.15), il n'y a pas de différence significative de volume massique lorsque la teneur en eau varie, et ceci indépendamment du mode d'utilisation et de la profondeur. L'unique différence significative révélée par l'analyse de variance concerne les modes d'utilisation. Les modes CP-C et CP-P présentent un volume massique plus grand que CP-F (tableau 4.16).

– en revanche, pour le site de “l'Universidade Rural” il se produit des différences significatives de volume massique lorsque la teneur en eau varie (tableau 4.17). Le volume massique à saturation est supérieur à celui à  $\text{pF}=3,0$ . Le volume massique à  $\text{pF}=3,0$  n'est pas significativement différent de celui à  $\text{pF}=4,2$ . Enfin, le volume massique à  $\text{pF}=4,2$  est supérieur à celui à  $105^\circ\text{C}$  (tableau 4.18).

**Tableau 4.12:** Volume massique ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en fonction de l'état hydrique des mottes.

	ST	pF = 3	pF = 4,2	sec 105 C °
CP - P.1	0,590	0,587	0,583	0,586
CP - P.2	0,587	0,585	0,583	0,582
CP - F.1	0,579	0,585	0,573	0,571
CP - F.2	0,576	0,570	0,569	0,571
CP - C.1	0,585	0,585	0,587	0,580
CP - C.2	0,583	0,584	0,584	0,579
UR - N.1	0,636	0,607	0,608	0,572
UR - N.2	0,636	0,613	0,611	0,573
UR - P.1	0,616	0,598	0,608	0,559
UR - P.2	0,616	0,598	0,611	0,559
UR - C.1	0,658	0,635	0,630	0,595
UR - C.2	0,662	0,635	0,632	0,587

**Tableau 4.13:** Densité apparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en fonction de l'état hydrique des mottes.

	ST	pF = 3	pF = 4,2	sec 105 C °
CP - P.1	1,70	1,70	1,71	1,71
CP - P.2	1,70	1,71	1,71	1,72
CP - F.1	1,73	1,74	1,74	1,75
CP - F.2	1,74	1,75	1,76	1,75
CP - C.1	1,71	1,71	1,70	1,73
CP - C.2	1,72	1,71	1,71	1,73
UR - N.1	1,57	1,65	1,64	1,75
UR - N.2	1,57	1,63	1,64	1,75
UR - P.1	1,62	1,67	1,67	1,79
UR - P.2	1,62	1,67	1,67	1,79
UR - C.1	1,52	1,58	1,59	1,70
UR - C.2	1,51	1,57	1,58	1,70

Tableau 4.14: Teneur en eau (cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>) en fonction de l'état hydrique des mottes.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET			SOL NU			CANNE A SUCRE			PATURAGE		
		Sat	pF = 3,0	pF = 4,2	Sat	pF = 3,0	pF = 4,2	Sat	pF = 3,0	pF = 4,2	Sat	pF = 3,0	pF = 4,2
CAMPOS	PROF 1	0,210	0,075	0,066				0,263	0,130	0,096	0,219	0,101	0,079
	PROF 2	0,249	0,101	0,078				0,259	0,138	0,115	0,226	0,103	0,095
UNIV. RURAL	PROF 1				0,295	0,165	0,136	0,309	0,170	0,131	0,291	0,151	0,123
	PROF 2				0,293	0,185	0,157	0,316	0,174	0,118	0,293	0,153	0,125



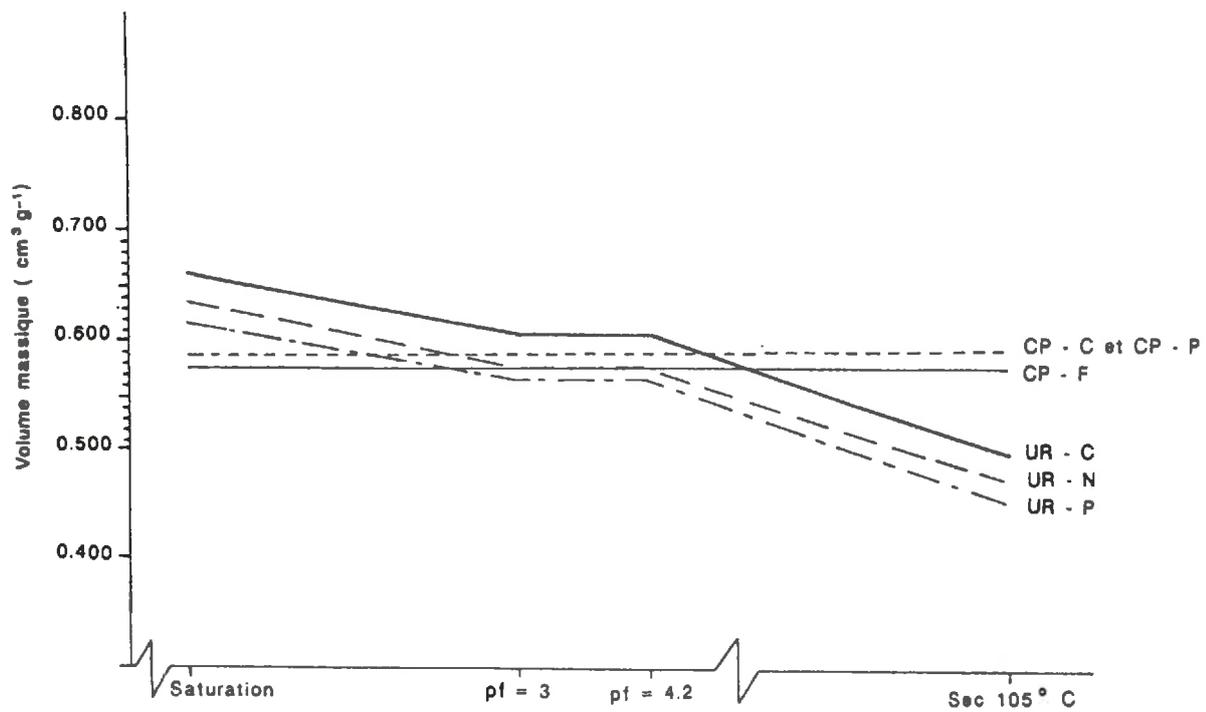


Figure 4.3: Représentation du phénomène de retrait.

**Tableau 4.15:** Analyse de variance (Site de “Campos”). Volume massique (cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>) en fonction de l'état hydrique.

S.Variation	D.L	S.C.E	C.M	s	F
Total	119	12926			
Profondeur	1	180	180		2,05
M.d'utilisation	2	3547	1773		20,26* *
Teneurs en eau	3	459	153		1,74
P.xM.d'ut	2	10	5		< 1
P.x T.	3	8	3		< 1
M.d'ut.xT.	6	260	43		< 1
P.x M.x T.	6	61	6		< 1
Résidu	96	8401	87,5	9,35	

CV% = 1,5

\* \* significatif au risque de 1%

**Tableau 4.16:** Test de Tukey pour le volume massique (Site de “Campos”). Comparaison des modes d'utilisation.

Mode utilisation	Moyennes
Pâturage	585,5a
Canne à sucre	583,3a
Forêt	573,02b
Tukey 5%	4,97

**Tableau 4.17:** Analyse de variance (site de "l'Universidade Rural"). Volume massique (cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>) en fonction de l'état hydrique.

S.Variation	D.L	S.C.E	C.M	s	F
Total	119	99684			
Profondeur	1	12	12		< 1
M.d'utilisation	2	27750	13835		137 <sup>**</sup>
Teneurs en eau	3	61408	20469		202 <sup>**</sup>
P.x M.d'ut	2	52	26		< 1
P.x T.	3	99	33		< 1
M.d'ut.xT.	6	493	82		< 1
P.x M.x T.	6	172	28		< 1
Résidu	96	9698	101	10,04	

CV% = 1,73

\*\* significatif au risque de 1%

**Tableau 4.18:** Test de Tukey pour le volume massique (Site de "l'Universidade Rural"). Comparaison des états hydriques.

Teneurs en eau	Moyennes
Saturé	637,3a
pF = 3,0	614,2b
pF = 4,2	612,4b
sec à 105 c	574,2c
Tukey 5%	5,86

Les non significations de toutes les interactions testées montrent l'uniformité de la diminution de volume indépendamment du mode d'utilisation et de la profondeur.

Quant à la valeur de cette diminution de volume, elle est de l'ordre de  $0,060 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  en moyenne (de saturé à sec  $105^\circ\text{C}$ ), et de  $0,030 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  (de saturé à  $\text{pF}=3,0$ ). Ces valeurs ne sont pas négligeables quand on les compare à celles obtenues par SORANI (1987) ( $0,080 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  entre  $\text{pF}=2,0$  et  $\text{pF}=4,0$ ) et BRUAND (1985) ( $0,040$  à  $0,050 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  entre  $\text{pF}=2,0$  et  $\text{pF}=4,0$ ) pour des sols argileux.

Si l'on observe la figure 4.3, on constate que les courbes sont parallèles. Le test de Tukey (tableau 4.19) montre que, pour chaque état hydrique, le volume massique de UR-C est supérieur à celui de UR-N, qui est lui-même supérieur à celui de UR-P.

**Tableau 4.19:** Test de Tukey pour le volume massique (Site de "l'Universidade Rural"). Comparaison des modes d'utilisation.

Mode utilisation	Moyennes
Canne à sucre	629,3a
Sol nu	607,5b
Paturage	592,3c
Tukey 5%	5,33

La présence d'un phénomène de retrait pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural" devra être prise en compte lors de la discussion générale des courbes de rétention en eau (chapitre 5).

Ce retrait indique que les pores se déforment lorsque l'état d'hydratation des échantillons varie.

Par contre, l'absence de retrait pour les échantillons du site de "Campos" indique que les courbes de rétention en eau peuvent être directement utilisées pour discuter la géométrie de l'espace poral.

Il faudra néanmoins, dans ce dernier cas, s'assurer que des phénomènes de retrait ne se sont pas produits au sein des mottes. Il est en effet possible que de tels phénomènes se produisent sans répercussion sensible sur le volume massique de ces mottes.

## **4.4 Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ )**

### **4.4.1 Introduction**

La vitesse avec laquelle l'eau s'infiltré dans le sol est d'une grande importance pour son utilisation. Cependant, cette vitesse varie en fonction du profil de potentiel de l'eau et de la géométrie du système poral (HILLEL, 1982 ; HENIN, 1977). En conditions saturées, cette vitesse d'infiltration peut être aisément discutée à partir d'une mesure de conductivité hydraulique ( $K_0$ ) (DARCY, 1856).

La mesure de  $K_0$  au laboratoire est souvent l'objet de nombreuses critiques (HENIN, 1977 ; JORGE et al., 1984 ; FERNANDES et al., 1983) : effets de paroi, difficulté de maintenir la charge hydraulique constante, modification de la structure de l'échantillon lors de la mesure, présence d'air piégé...

Dans notre étude, la mesure de  $K_0$  nous renseignera indirectement sur l'état structural des échantillons, en privilégiant les pores de grande taille en continuité de la face supérieure à la face inférieure des cylindres. Ce type de donnée est particulièrement intéressant, car ce sont les pores les plus grands qui disparaissent en premier lors d'un compactage, où tout au moins dont la continuité disparaît. De plus, très généralement ces pores de grande taille ne contribuent que très faiblement au volume poral analysé précédemment. De la sorte, d'éventuelles différences à propos de ces pores de grande taille peuvent ne pas avoir été identifiées jusqu'alors.

### **4.4.2 Méthodologie**

Les 12 échantillons ont été prélevés à l'aide de l'extracteur de UHLAND (1949), en utilisant des anneaux de 7,62 cm de diamètre et de 7,62 cm de hauteur.

Ils ont été mis à saturation par capillarité pendant 24 h (l'eau étant maintenue à la base du cylindre pendant 12 h, puis à sa partie supérieure pendant les 12 h suivantes). Ce dernier niveau de l'eau a d'ailleurs été conservé durant toute l'expérience. Une charge hydraulique de 3 cm au dessus du cylindre a été maintenue constante à l'aide d'un dispositif capacitif (fig. 4.4).

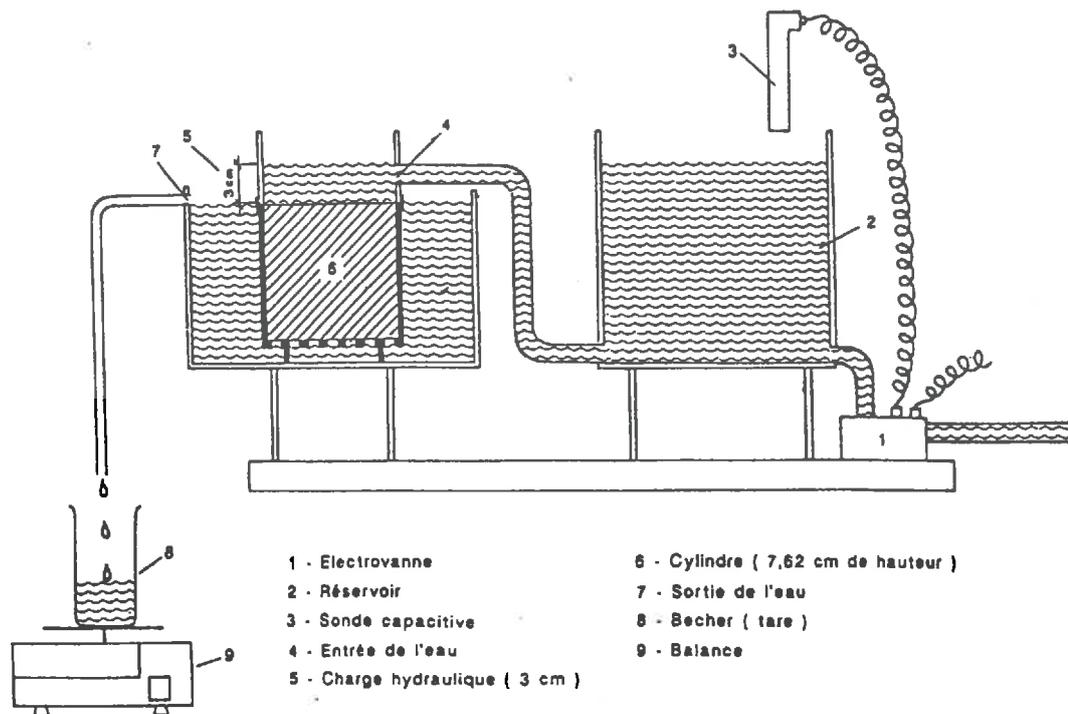


Figure 4.4: Schéma du dispositif utilisé pour la détermination de  $K_0$ .

La quantité d'eau écoulée a été mesurée à un pas de temps de 15 mn pendant 6 h. Les cylindres ont été ensuite laissés à saturation pendant une nuit sans charge hydraulique. Puis une seconde série de mesures a été faite, mais cette fois pendant 4 h.

Pour le calcul de  $K_0$  nous avons utilisé l'équation de DARCY (1856),

$$K_0 = (Q \times L) / (S \times H)$$

$K_0$  = conductivité hydraulique (cm/h)

$Q$  = volume d'eau percolé (cm<sup>3</sup>/h)

$S$  = surface du cylindre (cm<sup>2</sup>)

$H$  = charge hydraulique (cm)  $L$  = hauteur du cylindre (cm)

#### 4.4.3 Résultats

Lors de la discussion des valeurs de  $K_0$  obtenues, nous n'avons pas fait d'analyse statistique, puisque nous n'avons que deux répétitions (deux cylindres pour chaque horizon étudié).

Avec aussi peu de répétitions, le nombre de degrés de liberté du résidu est très faible et l'analyse de variance ne pourrait pas détecter de différences entre les traitements.

Cependant les résultats (tableau 4.20) et les observations pendant les expériences conduisent aux remarques suivantes :

- les variations entre les deux répétitions sont d’autant plus grandes que  $K_0$  est élevé ;
- la stabilisation du flux d’eau se produit d’autant plus rapidement qu’il est d’une faible intensité. Pour les flux les plus élevés, ce n’est qu’à partir de la 3<sup>ème</sup> ou 4<sup>ème</sup> heure que cette stabilisation devient effective ;
- lors de la stabilisation du flux d’eau, la diminution est de 2 à 9 % entre les premières valeurs enregistrées et celles considérées comme stables. Plus le flux d’eau est élevé, plus cette diminution est importante ;
- les flux d’eau enregistrés lors du 2<sup>ème</sup> jour sont semblables à ceux du premier jour après stabilisation.

**Tableau 4.20:** Conductivité hydraulique en saturée ( $K_0$ ) en cm/h. Moyenne de 2 répétitions et 10h pour chaque essai.

Utilisations Sols et profondeurs		FORET	SOL NU	CANNE A SUCRE	PATURAGE
CAMPOS	PROF 1	25,4		20,5	20,7
	PROF 2	5,8		8,6	11,9
UNIV. RURAL	PROF 1		5,2	48,1	13,2
	PROF 2		4,6	4,4	5,1

Dans le sol “Campos”, la profondeur 1 possède un  $K_0$  supérieur à celui de la profondeur 2. La valeur la plus élevée est obtenue pour CP-F-1, et il n’y a pas de différence entre CP-C-1 et CP-P-1. Pour la profondeur 2, l’ordre décroissant de valeur de  $K_0$  est CP-P-2, CP-C-2 et CP-F-2.

Pour le sol de “l’Universidade Rural”, il n’y a pas de différence de  $K_0$  à la profondeur 2. Pour la profondeur 1, la valeur de  $K_0$  de UR-C-1 est très supérieure à celle enregistrée pour UR-P-1 et UR-N-1, ce dernier étant inférieur au précédent.

#### 4.4.4 Discussion

Pour le site de “Campos” et pour la profondeur 1, la présence de nombreux graviers et la plus faible teneur en argile dans CP-F-1, expliquent que la conductivité hydraulique y soit supérieure à celle de CP-C-1 et CP-P-1. Pour la profondeur 2, les différences obtenues ne peuvent pas être mises en relation avec des différences de constitution granulométrique, celles-ci étant trop faibles. Ces différences ne sont pas, par conséquent, expliquées à ce stade de la discussion.

Pour le site de “l’Universidade Rural” et pour la profondeur 2, nous n’avons pas enregistré de variation de conductivité hydraulique en fonction du mode d’utilisation. A la profondeur 1, les valeurs élevées de  $K_0$  enregistrées pour UR-C-1 et UR-P-1 s’expliqueraient par la présence de quelques pores de grande taille en continuité à travers les cylindres. Quant à la valeur faible obtenue pour UR-N-1, elle s’expliquerait pour l’absence de ces pores de grande taille. Notons aussi qu’il n’y a pas de différence de  $K_0$  entre UR-N-1 et les trois valeurs obtenues à la profondeur 2.

Les valeurs de  $K_0$  obtenues, même les plus faibles (4,4 à 5,8 cm/h), sont plus élevées que celles généralement trouvées dans la littérature. Pour des Alfisols avec 18 % d’argile, FERNANDES et al., (1983) ont trouvé des valeurs de  $K_0$  entre 0,4 et 3,1 cm/h. JORGE et al., (1984), présentent des valeurs entre 0,12 et 1,85 cm/h pour des oxisols avec plus de 60 % d’argile. CINTRA et al., (1983) en conditions de terrain, ont déterminé des valeurs de taux d’infiltration de 2,4 à 6,3 cm/h sous culture et de 31,4 cm/h sous forêt.

### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous n’avons pas calculé de valeur de diamètre de pore équivalent pour discuter la signification des différences enregistrées. Un tel calcul nécessite des hypothèses qui ne seront évoquées que lors de la discussion générale qui suit. La discussion des courbes de rétention en eau a donc été limitée à la discussion des valeurs de teneur en eau en fonction de l’état d’hydratation des échantillons.

Néanmoins, pour le site de “Campos”, nous avons montré qu’il n’y a pas de phénomène de retrait et que la forme des courbes de rétention en eau est la même entre les trois modes d’utilisation pour la profondeur 2. Ceci indique, que quel que soit le mode d’utilisation, il n’y a pas de variation dans la géométrie de l’espace poral, tout au moins entre les valeurs extrêmes de diamètre de pore équivalent correspondant à l’état saturé et  $pF = 4,2$ .

Quant aux différences mises en évidence pour la profondeur 1, elles ne concernent que certaines parties des courbes de rétention en eau. Ces différences indiquent contrairement à la profondeur 2, qu'il existe des variations de géométrie de l'espace poral mais qu'elles ne concernent pas toute la gamme de diamètre de pore équivalent entre l'état saturé et  $pF=4,2$ .

Pour le site de "l'Universidade Rural", les propriétés de rétention en eau sont semblables lorsque l'on compare les courbes de rétention en eau. Précisons une nouvelle fois, que cela signifie que ces courbes présentent la même forme, mais qu'elles peuvent être translatées les unes par rapport aux autres parallèlement à l'axe des ordonnées (teneur en eau). En d'autres termes, si les courbes présentent la même forme, cela indique, en présence de phénomène de retrait qu'il n'y a pas de différence dans la variation de géométrie des pores lors de l'extraction d'eau. Par ailleurs, le fait que les courbes soient translatées parallèlement à l'axe des ordonnées signifie que les seules différences, concernent les pores qui ne perdent leur eau que pour  $pF > 4,2$ .

L'extraction d'eau des échantillons n'entraîne pas de variation du volume massique des mottes pour le site de "Campos", alors que cette variation est importante pour les mottes du site de "l'Universidade Rural". Néanmoins, dans ce dernier cas, le phénomène de retrait est quantitativement le même quels que soient les échantillons.

Les deux sites ne se distinguent pas aussi nettement à partir des valeurs de conductivité hydraulique en saturé. Les variations sont en effet plus élevées au sein d'un même site qu'entre les deux sites. De façon générale, la conductivité hydraulique est au moins deux fois plus élevée pour la profondeur 1 que pour la profondeur 2 ; elle peut même être dix fois plus élevée, c'est le cas pour les profondeurs 1 et 2 du mode d'utilisation canne à sucre pour le site de "l'Universidade Rural".

De tels résultats indiqueraient que c'est pour la profondeur 1 que les pores, de grande taille et en continuité sur 7 à 8 cm, sont les plus nombreux. Seul, le mode d'utilisation sol nu de "l'Universidade Rural" ne présente pas de différence entre les deux profondeurs prélevées.



## **Chapitre 5**

### **DISCUSSION GENERALE**

#### **5.1 Introduction**

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les résultats d'analyses qui devaient permettre de préciser la constitution minérale et l'organisation des échantillons prélevés. Ces résultats, qui ont été discutés pour chaque méthode d'analyse, vont l'être cette fois en fonction de l'objectif général de ce travail qui est l'étude du tassement des sols de type "podzolicos" en fonction de leur mode d'utilisation agricole.

La discussion générale sera essentiellement effectuée à l'aide d'une analyse compartimentale du volume poral des différents échantillons (GRIMALDI, 1986 ; COULON et BRUAND, 1989 ; FIES et BRUAND, 1990). La géométrie de l'espace poral est en effet étroitement liée au mode d'organisation des constituants. La mise en évidence de différences pour tel ou tel compartiment poral ne pourra être reliée à un effet direct du "mode d'utilisation" qu'après s'être assuré que de telles différences ne sont pas dues à des variations de constitution.

Nous allons faire le point successivement pour les deux sites en commençant par le site de "l'Universidade Rural", où les conditions de mise en culture de la canne à sucre peuvent être aisément considérées comme beaucoup moins dégradantes qu'à "Campos".

#### **5.2 Site de "l'Universidade Rural"**

Les conditions de mise en culture des parcelles canne à sucre et pâturage sont telles qu'elles peuvent être considérées comme étant très peu dégradantes pour la structure du sol. Toutes les opérations culturales sur ces deux parcelles ont été faites manuellement et la parcelle dite "pâturage" n'est pas pâturée, mais fauchée. Quant à la parcelle sol nu,

l'érosion y est importante, à la différence des deux précédentes, puisqu'elle exporte 200 t / ha / an (LEPRUN, 1988). Par l'importance de ce dernier phénomène, cette parcelle se distingue nettement des deux autres, et nous évoquerons à de nombreuses reprises cette caractéristique de la parcelle sol nu.

Les valeurs de densité réelle ( $d_r$ ) n'étant pas différentes (tableau 3.1), nous commencerons la discussion à partir des valeurs du volume poral total ( $V_t$ ) qui sont directement liées à celles de la densité apparente ( $d_a$ ), puisque  $V_t = 1/d_a - 1/d_r$ .

### 5.2.1 Volume poral total ( $V_t$ )

Trois valeurs de volume poral total ( $V_t$ ) sont comparées :

- la valeur obtenue à partir de l'étude des propriétés de rétention en eau (volume d'eau à saturation), soit  $V_t$  [eau] ;
- la valeur obtenue à l'aide des déterminations en porosimétrie au mercure (volume total de mercure introduit dans l'échantillon), soit  $V_t$  [Hg] ;
- enfin, la valeur calculée à partir des valeurs de densité apparente des anneaux de Kopecky ( $d_a$ ) et de densité réelle ( $d_r$ ) par la relation :  $V_t [d_a] = 1/d_a - 1/d_r$ .

Les différentes valeurs de  $V_t$  sont données dans le tableau 5.1. Elles sont calculées à partir des données présentées dans les tableaux 3.1, 3.2, 4.3 et 4.12. On note que pour tous les échantillons,  $V_t [d_a] > V_t$  [eau]  $> V_t$  [Hg]. Cette relation d'ordre s'explique aisément.  $V_t [d_a]$  étant calculé à partir de la valeur de densité apparente des anneaux de Kopecky, tous les pores (même ceux de plus grandes tailles) sont pris en compte. Par contre, ce n'est pas le cas avec  $V_t$  [eau] qui est calculé à partir du volume d'eau dans les cylindres. En fait, même dans les conditions de vide employées lors de cette expérience, les pores les plus grands n'étaient vraisemblablement pas occupés par l'eau. Les observations en microscopie ont montré en effet la présence de cavités de très grande dimension dans lesquels les phénomènes de capillarité ne peuvent intervenir.

Enfin, pour  $V_t$  [Hg], trois explications peuvent être proposées. D'une part, les injections de mercure sont faites pour des mottes et non des cylindres, une partie du système poral peut alors ne pas avoir été échantillonné.

**Tableau 5.1:** Volume poral total obtenu à partir du volume d'eau à saturation ( $V_t$ [eau]), de la porosimétrie au mercure ( $V_t$ [Hg]), de la densité apparente des anneaux de Kopecky ( $V_t$ [ $d_a$ ]). Diminution de volume au cours de la dessiccation ( $\Delta V$ ).

S.Variation	Volume poral ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )				
	$V_t$ [eau] (1)	$V_t$ [ $d_a$ ] (2)	$V_t$ [Hg] (3)	$\Delta V$ (4)	(3) + (4)
UR - N.1	0,298	0,343	0,207	0,064	0,271
UR - N.2	0,278	0,305	0,204	0,063	0,267
UR - P.1	0,286	0,340	0,205	0,063	0,268
UR - P.2	0,297	0,306	0,204	0,075	0,279
UR - C.1	0,317	0,355	0,211	0,057	0,268
UR - C.2	0,319	0,320	0,205	0,057	0,262

La deuxième explication concerne les pores pris en compte lors de l'injection de mercure. En effet, tous les pores de diamètre équivalent supérieur à 300  $\mu\text{m}$  sont remplis de mercure avant la première valeur de pression appliquée à l'échantillon. De la sorte, tous les pores de diamètre équivalent supérieur à 300  $\mu\text{m}$  ne sont pas pris en compte dans  $V_t$  [Hg]. Or, même s'il existe une différence importante pour un pore entre son diamètre équivalent et son diamètre tel qu'il apparaît en lame mince, les observations de ces dernières montrent que de nombreux pores ont une taille très supérieure à 300  $\mu\text{m}$ . Ainsi une partie de ces pores ne seraient pas inclus dans  $V_t$  [Hg].

La troisième et dernière explication proposée concerne l'état de déshydratation des échantillons. Les courbes d'injection de mercure sont faites sur des mottes préalablement séchées à 105°C. Or, à la suite de ce séchage, elles subissent une diminution de volume qui est important pour les échantillons provenant du site de "l'Universidade Rural" (tableau 4.12) (fig. 5.1).

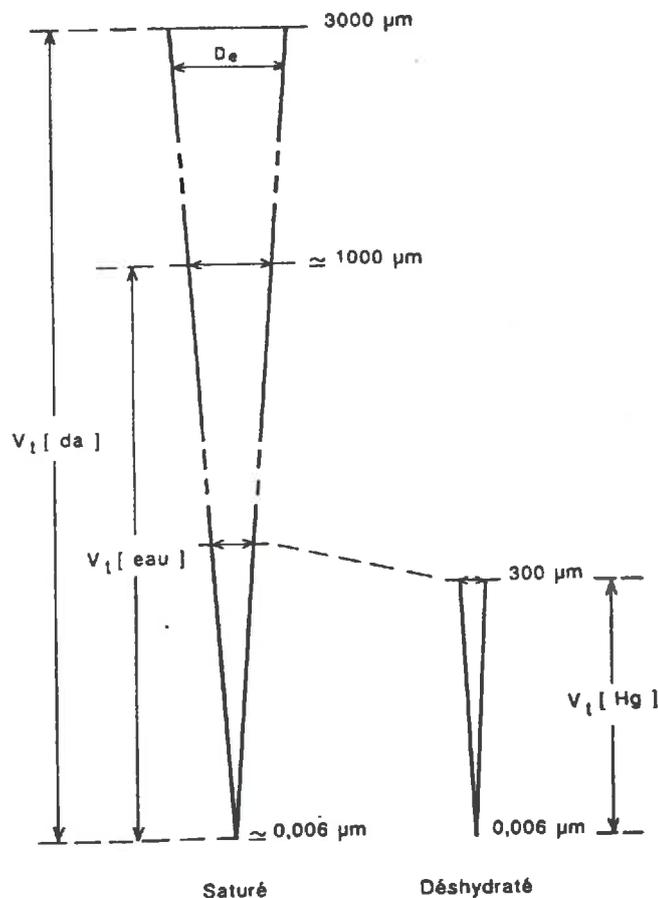


Figure 5.1: Schéma indiquant les valeurs de diamètre équivalent de pores ( $D_e$ ) pris en compte pour  $V_t[Hg]$ ,  $V_t[eau]$  et  $V_t[da]$  pour le site de "l'Universidade Rural". Ce schéma fait apparaître des différences de géométrie des pores entre l'état déshydraté et saturé puisque le système poral serait déformable.

Lorsque l'on ajoute à  $V_t[Hg]$ , la variation de volume massique entre l'état saturé et l'état sec à 105°C, les valeurs de volume poral obtenues sont encore nettement inférieures à  $V_t[d_a]$  et inférieur à  $V_t[eau]$  (tableau 5.1). La prise en compte des phénomènes de retrait ne permet donc pas, à elle seule, d'expliquer les faibles valeurs de  $V_t[Hg]$ .

A) *Volume poral total obtenu à partir des valeurs de densité apparente des anneaux de Kopecky ( $V_t[da]$ ).*

$V_t[d_a]$  n'a pas été l'objet d'une analyse de variance compte tenu de la façon dont il a été déterminé. Dans une discussion précédente, nous avons montré que  $V_t[d_a]$  pour la profondeur 1 est supérieur à  $V_t[d_a]$  pour la profondeur 2 et que pour une même profondeur, les différences de  $V_t[d_a]$  entre les modes d'utilisation sont très faibles (tableau 3.1).

A propos de  $V_t(d_a)$ , une remarque doit être faite concernant l'état de gonflement des horizons au moment du prélèvement. Les échantillons ont été prélevés à une teneur en eau voisine de  $0,18 \text{ g cm}^3 \text{ g}^{-1}$  et les courbes de rétention en eau indiquent que cette teneur en eau correspond à un pF de l'ordre de 2,5. Or, nous avons montré qu'un peu moins de la moitié de la diminution de volume des mottes (retrait) entre l'état saturé et l'état 105°C, se fait

entre l'état saturé et  $pF = 3,0$  (tableau 4.12). La perte en eau entre l'état saturé et  $pF = 2,5$  représente 90 % de la perte en eau entre l'état saturé et  $pF = 3,0$  (tableau 4.3). Il est donc probable que l'essentiel du retrait enregistré entre l'état saturé et  $pF = 3,0$  s'exprime entre l'état saturé et  $pF = 2,5$ . Néanmoins, nous ne savons pas quelle est la proportion de ce retrait des mottes qui se produit à l'échelle du volume de sol contenu dans un anneau de Kopecky.

Précisons que le retrait des mottes entre l'état saturé et  $pF = 3,0$  représente 6 à 8 % de  $V_t [d_a]$ . Il est alors raisonnable de considérer que l'essentiel de ce retrait des mottes donne lieu à la formation de fissures au sein des cylindres. Dans ces conditions,  $V_t [d_a]$  pourrait être considéré comme une approximation satisfaisante du volume poral des horizons étudiés, aux erreurs de mesure près.

*B) Volume poral obtenu à partir des propriétés de rétention en eau ( $V_t [eau]$ ).*

Une nouvelle analyse de variance ne concernant que la teneur en eau des cylindres à saturation (tableau 4.3) a été faite (tableau 5.2). Cette analyse de variance indique qu'il n'y a pas de différence de  $V_t [eau]$  entre les profondeurs 1 et 2 pour chaque mode d'utilisation (tableau 5.2). Cependant elle montre que  $V_t [eau]$  est significativement différent entre les modes d'utilisation, lorsque l'on regroupe les profondeurs (tableaux 5.1 et 5.2).

Le test de Tukey indique que  $V_t [eau]$  pour UR-C est significativement supérieur à  $V_t [eau]$  pour UR-P et UR-N, ces derniers n'étant pas significativement différents (tableau 5.3).

**Tableau 5.2:** Analyse de variance. Volume total des pores  $V_t$  [eau] obtenu à partir de la teneur en eau à saturation.

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	17	7506			
Profondeurs	1	31	31		< 1
Mode d'ut.	2	3250	1625		5,59 *
P.xM.d'ut.	2	740	370		1,27
Résidu	12	3485	290,4	17	

CV% = 5,67

\* significatif au risque de 5%

**Tableau 5.3:** Test de Tukey pour  $V_t$ [eau]. Comparaison des modes d'utilisation.

Mode utilisation	Moyennes
Canne à sucre	318,2a
Pâturage	291,7b
Sol nu	288,0b
Tukey 5%	26,1

Ces valeurs de  $V_t$  [eau] indiquent des variations de volume poral différentes de celles mises en évidence pour  $V_t$  [ $d_a$ ]. Ceci doit être attribué au fait que  $V_t$  [eau] ne prend pas en compte les pores de très grande taille tels qu'ils existent en nombre important dans l'horizon cultivé (profondeur 1). Les grands pores dont il vient d'être question sont donc mieux pris en compte avec  $V_t$  [ $d_a$ ], et ceci est plus important pour la profondeur 1 que pour la profondeur 2. C'est pour cette raison que  $V_t$  [eau] ne prenant pas en compte, ou seulement très partiellement, les pores les plus grands,  $V_t$  [eau] ne présente pas de différence entre les profondeurs 1 et 2.

C) *Volume poral total obtenu à partir des courbes d'injection de mercure ( $V_t$  [Hg]).*

Nous avons vu précédemment qu'il n'y avait pas de différence significative de  $V_t$  [Hg] entre toutes les sources de variation testées (profondeurs et modes d'utilisation) (tableaux 3.2 et 3.8).

Le volume poral développé par les pores de diamètre équivalent inférieur à 300  $\mu\text{m}$  est le même pour les différents horizons étudiés (de l'ordre de 0,205  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ), et ceci bien que la teneur en argile varie de 35 à 48 %. Les différences mises en évidence avec  $V_t$  [eau] et  $V_t$  [ $d_a$ ] sont par conséquent dues à des pores autres que ceux dont le diamètre équivalent est supérieur à 300  $\mu\text{m}$  à l'état sec.

D) *Conclusion*

Cette première analyse des variations de la géométrie de l'espace poral montre que :

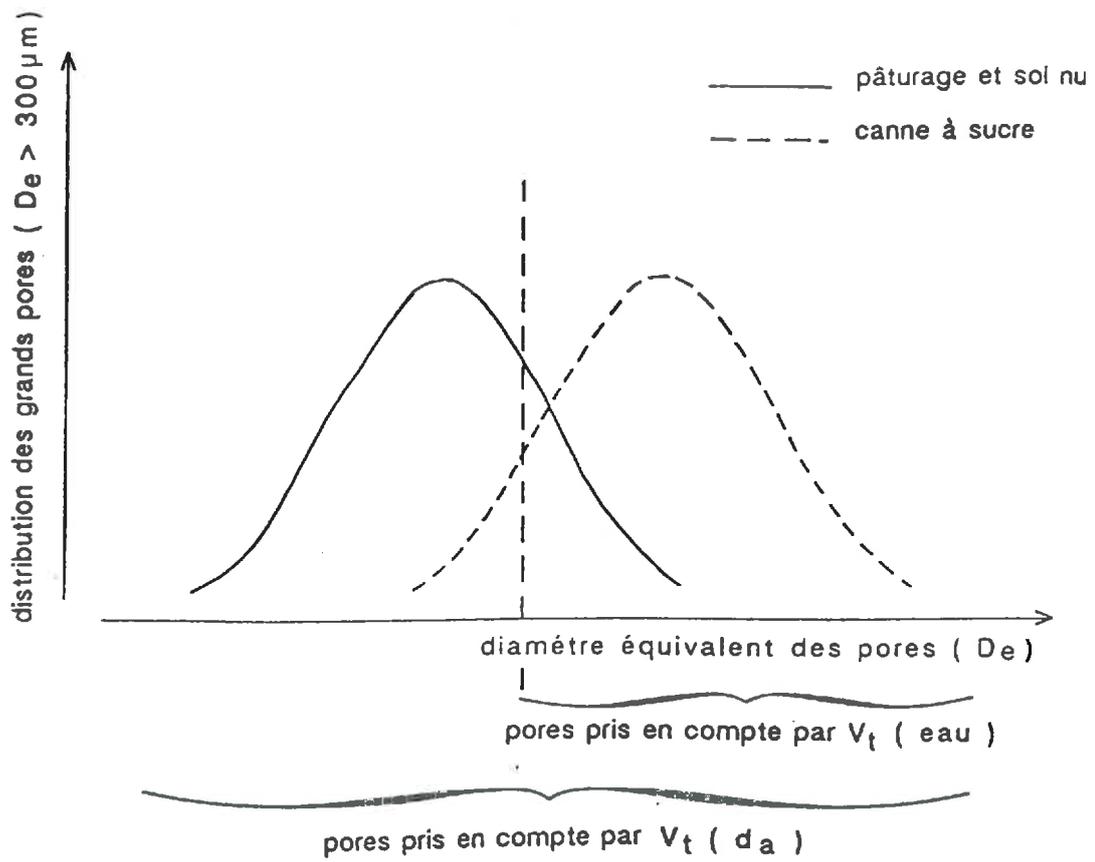
– le volume poral total est moins élevé à la profondeur 2 (0,310  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) qu'à la profondeur 1 (0,350  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ); mais pour une profondeur donnée, il n'y a pas de différence entre les modes d'utilisation ;

– le volume poral développé par les pores de diamètre équivalent inférieur à 300  $\mu\text{m}$  est constant, quels que soient la profondeur et le mode d'utilisation. Il est estimé à 0,205  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$  ;

– les résultats des discussions des variations de  $V_t$  [ $d_a$ ] et  $V_t$  [eau] sont apparemment en contradiction.

Les variations de  $V_t$  [ $d_a$ ] séparent nettement les deux profondeurs, les variations à une même profondeur étant faibles. Par contre, les variations de  $V_t$  [eau] séparent les modes d'utilisation pour une même profondeur sans qu'il y ait de différence entre les profondeurs pour un même mode d'utilisation.

De tels résultats doivent être interprétés comme indiquant une variation de la distribution de la taille des pores au sein des pores dont le diamètre équivalent est supérieur à 300  $\mu\text{m}$  à l'état déshydraté. De la sorte, la taille moyenne de ces grands pores est inférieure pour UR-C à celle des grands pores pour UR-P et UR-N, ceci pour chaque profondeur. En d'autres termes, le volume poral dû à ces grands pores correspond, pour chaque profondeur sans être différent, à des pores plus petits pour UR-C que pour UR-P et UR-N (figs. 5.2 et 5.3).



**Figure 5.2:** Schéma illustrant les différences de distribution des grands pores entre, d'une part, UR-C et, d'autre part, UR-N et UR-P.

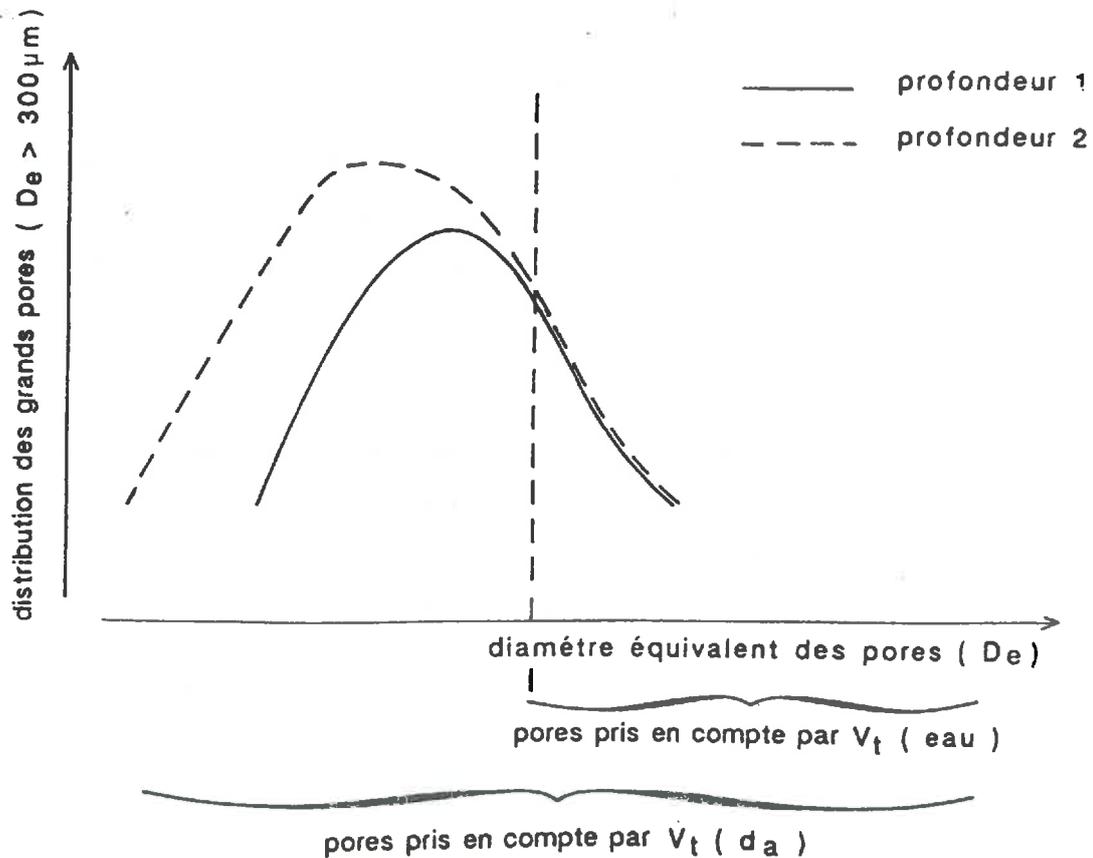


Figure 5.3: Schéma illustrant pour un mode d'utilisation, les différences de distribution des grands pores entre les profondeurs 1 et 2. La façon dont ces différences sont prises en compte pour  $V_t [d_a]$  et  $V_t [eau]$  est aussi indiquée.

## 5.2.2 Volume poral du à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{arg}$ )

Pour mener plus loin notre analyse, il est maintenant nécessaire de distinguer au sein de ces variations de  $V_p$ , ce qui peut être dû aux variations de teneur en argile qui ont été mises en évidence lors de la caractérisation des constituants. Dans le chapitre trois, l'analyse des courbes d'injection de mercure nous a conduit à diviser le volume poral total en deux compartiments :

- un volume poral accessible pour des diamètres de pore équivalent compris entre  $0,006 \mu\text{m}$  et  $0,5 \mu\text{m}$ . Il a été attribué aux pores dus à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{arg}$ ) ;

- et, un volume poral accessible pour des pores de diamètre équivalent compris entre  $0,5 \mu\text{m}$  et  $300 \mu\text{m}$ . Ce volume poral correspond à un ensemble de pores de différentes origines (pores tubulaires d'origine biologique, cavités, fissures, entassements de grains,...) et constitué un volume poral structural ( $V_{str}$ ).

A) Variations de  $V_{arg}$  à l'état déshydraté.

Les valeurs de  $V_{arg}$  obtenues en porosimétrie au mercure ( $V_{arg}$  [Hg]) sont celles du volume poral des échantillons à l'état déshydraté (tableau 3.2). Nous avons noté à partir de l'analyse de variance (tableau 3.9) que  $V_{arg}$  [Hg] ne varie pas à une même profondeur en fonction du mode d'utilisation, mais qu'il est plus élevé à la profondeur 2 par rapport à la profondeur 1.

La taille apparente des particules d'argile, qui sont des particules de kaolinite, ne varie pas entre les différents échantillons (tableaux 2.2, 2.5 et 2.6). Par conséquent, de telles variations de  $V_{arg}$  [Hg] doivent pouvoir être expliquées par des variations du mode d'organisation des particules et/ou des variations de teneur en argile.

En fait, la corrélation étroite existant entre  $V_{arg}$  [Hg] et la teneur en argile ( $r = 0,94$  avec la teneur en argile obtenue après traitement HCl+NaOH, tableau 2.1) montre que les variations de teneur en argile peuvent expliquer à elles seules l'essentiel des variations de  $V_{arg}$  [Hg] (tableau 5.4).

**Tableau 5.4:** Volume poral de l'argile obtenu à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{arg}$  [Hg]), % argile et volume poral de l'argile obtenu à partir du volume d'eau à  $pF=3,7$  ( $V_{arg}$  [pF = 3,7]) et rapport entre  $V_{arg}$  [pF = 3,7] et % argile.

S.Variation	$V_{arg}$ [Hg] (1)	% Arg (2)	$V_{arg}$ [pF:3,7] (3)	$V_{arg}[pF=3,7]/\%arg \times 100$ (3/2) x 100 (4)
<b>UR - N.1</b>	<b>0,100</b>	<b>34,8</b>	<b>0,146</b>	<b>0,419</b>
<b>UR - N.2</b>	<b>0,120</b>	<b>47,5</b>	<b>0,173</b>	<b>0,369</b>
<b>UR - P.1</b>	<b>0,104</b>	<b>37,3</b>	<b>0,153</b>	<b>0,410</b>
<b>UR - P.2</b>	<b>0,107</b>	<b>38,8</b>	<b>0,150</b>	<b>0,387</b>
<b>UR - C.1</b>	<b>0,112</b>	<b>39,4</b>	<b>0,163</b>	<b>0,413</b>
<b>UR - C.2</b>	<b>0,116</b>	<b>41,5</b>	<b>0,162</b>	<b>0,390</b>

$V_{arg}[Hg] \times \% Arg \ r=0,94$

$V_{arg}[pF] \times \% Arg \ r=0,93$

$\% argile \times (V_{arg}[pF=3,7]/\% Arg) \times 100 \ r=-0,90$

Cette discussion à propos de  $V_{arg}$  [Hg] est l'occasion de rapprocher :

– les valeurs de diamètre et épaisseur apparents déterminées à partir des diffractogrammes RX ;

– et la valeur de  $D_e$ , pour laquelle, entre 0,006  $\mu\text{m}$  et 0,5  $\mu\text{m}$ , la dérivée de la courbe cumulée est la plus élevée.

Cette valeur de  $D_e$ , qui correspond à la classe de taille de pore de la phase argileuse qui est la plus représentée, est comprise entre 0,016  $\mu\text{m}$  et 0,020  $\mu\text{m}$  quel que soit l'échantillon. L'épaisseur apparente des cristaux calculée varie de 150 à 160  $\text{\AA}$ , et leur diamètre de 330 à 340  $\text{\AA}$ , c'est-à-dire de 0,015 à 0,016  $\mu\text{m}$  et de 0,033 à 0,034  $\mu\text{m}$  respectivement (tableau 2.2).  $D_e$  est donc très proche de l'épaisseur apparente calculée pour les cristaux de kaolinite.

Si l'on considère que les particules de kaolinite sont des monocristaux, ces résultats indiquent que l'assemblage de ces particules est un assemblage compact, à l'état déshydraté, de très nombreux cristallites face-à-face tels que définis par TESSIER (1975) et PEDRO (1976).

#### B) Variations de $V_{\text{arg}}$ à un état hydraté ( $pF = 3,7$ ).

Ce qui précède concerne  $V_{\text{arg}}$  [Hg], c'est-à-dire l'espace poral dû à l'assemblage des particules d'argile pour les échantillons à l'état déshydraté. Nous allons maintenant discuter des éventuelles variations du volume poral dû à l'assemblage des particules d'argile à partir des teneurs en eau enregistrées aux différentes valeurs de  $pF$  (tableau 4.3).

L'étude du retrait de mottes de dimensions centimétriques a montré que la diminution de volume était importante lors de l'extraction d'eau (tableau 4.12 et fig. 4.3). Il est alors tout à fait vraisemblable que le retrait de la phase argileuse au sein des échantillons soit le moteur essentiel de ce retrait enregistré à l'échelle des mottes (TESSIER et al., 1980). Par conséquent,  $V_{\text{arg}}$  [Hg] serait inférieur au volume poral dû à la phase argileuse dans les échantillons hydratés.

La meilleure façon de le vérifier consiste à comparer  $V_{\text{arg}}$  [Hg] au volume d'eau retenu par les échantillons à la valeur de  $pF$  correspondant à un diamètre équivalent de 0,5  $\mu\text{m}$  (tableau 5.4). Cette valeur correspond à la limite entre les deux compartiments poraux identifiés en porosimétrie au mercure, c'est-à-dire  $pF = 3,7$ . Le volume d'eau retenu à  $pF = 3,7$  sera considéré comme retenu par des pores dus à l'assemblage des particules d'argile et dénommé  $V_{\text{arg}} [pF = 3,7]$ .

La comparaison de ces deux volumes poraux montre que  $V_{\text{arg}}$  [Hg] est nettement inférieur à  $V_{\text{arg}} [pF = 3,7]$  pour chaque échantillon (tableau 5.4). Il a été montré par BRUAND et PROST (1987) que les courbes d'entrée de mercure et de sortie d'eau d'un système poral rigide étaient semblables, et que de telles différences entre  $V_{\text{arg}}$  [Hg] et  $V_{\text{arg}} [pF = 3,7]$  ne pouvaient alors s'expliquer que par le gonflement de la phase argileuse.

Nous avons vu que les variations de  $V_{arg}$  [Hg] sont étroitement liées à celles de la teneur en argile, c'est aussi le cas de  $V_{arg}$  [pF = 3,7] ( $r = 0,93$ , teneur en argile obtenue après traitement HCl+NaOH, tableau 2.1). Néanmoins, si l'on rapporte  $V_{arg}$  [pF = 3,7] à la teneur en argile en calculant :  $V_{arg}$  [pF = 3,7] / % Arg x 100, on obtient des valeurs qui correspondent aux volumes poraux développés par gramme d'argile à pF = 3,7. Ceux-ci varient entre 0,369 et 0,419  $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$  (tableau 5.4).

Ces variations ne sont pas indépendantes de la teneur en argile ( $r = -0,90$ ) (tableaux 5.4 et 2.1). De la sorte, la phase argileuse gonflerait d'autant plus qu'elle est présente en faible quantité. De tels résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par BRUAND et BRAUDEAU (1990) lors de l'étude des variations de la géométrie de l'espace poral entre des sols ferrallitiques et des sols ferrugineux et hydromorphe de Côte d'Ivoire.

Ces auteurs ont mis en évidence une augmentation du gonflement de la phase argileuse à l'état hydraté lorsque la teneur en argile diminue, alors qu'il n'y avait pas de différence, comme dans notre étude, entre les volumes poraux développés par la phase argileuse à l'état déshydraté. Un tel comportement a été mis en relation avec la présence de smectites dans des sols à faible teneur en argile. Dans notre cas, une telle explication ne peut être envisagée, puisque l'analyse minéralogique n'a pas mis en évidence d'autres minéraux argileux que la kaolinite.

Une explication à un tel comportement pourrait être recherchée en relation avec la matière organique, dont la teneur et la nature varient certainement sensiblement entre les modes d'utilisation et profondeurs.

Une telle explication ne résiste pas à la comparaison des valeurs calculées par UR-N-1 et UR-P-1, qui sont les échantillons pour lesquels la teneur et la nature de la matière organique sont vraisemblablement les plus différentes. Or, pour ces deux échantillons, les teneurs en argile et les valeurs de  $V_{arg}$ [pF=3,7] / % Arg x 100 sont respectivement très proches (tableau 5.4). Il n'y aurait pas "d'effet matière organique". Les différences de comportement de la phase argileuse seraient alors bien à mettre en relation avec les variations de teneur en argile.

### C) Variations de $V_{arg}$ et nature des oxyhydroxydes de fer.

L'existence de cette relation ne fournit pas une explication claire des raisons d'une telle évolution du comportement. Nous savons depuis les travaux de CHAUVEL et al., (1976), toute l'importance qu'il faut attribuer au rôle des oxyhydroxydes de fer dans le comportement des plasmas argileux kaolinitiques. Or, dans un profil de sol ferrallitique de type "podzolico", la variation de teneur en argile est liée à l'intensité du processus de

lessivage, lui-même lié vraisemblablement à une modification du “degré de cimentation” des particules d’argile par les oxyhydroxydes de fer.

Nous savons que, bien qu’installées sur des sols identiques au départ, les différentes parcelles ont subi une érosion qui a entraîné une troncature du sol d’intensité variable suivant les modes d’utilisation. Les variations de teneur en argile indiqueraient alors que les échantillons ont été prélevés à différents niveaux du profil de sol initial et que les variations du pouvoir de gonflement de la phase argileuse seraient effectivement liées à une évolution du “degré de cimentation” des particules de kaolinite par les oxyhydroxydes de fer.

Cette hypothèse peut paraître en contradiction avec les résultats de l’analyse minéralogique. Celle-ci a en effet montré qu’il n’y avait pas de différence de taux de substitution Al-Fe entre les goethites des différents échantillons, ni de différence de teneur en goethite dans leur fraction granulométrique argile.

Ainsi, la constitution du plasma argileux des échantillons (kaolinite + oxyhydroxydes) ne semble pas évoluer avec la teneur en argile des échantillons et cependant, les propriétés de gonflement du plasma sont différentes suivant la teneur en argile. En fait, ces résultats qui concernent la constitution minéralogique des échantillons n’invalident pas l’hypothèse d’un rôle des oxyhydroxydes de fer.

En effet, CHAUVEL et al., (1976) ont montré que les propriétés de gonflement d’un plasma kaolinitique pouvaient être fortement modifiées après élimination d’une très faible proportion d’oxyhydroxyde de fer. Or, cette proportion est si faible qu’elle peut ne pas avoir été révélée par les données dont nous disposons.

## D) Conclusion

A l'état déshydraté, les variations de  $V_{arg}$  entre les échantillons apparaissent être essentiellement dues aux variations de teneur en argile. Le calcul de  $V_{arg}$  pour  $pF = 3,7$  montre que :

–  $V_{arg}$  à cette valeur de  $pF$  est supérieur à  $V_{arg}$  à l'état déshydraté, indiquant ainsi que la phase argileuse gonfle ;

– le gonflement de la phase argileuse (exprimé par gramme d'argile) est fonction de la quantité d'argile dans cet échantillon, mais aucun rôle des oxyhydroxydes de fer n'a pu être mis en évidence.

### 5.2.3 Volume poral structural ( $V_{str}$ )

Le volume poral structural ( $V_{str}$ ) est le complémentaire de  $V_{arg}$  au volume poral total ( $V$ ). Lorsqu'une mise en culture a pour effet de compacter un sol, la densité apparente augmente, car le volume poral total décroît et ceci parce que le volume poral structural décroît.

Dans notre cas,  $V_{str}$  regroupe des pores d'origines très différentes qui ne seront pas tous aussi sensibles au phénomène de compactage. Il est par conséquent nécessaire de rechercher l'origine des variations de  $V_{str}$ .

#### A) Utilisation des courbes de rétention en eau

Lors de la discussion des résultats de porosimétrie au mercure, nous avons vu qu'il n'y avait pas de différence significative de  $V_{str}$  [Hg] entre les échantillons (tableaux 3.2 et 3.10). Ce volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent compris entre  $300 \mu m$  et  $0,5 \mu m$  varie entre  $0,084$  et  $0,107 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ .

Dans le paragraphe précédent nous avons utilisé les courbes de rétention en eau pour discuter le volume poral de l'argile. La limite a été fixée à  $pF = 3,7$ , c'est-à-dire à un diamètre de pore équivalent égal à  $0,5 \mu m$ . Cette taille de pore correspond à la limite entre les deux compartiments poraux identifiées en porosimétrie au mercure.

En introduisant cette limite de  $pF = 3,7$  dans la courbe de rétention en eau, nous avons implicitement considéré que celle-ci présentait, comme la courbe d'intrusion de mercure, deux volumes poraux distincts. Or, les courbes de rétention en eau ne présentent pas deux pertes d'eau bien délimitées (fig. 4.2). De plus, nous venons de montrer que  $V_{arg}$  [ $pF = 3,7$ ] >  $V_{arg}$  [Hg] et que, par conséquent, le volume poral du à l'argile variait en

fonction de l'état d'hydratation. On pourrait alors penser qu'un tel résultat s'oppose à l'utilisation de cette limite de valeur de pF.

Le volume d'eau à pF = 3,7 est un volume qui est contenu dans des pores de diamètre équivalent < 0,5 µm. Si la phase argileuse subit des phénomènes de retrait au cours de la déshydratation, cette valeur de diamètre équivalent va alors décroître (TESSIER et PEDRO, 1976 ; TESSIER, 1980). De la sorte, ayant calculé  $V_{arg}$  [pF = 3,7] à partir de la quantité d'eau à pF = 3,7, nous avons montré qu'il y avait un retrait de la phase argileuse. Ceci étant, nous aurions dû calculer la valeur maximale de  $V_{arg}$  (maximum de gonflement de la phase argileuse) pour un pF < 3,7 et ainsi obtenir une différence entre  $V_{arg}$  à l'état hydraté et  $V_{arg}$  [Hg] encore plus élevée.

Le gonflement de la phase argileuse mis en évidence précédemment apparaît alors avoir été sous-estimé. Par conséquent, nous ne pouvons pas utiliser la différence de volume d'eau, entre l'état saturation et pF = 3,7, comme étant le volume poral structural puisque nous venons de montrer que de l'eau était retenue par des pores dus à l'assemblage des particules d'argile pour pF < 3,7.

*B) Volume structural occupé par de l'air à pF = 3,7 dans les mottes ( $V_{str}$  [M])*

Si nous considérons le volume d'air dans les échantillons à pF = 3,7, celui-ci est localisé dans des pores de diamètre équivalent supérieur à 0,5 µm. A la suite de la déshydratation, ces pores de diamètre équivalent inférieur à 0,5 µm vont subir des phénomènes de retrait et donner lieu à la formation d'un volume poral dont une partie au moins sera accessible à des diamètres équivalents > 0,5 µm. De la sorte, en calculant le volume d'air à pF = 3,7, on calcule une valeur de  $V_{str}$  que devrait être inférieure à  $V_{str}$  [Hg].

Nous ne connaissons pas le volume massique des mottes à pF = 3,7, mais nous avons montré qu'il n'y avait pas de variation de  $V_m$  entre pF = 3,0 [ $V_m$  (pF = 3,0)] et pF = 4,2. Ainsi nous avons utilisé  $V_m$  [pF = 3,0] (tableau 4.12) pour calculer le volume d'air à pF = 3,7, c'est-à-dire le volume poral structural à cette valeur de pF ( $V_{str}$  [M]) (M est relatif aux mottes). La relation utilisé est la suivante :

$$V_{str} [M] = (V_m [pF = 3,0]) - (1/d_s) - (V_{arg} [pF = 3,7])$$

avec  $d_s$  = masse volumique de la phase solide. Les volumes de  $V_{str}$  [M] ainsi obtenues sont donnés dans le tableau 5.5.

**Tableau 5.5:** Volume poral structural obtenu à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{str} [Hg]$ ) et volume structural des mottes ( $V_{str} [M]$ ).  $V_{arg} [pF = 3,7]$  : volume poral de l'argile à  $pF = 3,7$ ;  $V_m [pF = 3,0]$  : volume massique à  $pF = 3,0$  et  $V_t [d_a]$  : volume poral total calculé à partir de la densité apparente.

	$V_{str} [Hg]$ (1)	$V_{arg} [pF=3,7]$ (2)	$V_m [pF=3,0]$ (3)	$V_{str} [M]$ (3)-(2)-1/dr	$V_{str} [d_a]$ $= V_t [d_a]-(2)$
<b>UR - N.1</b>	0,107	0,146	0,608	0,092	0,197
<b>UR - N.2</b>	0,084	0,173	0,614	0,071	0,132
<b>UR - P.1</b>	0,101	0,153	0,600	0,078	0,187
<b>UR - P.2</b>	0,097	0,150	0,601	0,082	0,156
<b>UR - C.1</b>	0,097	0,163	0,634	0,102	0,192
<b>UR - C.2</b>	0,089	0,162	0,633	0,102	0,158

### C) Comparaison entre $V_{str} [Hg]$ et $V_{str} [M]$

Rappelons qu'aucune différence significative de  $V_{str} [Hg]$  n'a été mise en évidence à partir de l'analyse de variance (tableau 3.10).  $V_{str} [Hg]$  apparaît être soit du même ordre de grandeur que  $V_{str} [M]$ , soit inférieur, soit supérieur selon les cas (tableau 5.5).

Pour mener plus loin la discussion à propos de cette comparaison, il est nécessaire de savoir si la taille maximum des pores pris en compte avec la méthode du pétrole et la porosimétrie au mercure est la même.

A cet effet, nous avons calculé le volume poral total des mottes déshydratées à partir du volume massique à 105°C (déterminé à l'aide de la méthode au pétrole, MONNIER et al., 1973) (tableau 5.6).

**Tableau 5.6:** Volume massique des mottes à 105°C ( $V_m$  [105]) et  $1/d_r$  utilisés pour calculer le volume poral total des mottes à 105°C ( $V_t$  [ $V_m$  105]) et  $V_t$  [Hg] pour la comparaison.

	$V_m$ [105]	$1/d_r$	$V_t$ [ $V_m$ 105]	$V_t$ [Hg]
<b>UR - N.1</b>	0,572	0,370	0,202	0,207
<b>UR - N.2</b>	0,573	0,370	0,203	0,204
<b>UR - P.1</b>	0,599	0,369	0,190	0,205
<b>UR - P.2</b>	0,599	0,369	0,190	0,204
<b>UR - C.1</b>	0,595	0,369	0,226	0,211
<b>UR - C.2</b>	0,587	0,369	0,218	0,205

Ce volume poral total est dénommé  $V_t$  [ $V_m$  105] et il est calculé à l'aide de la relation :

$$V_t [V_m 105] = V_m [105] - 1/d_r$$

Ainsi, nous disposons des valeurs de  $V_t$  obtenues sur le même type d'échantillon (mottes) et dans le même état d'hydratation (105°C). Les valeurs de  $V_t$  [ $V_m$  105] et  $V_t$  [Hg] sont comparables (tableau 5.6). Ceci indique que la limite de taille pour la prise en compte de grands pores est la même avec les deux méthodes.

Les valeurs de  $V_{str}$  [M] et  $V_{str}$  [Hg] peuvent par conséquent être mises en relation puisqu'il s'agit de volumes poraux accessibles à des pores de diamètre équivalent appartenant à la même gamme de taille. L'analyse de variance (tableau 5.7) montre que la seule différence significative apparaît avec la source de variation profondeur.

Tableau 5.7: Analyse de variance. Comparaison entre  $V_{str}[Hg]$  et  $V_{str}[M]$ .

S.Variation	D.L	S.C.E.	C.M	s	F
Total	35	9481			
Profondeurs	1	981	981		4,58*
M.d'utilisations	2	910	445		2,12
$V_{str}$	1	641	641		2,99
P.xM.d'ut.	2	639	319		1,49
P.x $V_{str}$	1	290	290		1,35
M.d'ut.x $V_{str}$	2	801	400		1,87
P.x M.x $V_{str}$	2	72	35		< 1
Résidu	24	5147	214	14,62	

CV% = 16,05

\* significatif au risque de 5%

La profondeur 1 possède un  $V_{str}$  sur mottes plus élevé que pour la profondeur 2, et ceci indépendamment du mode d'utilisation et de la méthode de détermination de  $V_{str}$ .  $V_{str}$  [Hg] ayant été déterminé avec trois répétitions, nous n'avons pris que trois des cinq répétitions faites pour  $V_{str}$  [M] en se fixant comme règle de choix que la moyenne de ces trois répétitions soit la plus proche possible de celle calculée avec les trois précédentes.

Ceci étant, si  $V_{str}$  [M] et  $V_{str}$  [Hg] sont du même ordre de grandeur, cela signifie que pour les mottes, le volume poral occupé par de l'air à pF = 3,7 ( $V_{str}$  [M]) et que le volume poral ne résultant pas de l'assemblage des particules d'argile à 105°C ( $V_{str}$  [Hg]), sont du même ordre de grandeur.

Par conséquent, la diminution de  $V_{arg}$  entre pF = 3,7 ( $V_{arg}$  [pF=3,7]) et 105°C ( $V_{arg}$  [Hg]) discutée précédemment (tableau 5.4), doit correspondre à une diminution du volume massique des mottes [ $V_m$ ] équivalente ou tout au moins proche. C'est effectivement ce que montrent les résultats présentés dans le tableau 5.8.

**Tableau 5.8:** Comparaison de la différence de volume entre  $V_m$ [pF=3,0] et  $V_m$ [105] avec la différence de volume entre le  $V_{arg}$ [pF=3,7] et  $V_{arg}$ [Hg].

	$\Delta V_m =$ $V_m$ [pF=3,0]- $V_m$ [105]	$\Delta V_{arg} =$ $V_{arg}$ [pF=3,7]- $V_{arg}$ [Hg]
<b>UR - N.1</b>	0,036	0,046
<b>UR - N.2</b>	0,038	0,053
<b>UR - P.1</b>	0,036	0,049
<b>UR - P.2</b>	0,038	0,043
<b>UR - C.1</b>	0,035	0,051
<b>UR - C.2</b>	0,045	0,046

**D) Cohérence des variations de  $V_t$  [Hg],  $V_{str}$  [Hg] et  $V_{arg}$  [Hg]**

Nous avons montré précédemment l'absence de variations de  $V_t$  [Hg] entre tous les échantillons. Pour  $V_{arg}$  [Hg], une différence significative et apparue entre les deux profondeurs, mais aucune influence significative du mode d'utilisation n'a été observée à une profondeur donnée.

Il serait alors logique que nous obtenions le même type de variation pour  $V_{str}$  [Hg]. Or, pour  $V_{str}$  [Hg], aucune différence significative n'a été enregistrée. Ce résultat peut apparaître être en contradiction avec ce qui vient d'être évoqué puisque,  $V_t$  [Hg] =  $V_{str}$  [Hg] +  $V_{arg}$  [Hg].

En fait, cette apparente contradiction est due au cumul des erreurs pour le calcul de  $V_{str}$  [Hg]. L'analyse de variance a alors été faite avec moins de sensibilité (coefficient de variation plus élevé que pour  $V_{arg}$  [Hg] et  $V_t$  [Hg]). Par contre, quand on regroupe les valeurs de  $V_{str}$  [Hg] et  $V_{str}$  [M], on améliore la sensibilité de l'analyse et la profondeur intervient de façon significative dans les variations de  $V_{str}$ .

**E) Volume structural occupé par de l'air à pF=3,7 dans les anneaux de Kopecky ( $V_{str}$  [ $d_a$ ])**

En effectuant le même calcul que pour  $V_{str}$  [M], nous pouvons calculer un volume d'air dans les anneaux de Kopecky à pF=3,7 ( $V_{str}$  [ $d_a$ ]) à l'aide de la relation :

$$V_{str} [d_a] = V_t [d_a] - V_{arg} [pF=3,7]$$

Les valeurs ainsi calculées sont données dans le tableau 5.5. Pour les mêmes raisons que lors de la discussion de  $V_t [d_a]$ , nous n'avons pas effectué d'analyse de variance. Néanmoins, il est clair qu'il n'y a pas de différence de  $V_{str} [d_a]$  à la profondeur 1. Pour la profondeur 2, la plus faible valeur pour UR-N-2 est considéré comme non différente des deux autres.

La différence de  $V_{str}$  en fonction de la profondeur est apparue être faible à partir de  $V_{str} [Hg]$  et  $V_{str} [M]$ . A partir de  $V_{str} [d_a]$ , elle est plus nette et par conséquent se confirme.

#### F) Conclusion

Bien que la teneur en argile varie de 39 à 48 %, nous n'avons pas enregistré de variation de  $V_{str}$  à une profondeur donnée. Ainsi, en l'absence d'effet "mise en culture" à la profondeur 2, la pédogénèse est à l'origine de variations de teneur en argile (suite à l'érosion hydrique) qui sont apparemment sans conséquence importante pour  $V_{str}$ .

Quant à la faible différence de  $V_{str}$  entre les deux profondeurs, elle doit être attribuée à l'érosion hydrique de la parcelle sol nu et non à la culture de canne à sucre ou de graminées dans la parcelle dite "pâturage".

#### 5.2.4 Volume poral libre à l'air ( $V_{air}$ )

Jusqu'alors, nous n'avons analysé les résultats qu'en distinguant deux compartiments poraux :  $V_{str}$  et  $V_{arg}$ . Pour  $V_{str}$ , notre analyse a été globale pour les pores de grande taille. En effet, seule la discussion à propos de  $V_t [d_a]$  et  $V_t [eau]$  a montré l'existence de différences dans la distribution des pores de grande taille (fig. 5.2).

Pour décomposer  $V_{str}$  en séparant le volume poral dû aux pores les plus grands, nous avons introduit une limite de taille de pore à partir de laquelle on considère généralement que les phénomènes de capillarité deviennent négligeables.

McINTYRE et SLEEMAN (1982), SATO et TOKUNAGA (1989), utilisèrent  $pF=1,5$  (30 hPa,  $D_e = 100 \mu m$ ) pour cette limite ; HALL et al. (1977) et McKEAGUE et al. (1984), considèrent cette limite comme étant à  $pF=1,7$  (50 hPa) COMBEAU et QUANTIN (1963), étudiant la relation entre les valeurs de capacité au champ et les courbes de rétention en eau, observèrent que  $pF=1,8$  (65 hPa) et  $pF=2,0$  (100 hPa) sont les valeurs qui sont les plus satisfaisantes suivant les cas.

Nous pourrions encore citer de très nombreux autres travaux mais pour les sols brésiliens tels que les "alfisols", les "ultisols" et les "oxisols", la valeur de  $pF=1,78$  (60 hPa,

$D_c=50 \mu\text{m}$ ) est très généralement prise comme la meilleure valeur pour établir cette limite de comportement concernant les phénomènes de capillarité.

Le volume poral occupé par de l'air à  $pF=1,78$  est appelé volume poral libre à l'air ( $V_{\text{air}}$ ) (GROHMANN, 1960 ; OLIVEIRA et al., 1968 ; CARVALHO 1976 ; FERREIRA et MARCOS 1983 ; CINTRA et al., 1983). C'est d'ailleurs aussi ainsi qu'est définie la limite entre macroporosité et microporosité au Brésil.

Pour calculer un volume libre à l'air, il faut disposer d'une valeur de volume massique total et d'une valeur de teneur en eau à  $pF = 1,78$ . Pour le volume massique total ( $V_t$ ), nous pouvons utiliser quatre valeurs :

- celle calculée à partir de la densité apparente des cylindres ( $V_t [d_a]$  de Kopecky) ;
- celle calculée en utilisant la teneur en eau des cylindres à saturation ( $V_t [\text{eau}]$ ) ;
- en utilisant le volume total de mercure introduit dans les mottes ( $V_t [\text{Hg}]$ ) ;
- et enfin, en utilisant le volume massique des mottes à saturation ( $V_m [\text{Sat}]$ ).

Ce qui nous intéresse pour le volume poral libre à l'air [ $V_{\text{air}}$ ], ce sont les valeurs que l'on pourra estimer être proches de celles des horizons dont sont issus les échantillons. Pour cette raison, nous n'utiliserons que les valeurs obtenues à partir des cylindres de Kopecky. Le volume libre à l'air [ $V_{\text{air}}$ ] ainsi calculé est donnée dans le tableau 5.9.

**Tableau 5.9:** Volume libre à l'air calculé à partir des anneaux de Kopecky ( $V_{\text{air}} [pF = 1,78]$ ) et % par rapport au volume total ( $V_t [d_a]$ ).

	$V_{\text{air}} [pF=1,78]$	% $V_{\text{air}} [pF=1,78]$
<b>UR - N.1</b>	0,133	38,8
<b>UR - N.2</b>	0,081	26,6
<b>UR - P.1</b>	0,133	39,1
<b>UR - P.2</b>	0,094	30,7
<b>UR - C.1</b>	0,133	37,4
<b>UR - C.2</b>	0,096	30,0

Ne disposant pas de répétitions suffisantes pour la mesure de densité apparente, nous n'avons pas pu discuter de la signification des différences sur la base d'une analyse de variance. Néanmoins, l'absence de différence pour la profondeur 1 entre les modes d'utilisation est très nette.

Quant à la profondeur 2,  $V_{\text{air}} [d_a]$  est un peu moins élevé pour UR-N-2 que pour UR-P-2 et UR-C-2. Cette différence de  $V_{\text{air}} [d_a]$  étant très faible, nous avons considéré que les trois valeurs de  $V_{\text{air}} [d_a]$  à la profondeur 2 sont similaires.

Comme pour  $V_{\text{str}} [d_a]$ , la profondeur 1 se distingue de la profondeur 2 par des valeurs de  $V_{\text{air}}$  plus élevées. Cette distinction est d'ailleurs encore plus nette que pour  $V_{\text{str}} [d_a]$  (tableau 5.5). La différence de  $V_{\text{air}}$  doit être attribuée à d'autres pores que des fissures (pores planaires), puisque le retrait peut être considérée comme négligeable à  $pF=1,78$ . Il s'agit alors très vraisemblablement de pores d'origine biologiques tels que des pores tubulaires ou des pores dus à l'assemblage d'agrégats tels que des cavités.

Les faibles différences dans la distribution des pores les plus grands, c'est à dire les différences évoquées à partir de  $V_t [d_a]$  et  $V_t [\text{eau}]$  en fonction du mode d'utilisation et pour une profondeur donnée, n'apparaissant pas avec les valeurs de  $V_{\text{air}} [d_a]$ .

Enfin, précisons que  $V_{\text{air}} [d_a]$  exprimé en % de la porosité totale est compris entre 26 et 39 % (tableau 5.9).

### 5.2.5 Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ )

La conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ ) est liée à la géométrie du système poral (distribution de taille et continuité des pores) dans cet état saturé. Nous venons de discuter des variations de volume poral libre à l'air ( $V_{\text{air}}$ ) à  $pF=1,78$  qui représente le volume de pore de  $D_e > 50 \mu\text{m}$ . Pour mettre en relation  $V_{\text{air}}$  et  $K_0$  nous admettrons que les variations de géométrie du système poral, sont très faibles entre l'état saturé et  $pF=1,78$ .

Pour les échantillons provenant de la profondeur 2, nous n'avons pas enregistré de différence de  $K_0$  (tableau 4.20). L'absence de différence pour  $V_{\text{air}}$ , qui a été mise en évidence précédemment, est cohérente avec cette absence de variation pour  $K_0$  (tableau 5.3).

Nous avons à de nombreuses reprises évoqué la conclusion à laquelle nous sommes arrivés à l'issue de la discussion de  $V_t [d_a]$  et de  $V_t [\text{eau}]$  (figures 5.2 et 5.3). La différence de distribution représentée sur la figure 5.2 apparaît être sans conséquence pour  $K_0$ . Le calcul du volume poral non pris en compte par  $V_t [\text{eau}]$  peut être aisément effectué en soustrayant  $V_t[\text{eau}]$  à  $V_t [d_a]$ . Les résultats de ce calcul sont présentés dans le tableau 5.10.

Tableau 5.10: Valeur de  $V_t[d_a]$  et  $V_t[\text{eau}]$ . Différence entre ces deux valeurs de volume poral total et valeur de la conductivité hydraulique en saturé.

S.Variation	Volume poral ( $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$ )			$K_0$ cm/h
	$V_t [d_a]$ (1)	$V_t [\text{eau}]$ (2)	(1) - (2)	
UR - N.1	0,343	0,298	0,045	5,2
UR - N.2	0,305	0,278	0,027	4,6
UR - P.1	0,340	0,286	0,054	13,2
UR - P.2	0,306	0,297	0,009	5,1
UR - C.1	0,355	0,317	0,038	48,1
UR - C.2	0,320	0,319	0,001	4,4

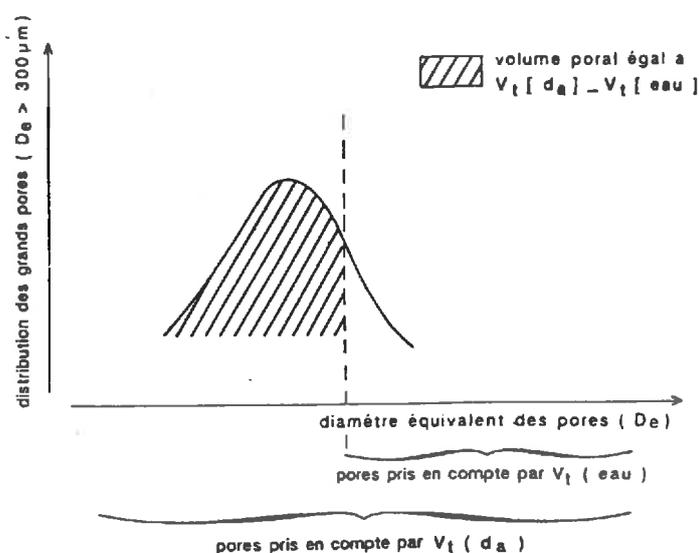


Figure 5.4: Représentation schématique du volume poral non pris en compte par  $V_t[\text{eau}]$ .

Rappelons que la différence correspond à un volume de pores de trop grande taille pour avoir été occupés par de l'eau dans les conditions expérimentales employées pour saturer les échantillons. Ce volume poral, qui est représenté schématiquement à l'aide de la figure 5.4, est peu élevé pour UR-N-2 et peut être considéré comme inexistant pour UR-P-2 et UR-C-2 (tableau 5.10).

Les valeurs de  $K_0$  sont essentiellement dépendantes de la taille des pores les plus grands, en continuité de la partie supérieure à la partie inférieure du cylindre et du nombre de ces pores. La caractèrè de continuité des pores n'a pas été étudié avec les méthodes que nous avons utilisées. Les différences mises en évidence à partir de  $V_t [d_a]$  et  $V_t [\text{eau}]$  (tableau 5.1), correspondraient alors à des pores qui ne sont pas en continuité à travers les cylindres ayant été utilisés pour la détermination de  $K_0$ .

Les pores de plus grandes tailles observées à partir des lames minces ont été les fissures, mais on peut considérer que celles-ci sont fermées lorsque l'échantillon est saturé d'eau. Mise à part les fissures, deux autres types de pores ont été identifiés: des cavités décrites à partir des descriptions des lames minces ; et des pores résultant de l'assemblage des particules d'argile qui ont été mises en évidence en porosimétrie au mercure.

Les cavités sont des pores de beaucoup plus grande taille que ceux dus à l'assemblage des particules d'argile mais ces cavités sont-elles en continuité ? Si l'on compare les valeurs de  $K_0$  obtenues à la profondeur 2 à celles données dans la littérature (FERNANDES et al., 1983 ; JORGE et al., 1984), il est difficile de ne pas envisager un rôle des cavités dans les transferts d'eau. Ces pores, qui ont été décrits à partir des observations de lames minces comme étant des cavités, pourraient être en fait, au moins partiellement, des pores tubulaires. S'agissant de pores tubulaires, il serait alors plus facile d'envisager qu'ils sont en continuité à travers les cylindres.

En fait, il ne nous est pas possible, à ce stade de la discussion, de conclure à ce sujet. Ce qui est clair, c'est qu'il est raisonnable d'admettre que certains des pores décrits comme étant des cavités soient en continuité à travers les cylindres et que ce soient eux qui déterminent les valeurs de  $K_0$ . Par conséquent, le nombre de ces cavités en continuité serait constant à la profondeur 2, puisque  $K_0$  ne varie pas à cette profondeur.

À la profondeur 1, contrairement à la profondeur 2, des variations importantes de  $K_0$  ont été mises en évidence (tableau 5.10). Les valeurs élevées de  $K_0$  obtenues pour UR-C-1 et UR-P-1 ont été reliées à la présence de pores de grande taille en continuité à travers les cylindres. Quant à la valeur faible enregistrée pour UR-N-1 (semblable aux valeurs obtenues pour la profondeur 2), elle serait due à l'absence de pores de grande taille en continuité.

Nous pourrions rechercher une explication à ces variations de  $K_0$  pour la profondeur 1 en reprenant la discussion de la géométrie de l'espace poral, mais nous venons de voir que, pour la profondeur 2, il était difficile de les utiliser. Il suffit d'ailleurs, à ce propos, de rappeler que  $V_{\text{air}}$  ne varie pas à la profondeur 1 (tableau 5.10), et que  $K_0$  peut varier d'un facteur  $\times 10$ . On peut aussi ajouter que  $V_{\text{str}}(d_a)$  ne varie pas pour la profondeur 1 en fonction du mode d'utilisation (tableau 5.5).

L'explication à ces variations de  $K_0$  concernerait par conséquent des pores de grande taille en continuité à travers les cylindres et qui seraient absents du mode d'utilisation sol nu. Il est alors logique d'envisager que ces pores sont la conséquence du travail du sol ou d'origine racinaire, puisqu'ils sont absents du sol nu.

Si ces pores de grande taille ont pour origine le travail du sol, ils seraient présents en nombre suffisamment important et posséderaient une distribution de taille telle qu'ils seraient apparus dans les différentes valeurs de  $V_{str}$  discutées précédemment. Or, cela n'a pas été le cas puisque nous n'avons pas relevé de différence de  $V_{str}$  à la profondeur 1 entre les modes d'utilisation. Par contre, le fait que ces pores de grande taille soient d'origine racinaire est beaucoup plus cohérent comparé à l'ensemble des résultats précédents.

Il est tout d'abord facile d'accepter que de tels pores soient en continuité sur la hauteur d'un cylindre qui est de 7,5 cm. Ensuite, les pores d'origine racinaire sont généralement trop peu nombreux pour intervenir de façon sensible dans une valeur volumique et sont, par conséquent, difficilement détectables lors d'une analyse compartimentale de l'espace poral. Enfin, de fines racines ont effectivement été observées dans les échantillons UR-C-1 et UR-P-1 qui ont été utilisés pour la détermination de  $K_0$ . La durée du stockage des échantillons a d'ailleurs favorisé le rôle des pores d'origine racinaire, les racines étant partiellement à totalement décomposées lors des expériences.

### 5.2.6 Conclusion

La première conclusion concernant le site de "l'Universidade Rural" est la presque totale absence de relation entre le mode d'utilisation agricole, et les variations du mode d'organisation des constituants du sol et de la géométrie de l'espace poral qui en résulte. Les différences de volume poral concernent la distribution des pores de grande taille. Ces différences ont été illustrées à l'aide des figures 5.2 et 5.3 et le sont de nouveau à l'aide de la figure 5.5.

Nous avons reconstitué de façon très schématique une distribution de taille de pore pour l'ensemble du volume poral. Les valeurs de  $D_e$  indiquées en abscisse sont approximatives et ne correspondent pas aux mêmes états d'hydratation. La figure 5.5 fait clairement apparaître cette différence de distribution sans que le volume poral total soit différent.

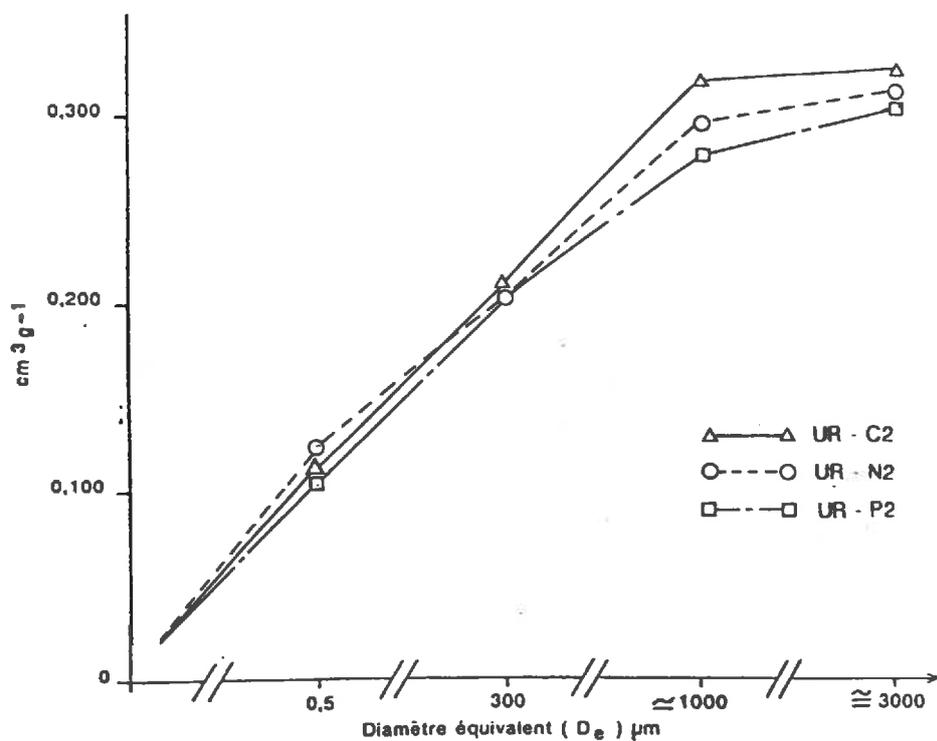
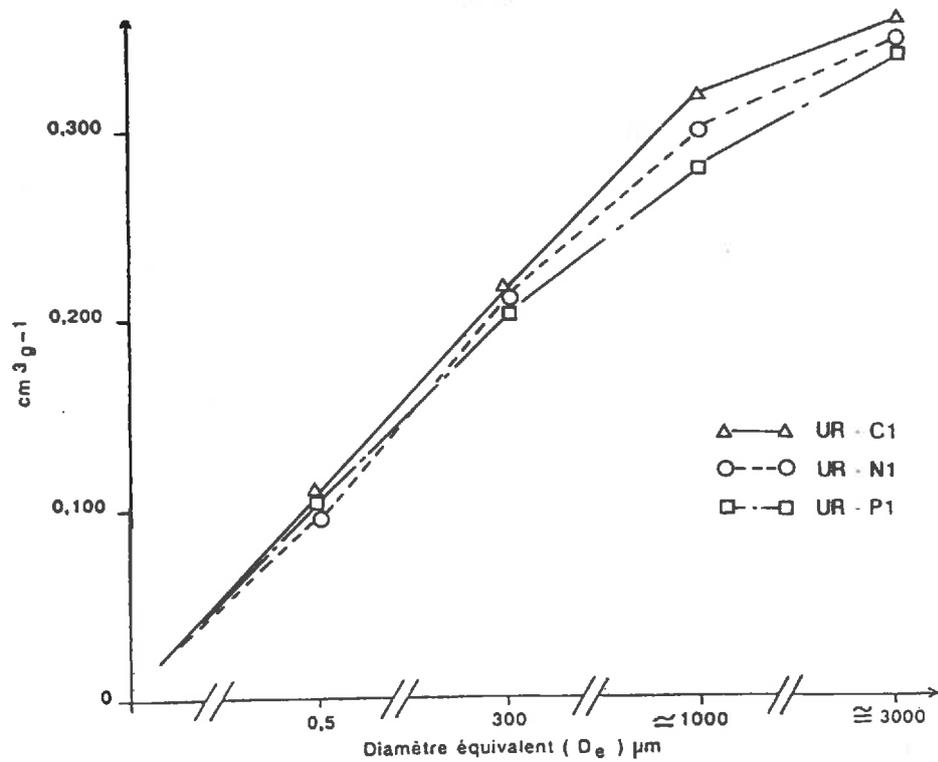


Figure 5.5: Représentation schématique de la distribution de taille des pores pour l'ensemble du volume poral (Site de "l'Universidade Rural"). Les valeurs de  $D_e$  indiquées en abscisse doivent être considérées comme étant des valeurs approchées.

Dans l'horizon sous-jacent à l'horizon superficiel (profondeur 2), nous nous attendions à un tel résultat en l'absence d'une mise en culture mécanisée. Dans l'horizon

superficiel (profondeur 1), l'absence de différence entre les situations cultivées et le sol nu est par contre inattendue.

Cette absence de différence de la géométrie de l'espace poral à chaque profondeur étudiée est un résultat intéressant, mais insuffisant pour conclure à l'absence d'un effet du mode d'utilisation agricole sur l'organisation des constituants du sol.

L'existence d'une variation de teneur en argile de 5 % pour l'horizon superficiel et de 10 % pour l'horizon sous-jacent indique qu'il s'agit d'horizons différents lorsqu'ils sont replacés dans le profil du sol initial avant l'intervention du phénomène d'érosion hydrique. De la sorte, les caractéristiques de l'espace poral pourraient avoir été différentes avant la mise en culture et ne plus l'être, suite au tassement d'origine agricole.

Il est important de noter que, pour le site de "l'Universidade Rural", les horizons sous-jacents à l'horizon superficiel ne seraient pas modifiés par la mise en culture. Cela n'exclut pas la présence en différentes quantités de pores racinaires mais ceux-ci seraient toujours trop peu nombreux pour être identifiés lors d'une analyse compartimentale de l'espace poral. C'est dans cette acception, que l'absence de modification doit être comprise.

L'absence de différence de géométrie de l'espace poral mise en évidence pour la profondeur 2 existait alors avant la mise en culture dans les horizons BA (pour une teneur en argile variant de 39 à 48 %). Pour l'horizon superficiel, il est très probable que la géométrie de l'espace poral ait été différente avant la mise en culture, c'est à dire sous végétation naturelle par rapport à la situation actuelle. Aujourd'hui, il ne semble pas y avoir de différence entre les trois modes d'utilisation.

Ainsi, si le mode d'organisation des constituants a été modifié par le mode d'utilisation, il ne l'a pas été différemment pour un sol cultivé (canne à sucre et pâturage) et sol non cultivé (sol nu).

Il n'y a donc pas d'argument qui permette d'affirmer que la mise en culture entraîne une augmentation de la densité apparente de l'horizon cultivé, et par conséquent entraîne un tassement de cet horizon. Cela concerne bien évidemment une mise en culture telle qu'elle a été effectuée dans les parcelles expérimentales du site de "l'Universidade Rural" : une seule mise en culture et absence de mécanisation.

Les seules différences, en terme de distribution de taille des pores, concerneraient des pores d'origine racinaire trop peu nombreux pour avoir été identifiés lors de l'analyse compartimentale de l'espace poral, mais suffisamment pour être à l'origine des variations de conductivité hydraulique enregistrées.

Ainsi, les pores d'origine racinaire, qui font en quelque sorte "la différence", expliqueraient que la conductivité hydraulique puisse varier de façon très importante à la profondeur 1. Ceci est en accord avec les résultats présentés par HUMBEL (1976) qui montrent que, pour des sols ferrallitiques du Cameroun, il n'y a de différence de  $V_p$  entre une végétation de savane (graminée) et une végétation de forêt, que pour les 20 premiers centimètres. Le rôle des racines ne concernerait que les premiers décimètres du sol.

Enfin, il est apparu au cours de la discussion que les échantillons exprimaient une diminution de volume au cours de l'extraction d'eau, entraînant ainsi la formation d'un réseau de fissures de maille centimétrique. Celui-ci a été aisément observé sur les lames minces. Or, les sols que nous avons étudiés sont généralement considérés comme ne possédant pas de retrait au cours de la dessiccation.

### **5.3 Le site de "Campos"**

Pour le site de "Campos", la discussion sera à la fois plus facile et plus difficile à mener que pour le site de "l'Universidade Rural". L'absence de phénomène de retrait devrait faciliter, si elle est confirmée, les comparaisons et la discussion des variations du volume poral structural. Par contre, l'histoire culturelle des deux modes d'utilisation canne à sucre et pâturage est beaucoup plus complexe que pour le site de "l'Universidade Rural".

A ce propos, rappelons que pour le site de "Campos" le mode d'utilisation forêt peut être considéré comme le sol dans son état naturel, puisqu'il n'a jamais été mis en culture. Rappelons aussi que la parcelle canne à sucre est cultivée depuis 35 ans, et que la parcelle pâturage est exploitée ainsi après avoir été cultivée pendant 40 ans en canne à sucre.

L'histoire culturelle de ces deux parcelles est par conséquent très différente des parcelles expérimentales du site de "l'Universidade Rural". Non seulement, les opérations culturales sont mécanisées, mais leur mise en culture est beaucoup plus ancienne. De plus, la parcelle pâturage est effectivement pâturée à "Campos" alors qu'il s'agissait en fait d'une culture de graminée à "l'Universidade Rural". Enfin, à la différence du sol de la parcelle sol nu de "l'Universidade Rural", le sol sous forêt de "Campos" peut être considéré comme étant le sol dans son état initial.

Nous venons de voir, dans la conclusion qui précède, les difficultés qu'il y avait à établir une relation de cause à effet entre des conditions d'utilisation du sol et un type d'organisation donné caractérisé par la géométrie de son espace poral. Avant de procéder à la discussion des éventuelles relations de cause à effet entre un mode d'utilisation et un état de

compacité, nous allons néanmoins procéder comme pour le site de “l’Universidade Rural”. Cela implique, tout d’abord, que soient comparées les données de l’analyse compartimentale du volume poral total à celles de la caractérisation des constituants et des modes d’organisation.

### 5.3.1 Volume poral total ( $V_t$ )

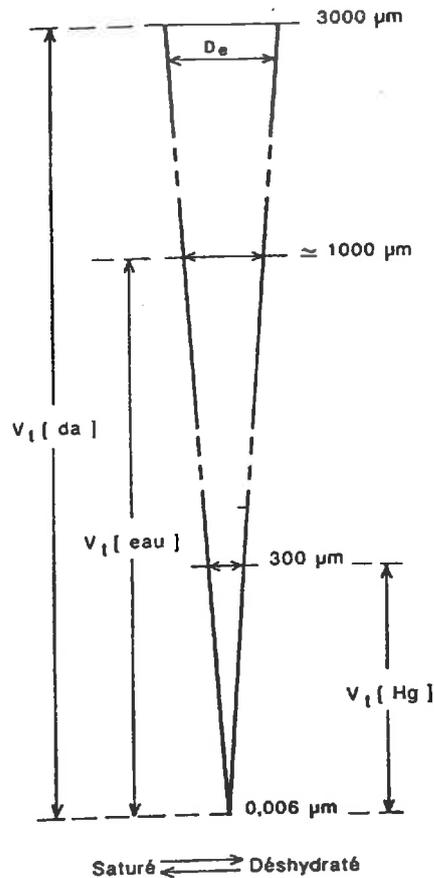
Comme pour le site de “l’Universidade Rural”, trois valeurs de volume poral total ( $V_t$ ) sont comparées :

- celle obtenue à partir de l’étude des propriétés de rétention en eau  $V_t$  [eau] ;
- celle obtenue à partir de l’intrusion totale de mercure ( $V_t$  [Hg]) ;
- et, enfin, celle calculée à partir des valeurs de  $d_a$  et  $d_r$ .

Les valeurs sont données dans le tableau 5.11. On note aussi (comme pour le site de “l’Universidade Rural”) que pour tous les échantillons :  $V_t [d_a] > V_t [eau] > V_t [Hg]$ .  $V_t [d_a]$  étant calculé à partir de la valeur de  $d_a$  tous les pores sont pris en compte.  $V_t [eau]$  a été déterminé à partir du volume d’eau retenu par les cylindres en condition de saturation (vide de la trompe à l’eau). Par conséquent, les pores plus grands, c’est-à-dire ceux pour lesquels la capillarité est négligeable, n’ont pas été pris en compte. Or, ces pores sont présents dans les échantillons, car les observations en microscopie optique ont en effet montré, dans la zone à “entassement de grains”, la présence de vides “d’entassement” de très grande dimensions (500 à 3000  $\mu\text{m}$ ) (fig. 5.6).

Tableau 5.11: Volume poral total calculé à partir de la teneur en eau à saturation ( $V_t$  [eau]), de la courbe d’intrusion de mercure ( $V_t$  [Hg]), ou des valeurs de  $d_a$  et  $d_r$  ( $V_t [d_a]$ ).

TRAITEMENTS	$V_t$ [eau] $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ (1)	$V_t$ [Hg] $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ (2)	$V_t$ [ $d_a$ ] $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ (3)	(3) - (1)	(1) - (2)	(3) - (2)
CP - P.1	0,225	0,171	0,265	0,040	0,054	0,094
CP - P.2	0,240	0,183	0,279	0,039	0,057	0,096
CP - F.1	0,208	0,174	0,299	0,091	0,034	0,125
CP - F.2	0,262	0,182	0,296	0,034	0,080	0,114
CP - C.1	0,254	0,185	0,295	0,041	0,069	0,110
CP - C.2	0,245	0,192	0,266	0,021	0,053	0,074



**Figure 5.6:** Schéma indiquant les valeurs de diamètre de pores ( $D_e$ ) pris en compte par  $V_t[\text{Hg}]$ ,  $V_t[\text{eau}]$  et  $V_t[\text{da}]$  pour le site de "Campos". Ce schéma ne fait pas apparaître de différence entre les états déshydraté et saturé puisque le système poral serait rigide.

Pour expliquer que  $V_t[\text{Hg}]$  soit le plus faible seules deux des trois explications envisagées pour le site de "l'Universidade Rural" peuvent être ici proposées puisque nous n'avons pas observé de diminution du volume des mottes au cours de la dessiccation. S'il n'y a pas de phénomène de retrait lors de la dessiccation, les différences entre  $V_t[\text{Hg}]$  et  $V_t[\text{eau}]$  sont donc à attribuer à des pores de diamètre équivalent ( $D_e$ ) supérieur à  $300\ \mu\text{m}$  ou inférieur à  $5,7\ \text{nm}$ . Le rôle des pores de  $D_e < 5,7\ \text{nm}$  peut dès maintenant être écarté puisque les courbes d'intrusion de mercure indiquent qu'il n'y a pas de contribution de ces pores au volume poral total (courbes cumulées à pente nulle du côté des pores les plus petits) (figures 3.9 et 3.10).

*A) Volume poral total obtenu à partir des valeurs de densité apparente des anneaux de Kopecky ( $V_t[d_a]$ )*

$V_t[d_a]$  n'a pas été l'objet d'une analyse de variance, compte tenu de la façon dont il a été déterminé. Dans une discussion précédente (cf chapitre 3), nous avons montré que, excepté  $V_t[d_a]$  pour CP-C-1 qui est supérieur à  $V_t[d_a]$  pour CP-C-2, les différences de  $V_t[d_a]$  pour les autres échantillons sont faibles.

Si l'on observe le tableau 5.11, nous remarquons même en l'absence de l'analyse de variance, qu'un seul mode d'utilisation pourrait présenter des différences de  $V_t [d_a]$  entre les profondeurs 1 et 2, c'est la canne à sucre avec CP-C-1 > CP-C-2. Concernant l'influence du mode d'utilisation sur  $V_t [d_a]$  à chaque profondeur, on note qu'à la profondeur 1, le mode d'utilisation pâturage pourrait posséder un  $V_t [d_a]$  plus faible que pour les deux autres modes d'utilisation.

Pour la profondeur 2, les différences sont moins nettes. La valeur  $0,296 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  de CP-P-2 paraît être plus élevée que celle obtenue pour CP-C-2 ( $0,266 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ). Néanmoins, en l'absence de l'analyse de variance, l'écart n'est pas suffisant pour que nous puissions l'affirmer. Nous considérerons donc ces deux valeurs comme étant proches.

B) *Volume poral total obtenu à partir des propriétés de rétention en eau ( $V_t [eau]$ ).*

Une nouvelle analyse de variance ne concernant que la teneur en eau des cylindres à saturation a été faite (tableau 5.12). Ces valeurs de teneur en eau sont celles qui ont été utilisées pour calculer  $V_t [eau]$  (tableau 5.11). Elle indique que toutes les sources de variation testées interviennent de façon significative. Compte tenu du rôle significatif de la source de variation "profondeurs x modes d'utilisation", nous avons décomposé cette interaction de deux façons différentes. La première a été faite pour comparer le comportement de la source de variation profondeur pour chaque mode d'utilisation (tableau 5.13). On observe par cette décomposition qu'il n'y a pas de différences significatives entre les profondeurs 1 et 2 pour CP-P et CP-C. Par contre, pour CP-F, la profondeur 2 possède un  $V_t [eau]$  supérieur à celui de la profondeur 1.

**Tableau 5.12:** Analyse de variance. Volume poral total obtenu à partir de la teneur en eau à saturation ( $V_t [eau]$ ).

S.Variation	D.L.	S.C.E.	C.M.	s	F
Total	17	7178			
Profondeur	1	1760	1760		16,7 * *
Mode d'ut.	2	1108	554		5,2 *
Prof.xM.d'ut.	2	3044	1522		14,4 * *
Résidu	12	1266	105,5	10,27	

CV% = 4,21

\* significatif au risque de 5%

\* \* significatif au risque de 1%

**Tableau 5.13: Décomposition des degrés de liberté de l'interaction. Comparaison des profondeurs à chaque mode d'utilisation.**

S. VARIATION	D.L	S.C.E.	C.M.	F
Prof dans P	1	308	308	2,92
Prof dans F	1	4374	4374	41,46* *
Prof dans C	1	122	122	< 1

\* \* significatif au risque de 1%

La seconde façon de procéder consiste à décomposer les degrés de liberté de l'interaction pour discuter le rôle de la source de variation du mode d'utilisation à chaque profondeur (tableau 5.14). On observe qu'à la profondeur 1, il y a une forte signification de la source de variation mode d'utilisation. L'application du test de Tukey (tableau 5.15) montre que pour  $V_t$  [eau] : CP-C-1 > CP-P-1 = CP-F-1.

Par contre, à la profondeur 2 la signification de la source de variation mode d'utilisation est faible comme pour  $V_t$  [ $d_a$ ]. En effet, bien que les valeurs soient différentes, le test de Tukey indique une très faible signification des différences enregistrées (tableau 5.16). On note d'ailleurs que la plus petite différence significative au niveau de risque de 5 % (22,35), ajoutée au  $V_t$  [eau] pour CP-P-2 donne une valeur presque égale à celle de CP-F-2 (239,5 + 22,35 = 261,85).

Compte tenu de cette très faible signification et comme pour  $V_t$  [ $d_a$ ], nous considérons que les  $V_t$  [eau] des trois modes d'utilisation à la profondeur 2 sont semblables.

**Tableau 5.14:** Décomposition des degrés de liberté de l'interaction. Comparaison des modes d'utilisation à chaque profondeur.

S. VARIATION	D.L.	S.C.E.	C.M.	F
M.d'ut. dans prof.1	2	3304	1652	15,66 <sup>**</sup>
" " " 2	2	848	424	4,02 <sup>*</sup>

<sup>\*\*</sup> significatif au risque de 1%

<sup>\*</sup> " " " " " 5%

**Tableau 5.15:** Test de Tukey. Comparaison des modes d'utilisation à la profondeur 1.

Mode utilisation	Moyennes
Canne à sucre	254,0a
Pâturage	225,0b
Forêt	208,0b
Tukey 5%	22,35

**Tableau 5.16:** Test de Tukey. Comparaison des modes d'utilisation à la profondeur 2.

Mode utilisation	Moyennes
Forêt	262,0a
Canne à sucre	245,0ab
Pâturage	239,5b
Tukey 5%	22,35

Le volume poral non pris en compte avec  $V_t$  [eau] correspond donc au volume de pores de trop grande taille pour avoir été occupés par de l'eau dans les conditions expérimentales qui devaient conduire à la saturation des échantillons. Ce volume poral peut être calculé en soustrayant  $V_t$  [eau] à  $V_t$  [ $d_a$ ] (tableau 5.11).

Deux échantillons se distinguent alors nettement, CP-F-1 avec  $0,091 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  et CP-C-2 avec  $0,021 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , les autres valeurs étant de l'ordre de  $0,035$  à  $0,040 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . Cette valeur de volume poral obtenue pour CP-F-1 peut être expliquée par la présence des nombreux vides d'entassement qui ont été observés sur les lames minces. Ceux-ci, qui sont en effet de grande taille et n'auraient pas été pris en compte, ou tout au moins seulement partiellement, par  $V_t$  [eau]. Pour CP-C-2, les observations des lames minces indiquent que la différence faible entre  $V_t$  [ $d_a$ ] et  $V_t$  [eau] peut être reliée à un plus petit nombre de cavités et de vides d'entassement que pour les autres échantillons.

*C) Volume poral total obtenu à partir des courbes d'injection de mercure ( $V_t$  [Hg])*

Nous avons vu précédemment (chapitre 3) qu'il y avait des différences significatives pour  $V_t$  [Hg] (tableau 3.2 et 3.3).  $V_t$  [Hg] est supérieur à la profondeur 2 par rapport à la profondeur 1. D'autre part, le mode d'utilisation canne à sucre possède un  $V_t$  [Hg] plus élevé que CP-P, mais égale à CP-F, ces deux derniers ne diffèrent pas significativement.

Ces différences de  $V_t$  [Hg] concernent les pores de  $D_e < 300 \mu\text{m}$  qui sont présents dans des mottes de dimensions centimétriques. Par conséquent, la différence de volume poral entre  $V_t$  [ $d_a$ ] et  $V_t$  [Hg] représente, en l'absence de phénomènes de retrait, un volume

poral composé de pores de  $D_e > 300 \mu\text{m}$  ( $V_p [D_e > 300 \mu\text{m}]$ ). Les valeurs de  $V_p [D_e > 300 \mu\text{m}]$  sont reportées dans le tableau 5.11.

On note l'absence de différence de  $V_p [d_e > 300 \mu\text{m}]$  entre les deux profondeurs étudiées pour CP-F et CP-P,  $V_p [d_e > 300 \mu\text{m}]$  étant le plus élevé pour CP-F. Pour CP-C, la profondeur 2 ne se distingue pas de CP-F. Par contre, pour CP-C-2 nous enregistrons une valeur de  $V_p [D_e > 300 \mu\text{m}]$  beaucoup plus faible que pour les autres échantillons.

#### D) Conclusion

Si nous considérons, comme pour le site de "l'Universidade Rural", que  $V_t [d_a]$  est une approximation satisfaisante du volume poral des horizons dont proviennent les échantillons, on note que :

– le volume poral total est approximativement le même pour tous les échantillons (environ  $0,290 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ), excepté pour les échantillons CP-P-1 et CP-C-2 qui présentent des valeurs plus faibles ( $0,265 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) ;

– le volume poral développé par les pores de diamètre équivalent  $< 300 \mu\text{m}$  à l'état déshydraté ( $V_t [\text{Hg}]$ ), varie entre les échantillons. Certes, les différences sont faibles, mais ce volume poral serait plus élevé à la profondeur 2 qu'à la profondeur 1, et plus élevé pour CP-C-2 que pour CP-P-2 ;

La comparaison des valeurs de  $V_t [d_a]$ ,  $V_t [\text{eau}]$  et  $V_t [\text{Hg}]$  montre que la profondeur 2 du mode d'utilisation canne à sucre se distingue des autres échantillons par la présence d'un volume nettement plus faible de pores de  $D_e > 300 \mu\text{m}$ . Pour le mode d'utilisation pâturage, ce volume poral est plus élevé mais inférieur aux valeurs enregistrées par le mode d'utilisation forêt et pour la profondeur 1 du mode d'utilisation canne à sucre

### 5.3.2 Volume poral dû à l'assemblage de l'argile ( $V_{\text{arg}}$ )

Rappelons que  $V_t [\text{Hg}]$  a été divisé en un volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent compris entre  $0,006 \mu\text{m}$  et  $0,5 \mu\text{m}$  et un autre volume poral accessible à des pores de diamètre équivalent compris entre  $0,5 \mu\text{m}$  et  $300 \mu\text{m}$  (figures 3.9 et 3.10).

Le premier a été attribué aux pores dus à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{\text{arg}}$ ) et le second, dénommé volume poral structural ( $V_{\text{str}}$ ), à un ensemble de pores de différentes origines. Les données de  $V_{\text{arg}}$  sont présentées dans le tableau 5.17.

**Tableau 5.17:** Volume poral total dû à l'assemblage des particules d'argile à l'état déshydraté ( $V_{arg} [Hg]$ ) et à  $pF = 3,7$  ( $V_{arg} [pF = 3,7]$ ).

TRAITEMENTS	$V_{arg}[pF=3,7]$ cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	$V_{arg} [Hg]$ cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>
CP - P.1	0,082	0,083
CP - P.2	0,097	0,091
CP - F.1	0,070	0,062
CP - F.2	0,100	0,091
CP - C.1	0,102	0,085
CP - C.2	0,126	0,110

$V_{arg}[Hg] \times \% \text{ argile } r=0,96^{***}$   
 $V_{arg}[pF=3,7] \times \% \text{ argile } r=0,90^{**}$

#### A) Variations de $V_{arg}$ à l'état déshydraté

Les valeurs de  $V_{arg}$  à l'état déshydraté sont données par la porosimétrie au mercure (tableau 3.2). Dans le chapitre 3, nous avons montré que la profondeur 2 présentait un  $V_{arg} [Hg]$  supérieur à celui de la profondeur 1 (tableau 3.4). Des différences ont été aussi mises en évidence entre les modes d'utilisation pour  $V_{arg} [Hg]$  avec CP-C > CP-P. Pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural", de telles variations ont été attribuées à des différences de teneur en argile des échantillons. L'étroitesse de la corrélation entre  $V_{arg} [Hg]$  et la teneur en argile ( $r = 0,96^{**}$ , avec les résultats obtenus après traitement HCl+NaOH, tableau 2.1) indique que c'est aussi le cas pour les échantillons provenant du site de "Campos".

Comme pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural", cette discussion à propos de  $V_{arg} [Hg]$  est l'occasion de rapprocher :

- les valeurs de diamètre et épaisseur apparents déterminées à partir des diffractogrammes RX ;
- et la valeur de  $D_e$ , pour laquelle entre 0,006  $\mu\text{m}$  et 0,5  $\mu\text{m}$ , la dérivée de la courbe cumulée est la plus élevée.

Cette valeur de  $D_e$  est comprise entre 0,026 et 0,033  $\mu\text{m}$  quel que soit l'échantillon. L'épaisseur apparente des cristaux calculée varie de 0,025 à 0,028  $\mu\text{m}$ , et leur diamètre de 0,035 à 0,041  $\mu\text{m}$  (tableau 2.2).

$D_e$  est donc ici aussi très proche de l'épaisseur apparente calculée pour les cristaux de kaolinite. Les remarques énoncées pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural" concernent par conséquent aussi les échantillons de "Campos".

### B) Variations de $V_{arg}$ à l'état hydraté

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises le fait que les mottes centimétriques ne subissent pas de retrait lors de la dessiccation pour les échantillons du site de "Campos". Cela ne signifie pas nécessairement que l'espace poral ne se déforme pas lors de la dessiccation ; il s'agit d'une condition nécessaire, mais non suffisante pour que cela soit le cas (BRUAND, 1986). Si l'espace poral ne se déforme pas lors de la dessiccation, les courbes de sortie d'eau et d'entrée de mercure doivent être semblables (BRUAND et PROST, 1987).

Nous avons calculé les valeurs de diamètre équivalent, à partir des valeurs de pF, en utilisant la loi de JURIN (tableau 5.18). La valeur de  $D_e$  limitant  $V_{arg}$  [Hg] du côté des grands pores est  $0,5 \mu\text{m}$ . Cette valeur correspond à un pF de 3,7.

**Tableau 5.18:** Comparaison entre les données de la courbe d'intrusion de mercure et celles de la courbe de sortie d'eau. Correspondance entre les valeurs de pF et celles de diamètre équivalent. Les volumes sont donnés en  $\text{cm}^3 \text{g}$

1

TRAITEMENT	Sat V [Hg]	pF=1,0 300 $\mu\text{m}$	pF=1,5 120 $\mu\text{m}$	pF=1,78 60 $\mu\text{m}$	pF=2,0 30 $\mu\text{m}$	pF=2,5 10 $\mu\text{m}$	pF=3,0 3 $\mu\text{m}$	pF=3,7 0,5 $\mu\text{m}$	pF=4,0 0,3 $\mu\text{m}$	pF=4,2 0,2 $\mu\text{m}$
CP - P.1										
V [eau]	0,225	0,198	0,178	0,158	0,135	0,112	0,098	0,082	0,079	0,078
V [Hg]	0,171	0,167	0,156	0,136	0,132	0,103	0,090	0,083	0,081	0,079
CP - P.2										
V [eau]	0,240	0,203	0,174	0,152	0,136	0,121	0,105	0,097	0,096	0,096
V [Hg]	0,183	0,179	0,166	0,143	0,134	0,109	0,098	0,091	0,090	0,089
CP - F.1										
V [eau]	0,208	0,189	0,129	0,102	0,093	0,083	0,074	0,070	0,069	0,069
V [Hg]	0,174	0,167	0,148	0,118	0,104	0,075	0,067	0,062	0,061	0,060
CP - F.2										
V [eau]	0,262	0,229	0,197	0,157	0,144	0,123	0,108	0,100	0,099	0,097
V [Hg]	0,182	0,181	0,166	0,153	0,143	0,115	0,104	0,091	0,095	0,094
CP - C.1										
V [eau]	0,254	0,230	0,185	0,154	0,141	0,118	0,110	0,102	0,098	0,097
V [Hg]	0,185	0,182	0,169	0,133	0,123	0,099	0,093	0,085	0,084	0,083
CP - C.2										
V [eau]	0,245	0,227	0,202	0,191	0,164	0,150	0,138	0,126	0,123	0,120
V [Hg]	0,266	0,189	0,180	0,161	0,154	0,127	0,116	0,110	0,109	0,108
r	0,26	0,86	0,86	0,91	0,93	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95

Valeur critique de r  
 0,05 = 0,75  
 0,01 = 0,89  
 0,001 = 0,95

Dans le tableau 5.18, nous remarquons la similitude des valeurs de volume poral données par la courbe de sortie d'eau et celles données par la courbe d'intrusion de mercure pour pF = 3,7, pF = 4,0 et pF = 4,2, et ceci quels que soient les échantillons. Il en résulte que la géométrie des pores due à l'assemblage des particules d'argile ne varie pas au cours de la dessiccation.

Ainsi, les phases argileuses des deux sites étudiés se comporteraient de façon totalement différentes, l'une possédant une organisation déformable lors des phases de dessiccation – humectation (“l’Universidade Rural”) et l’autre possédant une organisation rigide dans les mêmes conditions (“Campos”).

Certes les kaolinites sont de taille un peu plus grande (épaisseur apparente de l’ordre du double, tableau 2.2) pour les échantillons de “Campos” que pour ceux de “l’Universidade Rural”, mais la teneur en goethite est nettement plus élevée pour les échantillons de “l’Universidade Rural” que pour ceux de “Campos”.

En d’autres termes, si la phase argileuse est plus “fine” à “l’Universidade Rural”, elle y serait par contre plus “cimentée”. De telles variations de comportement pourraient n’être dues qu’à de très faibles variations de la nature des oxyhydroxydes de fer (CHAUVEL et al., 1976). Les données dont nous disposons ne nous permettent pas de proposer une explication à ces différences de comportement.

### C) Conclusion

Cette étude du volume poral développé par les particules d’argile fait clairement apparaître la rigidité de l’espace poral lors des variations de l’état d’hydratation des échantillons. Concernant les variations de ce volume poral en relation avec le mode d’utilisation, les résultats indiquent qu’elles doivent être attribuées à des variations de teneur en argile.

## 5.3.3 Volume poral structural ( $V_{str}$ )

### A) Utilisation des courbes d’injection de mercure ( $V_{str}$ [Hg])

Lorsque nous avons discuté des résultats de la porosimétrie au mercure, l’analyse de variance n’a pas révélé de différence entre les échantillons (tableau 3.5). Or lorsque l’on compare directement les valeurs portées dans le tableau 3.2, il semble bien y avoir de différence entre certains échantillons.

En fait, lors du calcul de  $V_{str}$  [Hg], nous avons procédé par différence entre  $V_t$  [Hg] et  $V_{arg}$  [Hg]. En procédant de la sorte, nous avons cumulé les erreurs expérimentales pour ces deux grandeurs. Avec un coefficient de variation de 19 % (tableau 3.5), il aurait fallu que les écarts entre les valeurs portées dans le tableau 3.2 soient plus grandes. Néanmoins, même s’il ne ressort rien de très net de cette comparaison, il faut noter que  $V_{str}$  [Hg] est le plus faible pour CP-C-2.

## B) Utilisation des courbes de rétention en eau ( $V_{str} [eau]$ )

Les courbes de sortie d'eau et d'entrée de mercure sont encore très proches pour le domaine de valeur de  $D_e$  correspondant  $V_{str}$  (tableau 5.18). On note qu'un écart existe et que celui-ci croît avec  $D_e$ . Ceci serait dû à la taille des échantillons qui est très différente suivant la méthode employée. Ainsi, la prise en compte des grands pores pour les mottes employées en porosimétrie au mercure seraient d'autant plus partielle que ceux-ci sont de grande taille. Cet écart ne remettrait donc pas en cause l'existence d'une rigidité du système poral lors de la dessiccation.

Par conséquent, alors que nous n'avons pas pu procéder ainsi pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural", nous considérerons que le volume poral structural ( $V_{str} [eau]$ ), correspond au volume d'eau entre l'état saturé et  $pF=3,7$  ( $D_e > 0,5 \mu m$ ). Ce volume poral ainsi calculé est donné dans le tableau 5.19.

**Tableau 5.19:** Valeurs obtenues à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{str} [Hg]$ ), de la courbe de rétention en eau ( $V_{str} [eau]$ ) et de la densité apparente ( $V_{str} [d_a]$ ).

	$V_{str} [Hg]$	$V_{str} [eau]$	$V_{str} [d_a]$
<b>CP - P.1</b>	0,082	0,143	0,183
<b>CP - P.2</b>	0,092	0,144	0,186
<b>CP - F.1</b>	0,112	0,138	0,229
<b>CP - F.2</b>	0,091	0,162	0,196
<b>CP - C.1</b>	0,110	0,152	0,193
<b>CP - C.2</b>	0,078	0,119	0,156

Nous n'avons pas procédé à une analyse de variance pour discuter  $V_{str} [eau]$  puisque la teneur en eau à  $pF=3,7$  a été déterminée sur terre fine, c'est-à-dire avec des différences entre répétitions très faibles. Dans ces conditions (c'est le contraire de ce que nous venons de développer pour  $V_{str} [Hg]$  plus haut), le résidu est très faible. Or, pour déterminer la signification des sources de variations (test F), on divise l'écart type (C.M.) de ces sources de variations par l'écart du résidu. Celui-ci étant très faible (proche de zéro), toutes les différences détectées seraient alors significatives.

En l'absence de cette analyse de variance, il faut néanmoins noter que la plus faible valeur  $V_{str} [eau]$  est enregistrée pour CP-C-2 ( $0,119 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) (tableau 5.19). On observe

aussi pour le mode d'utilisation forêt une plus faible valeur pour la profondeur 1 ( $0,138 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) que pour la profondeur 2 ( $0,162 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ). Pour les autres échantillons  $V_{\text{str}} [\text{eau}]$  est moins de  $0,145 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ .

*C) Utilisation de la densité apparente pour l'obtention du volume poral structural ( $V_{\text{str}} [d_a]$ ).*

Les discussions faites pour  $V_{\text{str}}$  à partir de courbe d'injection de mercure et de la courbe de rétention en eau ne concernent que très partiellement le volume poral structural. En effet, ces deux méthodes n'ont pas permis de prendre en compte l'ensemble des grands pores.

En absence de retrait, nous avons considéré que les échantillons du site de "Campos" possédaient un système poral rigide. Nous utiliserons donc de nouveau la quantité d'eau retenu à  $pF=3,7$  pour calculer  $V_{\text{str}} [d_a]$  à l'aide de la relation :

$$V_{\text{str}} [d_a] = 1/d_a - 1/d_r - (\text{volume d'eau à } pF = 3,7)$$

Les valeurs obtenues à partir des trois méthodes ( $V_{\text{str}} [d_a]$ ,  $V_{\text{str}} [\text{eau}]$  et  $V_{\text{str}} [\text{Hg}]$ ) sont données dans le tableau 5.19.

Nous notons que, lorsque l'on prend en compte tout le volume poral, CP-F-1 est l'échantillon qui possède le  $V_{\text{str}} [d_a]$  le plus élevé ( $0,229 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) et CP-C-2, le plus faible ( $0,156 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ). Pour les autres échantillons  $V_{\text{str}} [d_a]$  est voisin de  $0,190 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ .

#### *D) Conclusion*

Une analyse différente de celle réalisée pour les échantillons du site de "l'Universidade Rural" a été conduite, puisque le système poral structural peut être considéré comme indéformable lors de la dessiccation.

Nous avons donc pu combiner les données acquises sur les échantillons déshydratés et hydratés. Les valeurs obtenues pour  $V_{\text{str}}$  confirment ce que nous avons noté à partir de la discussion des différentes valeurs de  $V_t$  :

– la profondeur 2 du mode d'utilisation canne à sucre possède le plus faible volume poral de pores de  $D_e > 0,5 \mu\text{m}$ .

– la profondeur 1 du mode d'utilisation forêt se distingue des autres échantillons par la présence d'un volume poral élevé de pores uniquement pris en compte lors de la mesure de densité apparente. Ce volume est responsable de la valeur élevée de  $V_{\text{str}} [d_a]$ , alors que  $V_{\text{str}} [\text{eau}]$  est plus faible à la profondeur 1 qu'à la profondeur 2.

### 5.3.4 Volume poral libre à l'air ( $V_{\text{air}}$ )

Nous pourrions, comme pour le site de "l'Universidade Rural", estimer le volume poral libre à l'air de plusieurs façons, mais les discussions précédentes à propos de  $V_t$  et  $V_{\text{str}}$  ont montré que les différences s'y font plutôt au niveau des grands pores. Nous avons donc choisi de ne discuter  $V_{\text{air}}$  qu'à partir des valeurs de  $d_a$  obtenues à l'aide des anneaux de Kopecky ( $V_{\text{air}} [d_a]$ ).

Comme pour le site de "l'Universidade Rural", nous utiliserons le volume d'eau retenu à 60 hPa ( $pF=1,78$ ) pour calculer  $V_{\text{air}} [d_a]$  à l'aide de la relation :

$$V_{\text{air}} [d_a] = V_t [d_a] - (\text{volume d'eau à } pF=1,78)$$

Les valeurs obtenues sont reportées dans le tableau 5.20. CP-P-1 possède un  $V_{\text{air}} [d_a]$  inférieur à celui de CP-P-2. Pour CP-F et CP-C c'est l'inverse qui est enregistré,  $V_{\text{air}} [d_a]$  à la profondeur 1 est supérieur à  $V_{\text{air}} [d_a]$  à la profondeur 2.

Tableau 5.20: Volume libre à l'air ( $V_{\text{air}} [d_a]$ ) obtenu à partir de  $V_t[d_a]$  et des propriétés de rétention en eau ( $V_{\text{eau}} [pF = 1,78]$ ).

	$V_{\text{air}} [d_a]$	$V_{\text{eau}}[pF=1,78]$
CP - P.1	0,107	0,158
CP - P.2	0,127	0,152
CP - F.1	0,197	0,102
CP - F.2	0,139	0,157
CP - C.1	0,191	0,154
CP - C.2	0,075	0,191

Si nous comparons les trois modes d'utilisation à la profondeur 1, on note que  $V_{\text{air}} [d_a]$  décroît dans le sens CP-F-1, CP-C-1 et CP-P-1.

Pour la profondeur 2, l'ordre de la décroissance est CP-F-2, CP-P-2 et CP-C-2. Le mode d'utilisation forêt représente très vraisemblablement le sol dans son état initial. Le gradient de teneur en argile est en effet cohérent avec les variations de teneur en argile que l'on observe dans un sol "podzolique" (au sens de la terminologie brésilienne). Les teneurs en argile dans l'horizon de surface du sol sous forêt est par ailleurs inférieure à celle enregistrée pour l'horizon de surface du sol sous pâturage et sous canne à sucre.

### 5.3.5 Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ )

Dans le chapitre 4,  $K_0$  est apparu être nettement supérieur pour la profondeur 1 par rapport à sa valeur pour la profondeur 2 (tableau 4.20). A la profondeur 1, les valeurs de  $K_0$  sont telles que CP-F-1 > CP-C-1 = CP-P-1. A la profondeur 2, la relation d'ordre est CP-P-2 > CP-C-2 > CP-F-2.

Si l'on compare ces relations d'ordre concernant  $K_0$  aux résultats de notre étude compartimentale de l'espace poral, il semble y avoir, en première analyse, plusieurs contradictions.

En effet, à partir des valeurs de  $K_0$ , nous avons aisément distingué les deux profondeurs. Or, ni les différentes valeurs de volume poral total ( $V_t$  tableau 5.11), ni les différentes valeurs de volume poral structural ( $V_{str}$ ) (tableau 5.19), ni encore les valeurs du volume poral libre à l'air ( $V_{air}$ ) (tableau 5.20) ne permettent de les distinguer aisément. En fait, nous avons déjà insisté sur le fait que les variations de  $K_0$  devaient être attribuées aux pores en continuité à travers les cylindres. Cette indépendance des variations de  $K_0$  et des variations des différents volumes poraux identifiés est par conséquent tout à fait possible.

Ainsi, comme pour le site de "l'Universidade Rural", il ne semble pas y avoir de relation entre les résultats de notre analyse de l'espace poral et les valeurs de  $K_0$  mesurées.

En revanche, à la différence des échantillons du site de "l'Universidade Rural", l'étude des modes d'organisation des constituants en microscopie optique a montré la présence d'organisation du type "entassement de grains" avec de nombreux pores de type "vide d'entassement".

Pour CP-F-2, bien que 10 % de la surface des lames minces observées corresponde à ce type d'organisation, cela semble être sans conséquence sur la valeur de  $K_0$ . Elle est en effet semblable à celle obtenue pour la profondeur 2 des échantillons du site de "l'Universidade Rural" où aucune organisation de type à "entassement de grains" n'a été observée. De plus, pour le site de "Campos", les variations de  $K_0$  apparaissent être totalement indépendantes de celles de la proportion de zone de type à "entassement de grains" (tableau 5.21). Les vides d'entassement n'auraient donc aucun rôle préférentiel sur les transferts d'eau.

**Tableau 5.21:** Valeurs de la conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ ) et % de surface occupé par la microstructure de type à "entassement de grains" (% S).

	$K_0$ cm/h	% S
<b>CP - P1</b>	20,7	20
<b>CP - P2</b>	11,9	10
<b>CP - F1</b>	25,4	90
<b>CP - F2</b>	5,8	10
<b>CP - C1</b>	20,5	3
<b>CP - C2</b>	8,6	0

De la sorte, nous en arrivons aussi pour le site de "Campos" à envisager le rôle des pores d'origine racinaire. Certes, pour le site de "Campos", les différences entre les profondeurs 1 et 2 sont moins marquantes que pour "l'Universidade Rural". De plus,  $K_0$  est environ 2,5 fois plus faible pour CP-C-1 que pour UR-C-1. En fait, ceci demeure en accord avec un rôle important joué par les pores d'origine racinaire. En effet, la distance entre deux rangs de canne à sucre étant supérieure à "Campos" et les cylindres ayant été prélevés entre les rangs, la densité de racines était supérieure à "l'Universidade Rural". Les observations de terrain et celles faites au laboratoire sur les échantillons lors des différentes analyses ont aussi permis de le remarquer à de nombreuses reprises.

### 5.3.6 Conclusion

Pour le site de "l'Universidade Rural", où l'on a procédé à une seule mise en culture sans mécanisation, nous avons conclu à l'absence d'un effet direct du mode d'utilisation agricole sur le mode d'organisation des constituants dans les horizons sous-jacents aux horizons cultivés et sur les valeurs de densité apparente qui leurs sont liées.

Certes, des différences existent pour le site de "l'Universidade Rural" mais elles sont liées en partie à des variations de teneur en argile. Celle-ci augmente pour la parcelle sol nu à la suite de l'érosion des horizons supérieurs qui étaient naturellement d'autant plus appauvris en argile qu'ils étaient proches de la surface. Ainsi, pour cette parcelle, il y aurait un "effet indirect" du mode d'utilisation agricole sur les valeurs de densité apparente par

l'intermédiaire du phénomène d'érosion hydrique. En d'autres termes, si la densité est plus élevée à la base de l'horizon cultivé qu'elle ne l'était à la même profondeur dans le sol non cultivé, c'est à la suite du décapage des horizons superficiels de densité apparente plus faible qu'en profondeur.

Pour le site de "l'Universidade Rural", si le mode d'utilisation agricole intervient, ce serait par la création de pores d'origine racinaire dont la présence est déterminante pour expliquer les variations de conductivité hydraulique, mais semble sans conséquence sur le volume poral.

Dans le cas du site de "Campos", des différences concernant la géométrie de l'espace poral ont été mises en évidence aux profondeurs 1 et 2 en fonction du mode d'utilisation. Néanmoins, la distinction entre les profondeurs 1 et 2 apparue pour le site de "l'Universidade Rural" ne semble pas exister aussi nettement pour le site de "Campos", excepté pour le mode d'utilisation forêt. La distribution de taille de pore, qui a été représentée de façon très schématique (comme pour le site de "l'Universidade Rural", cf. fig. 5.5), fait apparaître les similitudes de distribution entre les deux profondeurs pour les modes d'utilisation canne à sucre et pâturage (fig. 5.7). Il faut d'ailleurs noter que l'espace poral étant rigide, ce mode de représentation est justifié pour le site de "Campos", quel que soit l'état d'hydratation. Cela n'est pas le cas pour la figure 5.5 qui concerne les échantillons du site de "l'Universidade Rural".

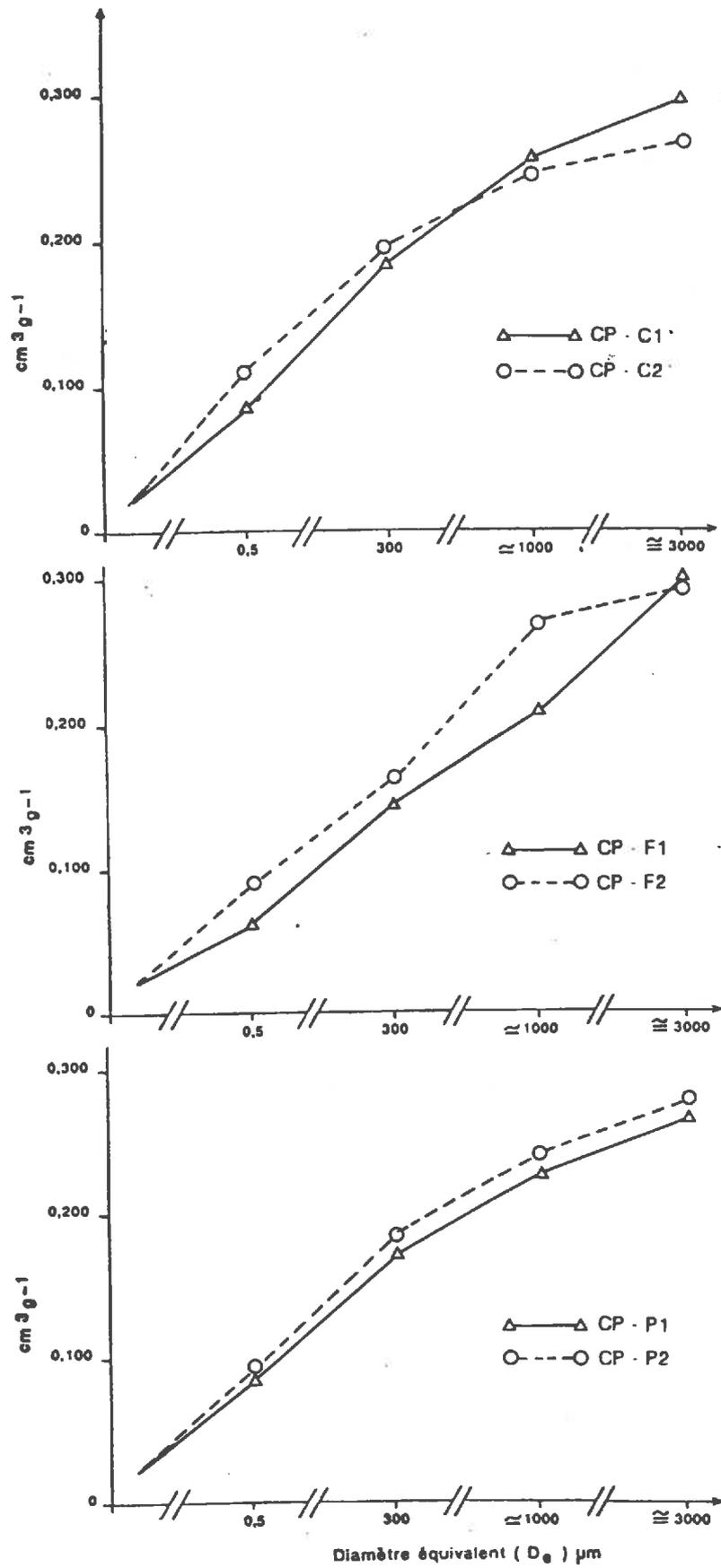


Figure 5.7: Représentation schématique de la distribution de taille des pores pour l'ensemble du volume poral (Site de "Campos").

Ce qui est par contre tout à fait nouveau pour le site de “Campos”, c’est que la profondeur 2 du mode d’utilisation canne à sucre et la profondeur 1 du mode d’utilisation pâturage se distinguent par des valeurs de volume poral total plus faibles que pour les autres échantillons. Malgré des variations de teneur en argile entre les échantillons, ces valeurs faibles du volume poral total sont au moins en partie dues à des valeurs plus faibles du volume poral structural.

La profondeur 2 du mode d’utilisation canne à sucre se distingue par une valeur plus faible du volume poral structural ( $D_e > 0,5 \mu\text{m}$ ). Cela est dû à un plus faible volume de pores structuraux dans toute la gamme de valeurs de  $D_e$  correspondant à ces pores. En effet, l’analyse compartimentale à partir des différentes mesures de  $V_t$  et  $V_{\text{str}}$  l’a montré clairement. C’est d’ailleurs pour cette raison que le volume poral libre à l’air est lui aussi le plus faible pour la profondeur 2 du mode d’utilisation canne à sucre.

Il faut aussi noter que la profondeur 1 du mode d’utilisation pâturage possède un volume poral libre à l’air ( $D_e > 50 \mu\text{m}$ ) plus faible que pour les autres échantillons, excepté la profondeur 2 du mode d’utilisation canne à sucre. Les différentes valeurs de volume poral structural calculées montrent que le mode d’utilisation pâturage se distingue dans la majorité des cas par une valeur plus faible que pour le mode d’utilisation forêt et que pour la profondeur 1 du mode d’utilisation canne à sucre.

## **5.4 Tassement du sol et mode d’utilisation agricole**

Pour le site de “Campos”, la profondeur 2 du mode d’utilisation canne à sucre et les deux profondeurs du mode d’utilisation pâturage (qui est une ancienne culture de canne à sucre) se distinguent donc par des volumes de pores structuraux plus faibles. De plus, la profondeur 1 du mode d’utilisation pâturage possède un volume poral libre à l’air plus faible qu’à la profondeur 2, alors que la parcelle est piétinée par les animaux durant toute l’année.

Malgré de tels résultats, nous ne pouvons pas conclure directement à l’existence d’une relation de cause à effet entre le mode d’organisation des constituants minéraux et le mode d’utilisation agricole. Pour discuter la possibilité de l’existence d’une telle relation de cause à effet, il est tout d’abord nécessaire de discuter qu’elles pouvaient être les caractéristiques de la géométrie de l’espace poral des horizons étudiés avant la mise en valeur agricole.

Pour le site de "l'Universidade Rural", nous avons conclu qu'à la profondeur 2, la géométrie de l'espace poral n'avait pas été modifiée par la mise en culture en l'absence de mécanisation. Or, les teneurs en argile sont de 39, 42 et 48 %, c'est à dire que les trois horizons étudiés à cette profondeur 2 occupaient dans le profil de sol initial (non tronqué par l'érosion hydrique) des positions très vraisemblablement différentes. Malgré cela, il n'y aurait pas eu de différence de géométrie de l'espace poral.

Pour le site de "Campos", la teneur en argile varie de 37 à 41 % pour la profondeur 2, c'est à dire beaucoup moins qu'à "l'Universidade Rural". Bien que des différences aient été mises en évidence à propos des kaolinites et des goethites, ainsi que pour le comportement, et si l'on retient l'hypothèse que l'absence de variabilité de géométrie de l'espace poral est applicable au site de "Campos", il n'y aurait donc pas eu non plus de différence avant la mise en culture dans ce dernier site.

La géométrie de l'espace poral à la profondeur 2 du mode d'utilisation forêt de "Campos", doit alors être considérée comme étant représentative de l'état avant la mise en culture pour ce site à la profondeur 2. Lorsque l'on construit la courbe du volume poral structural pour la profondeur 2 des trois modes d'utilisation, on note que les trois courbes sont décalées et les différences apparaissent clairement (fig.5.5). La profondeur 2 du mode d'utilisation canne à sucre se distinguent par une diminution du volume poral structural dans toute la gamme de  $D_e > 300 \mu\text{m}$ . Cette diminution serait alors à attribuer à l'effet du compactage sous culture de canne à sucre.

La courbe de la profondeur 1 du mode d'utilisation pâturage ne se sépare de celle des modes d'utilisation forêt et canne à sucre que pour  $D_e > 300 \mu\text{m}$ . Par contre, celle de la profondeur 2 est située entre les courbes de ces deux modes d'utilisation. Cette localisation résulterait, en quelque sorte, d'un décompactage par la végétation spécifique du mode d'utilisation pâturage, puisque la parcelle a tout d'abord été cultivée en canne à sucre. Une telle interprétation est en accord avec les résultats obtenus par CARVALHO (1976), qui montre qu'en 45 jours l'on passe d'une densité apparente de 1,53 ( $V_t = 0,277 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) à 1,41 ( $V_t = 0,332 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ) suite à l'effet du système racinaire d'une végétation de graminées.

Ainsi, la profondeur 2 du mode d'utilisation pâturage serait passé par un état tassé identique à celui de la profondeur 2 de la canne à sucre mais aurait été ensuite partiellement décompacté. C'est aussi à l'action des racines que doivent être attribuées les valeurs de  $K_0$  qui sont celles d'horizons bien drainés où les transferts de l'eau sont rapides.

Pour la profondeur 1 du mode d'utilisation pâturage, la faible valeur du volume poral libre à l'air serait à relier à l'effet du piétinement des animaux. Depuis sept ans, cette

parcelle a subi un pâturage constant durant lesquels les animaux ont toujours été présents, occasionnant ainsi un piétinement continu.

Or, à ce sujet, CARVALHO (1974) a montré que dans de telles conditions une zone à allure compactée se développe de 7 à 10 cm de profondeur. ALLMARAS et al., (1965), utilisant quatre types de culture sur quatre différents types de sol, observent que les modifications de densité apparente se font jusqu'à cette profondeur. SOEHNE et al., (1962), cités par GILL et VANDENBERG (1967), puis RAM (1984) ont confirmé ces résultats. Par conséquent, CP-P-1 aurait été prélevé dans la zone où l'effet du piétinement est le plus élevé.

Enfin, pour le site de "Campos", comme pour le site de "l'Universidade Rural", le mode d'utilisation agricole agit aussi "indirectement" par l'intermédiaire du phénomène d'érosion hydrique sur le volume poral total des différents horizons étudiés. Pour expliquer une telle action, il faut rappeler, d'une part, que le travail du sol homogénéise la teneur en argile de la partie supérieure du sol et que, d'autre part, les deux situations cultivées ont subi une érosion importante. C'est pour cela que la teneur en argile moyenne de l'horizon cultivé est supérieure à celle des dix premiers centimètres du sol sous forêt.

Ainsi s'explique aussi que l'horizon cultivé soit de plus en plus riche en argile à la suite de l'érosion, puisque des horizons situés de plus en plus profondément initialement, sont présents en surface.

Un tel phénomène d'érosion est confirmé par les observations de terrain effectuées lors du prélèvement des échantillons. Nous avons en effet observé la présence de matériaux grossiers accumulés en bas de pente pour les parcelles canne à sucre et pâturage. De la sorte, les prélèvements n'auraient pas été effectués dans l'horizon BA du sol pour les modes d'utilisation canne à sucre et pâturage mais, dans l'horizon Bt<sub>1</sub>.

Pour le site de "l'Universidade Rural", il semble (d'après les données de LEPRUN, 1989) que la canne à sucre n'ait pas subi une érosion importante, et que pour la parcelle sol nu nous ayons eu une érosion sélective (entraînement privilégié de l'argile par rapport aux fractions grossières), en raison de la faible force tractrice de la lame d'eau ruisselante (faible longueur des parcelles).

Dans le site de "Campos", l'érosion apparaît avoir été importante pour la canne à sucre avec entraînement de particules non sélectif. Les pentes sont du même ordre de grandeur pour les deux sites, mais la longueur des parcelles est seulement de 20 m pour le dispositif expérimental de "l'Universidade Rural". En revanche, pour les modes d'utilisation canne à sucre et pâturage du site de "Campos", les pentes ont une longueur

d'environ 250-300 m. Dans ces conditions, l'érosion se ferait par concentration du ruissellement et incision, et serait beaucoup plus importante pour le site de "Campos" que pour le celui de "l'Universidade Rural". Sur la base des variations de teneur en argile, la situation canne à sucre serait plus érodée que la situation pâturage



## CONCLUSION GENERALE

Cette thèse avait pour objectif l'étude d'un processus de dégradation physique qui aurait produit un tassement de l'horizon sous-jacent à l'horizon cultivé sous culture de canne à sucre.

La démarche adoptée a consisté en une analyse de situations où les phénomènes de tassement devaient s'être développés, avec des intensités différentes, dans des sols identiques, ou tout au moins dont les caractères varient très faiblement. C'est ainsi que deux sites et trois modes d'utilisation agricole pour chaque site ont été choisis. Pour chaque mode d'utilisation, nous avons étudié l'horizon cultivé et l'horizon directement sous-jacent.

Le tassement entraînant une augmentation de la densité apparente à la suite d'une modification du mode d'arrangement des constituants, notre étude a été conduite essentiellement à partir d'une analyse compartimentale de la géométrie de l'espace poral puisque celle-ci est étroitement liée à ce mode d'arrangement.

Les résultats mettent en évidence des variations de densité apparente, et par conséquent de volume poral total, en fonction du type d'horizon étudié et du mode d'utilisation. L'analyse compartimentale du volume poral total nous a conduit à distinguer un volume poral dû à l'assemblage des particules d'argile et un volume poral structural. Cela nous a permis de montrer que les variations de volume poral total sont partiellement dues aux variations de teneur en argile mise en évidence entre les horizons, par une analyse granulométrique des échantillons prélevés.

Néanmoins, des variations de volume poral structural existent aussi en fonction du mode d'utilisation agricole. Pour les discuter, nous avons procédé en deux temps pour chaque site :

– tout d'abord, par une analyse des variations du volume poral structural en fonction de la taille des pores ;

– puis, par la discussion de la relation de cause à effet entre tel état du volume poral structural et tel mode d'utilisation agricole.

Il ressort de cette étude que le volume poral structural n'est que très peu modifié sous l'horizon cultivé lorsqu'une seule culture de canne à sucre non mécanisée est effectuée. Sans que cela ne semble avoir de conséquence pour le volume poral total, les pores constituant le volume poral structural seraient néanmoins de plus petite dimension (moyenne de la distribution) pour l'horizon sous-jacent à l'horizon cultivé d'une culture de canne à sucre.

Par contre, lorsque cette culture est mécanisée, on enregistre après plusieurs années un tassement de l'horizon sous-jacent à l'horizon cultivé. Ce tassement, qui a clairement été mis en évidence, concerne l'ensemble des pores de diamètre supérieur à 300  $\mu\text{m}$  (fig. 6.1).

La figure 6.1, qui a été construite pour représenter de façon synthétique l'effet du tassement sous culture de canne à sucre, fait apparaître aussi un résultat important concernant le mode d'utilisation pâturage qui est une ancienne culture de canne à sucre.

L'implantation d'une végétation de graminées aurait en quelque sorte entraînée une décompaction partielle du sol. Un tel mode d'action serait à attribuer au développement du système racinaire (création de pores de grande taille, formation d'agrégats). Ce sont aussi les racines, par les pores de grande taille qu'elles créent et le caractère de continuité de ces pores, qui seraient responsables de l'augmentation importante des valeurs de conductivité hydraulique. L'étude de ces pores, qui ont échappé en partie à notre analyse de l'espace poral, nous semble constituer une voie de recherche très prometteuse en vue de l'accroissement du volume poral structural des horizons tassés. Néanmoins, les dix premiers centimètres du mode d'utilisation pâturage seraient plus tassés que l'horizon cultivé de la canne à sucre. Il s'agit vraisemblablement dans ce cas d'un compactage provoqué par le piétinement animal.

Si l'effet du tassement des sols sous culture de canne à sucre a bien été identifié, un autre type de dégradation physique des sols de type "podzolicos" s'est révélé déterminant. Il s'agit de l'érosion hydrique, non prise en compte au début de notre étude et qui doit permettre d'expliquer les différences de constitution entre les horizons. Ainsi, à la suite de l'érosion hydrique et d'une troncature d'intensité croissante des profils de sol, l'horizon cultivé reposerait directement sur des horizons de plus en plus compacts en raison de leurs caractéristiques pédogénétiques (fig.6.2).

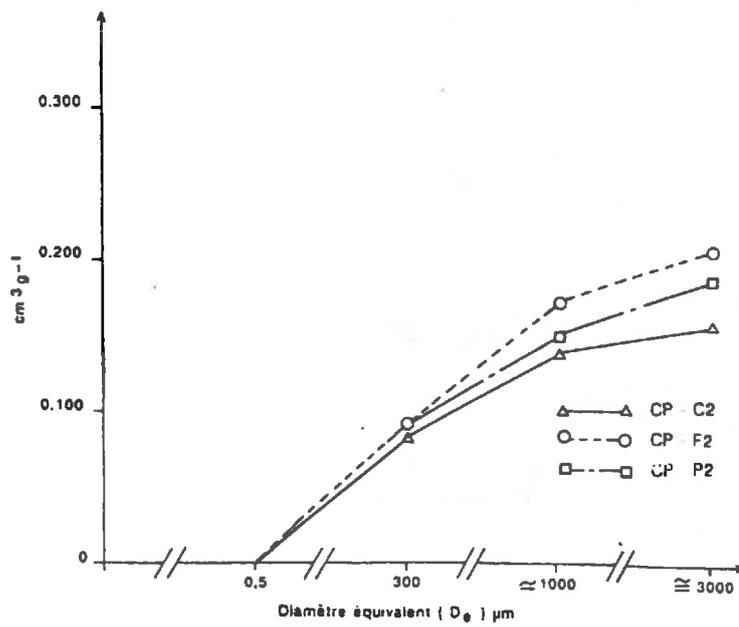
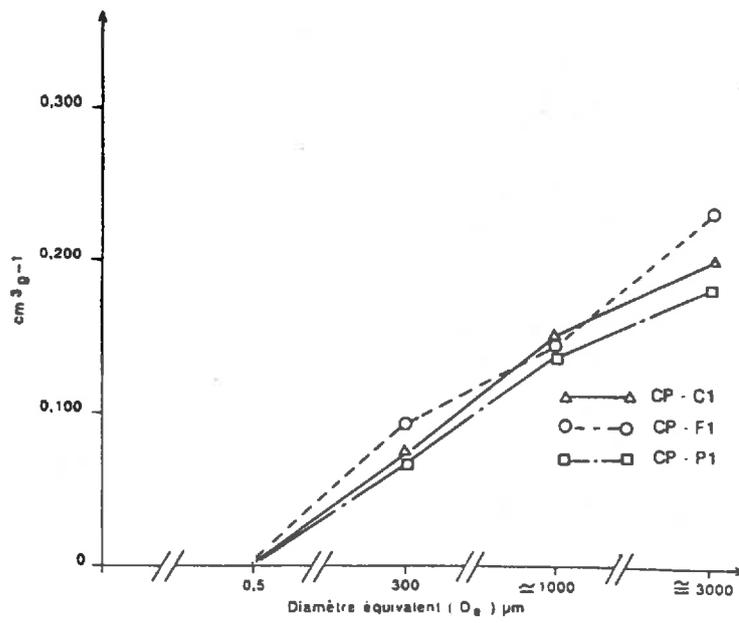


Figure 5.8: Représentation schématique de la distribution du volume poral structural pour le site de "Campos".

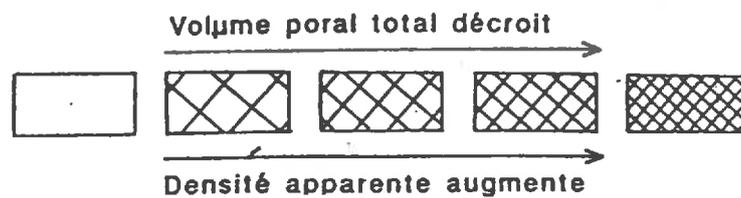
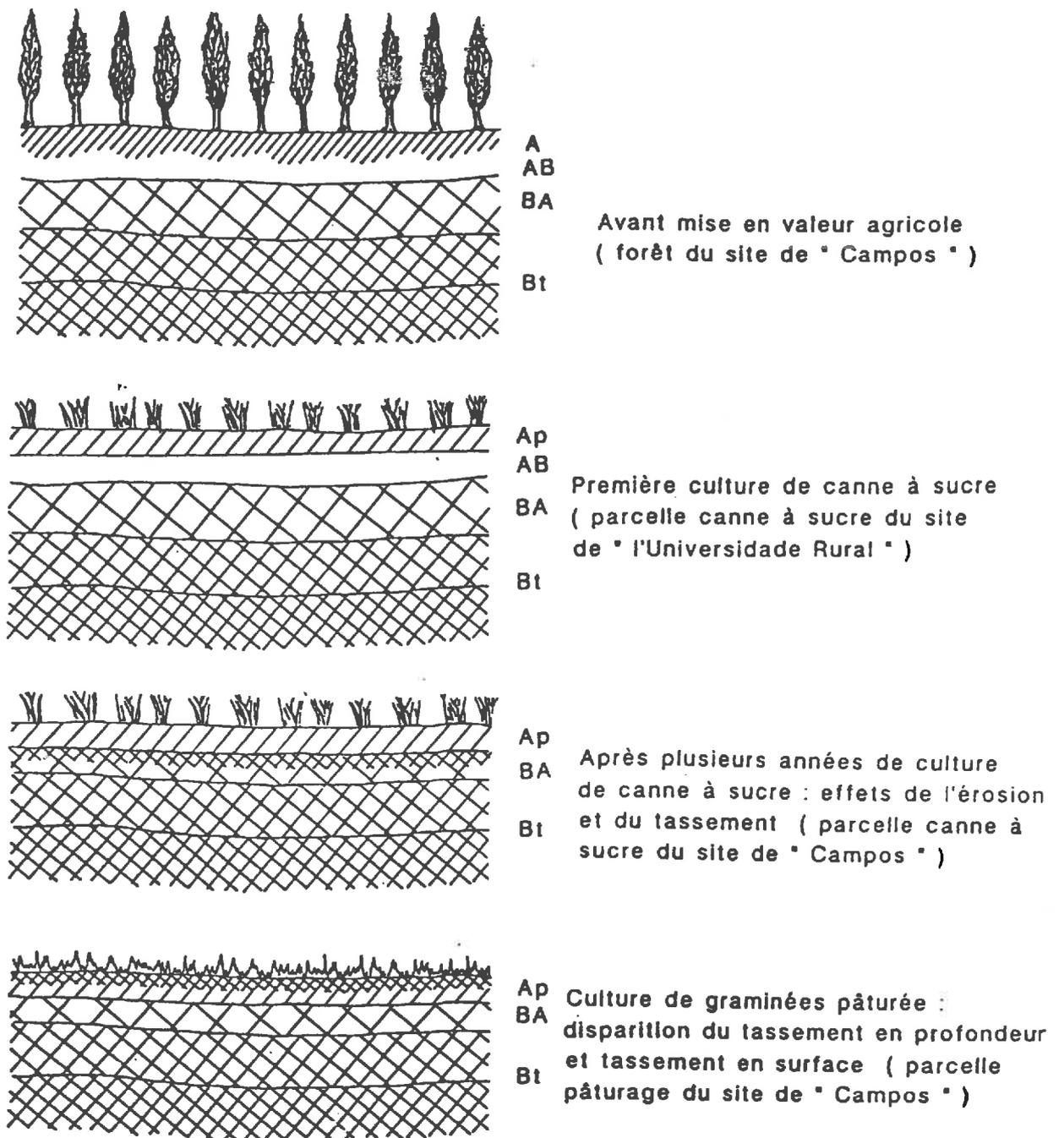


Figure 5.9: Schéma d'évolution des sols et de la densité apparente de leurs horizons en fonction du mode d'utilisatiior

Enfin, lors de la discussion de la géométrie de l'espace poral, une différence marquée est apparue entre les sols des deux sites, alors que ces sols étaient considérés comme étant semblables lors du choix des sites. Cette différence concerne l'existence de phénomènes de retrait pour les sols de l'un des sites alors qu'ils sont absents pour ceux de l'autre site.

Ces variations de comportement sont attribuées à des comportements totalement différents pour la phase argileuse entre les deux sites. Le mode d'assemblage des particules de kaolinite varie au cours des phases de dessiccation – humectation lorsqu'il y a retrait. Certes, les kaolinites sont de taille plus petite lorsqu'il y a un retrait, mais la teneur en goethite est alors plus élevée. En d'autres termes, si la phase argileuse est plus "fine" lorsqu'un phénomène de retrait s'exprime, elle serait par contre plus "cimentée". Les données dont nous disposons ne nous ont pas permis de mener plus loin la discussion à propos de ces différences de comportement.



## BIBLIOGRAPHIE

- ALLMARAS, R.R., BURWELL, R.E. & LARSON, E.E., 1965.** Agregate size distribution in the row zone of tillage experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 29 (6) : 645-650.
- AZZAOUI, M., 1988.** Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Thèse. Doctorat, Paris VI, 223 p.
- 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.
- BRADFIELD, R., 1950.** Soil structure. *Trens. 4th Int. Congr. Soil Sci.*, II, 9-19.
- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G., 1980.** Crystal structures of clay minerals and their ray identification. *Mineralogical Society Monograph N° 5*, 495 p.
- BRUAND, A., 1985.** Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse, Univ. Paris VII, 225 p.
- 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. *Sci. Sol*, 24(4):351:362.
- BRUAND, A., & 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 & 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., 1990.** Evolution 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. à paraître.
- BULLOCK, P., FEDEROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., TURSINA, T., BABEL, U., & Coll., 1985.** Handbook for soil thin section description. Ed.1<sup>e</sup>, Wayne Research publications, 150p.
- CAILLERE, D., HENIN, S. & RAUTUREAU, M., 1982.** Minéralogie des argiles. Classification et nomenclature. Tome 2, Masson Ed., 189p.
- CAMARGO, M.N., KLAMT, E. & KAUFFMAN, T.H., 1987.** Sistema brasileiro de classificação de solos. *Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 12(1):11-33.
- CAMBIER, Ph., 1976.** Les associations kaolinites-oxyde de fer : cristallinité et propriétés de surface. D.E.A. Univ. Paris VI, 23p.

- CAMBIER, Ph., & PROST, R., 1981.** Etude des associations argile-oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique. *Agronomie*, 1(9):713-722.
- CARVALHO, S.R., 1974.** Notes de travaux pratiques du cours de physique du sol. Cours donné par MARCOS, Z.Z., E.S.A.L.Q., PIRACICABA, 23p.
- CARVALHO, S.R., 1976.** Influencia de dois sistemas de manejo de pastagens na compactação de uma terra roxa estruturada. Tèse. ESALQ, USP, PIRACICABA, 89p.
- CARVALHO, C.N., 1984.** Uso agrícola do solo e a erosão hídrica. Congresso Brasileiro de Geologia, 33:399-409.
- CARVALHO, C.N., 1989.** Fluxo geoquímico de elementos em função do uso agrícola. Tese de Doutorado em preparação por 1990.
- CHAUVEL, A., PEDRO, G. & TESSIER, D., 1976.** Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. *Sci. Sol*, 2:3-28.
- CHAUVEL, A., 1977.** Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Travaux et doc. de l'O.R.S.T.O.M.*, 62:532p.
- CHURCHMAN, G.J., & PAYNE, D., 1983.** Mercury intrusion porosimetry of some New Zealand soils in relation to clay mineralogy and texture *J. Soil Sci.*, 34:437-451.
- CINTRA, F.L.D., MIELNICZUK, J., & SCOPEL, I., 1983.** Caracterização do impedimento mecânico em um "latossolo roxo" do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 7:323-327.
- COMBEAU, A., & QUANTIN, P., 1963.** Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF-humidité. *Sci. Sol*, 5-13.
- 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.
- COULON, E., 1988.** Conséquence du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Thèse Doctorat. Univ. d'Orléans, 242 p.
- COULON, E. & BRUAND, A., 1989.** Effects of compaction on the pore space geometry in sand soils. *Sol & tillage Res.*, 15 : 137-152.
- CUNHA, L.H. & NASCIMENTO, R.A.M., 1985.** Morfologia, Mineralogia et Genese de solos de Tabuleiro na região de Campos. *Pesq. Agropec. Bras.* (à paraître).
- DARCY, H., 1856.** Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont, 592p.
- DIAMOND, S., 1970.** Pore size distributions in clays. *Clays and Clay Min.*, 18:7-23.
- DUCHAUFOUR, Ph., 1965.** Précis de Pédologie. Masson, Ed 3<sup>e</sup>, 481 p.
- EMBRAPA. S.N.L.C.S., 1980a.** Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro. Projeto n° 02480039-3, Escala 1/100.000.
- EMBRAPA. S.N.L.C.S., 1980b.** Levantamento semi-detalhado e aptidão agrícola dos solos dos municípios do Rio de Janeiro. *Bull. Tec.* n°66, 388p.
- F.A.O., 1968 :** Directives pour la description des sols. 58p.

- FAURE, A., 1976.** Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. *Sci. Sol* n° 2 : 121-130.
- FERNANDES, J., FURLANI NETO, V.L. & STOLF, R., 1981a.** O preparo do solo para o plantio da cana de açúcar e seus efeitos nas soqueiras. *Brasil Açucareiro*, 97(4):37-40.
- FERNANDES, J., FURLANI NETO, V.L. & STOLF, R., 1981b.** Sistema de plantio e a competição do solo na cana de açúcar. *Brasil Açucareiro*, 97(3):20-31.
- FERNANDES, B., GALLOWAY, H.M., BRONSON, R.D. & MANNERING, J.V., 1983.** Condutividade hidráulica do solo saturado, em três sistemas de manejo. *Ceres*, 30(169):232-241.
- FERREIRA, M.M. & MARGOS, Z.Z., 1983.** Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo Distrofíco e Regossolo através do ponto de implexão da curva característica de umidade. *Cienc. Prat. Lavras*, 7 (1) : 96-101
- 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.
- FIES, J.C. & BRUAND, A., 1990.** Textural porosity analysis of a silty clay using pore volume balance estimation, mercure porosimetry and quantified backscattered electron image (BESI). *Geoderma*, (à paraître).
- FITZPATRICK, R.W. & SCHWERTMANN, U., 1982.** Al.-Substituted Goethite –An indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma*, 27 : 335-347.
- FITZPATRICK, E.A., 1984.** *Micromorphology of Soils*. Chapman and Hall Pub., USA, 433p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1974.** Soil map of the world. Paris, FAO/UNESCO carte, échelle 1:5 000 000, 59p.
- GILL, W.R. & VANDENBERG, G.E., 1967.** Soil dynamics in tillage and traction. *Agric. Handbook* n° 316. Ed. Agr. Res. Serv. USDA, pp : 434-435.
- GOMES, F.P., 1973.** Curso de estatística experimental. ESALQ, PIRACICADA, pp 199-223.
- GRIM, R.E., 1968.** *Clay mineralogy*. Mc Graw. Hill Book Company. New York, 596 p.
- GRIMALDI, M., 1986.** Modifications structurales d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Sci. Sol*, 24 : 264 – 284.
- GROHMANN, F., 1960.** Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bol. Tec. I.A.C., Campinas*, 19 (21) : 319 – 328.
- 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. renaté INA-PG*, 22p.
- HALL, D.G.M., REEVE, M.J., THOMASSON, A.J. & WRIGHT, V.F., 1977.** Water retention, porosity and density of field soils. *Soil Survey, Technical Monograph*, Harpenden, n°9, 75p.

- HENIN, S., 1977.** Cours de physique du sol. L'eau et le sol. Les propriétés mécaniques. La chaleur et le sol. ORSTOM Ed., Paris, 222p.
- HILLEL, D., 1982.** Introduction to Soil Physics. Academic Press, 364p.
- HODGSON, M. & DUDENEY, A.W.L., 1984.** Estimation of clay proportions in mixtures by x-ray diffraction and computerized chemical mass balance. *Clays clay Miner.*, 32 (1) : 19-28.
- HUMBEL, F.X., 1978.** L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. Travaux et documents. ORSTOM, n° 54, 301 p.
- I.B.G.E., 1959 a.** Enciclopédia dos Municípios brasileiros. Coord. por FERREIRA, J.P. Ed. FERREIRA, D.P. Rio de Janeiro, 226-227.
- I.B.G.E., 1959 b.** Enciclopédia dos Municípios brasileiros. Coord. por FERREIRA, J.P. Ed. FERREIRA, D.P. Rio de Janeiro, 263-264.
- I.B.G.E., 1987.** Levantamento sistemático da produção agrícola. CEPAGRO, 85 p.
- JORGE, J.A., LIBARDI, P.L., FOLONI, L.L., ALMEIDA, J.O.C., REICHARDT, K. & GAMERO, C.A., 1984.** Influência da sub-solagem e gradagem do solo na sua condutividade hidráulica. *Rev. Bras. Solo*, 8(1):1-6.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U., 1982.** The 5 M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clay and Clays Miner*, 30 (6) : 401-408.
- LAWRENCE, G.P., 1977.** Measurement of pores sizes in fine-textured soils. A review of existing technique. *J. Soil Sci.*, 28:527-540.
- LAWRENCE, G.P., 1978.** Stability of soil pores during mercury intrusion porometry. *Jour. Soil Sci.*, 29:298-304.
- LEPRUN, J.C., 1988.** A situação da conservação do solo e da água no Brasil. O papel do S.N.L.C.S. da EMBRAPA. Relatório interno, EMBRAPA, 42 p.
- LIETARD, O., 1977.** Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, 345 p.
- LOZET, J., 1972.** Utilisation du porosimètre à mercure en pédologie. *Pédologie*, XXI (3):284-292.
- McINTYRE, D.S. & SLEEMAN, J., 1982.** Macropores and hydraulic conductivity in a swelling soil. *Aust. J. Soil Res.*, 20(3):251-254.
- McKEAGUE, J.A., EILERS, R.J., THOMASSON, A.J., REEVE, M.J., BOUMA, J., GROSSMAN, R.B., FAVROT, J.C., RENGER, M. & STREBEL, O., 1984.** Tentative assessment of soil survey approaches to the characterization and interpretation of air-water properties of soils. *Geoderma*, 34:69-100.
- MARCOS, Z.Z., 1968.** Estrutura, agregação e água do solo. Tese, E.S.A.L.Q., Univ. Sao Paulo. Piracicaba, 55p.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L., 1960.** Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner*, 7 : 317-347.

- MENEZES, D.M., de, CEZAR, T.I. & CARVALHO, J.F. de, 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. & 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.
- MORDRY, J., SVATA, M. & VAN BRAKEL, J., 1981.** Thematic bibliography of mercure porosimetry. *Powder Tech.*, 29:13-43.
- NORRISH, K., TAYLOR, R.M., 1961.** The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.* 12, 294 – 306.
- OLIVEIRA, L.B. de ; DANTAS, H. da S. ; CAMPELO, A.B.; GALVAO, S.V. & GOMES, I.F.** Caracterização de adensamento no sub-solo de uma área de "TABULEIRO" da "Estação Experimental do Curado", RECIFE. *Pesq. Agropec. Bras*, 3:207-214.
- PAWLOSKI, G.A., 1985.** Quantitative determination of mineral content of geological samples by x-ray diffraction. *Am. Miner.*, 70:663-667.
- PEARSON, M.J., 1978.** Quantitative clay mineralogical analyses from bulk chemistry of sediments rocks. *Clays Clay Miner.*, 26 (6) : 423-433
- PEDRO, G., 1976.** Sols argileux et argiles. Eléments généraux en vue d'une introduction à leur étude. *Bull. AFES*, 2 : 69-84.
- PEDRO, G., 1979.** Les minéraux argileux. In *Pédologie*, t.2, constituants et propriétés du sol, M. Bonneau et B. Souchier, Masson éd., Paris, 38-57.
- 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
- QUANTIN, P. & BOULEAU, A., 1983.** Détermination des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par NaCl et NaOH. *Sci. Sol*, (3/4) : 217-234.
- RAM, R.B., 1984.** Pressure measurement in the soil under the load. *Soil & Tillage Res.*, 4 : 137-145.
- RANEY, W.A., EDMINSTER, T.W. & ALLAWAY, W.H., 1955.** Current status of research in soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, 79(4):423-428.
- RENAULT, P., 1988.** Theoretical studies of mercury intrusion in the size characterization of the lacunar pore space of soil samples. *Transport in Porous Media*, 3:529-547.
- RICHARDS, L.A., 1947.** Pressure membrane apparatus. Construction and use. *Agric. Eng.*, 28:451-454.
- ROBERT, M., TESSIER, D., 1974.** Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. agron.*, 25(6) : 859-882.
- ROBERT, M., 1975.** Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. agron.*, 26(4) : 363-399.
- SATO, K. & TOKUNAGA, K., 1989.** Studies on the macropores structure of grassland's soil. *Int. Grassland Congress, Nice, France*, 23-24.

- SCHULZE, D.G. & SCHWITTMANN, U., 1984.** The influence of iron aluminium on iron oxides – X. Properties of Al. substituted goethites. *Clay Miner.*, 19 : 521-539.
- SCHULZE, D.G., 1984.** The influence on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al – Substituted Goethites and estimation of Al from them. *Clay and Clays Miner.*, 32 (1) : 36-44.
- SILLS, I.D., AYLMOORE, L.A.G. & QUIRK, J.P., 1974.** Relationship between pore size distribution and physical properties of clay sols. *Aust. J. Soil Res.*, 12:107-117.
- SORANI, V., BRUAND, A., FOURNIER, B. & TESSIER, D., 1987.** Comportement des horizons d'un sol argileux en fonction de l'état hydrique. Etude d'échantillons à structure conservée. *Sci. Sol*, 3(25):133-144.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G., 1957.** Méthodes statistiques. Traduit par BOELLE, H & CAMHASI, E., Ed. 6<sup>e</sup>, Association de coordination Technique Agricole, Paris, 649 p.
- 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.
- STIPA, (Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique). 1982.** Notice pour l'entrée des descriptions et analyses des sols en banque de données. INRA-IRAT, 2eme Ed., 125p.
- STOOPS, G., 1986.** Multilingual translation of the terminology used in the "Handbook" for soil thin section description. *Pedologie*, 3:337-348.
- TCHOUBAR, C., PLACON, A., BEN BRAHIM, J., CLINARD, C. & SOW, C., 1982.** Caractéristiques structurales des kaolinites désordonnées. *Bull. Minéral.*, 105 : 477-491.
- TESSIER, D., 1975.** Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. C.N.A.M., Paris, 230 p.
- TESSIER, D. & PEDRO, G., 1976.** Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Evolution des principales argiles Ca au cours du phénomène de retrait. *Bull. AFES*, 2 : 85-99.
- TESSIER, D. & BERRIER, J., 1979.** Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Sci. du Sol*, 1 : 67-82.
- TESSIER, D., 1980.** Sur la signification de la limite du retrait dans les argiles. *C.R. Acad. Sci., Paris*, t.291, Série D, pp 377-380.
- TESSIER, D., PEDRO, G. & CAMARA, L., 1980.** Sur le comportement hydrique de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sci., Paris* t. 290, série D, pp 1169 – 1172.
- TESSIER, D., 1984.** Etude 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.
- THIRY, M. & WEBER, F., 1977.** Convergence de comportement entre les interstratifiés kaolinite-smectite et les "fire-clays". *Clay Minerals*, 12 : 83-91.
- THIRY, M., 1982.** Les kaolinites des argiles de Provins: géologie et cristallinité. *Bull. Minéral.*, 105 : 521-526.

- MENEZES, D.M., de, CEZAR, T.I. & CARVALHO, J.F. de, 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. & 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.
- MORDRY, J., SVATA, M. & VAN BRAKEL, J., 1981.** Thematic bibliography of mercure porosimetry. *Powder Tech.*, 29:13-43.
- NORRISH, K., TAYLOR, R.M., 1961.** The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.* 12, 294 – 306.
- OLIVEIRA, L.B. de ; DANTAS, H. da S. ; CAMPELO, A.B.; GALVAO, S.V. & GOMES, I.F.** Caracterização de adensamento no sub-solo de uma area de "TABULEIRO" da "Estação Experimental do Curado", RECIFE. *Pesq. Agropec. Bras.*, 3:207-214.
- PAWLOSKI, G.A., 1985.** Quantitative determination of mineral content of geological samptes by x-ray diffraction. *Am. Miner.*, 70:663-667.
- PEARSON, M.J., 1978.** Quantitative clay mineralogical analyses from bulk chemistry of sediments rocks. *Clays Clay Miner.*, 26 (6) : 423-433
- PEDRO, G., 1976.** Sols argileux et argiles. Eléments généraux en vue d'une introduction à leur étude. *Bull. AFES*, 2 : 69-84.
- PEDRO, G., 1979.** Les minéraux argileux. In *Pédologie*, t.2, constituants et propriétés du sol, M. Bonneau et B. Souchier, Masson éd., Paris, 38-57.
- 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
- QUANTIN, P. & BOULEAU, A., 1983.** Détermination des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par NaCl et NaOH. *Sci.. Sol*, (3/4) : 217-234.
- RAM, R.B., 1984.** Pressure measurement in the soil under the load. *Soil & Tillage Res.*, 4 : 137-145.
- RANEY, W.A., EDMINSTER, T.W. & ALLAWAY, W.H., 1955.** Current status of research in soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, 79(4):423-428.
- RENAULT, P., 1988.** Theoretical studies of mercury intrusion in the size characterization of the lacunar pore space of soil samples. *Transport in Porous Media*, 3:529-547.
- RICHARDS, L.A., 1947.** Pressure membrane apparatus. Construction and use. *Agric. Eng.*, 28:451-454.
- ROBERT, M., TESSIER, D., 1974.** Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. agron.*, 25(6) : 859-882.
- ROBERT, M., 1975.** Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. agron.*, 26(4) : 363-399.
- SATO, K. & TOKUNAGA, K., 1989.** Studies on the macropores structure of grassland's soil. *Int. Grassland Congress, Nice, France*, 23-24.

- SCHULZE, D.G. & SCHWITTMANN, U., 1984.** The influence of iron aluminium on iron oxides – X. Properties of Al. substituted goethites. *Clay Miner.*, 19 : 521-539.
- SCHULZE, D.G., 1984.** The influence on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al – Substituted Goethites and estimation of Al from them. *Clay and Clays Miner.*, 32 (1) : 36-44.
- SILLS, I.D., AYLMOORE, L.A.G. & QUIRK, J.P., 1974.** Relationship between pore size distribution and physical properties of clay sols. *Aust. J. Soil Res.*, 12:107-117.
- SORANI, V., BRUAND, A., FOURNIER, B. & TESSIER, D., 1987.** Comportement des horizons d'un sol argileux en fonction de l'état hydrique. Etude d'échantillons à structure conservée. *Sci. Sol*, 3(25):133-144.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G., 1957.** Méthodes statistiques. Traduit par BOELLE, H & CAMHASI, E., Ed. 6<sup>e</sup>, Association de coordination Technique Agricole, Paris, 649 p.
- 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.
- STIPA, (Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique). 1982.** Notice pour l'entrée des descriptions et analyses des sols en banque de données. INRA-IRAT, 2eme Ed., 125p.
- STOOPS, G., 1986.** Multilingual translation of the terminology used in the "Handbook" for soil thin section description. *Pedologie*, 3:337-348.
- TCHOUBAR, C., PLACON, A., BEN BRAHIM, J., CLINARD, C. & SOW, C., 1982.** Caractéristiques structurales des kaolinites désordonnées. *Bull. Minéral.*, 105 : 477-491.
- TESSIER, D., 1975.** Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. C.N.A.M., Paris, 230 p.
- TESSIER, D. & PEDRO, G., 1976.** Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Evolution des principales argiles Ca au cours du phénomène de retrait. *Bull. AFES*, 2 : 85-99.
- TESSIER, D. & BERRIER, J., 1979.** Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Sci. du Sol*, 1 : 67-82.
- TESSIER, D., 1980.** Sur la signification de la limite du retrait dans les argiles. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t.291, Série D, pp 377-380.
- TESSIER, D., PEDRO, G. & CAMARA, L., 1980.** Sur le comportement hydrique de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sci.*, Paris t. 290, série D, pp 1169 – 1172.
- TESSIER, D., 1984.** Etude 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.
- THIRY, M. & WEBER, F., 1977.** Convergence de comportement entre les interstratifiés kaolinite-smectite et les "fire-clays". *Clay Minerals*, 12 : 83-91.
- THIRY, M., 1982.** Les kaolinites des argiles de Provins: géologie et cristallinité. *Bull. Minéral.*, 105 : 521-526.

- UHLAND, R.E., 1949.** Physical properties of soils as modified by crops and manegement. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 14 : 361-366.
- U.S.D.A., 1951.** Soil Survey Manual. By Soil Survey Staff. Ed. 1962 by sup. Doc. U.S. Goy. Printing Office, 503 p.
- U.S.D.A., 1960.** Soil Conservation Service. Soil classification : a comprehensive system, 7th approximation. Washington, 503p.
- U.S.D.A., 1975.** Soil taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, 754p.
- VACHIER, P., CAMBIER, Ph. & PROST, R., 1979.** Structure d'un milieu poreux : la craie. Ann. Agron., 39(3):247-263.
- VAN BRAKEL, J., MORDRY, J. & SVATA, M., 1981.** Mercure porosimetry : State of the art. Powder Tech., 29:1-12.
- WIEGMANN, J., HORTE, Ch. & KRANZ, G., 1982.** Determination of the complete mineral composition of clays. Proc. VII Int. Clay. Conf. 1981. Bologna and Pavia. Ed. VAN OPHEËN and F. VERNIALE. Dev. Sed. 35, Elsevier, 365-372.

## RESUME

Sur des sols ferrallitiques "podzolicos", nous avons étudié le processus de dégradation physique par tassement suite à la culture de la canne à sucre. Deux sites ont été étudiés avec, pour chacun, trois modes d'utilisation (sol nu ou forêt, pâturage et canne à sucre). Pour chaque mode d'utilisation, deux profondeurs ont été échantillonnées, l'horizon cultivé et l'horizon sous-jacent où les valeurs de densité apparente sont les plus élevées. Les différences de densité apparente pouvant être dues au moins partiellement à des variations de constitution, nous avons étudié la granulométrie, la composition minéralogique (diffraction RX, dissolutions sélectives), la géométrie de l'espace poral (porosimétrie au mercure et microscopie optique), et certains aspects du comportement (courbes de rétention d'eau et de retrait-gonflement, conductivité hydraulique).

Les variations de densité apparente ont été attribuées en partie à des différences de composition entre les horizons et non pas uniquement à la culture répétée de canne à sucre. Ces variations de densité apparente s'expliquent en effet essentiellement par les différences de teneur en argile. Cependant, des différences dans la distribution du volume poral libre à l'air ont été attribuées au tassement. Ces différences, qui sont faibles en volume, sont par contre importantes pour expliquer les variations de conductivité hydraulique des horizons puisqu'elles concernent des pores d'origine racinaire de grande taille. Cependant, l'érosion hydrique qui se développe à la suite de la mise en culture de la canne à sucre est apparue déterminante pour expliquer la dégradation physique des sols. Cet autre processus de dégradation a en effet pour conséquence de faire affleurer en surface des horizons de densité apparente de plus en plus élevée.

Cette étude a fait apparaître aussi des différences de comportement en retrait gonflement entre les deux sites, bien que les sols présentent des caractéristiques morphologiques très proches. Cette distinction pourrait être due à des caractéristiques des cristaux de kaolinite et de goethite entre les deux sites.

## ABSTRACT

For the ultisols of the state of Rio de Janeiro (Brasil), soil compaction is very often considered as due to sugar cane cultivation. In order to study the significance of that soil degradation, two sites where sugar cane is cultivated were chosen. Three plots differing in their cultivation type (no-tilled or forest, grassland and sugar cane) were selected in each site. For each plot, samples were collected from the tilled horizon and from the plough pan. Differences in bulk density can be due to differences in the nature of soil components and in their fabric. Consequently, particle size distribution, mineralogical composition (X-ray diffraction, selective dissolutions), porosity (mercury porosimetry, optical microscopy), both water retention and shrinkage properties, and hydraulic conductivity were studied. Bulk density variations appear to be attributed to differences in soil composition essentially and not in soil compaction intensity partly. Results show many of these variations as being related to clay content changes. Some little differences in the size distribution of the structural pores and in the volume of biological, pores are due to soil compaction intensity. These differences explain the high variations of hydraulic conductivity. Actually, bulk density changes would originate mainly in hydraulical erosion which remove the upper part of the soil. Consequently, during a sugar cane cultivation period, the B<sub>t</sub> horizon is nearer and nearer the surface and the clay content of the plough pan becomes higher and higher. This study has also shown that, although the soils are morphologically similar between the two sites, their shrinkage properties are highly different. That distinction would be due to differences in the characteristics of the kaolinite and goethite crystals.



**Annexe A**  
**DESCRIPTION DES LAMES MINCES**

Echantillon : CP-P-1  
Horizon : Ap2  
Profondeur : 6 – 26 cm

**Microstructure:**

- a. Degré de pédalité : mottes à structure très faiblement développée;*
- b. Microstructure : de type A à "entassement de grains" (20%) et de type B en "éponge" (80%).*

**Vides : 20 % de la surface totale de la lame.**

- a. Vides d'entassement : de 500 à 2000  $\mu\text{m}$  de diamètre, (60% de la surface de type A) ;*
- b. Vides planaires : de 200 à 500  $\mu\text{m}$  de large, sans orientation, non complémentaires. (2% de la surface de type B) ;*
- c. Cavités : de 50 à 100  $\mu\text{m}$  de diamètre. (10% de la surface de type B).*

**Constituants minéraux :**     *glf : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *glf : rapport surfacique – 1,7*

- a. Constituants grossiers : quartz de 10 à 1500  $\mu\text{m}$  de diamètre (les plus nombreux ont 200  $\mu\text{m}$  de diamètre), subangulaires à sphéricité variable (50 % de la surface de la lame) ;*
- b. Constituants fins : brun rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : seuls quelques fragments de tissus végétaux (<1%)**

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène dans la zone de type B.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; un de forme allongé (1,5 mm x 5 mm) d'autres de plus petites tailles (100  $\mu\text{m}$  de diamètre). Moins de 1 % de la surface total de la lame.**

Echantillon : CP-P-2  
Horizon : BA  
Profondeur : 26 – 40 cm

**Microstructure:**

*a. Degré de pédalité : mottes à structure modérément développés ;*

*b. Microstructure : de type A à "entassement de grains" (10%) et de type B en "éponge" (90%).*

**Vides : 20 % de la surface totale de la lame.**

*a. Vides d'entassement : Trois grands vides de 3000  $\mu\text{m}$ , mais les plus nombreux se situent entre 100 à 500  $\mu\text{m}$  de diamètre (70 % de la surface de type A) ;*

*b. Vides planaires : de 100 à 200  $\mu\text{m}$  de large, sans orientation, non complémentaires (5 % de la surface de type B);*

*c. Cavités : de 50 à 800  $\mu\text{m}$ , entre les mottes recoupés par les vides planaires, et de 30 – 50  $\mu\text{m}$  dans les mottes (10 % de la surface de type B).*

**Constituants minéraux :**     *glf : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *glf : rapport surfacique – 1,7*

*a. Constituants grossiers : quartz de 10 à 2000  $\mu\text{m}$  de diamètre (les plus nombreux ont 200  $\mu\text{m}$  de diamètre) ; sub-angulaires à sphéricité variable (50 % de la surface de la lame) ;*

*b. Constituants fins : brun rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques :** *quelques fragments de tissus végétaux de petite taille (< 1 %).*

**Masse basale :**

*a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*

*b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène dans la zone de type B.*

**Traits pédologiques :** *Nodules, probablement ferro-manganiques ; quelques de 100 à 200  $\mu\text{m}$  de diamètre. Moins de 1 % de la surface de la lame.*

Echantillon : CP-F-1  
Horizon : AB  
Profondeur : 16 – 26 cm

**Microstructure:**

- a. Degré de pédalité : mottes à structure très faiblement développée ;*
- b. Microstructure : de type A à "entassement de grains (90%) et de type B en "éponge" (10%).*

**Vides : 30 % de la surface total de lame.**

- a. Vides d'entassement : de 500 à 3000  $\mu\text{m}$  de diamètre, mais les plus nombreux se situent entre 500 à 1000  $\mu\text{m}$  (30 % de la surface de type A) ;*
- b. Vides planaires : absents ;*
- c. Cavités : de 30 à 150  $\mu\text{m}$  de diamètre (10 % de la surface de type B).*

**Constituants minéraux :**     *g/f : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *g/f : rapport surfacique – 6,0*

- a. Constituants grossiers : quartz de 10 à 4000  $\mu\text{m}$  de diamètre (les plus nombreux se situent entre 500 à 1000  $\mu\text{m}$ ), subangulaires à sphéricité variable (60 % de la surface de la lame) ;*
- b. Constituants fins : jaune-rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (10 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : Absents.**

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : ils ne se distribuent pas de façon homogène, concentrés en certaines zones de la lame ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence, ils ne se distribuent pas de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de taille entre 30 à 150  $\mu\text{m}$ . Moins de 1 % de la surface de la lame.**

Echantillon : CP-F-2  
Horizon : BA  
Profondeur : 26 – 40 cm

**Microstructure:**

- a. *Degré de pédalité : mottes à microstructure modérément développée ;*
- b. *Microstructure : de type A à "entassement de grains (10%), et de type B en "éponge" (90%) et de type C "massif" (1%).*

**Vides : 15 % de la surface de la lame.**

- a. *Vides d'entassement : 100 à 1200  $\mu\text{m}$ , mais les plus nombreux se situent entre 100 – 200  $\mu\text{m}$  (40% de la surface de type A) ;*
- b. *Vides planaires : un de 30  $\mu\text{m}$  de large par 500  $\mu\text{m}$  de long et d'autres de plus petite taille (2 % de la surface de type B) ;*
- c. *Cavités : de 50 – 300  $\mu\text{m}$  (10 % de la surface de type B).*

**Constituants minéraux :**     *glf : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *glf : rapport surfacique – 1,7*

- a. *Constituants grossiers : quartz de 10 à 3000  $\mu\text{m}$ , mais les plus nombreux ont 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre, subangulaires à sphéricité variable (50 % de la surface de la lame) ;*
- b. *Constituants fins : brun rouge ; dans la zone de microstructure en "éponge" et rouge dans la zone de microstructure "massif" ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (35 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : absents.**

**Masse basale :**

- a. *Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*
- b. *Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène dans la zone à microstructure en "éponge", change de couleur et sont plus concentrés dans la zone à microstructure massif.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; un de 3000  $\mu\text{m}$  et quelques de 150  $\mu\text{m}$ . Moins de 1 % de la surface.**

Echantillon : CP-C-1  
Horizon : AB  
Profondeur : 20 – 28 cm

**Microstructure:**

- a. Degré de pédalité : mottes à structure modérément développée ;*
- b. Microstructure : de type B en "éponge" (97%) et de type A à entassement de grains (3%).*

**Vides : 20 % de la surface.**

- a. Vides d'entassement : dans une zone formée probablement par déjections de lombriciens de 500 à 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre (10 % de la surface de type A) ;*
- b. Vides planaires : petits réseaux de 60  $\mu\text{m}$  de large, sans orientation, non complémentaires (2 % de la surface de type B) ;*
- c. Cavités : une cavité de 4000  $\mu\text{m}$  de diamètre et quelques de 1000  $\mu\text{m}$  et 2000  $\mu\text{m}$ , mais les plus nombreuses ont entre 50  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$  de diamètre (20% de la surface de type B).*

**Constituants minéraux :**     *g/f : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *g/f : rapport surfacique – 1,7*

- a. Constituants grossiers : quartz de diamètre jusqu' à 2000  $\mu\text{m}$ , quelques uns de 200  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$ , et une majorité entre 50 et 100  $\mu\text{m}$  de diamètre (50% de la surface de la lame) ;*
- b. Constituants fins : brun rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30% de la surface de la lame).*

**Constituants organiques :** *présence d'un fragment de tissu végétal de 150  $\mu\text{m}$  de large et 3000  $\mu\text{m}$  de long et quelques autres fragments de plus petite taille (1 % de la surface).*

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène dans la zone à microstructure en éponge ; très compacte.*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène.*

**Traits pédologiques :** *Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 100 à 150  $\mu\text{m}$  (1 % de la surface). Déjection de lombriciens à microstructure à "entassement de grains très compacte (3 % de la surface).*

**Echantillon : CP-C-2**  
**Horizon : BA**  
**Profondeur : 28 – 47 cm**

**Microstructure:**

- a. Degré de pédalité : mottes à structure modérément développée ;*
- b. Microstructure : de type en "éponge".*

**Vides : 20 % de la surface.**

- a. Vides d'entassements : absents ;*
- b. Vides planaires : un de largeur variable (30 à 250  $\mu\text{m}$ ) et de 800  $\mu\text{m}$  de longueur, et d'autres de plus petites tailles, sans orientation et non complémentaires (5 % de la surface) ;*
- c. Cavités : quelques unes jusqu'à 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre, mais les plus fréquentes ont de 80 à 150  $\mu\text{m}$  de diamètre (15% de la surface).*

**Constituants minéraux :**     *g/f : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *g/f : rapport surfacique – 1,7*

- a. Constituants grossiers : quartz de 10 à 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre, mais les plus nombreux ont 500  $\mu\text{m}$ , sub-angulaires à sphéricité variable (50 % de la surface de la lame) ;*
- b. Constituants fins : brun rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques :** *un fragment de tissu végétal de 300  $\mu\text{m}$  de large par 6000  $\mu\text{m}$  de long.*

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribué de façon homogène.*

**Traits pédologiques :** *Nodules, probablement ferro-manganiques, de 60 à 1200  $\mu\text{m}$  (1 % de la surface).*

Echantillon : UR-N-1  
Horizon : A<sub>1</sub>  
Profondeur 0 – 15 cm

**Microstructure :**

- a. Degré de pédalité : mottes et/ou agrégats modérément développée;*
- b. Microstructure : de type "complexe", association à une microstructure de type en "éponge" à une microstructure de type "fissurale".*

**Vides : 30 % de la surface.**

- a. Vides planaires : trois grands vides planaires de 1 à 2 cm de long et de largeur variable (300 à 600 µm). D'autres vides planaires de plus petite taille (100 à 300 µm) sont présentes, orientées et complémentaires. Existence de très nombreux vides planaires de très petite taille (large 25 µm, long 100 µm) que correspondent à la microstructure "fissurale" associé à la microstructure en "éponge" (20 % de la surface) ;*
- b. Cavités : quelques grandes cavités (1000 à 1500 µm de diamètre) partiellement remplies par des grains de quartz et d'autres plus nombreuses et de plus petite taille (30 à 300 µm de diamètre).*

**Constituants minéraux :**     *glf : limite – 10 µm*  
                                      *glf : rapport surfacique – 1,3*

- a. Constituants grossiers : quartz de 1000 à 1500 µm, sont situés dans les vides planaires et les cavités de grande taille. Les plus nombreux ont de 100 à 300 µm de diamètre ; sous angulaires à sphéricité variable (40 % de la surface) ;*
- b. Constituants fins : rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30 % de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : absents.**

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : les plus nombreux (ceux de taille moyenne) sont distribués de façon homogène. Les grains de plus grande taille sont concentrés dans les vides planaires et cavités ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 100 à 300 µm de diamètre (1 % de la surface).**



Echantillon : UR-P-1  
Horizon : A<sub>1</sub>  
Profondeur : 0 – 15 cm

**Microstructure :**

- a. Degré de pédalité : mottes et/ou agrégats modérément développée;*
- b. Microstructure : de type "complexe" ; association d'une microstructure en "éponge" à une microstructure de type "fissurale".*

**Vides : 30 % de la surface.**

- a. Vides planaires : deux grands vides planaires de grande taille (500 à 1500  $\mu\text{m}$  de large par 5000  $\mu\text{m}$  de long). Réseau dense de vides planaires beaucoup plus fins (30 à 50  $\mu\text{m}$  de large par 250 à 300  $\mu\text{m}$  de long) (10% de la surface) ;*
- b. Cavités : existence de 3 grandes cavités (2000 à 8000  $\mu\text{m}$  de diamètre) particulièrement occupées par des grains de quartz isolés et d'agrégats à microstructure massive. De nombreux vides planaires partent de ces cavités (20 % de la surface).*

**Constituants minéraux :**     *glf : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
                                      *glf : rapport surfacique – 1,3*

- a. Constituants grossiers : quartz de 150 à 1800  $\mu\text{m}$  de diamètre, mais les plus nombreux sont de petite taille (150 à 500 $\mu\text{m}$  de diamètre) subangulaires à sphéricité variable (40% de la surface) ;*
- b. Constituants fins ; rouge, essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30% de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : absence.**

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribuée de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 300 à 600  $\mu\text{m}$  de diamètre (1 % de la surface).**

Echantillon : UR-P-2  
Horizon : AB  
Profondeur : 15 – 40 cm

**Microstructure :**

- a. Degré de pédalité : mottes et/ou agrégats modérément développée;*
- b. Microstructure : de type "complexe" : association d'une microstructure de type en "éponge" à une microstructure de type "fissurale" ;*

**Vides : 20 % de la surface.**

- a. Vides planaires : grand vide planaire de 200 à 500  $\mu\text{m}$  de large par 2,5 cm de long. Réseau dense de vides planaires de petites dimension. Orientés et complémentaires (10% de la surface) ;*
- b. Cavités : de petite taille (30 à 500  $\mu\text{m}$ ) (10% de la surface).*

**Constituants minéraux :**      *glf : limite – 10  $\mu\text{m}$*   
   *glf : rapport surfacique – 1,0*

- a. Constituants grossiers : présence de 3 grands grains de quartz (2000 à 4500  $\mu\text{m}$  de côté), mais les plus nombreux ont 150 à 600  $\mu\text{m}$  de diamètre et sont subangulaires à sphéricité variable (40% de la surface) ;*
- b. Constituants fins : rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (40% de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : absents.**

**Masse basale :**

- a. Organisation des constituants grossiers : excepté les 3 grands grains de quartz, les autres sont distribués de façon homogène ;*
- b. Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 300 à 450  $\mu\text{m}$  de diamètre (1 % de la surface).**

Echantillon : UR-C-1  
Horizon : A<sub>1</sub>  
Profondeur : 0 – 15 cm

**Microstructure :**

- a. *Degré de pédalité : mottes et lou agrégats modérément développée;*
- b. *Microstructure : de type "complexe" ; association d'une microstructure de type en "éponge" à une microstructure de type "fissurale".*

**Vides : 30 % de la surface.**

- a. *Vides planaires : plusieurs vides planaires de taille moyenne (100 à 200 µm de large par 1000 à 1500 µm de long) et d'autres plus petits et plus nombreux (30 à 50 µm de large par 200 à 400 µm de long), orientés (les plus grands) et complémentaires (10% de la surface) ;*
- b. *Cavités : deux grandes cavités (2000 et 4000 µm de diamètre), d'où sortent vides planaires de taille moyenne. Existence d'autres cavités et de taille plus petites (100 µm de large par 500 µm de long) (20% de la surface).*

**Constituants minéraux :**     *g/f : limite – 10 µm*  
                                      *g/f : rapport surfacique –1,3*

- a. *Constituants grossiers : quartz, un grand de 5000 µm, mais les plus nombreux ont de 300 à 500 µm de diamètre (40 % de la surface) ;*
- b. *Constituants fins : rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30% de la surface de la lame).*

**Constituants organiques : présence de fragments de tissus végétaux dans de grandes cavités.**

**Masse basale :**

- a. *Organisation des constituants grossiers : en général ils sont distribués de façon homogène, mais il existe une certaine concentration de grands quartz dans des cavités ;*
- b. *Organisation des constituants fins : absence de biréfringence ; distribués de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 60 à 2100 µm (1 % de la surface).**

Echantillon : UR-C-2  
Horizon : BA  
Profondeur : 15 – 20 cm

**Microstructure :**

- a. Degré de pédalité : mottes et/ou agrégats modérément développée;*
- b. Microstructure : de type "complexe" ; association d'une microstructure de type en "éponge" à une microstructure de type "fissurale".*

**Vides : 30% de la surface**

*a. Vides planaires : un grand vide planaire de 3,5 cm de longueur et de 300 à 1400  $\mu\text{m}$  de large. D'autres vides planaires de plus petite taille sont présentes (30 à 150  $\mu\text{m}$  de large par 500 à 1000  $\mu\text{m}$  de long) orientés et complémentaires (20% de la surface) ;*

*b. Cavités : deux grandes cavités (la première de 5000  $\mu\text{m}$  de diamètre et la seconde de 3000  $\mu\text{m}$  de diamètre) sont interliées par le grand vide planaire. Dans la deuxième cavité, il existe un agrégat massif de 2000  $\mu\text{m}$ . D'autres cavités (100 à 1000  $\mu\text{m}$  de diamètre) sont présentes (10% de la surface).*

**Constituants minéraux :      *g/f : limite – 10  $\mu\text{m}$***

*g/f : rapport surfacique – 1,3*

*a. Constituants grossiers : quartz, de 300 à 1000  $\mu\text{m}$ , mais les plus nombreux ont de 300 à 600  $\mu\text{m}$  de diamètre (40 % de la surface) ;*

*b. Constituants fins : rouge ; essentiellement de la taille des argiles granulométriques (30% de la surface de la lame)*

**Constituants organiques : présence de fragments de tissus végétaux dans des cavités.**

**Masse basale :**

*a. Organisation des constituants grossiers : distribués de façon homogène ;*

*b. Organisation des constituants fins : absence des biréfringence ; distribués de façon homogène.*

**Traits pédologiques : Nodules, probablement ferro-manganiques ; de 30 à 2000  $\mu\text{m}$  (1% de la surface).**

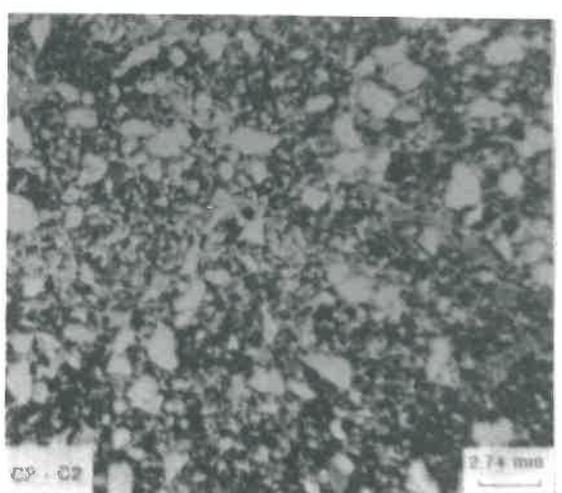
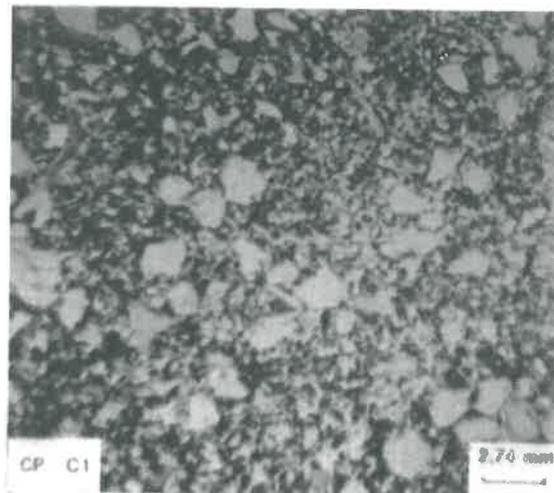
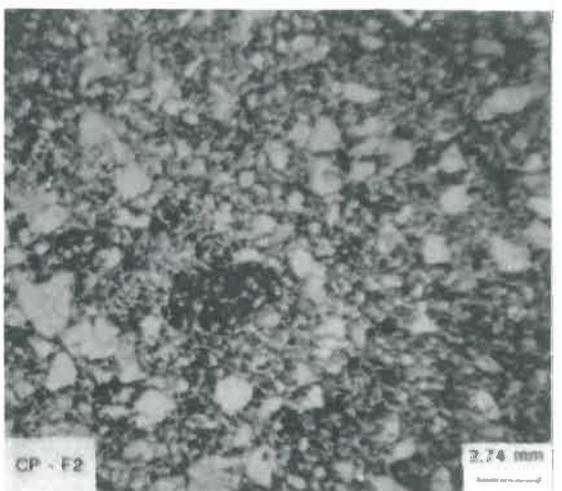
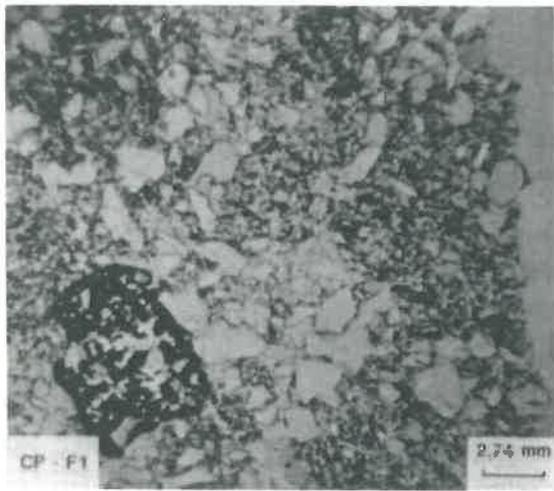
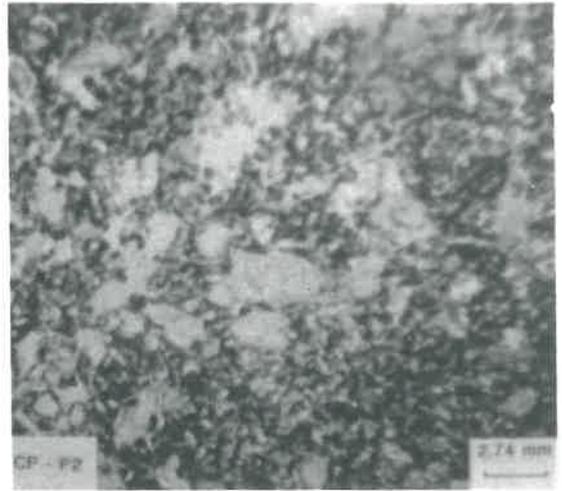
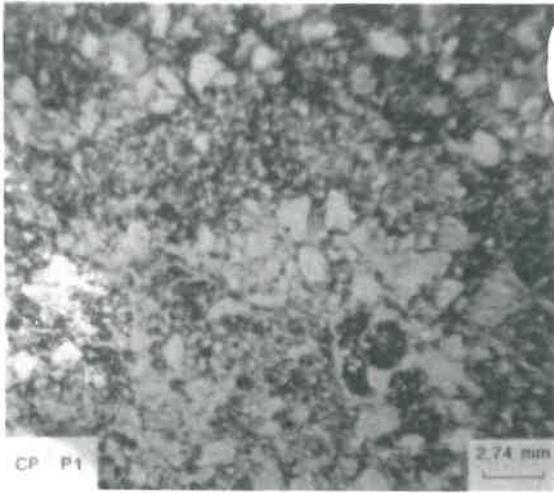


Figure A.1: Site de "Campos". Microstructure à "entassement de grains" et microstructure en "éponge".

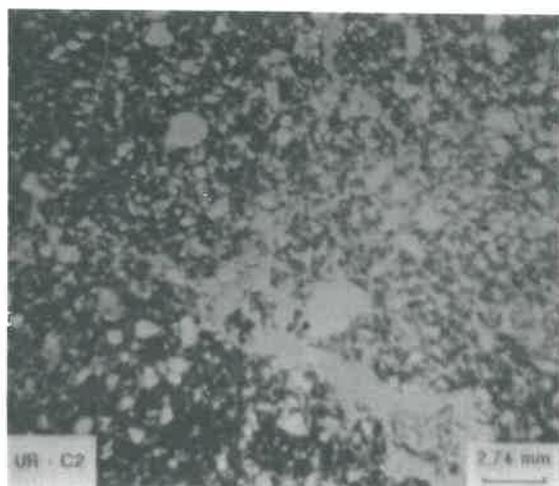
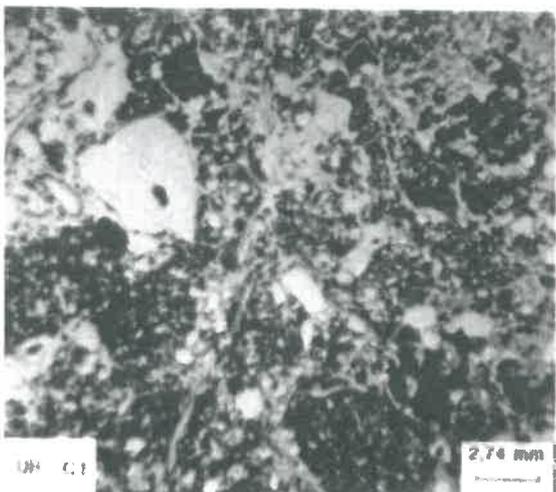
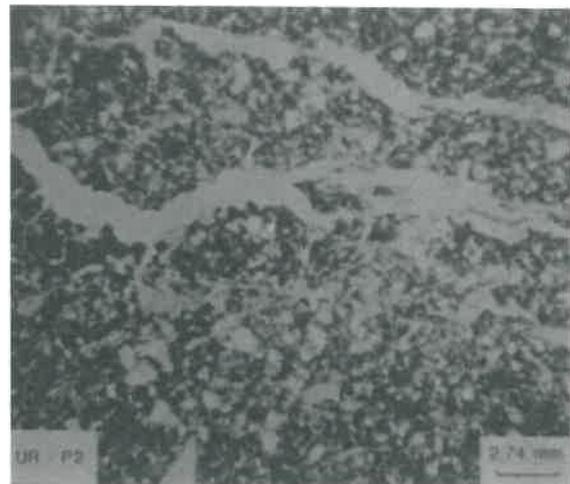
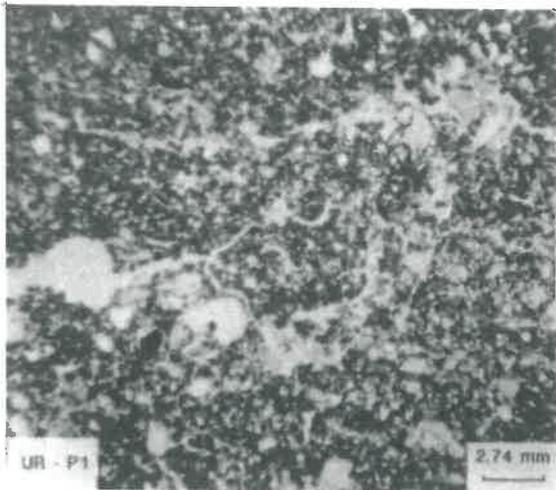
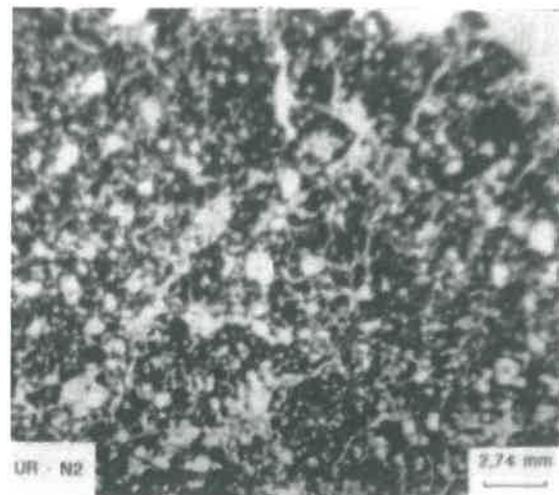
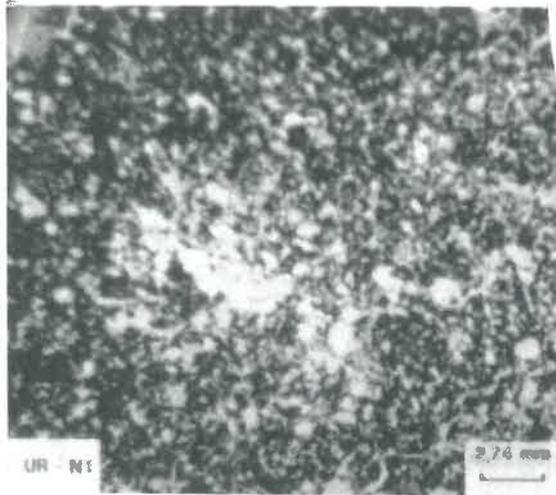


Figure A.2: Site de "l'Universidade Rural". Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale".



## Table des Matières

Chapitre 1 LES SITES ETUDIÉS	21
1.1 Introduction	21
1.2 Le site de la région de “Campos”	23
1.2.1 Caractères généraux du milieu	23
1.2.2 Les situations étudiées	24
1.2.3 Discussion	31
1.3 Le site de “l’Universidade Rural”	32
1.3.1 Caractères généraux du milieu	32
1.3.2 Les trois situations étudiées	34
1.3.3 Discussion	37
1.4 Localisation des prélèvements d’échantillons	37
1.5 Conclusion	40
Chapitre 2 CARACTERISATION DES CONSTITUANTS MINERAUX	41
2.1 Introduction	41
2.2 Analyse granulométrique	41
2.2.1 Méthodes	42
2.2.2 Résultats et discussion	42
2.3 Analyse minéralogique de la fraction argile	44
2.3.1 Identification des différents minéraux	44
2.3.2 Caractérisation des kaolinites et des goethites	50
2.3.3 Analyse minéralogique quantitative	61
2.4 Conclusion	66
Chapitre 3 ANALYSE DES MODES D’ORGANISATION	69
3.1 Introduction	69
3.2 Volume poral total déduit des valeurs de densités apparente et réelle	69
3.3 Microscopie optique et typologie des organisations et pores associés	71
3.3.1 Introduction	71

3.3.2	Méthodologie .....	72
3.3.3	Résultats et discussions .....	72
3.4	Porosimétrie au mercure et géométrie de l'espace poral .....	80
3.4.1	Introduction .....	80
3.4.2	Méthodologie .....	80
3.4.3	Résultats et discussion .....	81
3.5	Conclusion .....	87
<b>Chapitre 4 ETUDE DU COMPORTEMENT HYDRIQUE</b>		<b>89</b>
4.1	Introduction .....	89
4.2	Etude des propriétés de rétention en eau .....	89
4.2.1	Méthodologie .....	89
4.2.2	Résultats .....	91
4.2.3	Discussion .....	94
4.3	Les propriétés de retrait .....	104
4.3.1	Introduction .....	104
4.3.2	Méthodologie .....	105
4.3.3	Résultats et discussion .....	105
4.4	Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ ) .....	113
4.4.1	Introduction .....	113
4.4.2	Méthodologie .....	113
4.4.3	Résultats .....	114
4.4.4	Discussion .....	115
4.5	Conclusion .....	116
<b>Chapitre 5 DISCUSSION GENERALE</b>		<b>119</b>
5.1	Introduction .....	119
5.2	Site de "l'Universidade Rural" .....	119
5.2.1	Volume poral total ( $V_p$ ) .....	120
5.2.2	Volume poral dû à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{arg}$ ) .....	127
5.2.3	Volume poral structural ( $V_{str}$ ) .....	132
5.2.4	Volume poral libre à l'air ( $V_{air}$ ) .....	138
5.2.5	Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ ) .....	140
5.2.6	Conclusion .....	143
5.3	Le site de "Campos" .....	146
5.3.1	Volume poral total ( $V_p$ ) .....	147
5.3.2	Volume poral dû à l'assemblage de l'argile ( $V_{arg}$ ) .....	153
5.3.3	Volume poral structural ( $V_{str}$ ) .....	156

5.3.4 Volume poral libre à l'air ( $V_{\text{air}}$ ) .....	158
5.3.5 Conductivité hydraulique en saturé ( $K_0$ ) .....	160
5.3.6 Conclusion .....	161
5.4 Tassement du sol et mode d'utilisation agricole .....	164
CONCLUSION GENERALE	169
BIBLIOGRAPHIE	175
Annexe A DESCRIPTION DES LAMES MINCES	185



## Figures

Figure 1: Carte schématique du Brésil. ....	18
Figure 2: Localisation des deux sites étudiés dans l'état de Rio de Janeiro. ....	18
Figure 1.1: Carte géologique de la région de "Campos". ....	22
Figure 1.2: Bilan hydrique pour la région de "Campos". ....	24
Figure 1.3: Situation des profils dans le paysage : 1. Pâturage, 2. Canne à sucre et 3. Forêt secondaire. ....	25
Figure 1.4: Schéma des trois profils de sols étudiés pour le site de "Campos". ....	32
Figure 1.5: Bilan hydrique pour la région de Rio. ....	33
Figure 1.6: Carte géologique de la région de "l'Universidade Rural". ...	34
Figure 1.7: Schéma du dispositif expérimental conçu pour étudier l'érosion à "l'Universidade Rural" : a. sol nu, b. pâturage, c. canne à sucre, d. localisation des prélèvements et e. localisation du profil décrit. ....	35
Figure 1.8: Schéma du profil de sol étudié pour le site de "l'Universidade Rural". ....	38
Figure 1.9: Localisation et dénomination abrégée des échantillons prélevés dans les profils de sols étudiés à "Campos" et à "l'Universidade Rural". ....	39
Figure 2.1: Diffractogrammes RX obtenus à partir de lames orientées (Co K $\alpha$ ) (Fraction < 2 $\mu$ m) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2. ....	46
Figure 2.2: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre (Co K $\alpha$ ) (Fraction < 2 $\mu$ m) : a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2. ....	47
Figure 2.3: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre après traitement NaOH 5N (Co K $\alpha$ )(Fraction < 2 $\mu$ m) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2. ....	48
Figure 2.4: Diffractogrammes RX obtenus sur poudre après traitement CDB (Co K $\alpha$ ) (Fraction < 2 $\mu$ m) avec a. CP-F-1, b. CP-C-2, c. UR-N-1 et d. UR-C-2. ....	49

Figure 2.5: Représentation schématique des dispositions cristallographiques dans une particule de kaolinite (d'après THIRY, 1982). . . . .	51
Figure 2.6: Analyse thermopondérale de la fraction argileuse pour UR-C-1 (courbe de perte de masse en mg : —, et sa courbe dérivée : - - -). . . . .	58
Figure 2.7: Analyse thermopondérale de la fraction argileuse après traitement CDB pour UR-C-1 (courbe de perte de masse en mg : —, et sa courbe dérivée : - - -). . . . .	59
Figure 3.1: Microstructure à "entassement de grains" et microstructure en "éponge". Site de "Campos". . . . .	73
Figure 3.2: Microstructure à "entassement de grains". Site de "Campos". . . . .	74
Figure 3.3: Microstructure à "entassement de grains" et microstructure en "éponge". Site de "Campos". . . . .	74
Figure 3.4: Microstructure en "éponge". Site de "Campos". . . . .	75
Figure 3.5: Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale". Site de "l'Universidade Rural". . . . .	76
Figure 3.6: Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale". Site de "l'Universidade Rural". . . . .	77
Figure 3.7: Microstructure en "éponge". Site de "l'Universidade Rural". . . . .	77
Figure 3.8: Microstructure "fissurale" (épifluorescence U.V.). Site de "l'Universidade Rural". . . . .	78
Figure 3.9: Courbe d'intrusion de mercure pour l'échantillon CP-P-1. (Trois répétitions $R_1$ , $R_2$ et $R_3$ ). . . . .	81
Figure 3.10: Intrusion de mercure. Courbe dérivée de la courbe du volume poral cumulé. (cf. Figure 3.9). . . . .	82
Figure 4.1: Courbes de rétention en eau au cours de la déshydratation. Site de "Campos". . . . .	92
Figure 4.2: Courbes de rétention en eau au cours de la déshydratation. Site de "l'Universidade Rural". . . . .	93
Figure 4.3: Représentation du phénomène de retrait. . . . .	109
Figure 4.4: Schéma du dispositif utilisé pour la détermination de $K_0$ . . . . .	114
Figure 5.1: Schéma indiquant les valeurs de diamètre équivalent de pores ( $D_e$ ) pris en compte pour $V_l[Hg]$ , $V_l[eau]$ et $V_l[da]$ pour le site de "l'Universidade Rural". Ce schéma fait apparaître des différences de géométrie des pores entre l'état déshydraté est saturé puisque le système poral serait déformable. . . . .	122

Figure 5.2: Schéma illustrant les différences de distribution des grands pores entre, d'une part, UR-C et, d'autre part, UR-N et UR-P. . . . .	126
Figure 5.3: Schéma illustrant pour un mode d'utilisation, les différences de distribution des grands pores entre les profondeurs 1 et 2. La façon dont ces différences sont prises en compte pour $V_t [d_a]$ et $V_t [eau]$ est aussi indiquée. . . . .	127
Figure 5.4: Représentation schématique du volume poral non pris en compte par $V_t [eau]$ . . . . .	141
Figure 5.5: Représentation schématique de la distribution de taille des pores pour l'ensemble du volume poral (Site de "l'Universidade Rural"). Les valeurs de $D_p$ indiquées en abscisse doivent être considérées comme étant des valeurs approchées. . . . .	144
Figure 5.6: Schéma indiquant les valeurs de diamètre de pores ( $D_p$ ) pris en compte par $V_t [Hg]$ , $V_t [eau]$ et $V_t [da]$ pour le site de "Campos". Ce schéma ne fait pas apparaître de différence entre les états déshydraté et saturé puisque le système poral serait rigide. . . . .	148
Figure 5.7: Représentation schématique de la distribution de taille des pores pour l'ensemble du volume poral (Site de "Campos"). . . . .	163
Figure 5.8: Représentation schématique de la distribution du volume poral structural pour le site de "Campos". . . . .	171
Figure 5.9: Schéma d'évolution des sols et de la densité apparente de leurs horizons en fonction du mode d'utilisation. . . . .	172
Figure A.1: Site de "Campos". Microstructure à "entassement de grains" et microstructure en "éponge". . . . .	198
Figure A.2: Site de "l'Universidade Rural". Microstructure "complexe". Association de microstructure en "éponge" et microstructure "fissurale". . . . .	199



## Tableaux

Tableau 1.1: Moyennes des précipitations et températures. Région nord ("Campos"). Période d'observation : 35 ans. ....	24
Tableau 1.2: Analyse granulométrique du profil de sol sous forêt (PVA "Campos"). ....	26
Tableau 1.3: Analyse chimique du profil de sol sous forêt (PVA "Campos") ....	27
Tableau 1.4: Analyse granulométrique du profil de sol sous pâturage (PVA "Campos"). ....	28
Tableau 1.5: Analyse chimique du profil de sol sous pâturage (PVA "Campos"). ....	29
Tableau 1.6: Analyse granulométrique du profil de sol sous canne à sucre (PVA "Campos"). ....	30
Tableau 1.7: Analyse chimique du profil de sol sous canne à sucre (PVA "Campos"). ....	31
Tableau 1.8: Moyennes des précipitations et températures. Région de Rio. Période d'observation : 35 ans. ....	33
Tableau 1.9: Analyse granulométrique du profil de sol sous pelouse (PVA "Universidade Rural"). ....	36
Tableau 1.10: Analyse chimique du profil de sol sous pelouse (PVA "Universidade Rural"). ....	37
Tableau 2.1: Effets de différents traitements sur la teneur en argile mesurée pour les sites de "Campos" et de "l'Universidade Rural". 1. Laboratoire INRA d'ARRAS, dispersant hexamétaphosphate + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 2. Laboratoire SNLCS-EMBRAPA-Brésil, dispersant NaOH1N ; 3. Laboratoire INRA-SESCPF, 200 ml HCl 0,05N + 40 ml NaOH 1N. ....	43
Tableau 2.2: Epaisseur apparente et diamètre apparent selon respectivement les raies 001 et 060, des cristaux de kaolinite (épaisseur et diamètre en Å). ....	52
Tableau 2.3: Analyse de variance. Taille apparente des cristaux selon la raie 001 (épaisseur). ....	53

Tableau 2.4: Analyse de variance. Taille apparente des cristaux selon la raie 060 (diamètre). . . . .	53
Tableau 2.5: Décomposition des degrés de liberté des traitements (modes d'utilisation et profondeurs) pour la raie 001. . . . .	54
Tableau 2.6: Décomposition des degrés de liberté des traitements (modes d'utilisation et profondeurs) pour la raie 060. . . . .	55
Tableau 2.7: Décomposition des degrés de liberté de l'interaction (raie 001) pour tester la source de variation profondeur dans chaque mode d'utilisation. . . . .	56
Tableau 2.8: Décomposition des degrés de liberté de l'interaction (raie 060) pour tester la source de variation profondeur dans chaque mode d'utilisation. . . . .	56
Tableau 2.9: Teneur en eau de la kaolinite déduite de l'analyse thermopondérale (cf figures 2.6 et 2.7) (teneur en eau exprimée en % de la masse d'oxyde). 1. en considérant les domaines II et III. 2. en considérant le domaine II. . . . .	60
Tableau 2.10: Taux de substitution Al-Fe dans le réseau de la goethite. Pourcentage d'atome d'aluminium. . . . .	61
Tableau 2.11: Compositions chimiques utilisées pour l'établissement du système d'équation linéaire. . . . .	63
Tableau 2.12: Composition de la goethite en fonction du taux de substitution Al-Fe. Résultats exprimés en % par rapport à l'état calciné. . . . .	64
Tableau 2.13: Analyse chimique de la fraction argile exprimée en % d'oxyde. . . . .	64
Tableau 2.14: Proportions de kaolinite (K), goethite (Gt), anatase (A) et quartz (Q) dans la fraction argile. . . . .	65
Tableau 3.1: Densité apparente ( $d_a$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ), densité réelle ( $d_r$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en volume poral total $V_t$ ( $d_a$ ) ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) obtenus à l'aide des anneaux volumiques (Kopecky). . . . .	70
Tableau 3.2: Données de l'intrusion de mercure : Volume poral total ( $V_t$ [Hg]), volume dû à l'assemblage des particules d'argile ( $V_{\text{arg}}$ [Hg]) et volume poral structural ( $V_{\text{str}}$ [Hg]) ; moyenne de 3 répétitions. . . . .	83
Tableau 3.3: Analyse de variance (Site de "Campos"). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_t$ [Hg]). Moyenne des 3 répétitions. . . . .	83

Tableau 3.4: Analyse de variance (Site de “Campos”). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_{\text{arg}}$ [Hg]). Moyenne des 3 répétitions. ....	84
Tableau 3.5: Analyse de variance (Site de “Campos”). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume de l’argile ( $V_{\text{str}}$ [Hg]. Moyenne de 3 répétitions. ....	84
Tableau 3.6: Test de Tukey pour le volume poral total (site de Campos). Comparaison des modes d’utilisation. ....	85
Tableau 3.7: Test de Tukey pour le volume poral de l’argile (Site de “Campos”). Comparaison des modes d’utilisation. ....	85
Tableau 3.8: Analyse de variance (Site de “l’Universidade Rural”). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral total ( $V_t$ [Hg]. Moyenne des 3 répétitions. ....	86
Tableau 3.9: Analyse de variance (Site de “l’Universidade Rural”). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral de l’argile ( $V_{\text{arg}}$ [Hg]). Moyenne des 3 répétitions. ....	86
Tableau 3.10: Analyse de variance (Site de “l’Universidade Rural”). Intrusion de mercure ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ). Volume poral structural ( $V_{\text{str}}$ [Hg]). Moyenne de 3 répétitions. ....	87
Tableau 4.1: Comparaison à $pF=3,0$ des teneurs en eau de cylindres (C) et de la terre tamisée à 2mm (TF). ....	94
Tableau 4.2: Analyse de variance résumée. Influence des couches dans chaque horizon aux différents $pF$ . ....	95
Tableau 4.3: Teneurs en eau ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) aux différentes valeurs de $pF$ (ST : état saturé). ....	96
Tableau 4.4: Analyse de variance. Teneur en eau en fonction du $pF$ . Pour les deux sites, pour les deux profondeurs et pour les modes d’utilisation. ....	97
Tableau 4.5: Décomposition des 11 degrés de liberté de traitements (sites, profondeurs et modes d’utilisation). ....	98
Tableau 4.6: Décomposition des degrés de liberté de l’interaction (profondeurs-modes d’utilisation). Comparaison des profondeurs dans chaque mode d’utilisation (Site de “Campos”). ....	98
Tableau 4.7: Test de Tukey pour la teneur en eau (Site de “Campos”). Comparaison des modes d’utilisation. ....	99
Tableau 4.8: Test de Tukey pour la teneur en eau (Site de “l’Universidade Rural”). Comparaison des modes d’utilisation. ....	100

Tableau 4.9: Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des différents états hydriques dans chaque traitement. . . . .	101
Tableau 4.10: Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des profondeurs 1 et 2 à chaque état hydrique et chaque mode d'utilisation. . . . .	101
Tableau 4.11: Test de Tukey pour la teneur en eau. Comparaison des modes d'utilisation à chaque profondeur et chaque état hydrique. .	102
Tableau 4.12: Volume massique ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en fonction de l'état hydrique des mottes. . . . .	106
Tableau 4.13: Densité apparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) en fonction de l'état hydrique des mottes. . . . .	106
Tableau 4.14: Teneur en eau ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) en fonction de l'état hydrique des mottes. . . . .	107
Tableau 4.15: Analyse de variance (Site de "Campos"). Volume massique ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) en fonction de l'état hydrique. . . . .	109
Tableau 4.16: Test de Tukey pour le volume massique (Site de "Campos"). Comparaison des modes d'utilisation. . . . .	110
Tableau 4.17: Analyse de variance (site de "l'Universidade Rural"). Volume massique ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) en fonction de l'état hydrique. . . . .	110
Tableau 4.18: Test de Tukey pour le volume massique (Site de "l'Universidade Rural"). Comparaison des états hydriques. . . . .	111
Tableau 4.19: Test de Tukey pour le volume massique (Site de "l'Universidade Rural"). Comparaison des modes d'utilisation. . . . .	112
Tableau 4.20: Conductivité hydraulique en saturée ( $K_0$ ) en cm/h. Moyenne de 2 répétitions et 10h pour chaque essai. . . . .	115
Tableau 5.1: Volume poral total obtenu à partir du volume d'eau à saturation ( $V_t[\text{eau}]$ ), de la porosimétrie au mercure ( $V_t[\text{Hg}]$ ), de la densité apparente des anneaux de Kopecky ( $V_t[d_a]$ ). Diminution de volume au cours de la dessiccation ( $\Delta V$ ). . . . .	120
Tableau 5.2: Analyse de variance. Volume total des pores $V_t[\text{eau}]$ obtenu à partir de la teneur en eau à saturation. . . . .	123
Tableau 5.3: Test de Tukey pour $V_t[\text{eau}]$ . Comparaison des modes d'utilisation. . . . .	124
Tableau 5.4: Volume poral de l'argile obtenu à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{\text{arg}}[\text{Hg}]$ ), % argile et volume poral de l'argile obtenu	

à partir du volume d'eau à $pF=3,7$ ( $V_{arg} [pF = 3,7]$ ) et rapport entre $V_{arg} [pF = 3,7]$ et % argile. ....	128
Tableau 5.5: Volume poral structural obtenu à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{str} [Hg]$ ) et volume structural des mottes ( $V_{str} [M]$ ). $V_{arg} [pF = 3,7]$ : volume poral de l'argile à $pF = 3,7$ ; $V_m [pF = 3,0]$ : volume massique à $pF = 3,0$ et $V_t [d_a]$ : volume poral total calculé à partir de la densité apparente. ....	133
Tableau 5.6: Volume massique des mottes à $105^{\circ}C$ ( $V_m [105]$ ) et $1/d_t$ utilisés pour calculer le volume poral total des mottes à $105^{\circ}C$ ( $V_t [V_m 105]$ ) et $V_t [Hg]$ pour la comparaison. ....	134
Tableau 5.7: Analyse de variance. Comparaison entre $V_{str}[Hg]$ et $V_{str}[M]$ . ....	135
Tableau 5.8: Comparaison de la différence de volume entre $V_m[pF=3,0]$ et $V_m[105]$ avec la différence de volume entre le $V_{arg}[pF=3,7]$ et $V_{arg}[Hg]$ . ....	136
Tableau 5.9: Volume libre à l'air calculé à partir des anneaux de Kopecky ( $V_{air} [pF = 1,78]$ ) et % par rapport au volume total ( $V_t [d_a]$ ). ....	139
Tableau 5.10: Valeur de $V_t[d_a]$ et $V_t[eau]$ . Différence entre ces deux valeurs de volume poral total et valeur de la conductivité hydraulique en saturé. ....	140
Tableau 5.11: Volume poral total calculé à partir de la teneur en eau à saturation ( $V_t [eau]$ ), de la courbe d'intrusion de mercure ( $V_t [Hg]$ ), ou des valeurs de $d_a$ et $d_t$ ( $V_t [d_a]$ ). ....	147
Tableau 5.12: Analyse de variance. Volume poral total obtenu à partir de la teneur en eau à saturation ( $V_t [eau]$ ). ....	149
Tableau 5.13: Décomposition des degrés de liberté de l'interaction. Comparaison des profondeurs à chaque mode d'utilisation. ....	149
Tableau 5.14: Décomposition des degrés de liberté de l'interaction. Comparaison des modes d'utilisation à chaque profondeur. ....	150
Tableau 5.15: Test de Tukey. Comparaison des modes d'utilisation à la profondeur 1. ....	151
Tableau 5.16: Test de Tukey. Comparaison des modes d'utilisation à la profondeur 2. ....	151

Tableau 5.17: Volume poral total dû à l'assemblage des particules d'argile à l'état déshydraté ( $V_{arg} [H_g]$ ) et à $pF = 3,7$ ( $V_{arg} [pF = 3,7]$ ). . . . .	153
Tableau 5.18: Comparaison entre les données de la courbe d'intrusion de mercure et celles de la courbe de sortie d'eau. Correspondance entre les valeurs de $pF$ et celles de diamètre équivalent. Les volumes sont donnés en $cm^3 g$ . . . . .	155
Tableau 5.19: Valeurs obtenues à partir de la porosimétrie au mercure ( $V_{str} [Hg]$ ), de la courbe de rétention en eau ( $V_{str} [eau]$ ) et de la densité apparente ( $V_{str} [d_a]$ ). . . . .	157
Tableau 5.20: Volume libre à l'air ( $V_{air} [d_a]$ ) obtenu à partir de $V_t[d_a]$ et des propriétés de rétention en eau ( $V_{eau} [pF = 1,78]$ ). . . . .	159
Tableau 5.21: Valeurs de la conductivité hydraulique en saturé ( $K_o$ ) et % de surface occupé par la microstructure de type à "entassement de grains" (% S). . . . .	160