

**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE P. ET M. CURIE**

**spécialité**

**PÉDOLOGIE**

**présentée par**

**Antoine MAPANGUI**

**pour obtenir le titre de**

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE P. ET M. CURIE**

**ÉTUDE DE L'ORGANISATION ET DU COMPORTEMENT  
DE SOLS FERRALLITIQUES ARGILEUX  
DE LA VALLÉE DU NIARI (CONGO)**

**Conséquences sur l'évolution physique sous  
culture de manioc en mécanisé depuis 15 ans**

**Soutenance devant le jury composé de:**

<b>G. PÉDRO</b>	<b>Président</b>
<b>E. GARNIER-ZARLI</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M. GRIMALDI</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>P. ROGNON</b>	<b>Examineur</b>
<b>D. TESSIER</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. LATHAM</b>	<b>Examineur</b>
<b>L.M. BRESSON</b>	<b>Examineur</b>

*A Lilia MAPANGUI-ARJANOVA,*

*A Nikolaï MAPANGUI,*

*A Erik BRAUDEAU,*

*A tous mes parents et amis,*

*A la mémoire de mes parents, PUONGUI-NGANKA et  
MIÉMET-MAWIMI.*

*Ce travail vous est tous dédié.*



## RESUME

Malgré l'apparence donnée par une végétation luxuriante, les couvertures pédologiques acides exondées des régions tropicales humides sont pauvres chimiquement et fragiles du point de vue physique.

Dans la Vallée du Niari au Bas Congo, comme en Afrique tropicale, aujourd'hui encore, une alternative à l'agriculture autochtone manuelle est toujours recherchée.

Ce travail, nous a permis d'analyser l'évolution des propriétés physiques macroscopiques, à partir des données physiques, (courbes de retrait et d'intrusion de mercure...), morphologiques (organisation et d'analyse d'images)...., obtenues sur des échantillons de sol non perturbés.

Cette démarche a été appliquée à un sol ferrallitique argileux. Les modifications structurales consécutives à la culture de manioc, mécanisée et fertilisée depuis 15 ans, ont été étudiées, au niveau de la parcelle expérimentale, en les comparant aux caractéristiques du sol sous savane.

Il ressort des résultats obtenus que la culture mécanisée modifie surtout l'organisation du sol, à toutes ses échelles, et cela jusqu'au niveau microstructural (de l'argile du sol), avec disparition de la fragmentation et de la microagrégation caractéristiques des sols ferrallitiques. Cette déstructuration a un effet déterminant sur les propriétés de retrait-gonflement du sol et sur les propriétés de rétention de l'eau.

*Au total, l'évolution structurale au cours de la dessiccation du sol étudié comporte deux mécanismes quasi simultanés:*

*La FISSURATION non monotone accompagnée d'une REPRISE EN MASSE du sol.*

*Il en résulte ainsi un évolution des propriétés physiques du sol, favorable lors de la FRAGMENTATION du sol, puis défavorable, lors de la PRISE EN MASSE.*

*En définitive les modifications du sol, dues à la culture mécanisée de manioc se manifestent en une reprise en masse qui n'existe pas dans l'horizon B2 du sol sous savane. Mais, en raison de l'activité faunique importante, les modalités d'infiltration et de ressuyage lors des précipitations ainsi que celles de lixiviation des éléments minéraux n'apparaissent pas être affectées pour autant.*

## ABSTRACT

Despite their luxuriant vegetation, oxisols of humid areas are chemically poor and physically fragile. In the Niari "Valley" of Lower Congo area, as everywhere in tropical Africa, an alternative to the manual traditional agriculture has not still be found.

In the present work, we have developed an approach in which, in different stages, the changes of the macroscopic and the microscopic aspects of soil organization were studied. Soil structure properties was studied by using shrinkage measurements and by studying pore size distribution by mercury injection. Observations and image analysis of thin sections were used to study soil organization and pore size distribution.

This approach was developed to study changes in the behavior of a clayey oxisol where structural modifications are induced by mechanical cultivation. Situations with high fertilizer input on cassava crops were compared to native savannah.

The results show that mechanical cultivation modifies the soil organization from the macroscopic to the microscopic, i.e. from soil profile structure up to the microstructural level. At the soil profile scale, cracks and micropedic structure mainly disappeared. A strong decrease in shrinkage/swelling properties was also observed.

*A detailed analysis of the shrinkage phenomenon under cassava crop shows in fact two main successive processes:*

*At first the formation of cracks induces favourable physical properties. Afterwards by increasing bulk inwards settling, more defavourable conditions are met.*

*Consequences for plant root development are deduced especially in the Ap2 horizons of the cultivated soil. However, due to high fauna activity, the drainage of precipitations and the leaching of mineral particles was not reduced, even the soil structure as regard to plant development and available water for plants have strongly changed.*



## **AVANT - PROPOS.**

*Ce mémoire représente la synthèse d'une partie de notre activité de recherche menée depuis 15 ans, au Congo de 1975 à 1989, et en France depuis. De ce fait, il est donc difficile de remercier ici, nommément, tous ceux qui ont contribué aussi bien à la formulation qu'à la réalisation de ce travail, tant la liste est longue de ceux qui, sur le terrain comme en laboratoire, se sont intéressés à cette recherche et qui l'ont faite avancer.*

*Dès 1987, le Professeur G. PEDRO, Directeur de recherche à l'INRA, correspondant de l'Académie des Sciences et membre de l'Académie de l'Agriculture de France, s'est intéressé, déjà sur le terrain, à cet travail. Il m'a ensuite de manière décisive incité, à mon arrivée en France, à m'investir en temps et à la réflexion nécessaires à un travail de thèse et m'a donné l'environnement scientifique pour le réaliser. Il m'a toujours fait confiance et je lui exprime ici ma profonde reconnaissance.*

*Malgré ses préoccupations multiples, D. TESSIER, Directeur de recherche à l'INRA, a su supervisé l'interprétation des résultats et la rédaction de ce mémoire. J'ai profité de sa vision claire des problèmes de Science du Sol et particulièrement dans le domaine de la Physique du Sol. Ainsi ce travail ne serait pas devenu ce qu'il est si, auprès de lui, je n'avais pas trouvé un appui efficace et cordial. Je lui suis aussi reconnaissant de m'avoir accueilli à la Station Science du Sol de l'INRA à Versailles.*

*Madame E. GARNIER-ZARLI, Professeur de Biologie des Sols et des Eaux à l'Université Paris XII, s'est intéressée à mes travaux sur la structuration des sols tropicaux acides. C'est ensuite avec beaucoup d'intérêt qu'elle a suivi l'étude en laboratoire, apportant son appui à la finalisation de ce travail et en ayant accepté de siéger à ce jury. Je lui dois aussi mes cordiales remerciements.*

*Je tiens aussi à témoigner toutes ma gratitude à M. GRIMALDI, au Professeur P. ROGNON, M. LATHAM, et à L.M. BRESSON qui ont pris sur leur temps pour participer à ce jury.*

*Grâce, d'une part, à sa grande ouverture d'esprit, I. DENISOFF, Professeur fondateur de la chaire de Pédologie tropicale à l'Institut Agronomique du Kouban (Russie) et aussi d'autre part, à sa perspicacité, R. BERTRAND de l'IRAT/CIRAD, ont été à l'origine de ce programme de recherche. Je dois, à la mémoire du premier, mon meilleur souvenir et, au second, mes sincères remerciements.*

*Ce mémoire est un des résultats d'un travail réalisé en commun, dans le cadre du réseau Sols Acides de l'IBSRAM et particulièrement avec mon collègue et ami E. BRAUDEAU, Pédologue à l'ORSTOM. Nous avons partagé dès 1985 les espoirs et les difficultés d'une telle entreprise visant le développement d'une approche plus précise, plus spécifique à l'étude de l'évolution des propriétés physiques des sols ferrallitiques argileux. L'aboutissement de cet effort a été le développement, d'une part, d'un modèle de retrait en continu par E. BRAUDEAU et d'autre part, dans ce mémoire, d'une approche appropriée à l'étude de la dynamique, en fonction de l'état hydrique, de la structure d'un sol argileux. Ainsi donc, ce mémoire lui est aussi dédié.*



*Ce travail repose en fait sur l'analyse, en laboratoire, d'échantillons de sol provenant d'un essai agronomique conduit sur deux sites rapprochés mais dont l'histoire culturelle est très contrastée. Ce sont B. NYETE, pour l'essai central, J. ARRIVETS et E. TOUTOU-MISSIE, pour l'essai périphérique, qui ont eu la lourde charge de suivre la réalisation du protocole expérimental précis. A tous les trois ainsi qu'à tous les autres collègues, les techniciens, les stagiaires et les paysans qui ont contribué à cet essai je voudrais exprimer ici mes remerciements.*

*Pour leurs encouragements continus et leur appui efficace, je suis aussi reconnaissant à: M. ONANGA, Professeur de Chimie à l'Université de Brazzaville, Directeur Général de la Recherche Scientifique et Technique du Congo, J. DIAMOUANGANA, Directeur du Projet Mayombe/UNESCO, D. KABALA-MATUKA, de la Division des Sciences Ecologiques de l'UNESCO, P. SIBAND et J. DUBERNARD du CIRAD/IRAT.*

*Monsieur M. RIEU, Directeur de Recherche à l'ORSTOM s'est aussi intéressé à mon travail en m'accordant son accueil à l'Unité Hydrophysique du Centre ORSTOM de Bondy. Je tiens à le remercier ainsi qu'à dire toute ma reconnaissance à Mesdames M. POUGET, E. PRRIER et D. RAILLOT et à Messieurs D. MARTIN, A. LECOCQ, G. AUBERT, A. RUELLAN, R. MOREAU, G. BELLIER, P. BOIVIN, F. SONDAG, C. PRATT, C. ZENERINO, Y. BOULVERT, M. SARAZIN et M. TAHER, tous de l'ORSTOM, pour leur aide et leurs encouragements.*

*Je dois exprimer toute ma reconnaissance au Professeur A.FEDOROFF, et P. GUILLORE de l'INA Grignon, ainsi qu'à A. BRUAND, de l'INRA d'Orléans pour l'aide qu'ils m'on apporté aux étapes décisives de l'étude de l'organisation et de l'espace poral des échantillons du sol étudié.*

*Je tiens à remercier chaleureusement, pour leurs conseils et leur aide, M. TERCE, M. ROBERT, P. CAMBIER, C. CHENU, F. ELSASS, A.M. JAUNET, A. BEAUMONT, M. LEMAIN, C. HARTMANN, G.H. SALA, C. GRIMALDI, H. AOUDJIT, R. DUPONT et C. LE SOUDER, tous de la Station de Science du Sol de l'INRA de Versailles.*

*Je ne saurais terminer les remerciements à tous les autres, parfois anonymes, qui m'ont aidé sans mentionner le sacrifice et le soutien de ma famille. Je tiens pour cela à adresser, ma profonde gratitude, à mon épouse Lilia MAPANGUI-ARJANOVA et à notre fils Nikolaï MAPANGUI, qui ont pu patienter en supportant tout le poids de maintes difficultés liées à ce travail. Cette thèse leur est d'abord dédiée, ainsi qu'elle l'est aussi à la mémoire de mon père J. PUONGUI et de ma mère M. MIÉMET.*

*Ce travail a pu être réalisé grâce à un soutien financier, à différentes étapes, de plusieurs organismes: Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique du Congo, CIRAD/IRAT, ORSTOM (MAA/UR 3D), Station Science du Sol de l'INRA de Versailles, projet Mayombe de l'UNESCO et le réseau Sols Acides de l'IBSRAM.*



# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### PREMIERE PARTIE:

## APPROCHE SPATIALE DES COUVERTURES PEDOLOGIQUES DANS LE BASSIN DU NIARI

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE 15

### CHAPITRE I: MILIEU PHYSIQUE: LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE NIARI

A. CLIMAT	18
B. GEOLOGIE	24
C. CADRE PHYSIQUE	31
D. FORMATIONS VEGETALES	37
E. COUVERTURES PEDOLOGIQUES	42
F. CONCLUSION	46

### CHAPITRE II: VALLEE DU NIARI: UNITE DE PAYASAGE MORPHO- PEDOLOGIQUE

A. MORPHOGENESE DE LA VALLEE DU NIARI	48
B. TYPE DE SOLS DE LA VALLEE DU NIARI	51
C. MISE EN VALEUR DE LA VALLEE DU NIARI	54
D. CONCLUSION	59

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE 61

### DEUXIEME PARTIE

## MATERIEL, METHODES ET CARACTERISATION DE L'EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE 64

### CHAPITRE III: METHODES D'ETUDE PHYSIQUE D'ECHANTILLONS DE SOL NON PERTURBES

A. APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE	66
B. ECHANTILLONS DECIMETRIQUES DE SOL NON PERTURBES	66

C. DESHYDRATATION, IMPREGNATION DE CYLINDRES DE SOL NON PERTURBES	67
D. APPROCHE MASSIQUE: CHOIX D'UN SYSTEME DE REFERENCE	70
E. ORGANISATION DU SOL ET DE L'ARGILE DU SOL	73
F. VARIATION DE VOLUME DU SOL EN FONCTION DE SA TENEUR EN EAU: COURBES DE RETRAIT DE MOTTES PAR "RETRACTOMETRIE"	74
G. SPECTRE MACROPORAL PARTIEL DE CYLINDRES DE SOL: COURBES DE POTENTIEL DE L'EAU	81
H. ESPACE MACROPORAL TOTAL PAR ANALYSE D'IMAGES DE LAMES MINCES ET MESURES MORPHO-MATHEMATIQUES	83
I. ESPACE MICROPORAL, PAR INTRUSION DE MERCURE DANS DES AGREGATS MILLIMETRIQUES	90
J. CONCLUSION	93

#### **CHAPITRE IV: DISPOSITIF DE L'ESSAI AGRONOMIQUE**

A. GENERALITES	97
B. PARCELLES EXPERIMENTALES	97
C. CHOIX DES PARCELLES POUR L'ÉTUDE PHYSIQUE SOL	100
D. TRAVAUX CULTURAUX PRATIQUES DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES	101
E. CHOIX DE LA VARIETE DE MANIOC TESTEE DANS LES ESSAIS	103
F. CONCLUSION	103

#### **CHAPITRE V: CARACTERISATION DU SOL TEMOIN SOUS SAVANE**

A. DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL SOUS SAVANE	105
B. CARACTERISTIQUES MICROMORPHOLOGIQUES DU SOL SOUS SAVANE	107
C. MINERALOGIE DU SOL SOUS SAVANE	110
D. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL SOUS SAVANE	114
E. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL SOUS SAVANE	117
F. PROFILS HYDRIQUES SAISONNIERS DU SOL DE SAVANE	120
G. CONCLUSION	122

#### **CHAPITRE V: MODIFICATIONS DU SOL SOUS CULTURE MECANISEE DE MANIOC**

A. MORPHOLOGIE DES PROFILS CULTURAUX	125
--------------------------------------	-----

B. MODIFICATIONS DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL	127
C. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL CULTIVE	131
D. CONCLUSION	135
<b>CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE</b>	<b>136</b>

**TROISIEME PARTIE**  
**ORGANISATION, ESPACE PORAL ET PROPRIETES**  
**PHYSIQUES DU SOL EN FONCTION DE SON ETAT**  
**HYDRIQUE**

<b>INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE</b>	<b>139</b>
--	------------

**CHAPITRE VII: ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PROPRIETES**  
**PHYSIQUES MACROSCOPIQUES DU SOL**

A. ORGANISATION DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL EN MICROSCOPIE OPTIQUE	141
B. DYNAMIQUE, EN DESSICCATION, DE L'ESPACE PORAL DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL	147
C. EXAMEN DES MACROPORES DU SOL EN ANALYSE D'IMAGES DE LAMES MINCES	159
D. CONCLUSION	177

**CHAPITRE VIII: ANALYSE DE L'ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL**

A. ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL	179
B. ESPACE PORAL D'AGREGATS MILLIMETRIQUES: COURBES D'INTRUSION DE MERCURE	188
C. CONCLUSION	192

<b>CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE</b>	<b>193</b>
--	------------

**QUATRIEME PARTIE**  
**SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS**

<b>INTRODUCTION QUATRIEME PARTIE</b>	<b>195</b>
--------------------------------------	------------

**CHAPITRE IX: INTERET D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE POUR**  
**L'ETUDE DE LA STRUCTURE DES SOLS**

INTRODUCTION	197
A. CADRE METHODOLOGIQUE GENERAL	197
B. CONCLUSION	203
<b>CHAPITRE X: CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES DE NOUVELLES RECHERCHES</b>	
A. ETAT DE DEPART DU SOL SOUS SAVANE	204
B. MISE EN EVIDENCE DE CRITERES DE DEGRDATION DES PROPRIETES PHYSIQUES	205
C. ETAT PHYSICO-CHIMIQUE DU SOL CULTIVE	206
D. ETAT PHYSIQUE DU SOL CULTIVE	206
E. CONTRIBUTIONS AU MAINTIEN DE LA FERTILITE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI	211
F. CONCLUSION	213
<b>CONCLUSIONS GENERALES</b>	214
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>TABLES</b>	

## **INTRODUCTION GENERALE**



En Afrique équatoriale, la **Vallée du Niari**, au Bas-Congo (4 ° S et 13,5 ° E), en raison de ses terres planes et argileuses, de sa végétation de savane facile à défricher et de sa proximité de l'Océan atlantique et de Brazzaville auxquels elle est reliée par le Chemin de Fer Congo-Océan et la route Nationale N°1, **est une région à grande vocation agricole.**

Mais, la principale contrainte de production au Niari, comme dans l'ensemble de la zone tropicale humide, est la pauvreté chimique des sols ferrallitiques acides, ainsi que leur très grande fragilité du point de vue physique. Celle-ci a imposé ainsi, aux populations autochtones, une agriculture itinérante, extensive et basée sur le brûlis de la végétation et de longues jachères de reconstitution de la fertilité du milieu. Cette défriche-brûlis itinérante, qui a été pendant longtemps écologiquement remarquable, s'avère de plus en plus inadaptée, d'une part, aux impératifs de développement d'une économie de marché efficace et d'autre part, à une société congolaise en mutation profonde pour les raisons principales suivantes:

- très faible productivité du travail;
- pénibilité d'un travail entièrement manuel utilisant des outils très rudimentaires (houe, machette, hache);
- fixation des villages et appropriation de plus en plus nette des terres;
- urbanisation galopante et exode rural massif des jeunes vers les villes: 51 % de la population congolaise est aujourd'hui citadine avec des taux annuels d'accroissement d'environ 6 % (recensement national de 1984).

Dans la Vallée du Niari, l'introduction au cours des années 40, de l'agriculture intensive utilisant la fertilisation et la mécanisation du travail du sol se voulait être une alternative au système paysan autochtone et un puissant moyen de mise en valeur de cette région. Mais, cette monoculture intensive et mécanisée a été très vite confrontée à **une très rapide évolution du sol**. Celle-ci est marquée, **en deux ans de monoculture intensive**, par une très forte baisse des rendements des cultures, particulièrement de l'arachide et une dégradation spectaculaire des propriétés aussi bien chimiques, biologiques que physiques du sol:

- une forte acidification du complexe d'échange cationique;
- une toxicité manganique et aluminique des plantes et particulièrement de l'arachide;
- une diminution importante du taux de la matière organique du sol;
- un effondrement de la structure du sol avec diminution de la stabilité structurale.

Cette dégradation des terres a ainsi posé très tôt d'énormes problèmes aux colons agricoles installés dans la Vallée du Niari, problèmes que l'on ne pouvait espérer résoudre

convenablement qu'en disposant de bonnes références sur les sols et leur environnement. Mais de telles connaissances n'étaient pas encore disponibles dans tout le pays.

Cependant, des expérimentations agronomiques accompagnées des études cartographiques et agro-pédologiques, menées entre 1947 et 1962, dans la Vallée du Niari ont permis de décrire ce sol et de caractériser partiellement le phénomène de sa perte de fertilité quasi totale au bout de deux ans de monoculture intensive et fortement mécanisée. Des solutions très partielles (introduction de plantes de couverture et apport d'engrais minéraux, de calcaire broyé et d'amendements organiques...), qui ont été ainsi préconisées, n'ont guère permis d'améliorer entièrement la situation qui perdure encore de nos jours.

*En définitive, dans la Vallée du Niari, si le sol ferrallitique argileux sous savane spontanée a une structure fragmentaire tout à fait remarquable, par contre après quelques années de culture intensive non adaptée, il se dégrade fortement. Il semble que cette rapide évolution, est une combinaison complexe de l'appauvrissement chimique, de la diminution du taux de matière organique, de l'acidification du complexe d'échange et de la disparition de la fragmentation de la structure. Mais l'évolution du sol cultivé n'a été étudiée que de façon partielle pour l'état chimique et la stabilité structurale.*

*Sans négliger les autres aspects, l'évolution du comportement physique consécutive à la mise en culture de ce sol a été beaucoup moins étudiée, certainement en raison des problèmes méthodologiques que son étude soulève toujours.*

*Nos recherches vont ainsi porter sur l'évolution sous culture de l'état physique de ce sol acide argileux de la Vallée du Niari au Bas-Congo.*

\* \*  
\*

Dans la Vallée du Niari, les cycles saisonniers de dessiccation et de réhumectation se traduisent par des phénomènes de retrait et de gonflement qui ont des conséquences importantes sur l'état structural des sols.

*L'objectif de ce mémoire est, en utilisant différentes méthodes complémentaires, d'analyser l'évolution de la structure d'un sol ferrallitique acide et argileux de la Vallée du Niari, en étudiant, depuis l'échelle ultrastructurale et microstructurale jusqu'à l'échelle macrostructurale, la dynamique de son organisation, particulièrement de l'espace poral et de ses propriétés physiques en fonction de l'état hydrique.*

Cet objectif suppose, d'une part sur le terrain, une caractérisation fine du site et un échantillonnage raisonné, d'autre part, en laboratoire, l'analyse d'échantillons de sol non perturbés, fractionnés à différentes tailles.

L'étude des conséquences structurales du retrait dans ce matériau est basée sur deux approches complémentaires: *analyse physique, et analyse d'images de lames minces (analyse morphologique)*.

*L'approche physique* est basée sur la "rétractométrie" (BRAUDEAU, 1988, 1989), les mesures de rétention d'eau et la porosimétrie à mercure.

*L'approche morphologique* est rendue possible par l'utilisation de lames minces et leur étude quantitative grâce à l'analyse d'images avec le logiciel VISILOG.

*Nous allons donc rechercher, en nous appuyant sur une méthodologie performante, des arguments morphologiques pour la compréhension des mécanismes de retrait du sol et de leurs conséquences sur la dynamique de l'espace poral du sol en fonction de l'état hydrique (état énergétique de l'eau et/ou teneur en eau).*

Après la présentation du milieu écologique dans les chapitres I et II, la description du site expérimental et la caractérisation du sol ferrallitique jaune, acide et argileux de la Vallée du Niari sont faites dans les chapitres III, IV et V.

Les méthodes et les équations décrivant les déformations du volume en fonction des variations de l'état hydrique de cylindres de sol non perturbé sont brièvement exposées au chapitre VI .

Les résultats obtenus sont présentés aux chapitres VII et VIII. Leur analyse permet de juger la pertinence de cette approche basée sur l'utilisation des méthodes physiques, microscopiques et morpho-mathématiques d'analyses d'images de lames minces.

La synthèse de tous les résultats donnée dans les chapitres IX, X et XI permet de préciser les mécanismes de la fissuration et de la reprise en masse du sol, au cours de la dessiccation. Elle nous permet aussi de montrer les conséquences agronomiques et écologiques de ces phénomènes.

En définitive, cette approche ne prétend pas cerner l'ensemble du problème des relations organisation - comportement hydrique des sols argileux, mais de donner des éléments de base en vue d'une meilleure compréhension de l'évolution des sols.



## PREMIERE PARTIE

# APPROCHE SPATIALE DES COUVERTURES PEDOLOGIQUES DANS LE BASSIN DU NIARI

*Nous procéderons, dans cette première partie, à une approche spatiale, morpho - pédologique de l'unité de paysage appelée "Vallée du Niari", en la situant, par une description succincte, dans son environnement constitué par le Bassin versant du fleuve Niari (chapitre I). Ensuite, nous caractériserons cette unité de paysage tout en insistant sur les influences aussi bien physiques (climatiques particulièrement), qu'anthropiques qui restent profondément marquées dans les sols et le paysage de la Vallée du Niari (chapitre II).*



## **INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE**

Les sols sont organisés à différentes échelles, depuis le bassin versant jusqu'aux constituants élémentaires.

Ainsi, il convient donc de rappeler, avant de caractériser (chapitre II) la "Vallée" du Niari, unité de paysage associée au sol ferrallitique jaune et argileux étudié, les caractéristiques essentielles de son environnement physique constitué par le "Bassin versant du fleuve Niari", région morpho - pédologique (chapitre I).

---



## CHAPITRE I

### MILIEU PHYSIQUE: LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE NIARI

---

*Le Bassin du fleuve Niari (appelé aussi fleuve Kouilou-Niari), appartenant entièrement à la République du Congo, est compris entre ceux de la Nyanga et de l'Ogooué au Nord-Est (particulièrement gabonais), et celui du fleuve Congo à l'Est (essentiellement zaïrois).*

*Le "Bassin du Niari" constitue aussi une région économique alimentant le Chemin de Fer Congo Océan (C.F.C.O.), et la voie ferrée de la Compagnie Minière de l'Ogooué (COMILOG) qui ont plus largement vivifié la Vallée du Niari.*

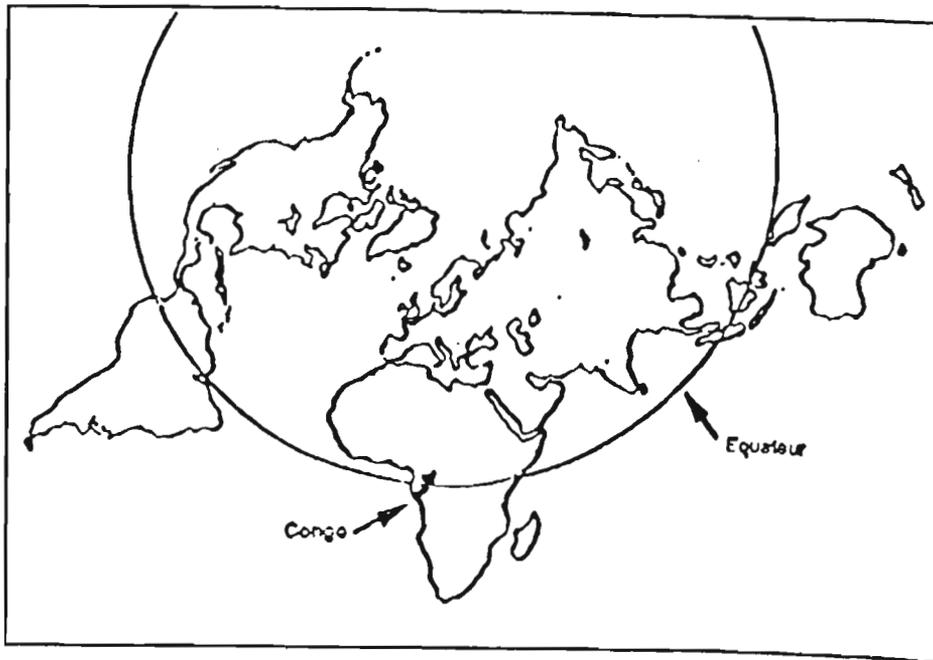


Figure I.1 a: Situation de la zone d'étude par rapport au monde et à l'Afrique

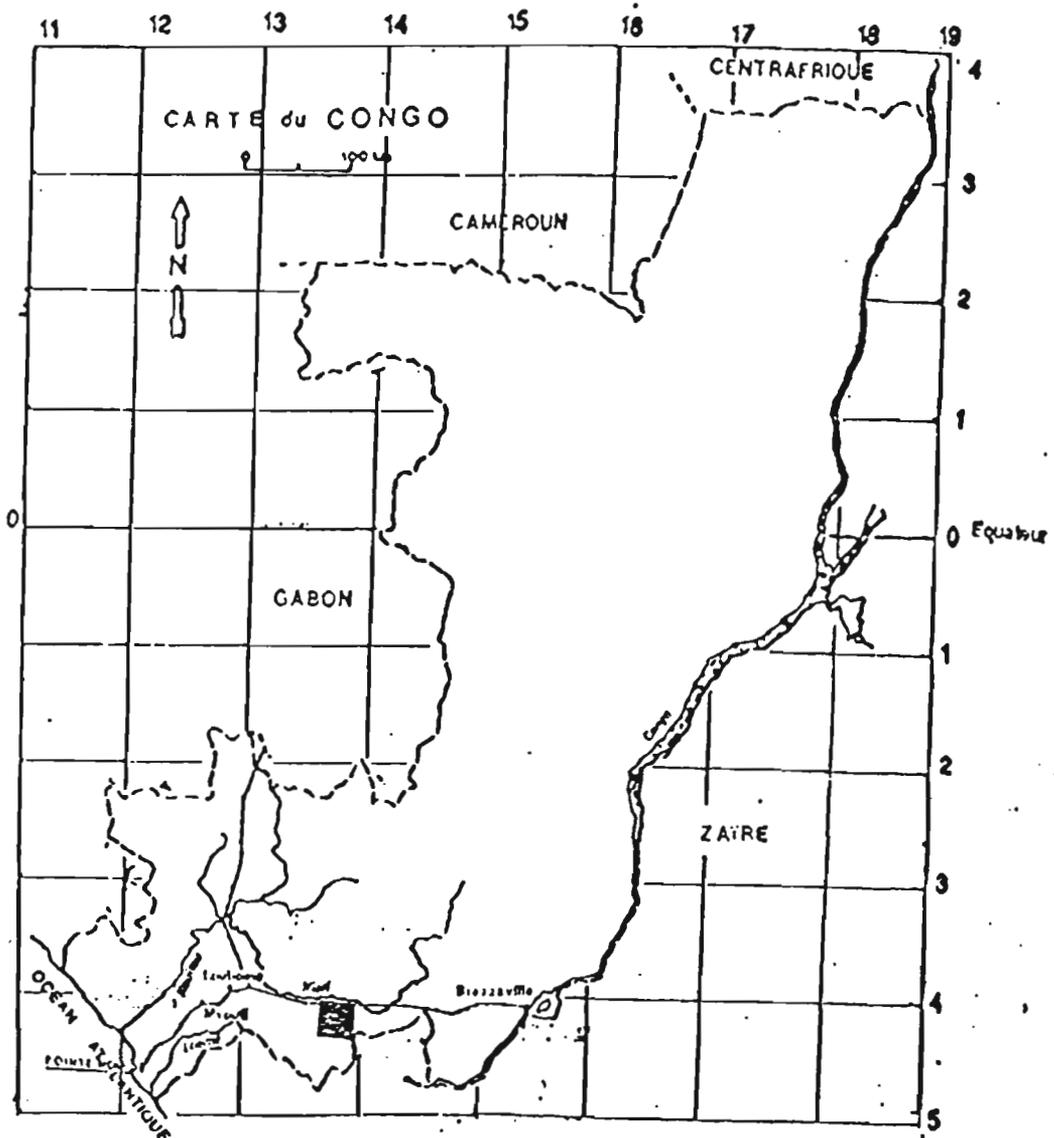


Figure I.1 b: Situation de la Vallée du Niari au Bas-Congo

## A. CLIMAT

Les sources utilisées pour caractériser le climat du Niari sont diverses: Atlas du Congo (1969), VENNETIER (1966) et SAMBA-KIMBATA (1978) qui ont synthétisé ou analysé des données ASECNA.

### 1. CARACTERISATION DU CLIMAT

#### a. GENERALITES

A cheval sur l'équateur (3° 30' N - 5° S), le Congo subit un climat équatorial et tropical de type "guinéen forestier" "septentrional" au Nord de Brazzaville et de type "bas-congolais" au Sud (figure I.1 a et b). Cependant, l'influence de la latitude, la proximité de l'océan, l'altitude des paysages, le type de végétation et l'orientation des reliefs introduisent, localement, des différences climatiques. Dans les couches atmosphériques moyennes et supérieures, deux anticyclones subtropicaux continentaux, Saharien au Nord, Sud Africain au Sud envoient en permanence vers l'Est des masses d'air sèches qui traversent cette région (Atlas du Congo, 1966; SAMBA-KIMBATA, 1985; CLAIRAC et *al.*, 1989) (figure I.2).

#### b. SAISONS

La pluviométrie, comme partout en Afrique Equatoriale, est l'élément le plus déterminant du climat, qui permet de distinguer deux types de saison: la saison des pluies et la saison sèche (Atlas du Congo, 1966). Les pluies dépendent, quant à elles, de la nature des masses d'air qui traversent la région, de la topographie régionale ou encore de la position du front intertropical.

Le Bassin du Niari, dans le Sud Congo, connaît un climat "équatorial de transition" de type "bas-congolais" (AUBREVILLE, 1949, 1965) caractérisé par:

- une longue saison sèche de 4 à 5 mois (Juin à Septembre-Octobre), correspondant à un minimum de température, d'ensoleillement et de tension de la vapeur d'eau;
- une saison de pluies de 7 à 8 mois, avec des températures élevées, un bon ensoleillement et une forte humidité atmosphérique. Elle comprend une "petite saison sèche fraîche", correspondant à un ralentissement "statistique" des pluies, en Janvier ou Février.

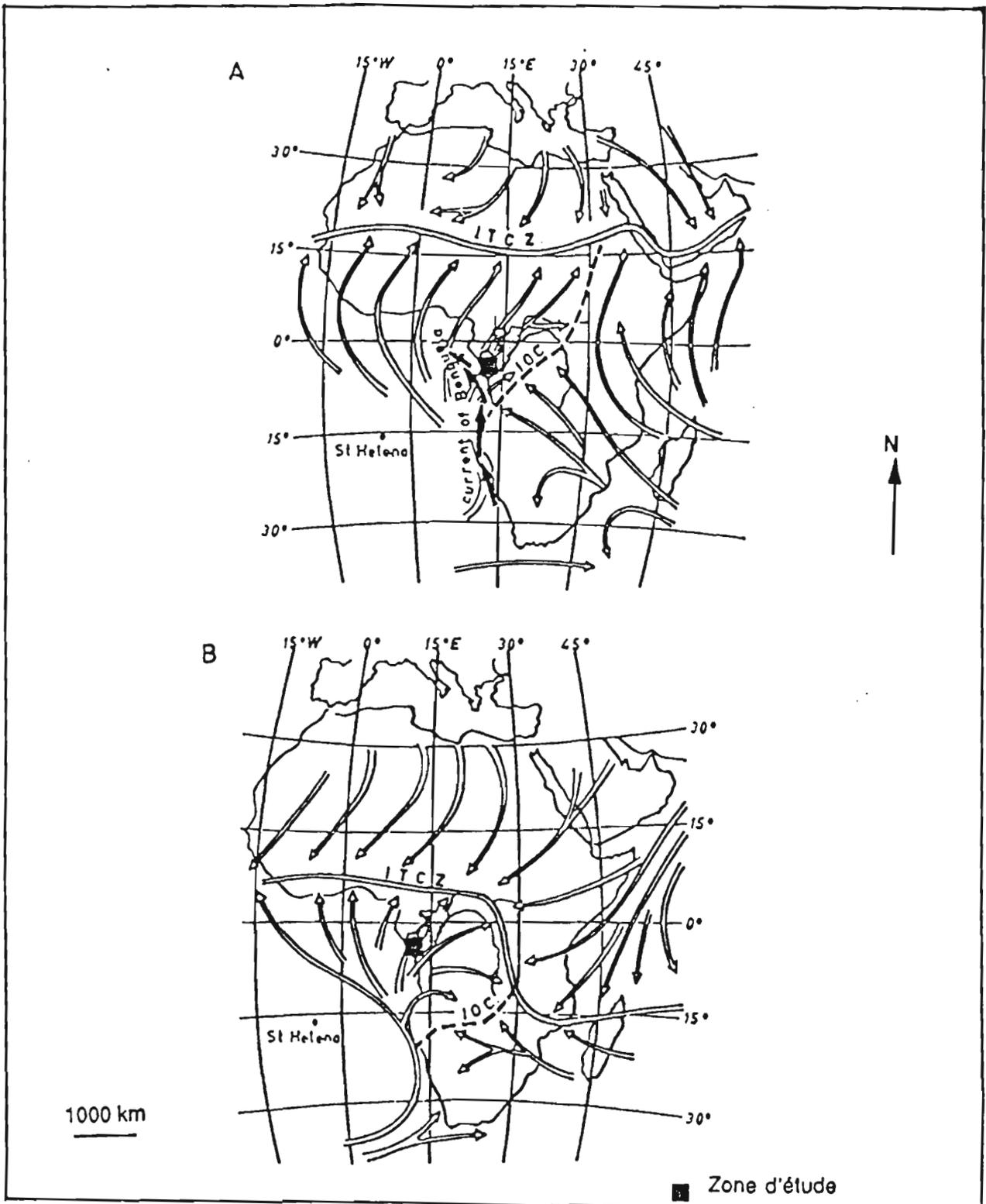


Figure 1.2: Vents dans les basses couches atmosphériques et traces au sol des surfaces de discontinuité: équateur météorologique (ITCZ) et confluence interocéanique (IOC)  
A: en Juillet; B: en Janvier (Source: CLAIRAC et. al., 1989)

### 1). Températures

Les températures moyennes, de l'ensemble du Bassin du Niari, varient assez peu tout au long de l'année, avec toutefois un léger maximum en mars et avril. Les maxima absolus sont peu élevés sont compris entre 26°C et 35°C. Par contre, les minima absolus sont assez importants et peuvent descendre jusqu'à 12°C dans les zones forestières du Chaillu et du Mayombe (figure 1.4 b).

Des différences thermiques apparaissent d'une station à une autre. Ainsi, à Sibiti, où l'influence de l'océan, de l'altitude et de la forêt est plus importante, les températures moyennes annuelles sont 23 °C environ. Dans la Vallée du Niari, zone de savane, sa situation au fond d'une dépression provoque l'augmentation générale des températures, avec des moyennes annuelles voisines de 27 °C.

### 2). Humidité atmosphérique

L'humidité relative de l'air à une température et une pression données, exprime en pour cent le rapport entre la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air considéré et la tension maxima de cet air s'il était saturé à la même pression et à la même température (Atlas du Congo, 1966).

L'humidité atmosphérique est très élevée et relativement constante: les moyennes annuelles sont de 80 % avec des maxima absolus (au coucher et au lever du soleil) qui atteignent souvent 100 % et des minima qui descendent rarement en dessous de 30 %.

### 3). Précipitations

Dans le Bassin du fleuve Niari, les pluies, qui sont caractérisées par leur irrégularité aussi bien dans l'espace que dans le temps peuvent avoir trois origines différentes:

- **Les foyers orageux** de dimensions restreintes qui sont soumis à des influences locales et qui **occasionnent des orages locaux** de courte durée.
- **Les lignes de grains** qui sont formés de centres orageux en déplacement et souvent alignés. Ces zones orageuses **provoquent des pluies violentes** et intermittentes de durée variable.
- **Les traînées de systèmes orageux**, qui sont à l'origine de pluies de mousson non orageuses, sont **généralement faibles et de longue durée** (12 heures et plus).

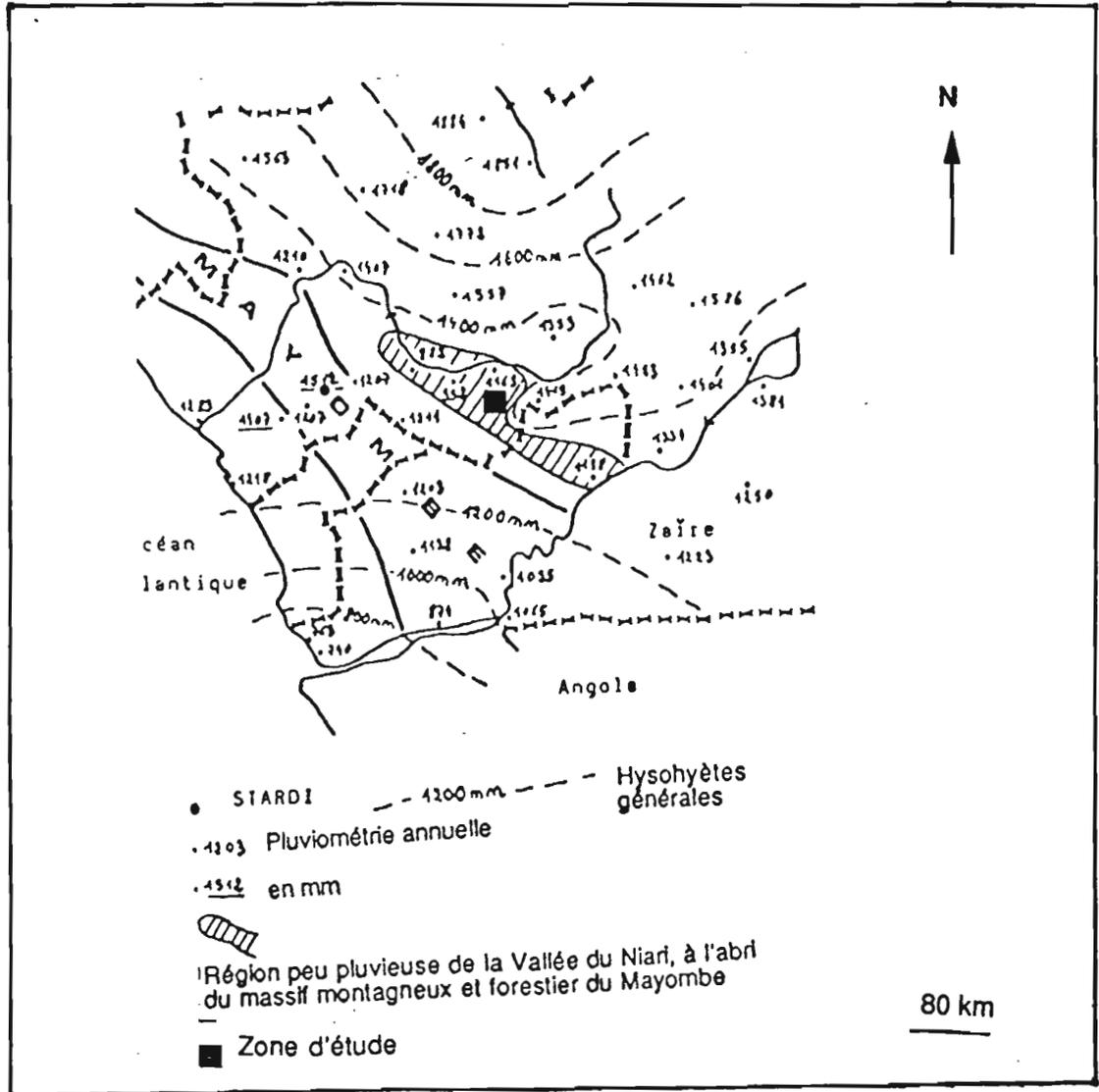


Figure 1.3 a: Pluviométrie annuelle moyenne dans le Bassin du fleuve Niari (Source: CLAIRAC et al., 1989)

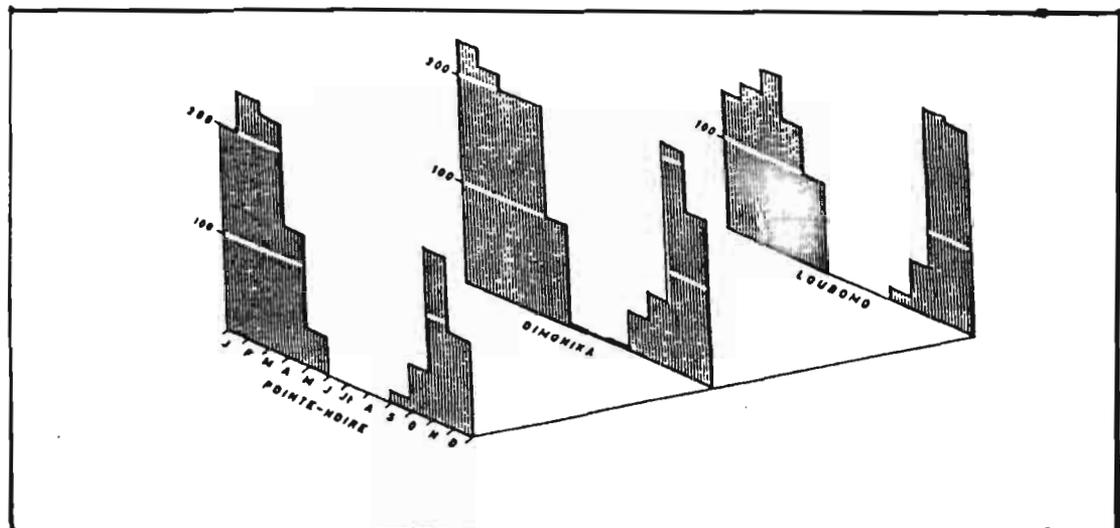


Figure 1.3 b: Histogrammes comparés de l'évolution saisonnière à Pointe-Noire (plaine côtière), à Dimonika (Mayombe) et à Loubomo (Vallée du Niari) (Source: CLAIRAC et al., 1989)

Dans le Bassin du fleuve Niari, la pluviosité moyenne annuelle varie entre 1800 mm sur les reliefs du Mont Lékéti au Nord du massif forestier du Chaillu, et 900 - 1000 mm à Loudima dans la Vallée du Niari (figure I.3 a et b).

#### **4). Nébulosité. Insolation**

La nébulosité est forte au cours de la saison sèche et fraîche (juillet à août). Des brouillards matinaux parfois précipitants ou précipitations occultes sont, à cette période, plus fréquentes, particulièrement en zones forestières.

En saison de pluies la nébulosité se traduit par la présence de puissantes masses nuageuses de convection, soit isolées, soit quasi continues lorsque le front de mousson est sur le Sud Congo.

L'insolation varie selon la station et selon la période de l'année (figure I.4 a).

Cependant, dans l'ensemble du Bassin du Niari, les moyennes annuelles sont inférieures à 1700 heures.

## **2. CONCLUSION**

Le "Bassin du fleuve Niari", dont le régime pluviométrique est bimodal a une pluviosité assez faible, pour une latitude méridionale de seulement 4° Sud: 1050 et 1500 mm en moyenne annuelle.

Mais, nous observons que les conditions de végétation forestière, de proximité océanique et surtout d'orographie sont à l'origine d'un grand nombre de microclimats locaux qui tendent surtout à faire baisser la température, à accroître la pluviosité, modifiant ainsi de façon significative les conditions écologiques régionales.

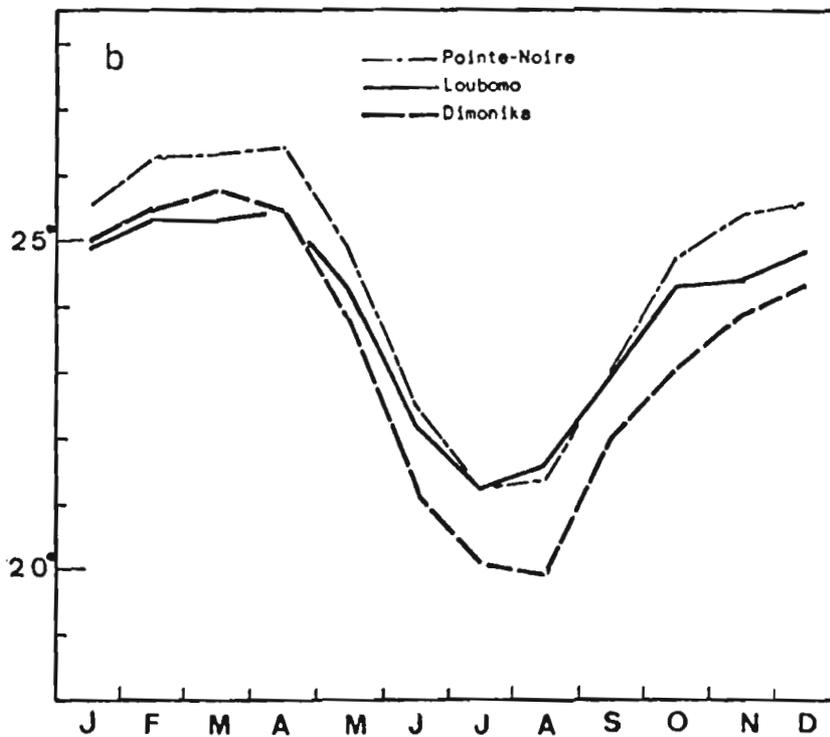
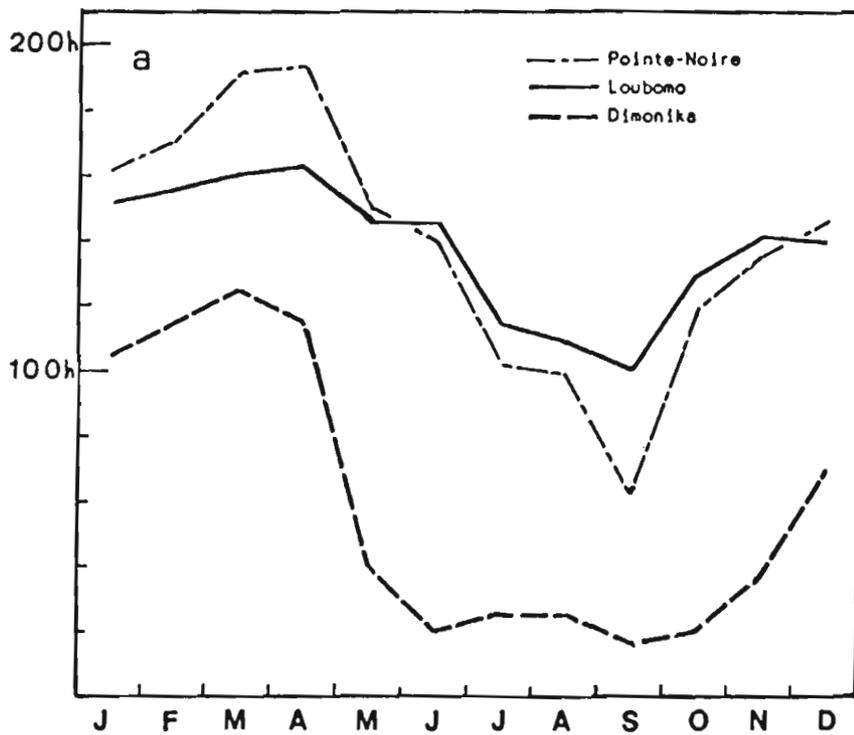


Figure 1.4 a: Evolution de l'ensoleillement moyen mensuel à Pointe-Noire, Dimonika (Mayombe) et à Loubomo ou Dolisie (Vallée du Niari) (Source: CLAIRAC et. al., 1989)

Figure 1.4 b: Evolution des températures moyennes mensuelles à Pointe-Noire, à Dimonika (Mayombe) et à Loubomo (Vallée du Niari) Source: CLAIRAC et. al., 1989)

## B. GEOLOGIE

### 1. SUBSTRATUM GEOLOGIQUE

Au Congo, après la plaine côtière constituée de sables tertiaires on passe, à l'intérieur du pays, aux systèmes précambriens qu'on ne quittera qu'à la limite NE du "Bassin du Niari"(SCOLARI, 1965) (figure I.5).

#### a. SCHISTES ET QUARTZITES DU MAYOMBE

La chaîne du Mayombe, allongée NW - SE, est constituée essentiellement de schistes, de quartzites graphiteux, de grès quartziteux, d'argillites, d'arkoses, et de conglomérats du Précambrien inférieur (système mayombien) et moyen (système du Mont Bamba). On y trouve également des intrusions de granite calco-potassique et de roches basiques (COSSON, 1955; BIGOTTE, 1954).

#### b. CALCAIRES, MARNES, TILLITES ET GRES DU SYNCLINAL DU NIARI

Le synclinal débute par la série conglomératique de la Tillite inférieure du Bas-Congo, à sa limite SO, séparée par une lacune d'érosion avec les séries du Mayombe. On passe ensuite à la série précambrienne du Schisto-calcaire qui représente selon DADET (1969), une phase de sédimentation subsidente équilibrée, à apports terrigènes réduits, intermittents et à apports chimiques prépondérants. On y distingue trois principaux étages:

- l'étage inférieur (SC I), constitué de calcaire cristallin gris ou rose, à oolithes;
- l'étage moyen (SC II), formé de bas en haut de calcaire argileux à calcite, de calcaire bréchoïde et de calcaire dolomitique;
- et l'étage supérieur (SC III), comprenant à la base des marnes et au sommet du calcaire dolomitique et/ou des dolomies fétides.

**Le Schisto-calcaire** forme donc un ensemble de roches variées dont la **disposition schisteuse** et le caractère calcaire et/ou magnésien sont dominants.

La Vallée du Niari, localisée essentiellement sur la rive gauche du fleuve (portant dans la partie moyenne de son bassin le nom du Niari), s'est donc développée sur l'étage moyen (SC II).

L'étage supérieur (SC III) n'affleure qu'aux points de contact avec le Schisto-gréseux au Sud.

Quant à l'étage inférieur (SC I), il s'étend sur la rive droite du Niari, à la limite Nord avec la série de la Tillite supérieure du Bas-Congo (conglomérat glaciaire). Cette série conglomératique repose au Nord sur la série gréseuse de la Bouénza (grès schistoïdes, puis quartzeux, schistes gris, puis quartzeux durs et enfin grès quartzeux et feldspathiques).

### **C. GRES ET ARGILLITES DU SCHISTO-GRESEUX**

Le **Schisto-gréseux** (alternance de grès et d'argillites) qui recouvre localement (à la limite NE du géosynclinal) le Schisto-calcaire, **a également une disposition schisteuse** et est constitué de séries du Précambrien supérieur qui se retrouvent à la fois dans le synclinal (reliefs résiduels isolés) et sur le Plateau des Cataractes au Sud et SW. Cet ensemble est formé par deux séries:

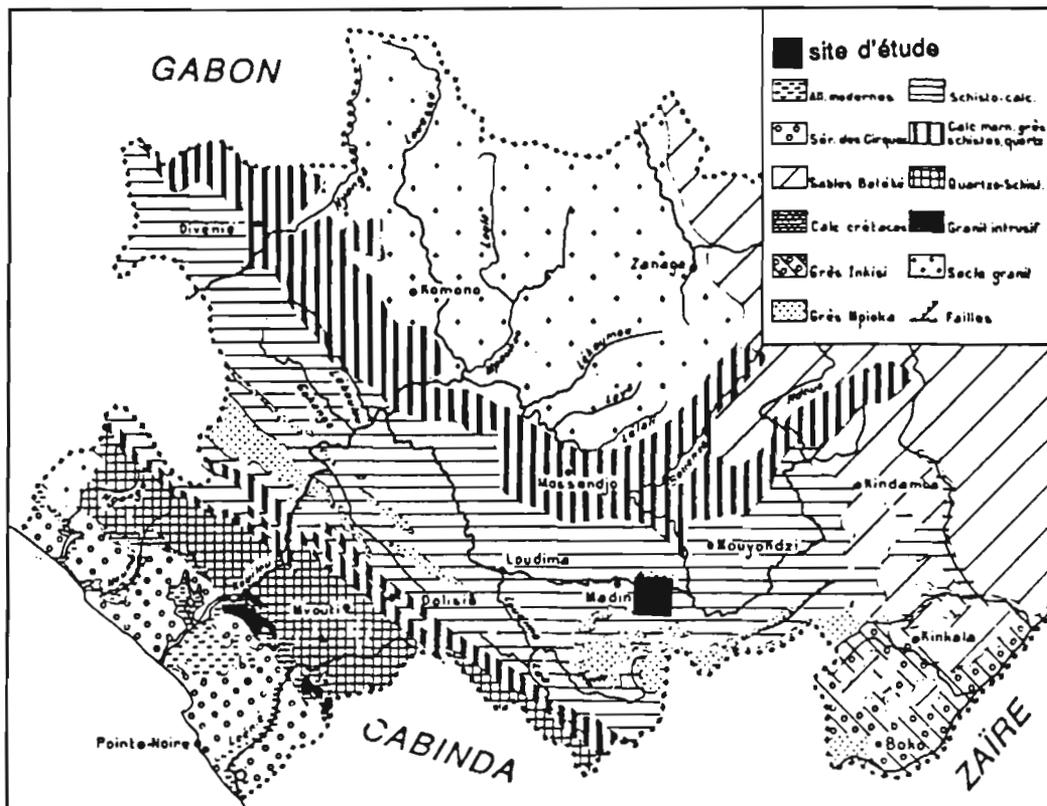
- la couche supérieure ou série de l'Inkisi, constituée de grès feldspathiques, arkosiques qui est particulière au Plateau des Cataractes;
- la série de la Mpioka, à la base, comprenant deux étages:
  - + l'étage supérieur (renfermant des argillites lie de vin, micacées), qui est aussi celui du Plateau des Cataractes;
  - + l'étage inférieur constitué de deux niveaux argileux enfermant un niveau gréseux qui repose sur un conglomérat d'éléments et de galets de calcaires ou de quartz.

Jusqu'à la gare ferroviaire de Loutété, nous observons que le Plateau des Cataractes domine immédiatement la dépression schisto-calcaire. Mais au-delà, et notamment, du Sud de de la gare de Madingou, en passant par le Mont Bélo, jusqu'à la gare de Makabana, des reliefs discontinus dépassant par endroit 800 m d'altitude, prolongent ce plateau. Ils reproduisent ainsi, dans la Vallée du Niari, l'arrangement géologique de l'étage inférieur de la série de la Mpioka: grès sur calcaires dolomitiques ou dolomies fétides.

C'est donc par cet étage que le Schisto-gréseux est en contact avec le Schisto-calcaire.

### **d. GRANITES DU CHAILLU**

Le massif du Chaillu, au NW, est un immense batholite de granite du Précambrien inférieur, fortement érodé et parsemé de septa de roches métamorphiques diverses non granitisées, de superficies généralement assez faibles. Il occupe près de 30.000 km<sup>2</sup> au Congo, où il prolonge le Massif Central gabonais.



Echelle: 1/ 25 000 000

25 km



Figure 1.5: Carte géologique schématique du Bassin du fleuve Niari (Sud Congo)  
 (Source: VENNETIER, 1966)

Les granites du Chaillu correspondent à l'affleurement du craton africain et présentent une hétérogénéité de structure et de composition due certainement à la superposition d'au moins deux épisodes de granitisation compliqués par des phénomènes d'endomorphisme. On peut distinguer dans ce massif cristallin précambrien deux principaux types de faciès (BABET, 1929):

- un faciès silico-sodique, gris qui correspond à la première phase de granitisation;
- un faciès silico-potassique, rose qui résulte de la seconde granitisation.

Dans tous ces faciès on peut rencontrer des intrusions basiques et ultra basiques qui sont à l'origine des minéralisations en nickel et en chrome.

### **3. ALLUVIONS QUATERNAIRES**

Depuis sa source, sur les Plateaux Batéké jusque dans le synclinal schisto-calcaire, le fleuve Niari traverse différentes formations géologiques: sables Batéké, argillites et grès bouéziens, tillite supérieure, calcaires et marnes du Niari.

Par ailleurs, ses principaux affluents du cours moyen apportent d'autres matériaux, soit de la zone granitique (pour la Bouénza), soit du Schisto-gréseux (pour la Nkenké et la Loudima). Il en résulte que les alluvions du Niari et de ses affluents peuvent être constituées de matériaux très hétérogènes arrachés aux différentes roches situées en amont.

Le fleuve Niari, comme nous l'avons observé sur le terrain, est presque partout dominé par des talus atteignant parfois jusqu'à 50 m de hauteur. De ce fait les alluvions déposées par ce fleuve très encaissé sont très localisées dans certains endroits: rives concaves et confluent avec ses principaux affluents.

### **4. MATERIAUX ORIGINELS DES SOLS FERRALLITIQUES**

#### **a. MISE EN PLACE DES MATERIAUX FERRALLITIQUES**

Présentes dans les régions tropicales humides sur environ vingt pour cent de la surface des continents, les couvertures ferrallitiques sont marquées par une forte expression des constituants ferrifères résultant de l'altération météorique des roches diverses (BOCQUIER G. et *al.*, 1984). Ces formations superficielles zonales se caractérisent essentiellement par leur grande épaisseur (fréquemment plus de 10 mètres), par leur couleur vive (de 5 R à 10 YR), et par l'accumulation de produits résiduels constitués d'oxyhydroxydes métalliques et d'argiles essentiellement monosiallitiques. Ces produits résiduels de l'altération et de la pédogénèse ferrallitiques, qui comprennent parfois des cuirasses

latéritiques, ferrugineuses, bauxitiques et manganésifères, ont été reconnus et étudiés depuis le début du XXème siècle par de nombreux auteurs: DEMOLON, (1952); LACROIX (1913), CAMPBELL (1917), HARRASOWITZ (1926), HARRISON (1933), PRESCOTT et PENDLETON (1952), MOHR et VAN BAREN (1954), AUBERT (1954), SEGALIN (1969), BONIFAS (1959), LENEUF (1959), ALEXANDER et CADY (1962), MILLOT et al. (1955), SYS (1965), CHATELIN (1972, 1974), GOUDIE (1973), NORTON (1973), et McNEIL (1974), HEINZELIN, (1965).

Au Congo, plus de la moitié du pays (à l'exception des alluvions quaternaires de la Cuvette congolaise, et les séries tertiaires des sables Batéké et de la plaine côtière), est constitué par ces formations latéritiques.

D'après les études menées en relation avec les cartographies des sols à 1/200.000ème, réalisées au cours des années cinquante à soixante dix (BRUGIERE, 1952, 1953; LAPORTE, 1962; NOVIKOFF, 1974; BOISSEZON et al., 1970; GRAS, 1967, 1970; JAMET et al., 1976; etc...), les pédons ferrallitiques présentent en coupe de grandes zonations subhorizontales qui se distinguent verticalement et latéralement de façon diverse d'une région morpho-pédologique à l'autre.

#### **b. TRANSFORMATIONS MINERALOGIQUES ET STRUCTURALES DES MATERIAUX FERRALLITIQUES**

Des transferts de matière postérieurs à l'altération des minéraux primaires aboutissent à diverses accumulations absolues qui se succèdent dans l'infrasol (niveaux III et II) et l'apexol ou niveau I (aussi bien dans leur système poral que dans leurs plasmas).

Depuis les isaltérites jusqu'aux horizons meubles, la porosité fissurale héritée des roches mères est relayée et/ou complétée par une forte porosité intra et intercrystalline (lors de la dissolution des minéraux primaires), puis recoupée par une porosité tubulaire d'origine biologique. Toutes ces porosités peuvent être le siège de dépôts cutaniques argilo-métalliques ( ferrugineux ou alumineux), ou de dépôts ultimes de microagrégats biologiques (MULLER D. et al., 1981; BOULANGE et al., 1973 BOULANGE, 1984), qui résultent de transferts de matière provenant des couches sus-jacentes.

Les accumulations les plus significatives, au sein des plasmas sont des concentrations ferrugineuses qui affectent souvent certaines parties des altérites (MILLOT et al., 1955; FRANKEL et al., 1966).

### C. ORGANISATION VERTICALE DES COUVERTURES FERRALLITIQUES

D'une façon générale, en zone tropicale humide, depuis la roche non altérée jusqu'à la surface du sol, trois principaux niveaux (ensembles d'horizons) se succèdent, présentant le plus souvent entre eux des discontinuités apparentes (figure 1.6):

- **Niveau III:** ensemble inférieur **d'altération ferrallitique**, constitué soit d'argiles bariolées, soit d'arènes granitiques ou gréseuses. Dans ces altérites, malgré d'importantes pertes de matière par dissolution (80 % environ sur roches basiques) et la transformation des minéraux primaires en secondaires (pseudomorphoses), les structures et les volumes originels des roches mères sont en général bien conservés;

- **Niveau II:** ensemble médian essentiellement **graveleux** qui se subdivise souvent en sous niveaux constitués:

+ d'éléments grossiers de nature et d'origine très diverses (industries du néolithique, galets siliceux, nodules, concrétions et fragments de cuirasses et/ou de roche). Cet ensemble, généralement dénommé "Stone line" ou nappe de gravats, est souvent à la limite entre les niveaux I et II. Il est bien représenté dans une grande partie du Congo méridional;

+ d'oxy-hydroxydes métalliques et d'argile (souvent tachetée), avec des organisations lithorelictuelles conservées ou bien plus ou moins transformées, avec des structures d'accumulation continues (cuirasses) ou discontinues (nodules, à structure interne non différenciée, et concrétions ou pisolithes à structure interne concentrique), plus ou moins indurée D'HOORE, 1954; BOULANGE et *al.*, 1973). Dans cet ensemble dénommé "ensemble glébulaire", peuvent coexister ou évoluer parallèlement diverses lignées glébulaires litho et pédorelictuelles (STOOPS, 1967; MULLER et *al.*, 1981; FRITSCH, 1984; RIQUIER, 1969);

- **Niveau I:** ensemble supérieur **meuble et structochrome**, dans lequel, des minéraux primaires résistants (quartz dominant) et des minéraux secondaires d'altérations pseudomorphiques ou résiduels de la dégradation de l'ensemble glébulaire, s'accumulent relativement. Ce niveau, surmontant généralement l'ensemble glébulaire et/ou la "Stone line", est constitué d'horizons meubles et structurés en microagrégats dans lesquels dominant le quartz et/ou la kaolinite.

Le niveau I a parfois été considéré comme un résultat du recouvrement par des matériaux allochtones (action érosive des eaux de ruissellement) ou par des matériaux

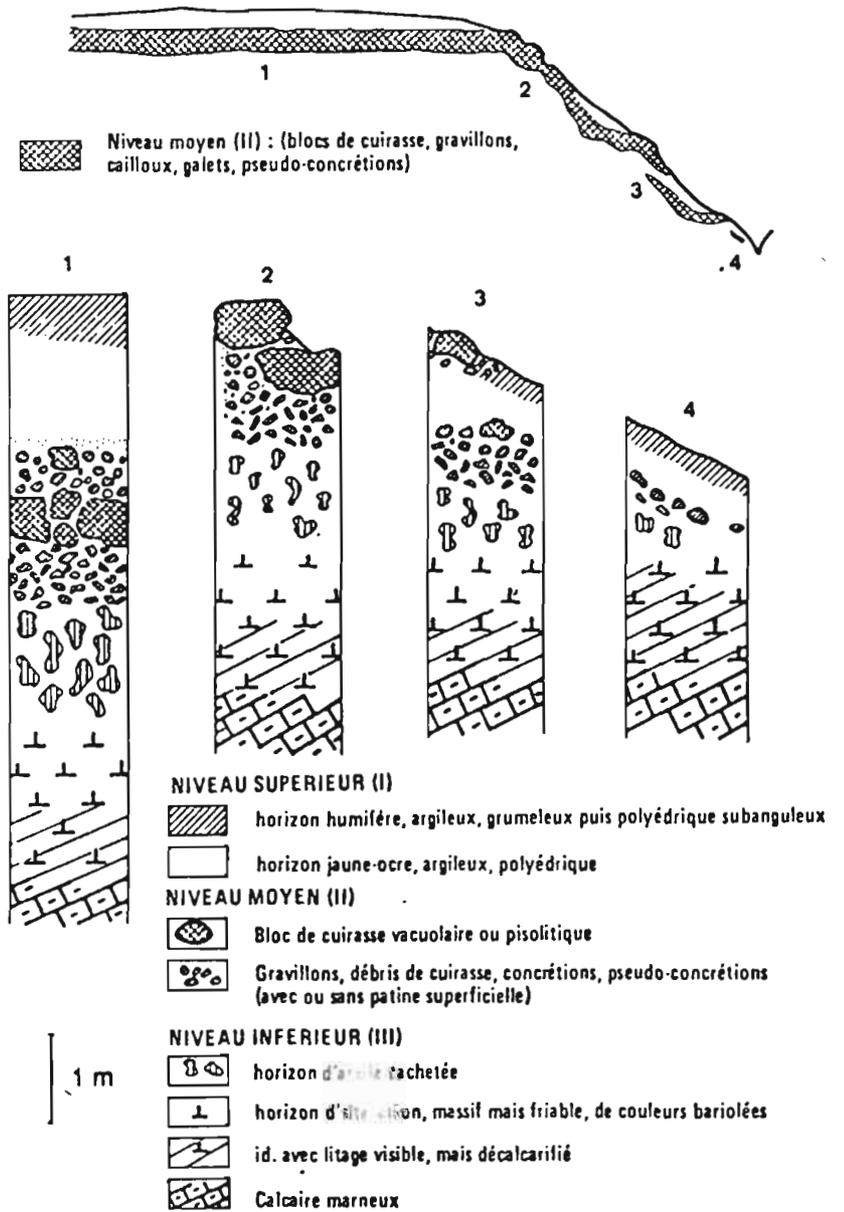


Figure 1.6: Organisation des couvertures ferrallitiques dans le Bassin du fleuve Niari (Source: De BOISSEZON et GRAS, 1975)

autochtones remontés par les termites depuis les altérites. L'abondance de galets roulés, de fragments d'industrie néolithique et/ou de nodules patinés justifie, pour un grand nombre d'auteurs, cette allochtonie.

Cependant d'après BOCQUIER et *al.* (1984), certaines études pétrologiques récentes (MULLER, J.P., 1983; LEPRUN, 1979; MULLER D. et *al.*, 1981; ROSELLO et *al.*, 1982; CHAUVEL 1977; FRITSCH, 1984...), ont pu montrer l'existence des filiations structurales et géochimiques entre les deux ensembles supérieurs. D'après ce même auteur, les ensembles meubles résulteraient dans ces cas précis de la dégradation d'ensembles glébulaires.

#### 4. CONCLUSION

Les principaux constituants secondaires des paragenèses minérales (kaolinite et oxyhydroxydes de fer et d'alumine), sont affectés, de l'infrasol à l'apexol, par "des transformations cristalochimiques successives, qui les amènent progressivement à des statuts de plus en plus substitués, avant de changer d'état minéralogique. Ainsi, une formation latéritique résulte elle-même de successions complexes d'accumulations minérales relatives et absolues." (BOCQUIER et *al.*, 1984).

A ces transformations minérales et aux transferts qui leurs sont liés, correspondent d'importantes **transformations structurales** qui elles-mêmes sont évolutives (NAHON, 1976): des structures héritées (des roches mères), et d'accumulations ferrugineuses dans l'infrasol (altérite et ensemble glébulaire), on aboutit à des structures de pédoturbation (c'est à dire de réorganisation sur place) et/ou de lessivage dans l'apexol. Dans cet ensemble meuble, le squelette essentiellement quartzeux et le plasma ferro-kaolinitique se réorganisent en structures microagrégées et poreuses.

*Cependant, si l'organisation verticale a été fréquemment décrite, grâce aux coupes naturelles, l'organisation spatiale des couvertures pédologiques est encore très mal connue dans le Bassin du Niari, comme dans l'ensemble de la zone tropicale humide.*

### C. CADRE PHYSIQUE

#### 1. GEOMORPHOLOGIE

Le Bassin du fleuve Niari est constitué par un synclinal central encadré par des hauts reliefs du Mayombe à l'Ouest, du Chaillu au Nord et du Plateau des Cataractes à l'Est et au Sud.

## a. HAUTS RELIEFS RESIDUELS

### 1). Massif du Mayombe

Large de soixante kilomètres à la frontière du Cabinda, le Mayombe se poursuit au Gabon où il s'élargit. Allongé NO - SE, ce massif est constitué d'une succession de chaînons (hérissés de crêtes secondaires qui séparent des vallées très étroites et de petits bassins étirés), parallèles à cette direction dite mayombienne.

Les pénéplanations qui se sont succédées au Mayombe, n'ont laissé en place que les racines de plis dus à différents soulèvements du Précambrien inférieur (orientés OSO - ENE), du Précambrien supérieur (orientés NO - SE), et enfin du Crétacé.

Ainsi, les altitudes n'y sont jamais très élevées: 600 à 807 m dans la chaîne du Mont Bamba, pour redescendre vers 300 - 400 m sur les bordures. La grande partie des crêtes culminant entre 700 et 800 m, les sommets les plus fréquents qui se trouvent entre 765 et 795 m et entre 735 et 745 m, constituent ainsi des îlots résiduels de la surface Kalaharienne, que' on pourrait raccorder à la surface Africaine I du début Tertiaire, décrite au Cameroun, au Gabon, et en Centrafrique.

Quelques sommets de 664 à 688 m d'altitude constituent certainement des vestiges d'un niveau d'aplanissement de la fin du Tertiaire.

Ces différents niveaux d'aplanissement sont profondément disséqués par le fleuve Niari (ici appelé Kouilou), des rivières (Loémé, Loukénéne et Loukoula) et de nombreux marigots.

Le Mayombe, très tourmenté, a été soumis à une érosion différentielle qui a pu jouer à fond, déblayant ainsi les couches les plus tendres, laissant en relief les couches dures. Ce qui donne aujourd'hui, à ces montagnes basses, un relief constitué de crêtes appalachiennes monoclinales (pentes fortes à raides).

Le contact avec le synclinal schisto-calcaire se fait par une série de collines prémayombiennes, dont l'altitude variant entre 450 et 550 m les fait rattacher à la surface P 2 b de CAHEN et LEPERSONNE (1948).

Ce niveau correspondrait à la surface Africaine II de la fin du Tertiaire dont les reliques se trouvent (CAHEN et *al.*, 1966; DENISOFF et *al.*, 1954; GRAS, 1970; LEPERSONNE, 1956): au Nord de la Vallée du Niari (plateau de Mouyondzi, au Congo); dans le haut Shibango (au Zaïre) et au pied de l'Adamaoua (au Cameroun).

## 2). Massif du Chaillu

Le massif du Chaillu ou "Niari forestier" est constitué d'interfluves en forme de mamelons arrondis de 650 à 700 m d'altitude et dont les croupes les plus hautes culminent entre 800 et 845 m au SE de ce massif, à la frontière Congo-Gabon.

Le contact avec le synclinal schisto-calcaire se fait au SO, par une dépression subséquente, que domine une cuesta gréseuse assez irrégulière de 150 à 200 m d'altitude relative (PETIT, 1975; VENNETIER, 1966; SAUTTER, 1966). A sa bordure Est, ce socle granitique est recouvert par les sables Tertiaire des hauts plateaux Batéké.

## 3). Plateau des Cataractes et ses avancées dans la Vallée du Niari

Avec ses 7000 km<sup>2</sup>, le Plateau des Cataractes est également une unité géomorphologique caractéristique: pénéplaine fortement reprise par l'érosion en nappe (parfois jusqu'à la "stone line"), et en ravines énormes assimilées ici aux "lavakas". C'est donc une surface d'érosion ancienne qui se prolonge, avec des ondulations plus usées, au Bas-Zaïre jusqu'au pied du massif du Mayombe.

Au Sud du synclinal du Niari, le Plateau des Cataractes et ses avancées dominant, par une cuesta abrupte, la Vallée du Niari de 300 à 500 m, avec quelques sommets culminant à 720 m (Monts Ngouédi), à 820 m (Mont Kinimbou)...

### b. SYNCLINAL SCHISTO-CALCAIRE DU NIARI

Du point de vue morphologique, cette région "se définit comme une dépression monoclinale, logée sur le flanc nord d'un vaste géosynclinal sédimentaire" (SAUTTER, 1966), allongé entre le Mayombe et le Chaillu, mais d'allure dissymétrique.

Les failles qui affectent l'ensemble du géosynclinal sédimentaire ont deux directions principales: à l'Est, une direction dite "mayombienne" (NNO - SSE), assimilée à celle du Mayombe et à l'Ouest, une direction dite "combienne" (OSO - ENE), correspondant à celle des Monts Comba et de la cuesta du Plateau des Cataractes.

Dans sa partie occidentale, le géosynclinal prend la direction dite mayombienne et s'appuie au SO sur le massif du Mayombe.

## 1). Collines et "hauts" plateaux schisto-calcaires

Le relief se résout ici le plus souvent en une multitude de plateaux résiduels et de collines très serrées que séparent des vallées karstiques dont les plus petites n'ont généralement qu'un écoulement temporaire, au maximum des grosses pluies.

L'altitude passe de 650 - 700 m, près du Chaillu au Nord, à 350 - 400 m sur les sommets qui dominent la rive droite du Niari (Mont Soulou: 424 m; Forêt de Mbomo: 419 m; Forêt de Ngourou: 352 m ...).

Sur cette rive droite du fleuve, le relief actuel est donc le résultat d'une surface d'érosion dont quelques témoins subsistent sous forme de plateaux peu étendus: plateau de Sibiti (531 m) et plateaux Béembé aux environs de Mouyondzi (500 m d'altitude), correspondant à la surface P 2 b de CAHEN et LEPERSONNE.

Le domaine des collines du niveau supérieur dolomitique (SC III), sur la rive gauche, correspond au "bassin minéralisé du Niari" (BIGOTTE, 1954), dont les gîtes de polymétaux (plomb, zinc et cuivre...), au pied du Plateau des Cataractes, ont depuis longtemps retenu l'attention des géologues et des décideurs.

Dans la boucle du Niari, en dessous des buttes calcaires surmontées par les grès de la Mpioka, le relief se réduit à des collines surbaissées (pitons dolomitiques des "Monts de la Lune").

## 2). "Vallée" et "Boucle" du Niari

Du point de vue morphologique, la "**Vallée**" et la "**Boucle**" du Niari forment un ensemble appelé "**Plaine**" du Niari, qui est un aplanissement, au niveau du cours moyen du fleuve Niari, d'une partie du soubassement schisto-calcaire moyen (SC II).

La Plaine du Niari, c'est-à-dire la Vallée et la Boucle du Niari est constituée par les bas plateaux et les plaines alluviales du fleuve Niari et de ses principaux affluents.

*Nous désignerons, dans la suite de ce mémoire, Vallée du Niari l'ensemble des bas plateaux constituant la Vallée et la Boucle du Niari*

### a). Bas plateaux et dépressions karstiques associées

L'altitude des bas plateaux de la Vallée du Niari remonte doucement de 180 à 220 mètres. Le microrelief caractéristique de ces vastes surfaces planes est de type karstique: glacis à pente inférieure à 5 %, dépressions allongées ou circulaires (dolines) plus ou moins encaissées, occupées ou non par des étangs.

Dans la partie comprise entre les gares ferroviaires de Loutété et de Loudima, le Niari coule, soit à la limite de sa plaine, soit il en est séparé par quelques collines de calcaires durs. Cette zone, généralement peu large 7 à 15 km, atteint sa plus grande largeur (20 km environ entre le lit du fleuve et les collines dolomitiques), au niveau de la ville de Nkayi, sur le "Plateau de Télémine".

La partie au Nord Ouest du district de Loudima, qui se prolonge, au Nord-Ouest, jusqu'au Gabon, est le seul endroit où la Vallée du Niari déborde légèrement sur la rive droite du fleuve. Dans cette partie, la plaine qui se développe sur plus de 80 km de long, est plus vaste, mais souvent marécageuse: largeur assez uniforme de 25 km en moyenne. Le microrelief y est très karstique et comprend de nombreuses dépressions occupées par des étangs. L'altitude des plateaux est de 200 - 250 m.

### ***b). Terrasses alluviales du Niari***

Le Niari qui traverse plusieurs formations géologiques possède un cours en général très encaissé.

Mais dans la la Vallée du Niari, partie moyenne de son bassin, on peut observer, entre les confluents des rivières Bouénza et Kibouba, l'existence de lambeaux de terrasses alluviales.

Les alluvions déposées par le fleuve Niari et ses principaux forment ici trois terrasses étagées, plus ou moins larges selon les endroits:

- la terrasse basse actuelle, de largeur très faible (100 m au maximum), elle est située en bordure du fleuve dont elle est séparée par un bourrelet de berge sableux;
- la terrasse moyenne, pouvant atteindre, par endroit, jusqu'à 7 km de largeur, est la formation alluviale la plus importante du cours moyen du Niari;
- la terrasse supérieure, très localisé, qui domine le Niari par un talus de 30 m environ, est beaucoup moins étendue que les deux premières. Elle ne se présente, le plus souvent et très localement sur la terrasse moyenne ou sur la cuesta, qu'en amas isolés d'alluvions grossières, parfois cimentées par des oxydes métalliques (débris de cuirasse conglomératique).

## **2. HYDROLOGIE**

Fleuve entièrement congolais, le Niari (708 km de long), qui porte le nom de Ndouo dans son bassin supérieur et de Kouilou, dans son cours inférieur (après son entrée dans le Mayombe), draine la majeure partie du Bas-Congo. Son bassin versant, de 60.000 km<sup>2</sup>, est



constitué par diverses formations géologiques qui soumettent le Niari et ses affluents à des régimes hydrologiques assez variés (figure 1.7).

Le Niari prend sa source à l'Est du Mont Paga (à 650 m d'altitude), sur les contreforts des collines batéké (700 à 900 m d'altitude), et d'où rayonnent de nombreux autres cours d'eau (Ogoué, Lékéti, Bouénza, Mpama, Djoué etc...). De là, ce ruisseau au cours torrentiel ( $85 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), se dirige vers le Sud le long d'une faille bien marquée et en quelques kilomètres, il (le Ndouo-Niari) descend rapidement les collines mères avant de bifurquer, au vingt cinquième kilomètre, vers le SO dans les tillites du Précambrien. Sa pente est encore assez forte (2,2 % et plus), quand le fleuve reçoit dans ce cours supérieur la Djouéké et la Louhoulou.

Après 120 km de parcours, avec une pente assez faible (1,13 %), le Niari atteint le synclinal sédimentaire où sur sa rive droite, la Bouénza lui apporte un volume d'eau important ( $105 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

Dans la Vallée du Niari, par contre sur sa rive gauche, ses affluents qui descendent du Plateau des Cataractes, sont courts et possèdent un régime de crues brutales (Louvisi, Loutété et la Nkenké...); par contre la Loudima, limitant le Plateau de Télémine à l'Ouest, et qui serpente longuement dans une vallée marécageuse est plus calme ( $31 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

En aval de son confluent avec la Loudima, dans la Boucle du Niari, le fleuve qui débite  $395 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  est accidenté de rapides. Sur sa rive droite, il reçoit d'abord la Louéssé ( $265 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), bien alimentée par les fortes pluies qui tombent au Chaillu, puis d'autres rivières qui affluent également dans le Niari: Léboulou et Gokango à droite, Louvakou et Loubomo à gauche.

Dans le Mayombe, les affluents du fleuve sont des torrents très courts. Dans ce bassin inférieur, par de nombreux rapides, le Kouilou-Niari franchit les chaînons mayombiens, pour rejoindre le plateau côtier par une vallée large et marécageuse, où il reçoit la Loundji et la Ntombo, avant de terminer sa course dans l'Atlantique Sud, par un large estuaire, au Nord de Pointe-Noire.

## **D. FORMATIONS VEGETALES**

Deux principaux types de végétation couvrent le territoire congolais: la forêt et la savane (respectivement 60 % et 40 % de la superficie totale) (figure 1.8).

L'action des paléoclimats et les activités humaines anciennes et récentes ont certainement contribué à modifier cette répartition de la végétation aussi bien dans l'espace que dans le temps.

## 1. FORETS TROPICALES HUMIDES

C'est la forêt ombrophile qui domine dans le Sud Congo. Son aspect est très classique, avec une succession en hauteur de différents types d'essences: de très grands arbres isolés (40 à 60 m de haut), dominant la canopée continue formée à 20 à 30 m de haut par des arbres à bois durs et à croissance rapide. L'étage inférieur, est constitué de petits arbres et d'arbrisseaux ayant une dizaine de mètres de haut.

Les plus hauts arbres constituent l'essentiel des essences commercialisées, tels que *Terminalia superba*, *Chlorophora excelsa*, *Khaya spp*, *Triplochiton scleroxylon* et *Aucumea spp...*

La forêt humide primaire est facilement pénétrable au niveau du sol, le sous-bois y étant très peu développé.

### a. MASSIFS FORESTIERS

Ils se répartissent, dans le Bassin du Niari, en trois ensembles importants:

- La forêt ombrophile du Mayombe qui couvre la quasi-totalité de ce massif montagneux. Cependant, sa bordure orientale (surtout entre Kimongo et Dolisie), est maintenant très savanisée. Il existe également, très localement à l'intérieur du Mayombe, des taches de savane incluse d'origine mal connue: à l'origine anthropique signalée par plusieurs auteurs, LANFRANCHI et SCHWARTZ (1990), opposent une origine plus complexe due aux différents paléoclimats successifs depuis le Quaternaire et à l'érosion des sols.
- La forêt du Chaillu, également ombrophile, possède un plus grand nombre de savanes incluses (à graminées ou à fougères aigles), de superficie parfois assez importante: surtout le long des axes de communication (Sibiti-Zanaga et Mossendjo-Komono). Vers l'extérieur de ce massif, la forêt se dégrade d'autant plus nettement que la zone est densément peuplée (vers Mouyondzi, par exemple);
- La couverture forestière très dégradée du Plateau des Cataractes, où on a plutôt actuellement une véritable mosaïque de forêt-savane.

### b. FORETS GALERIES

En zones de savane, le réseau hydrographique assez dense dans le synclinal schisto-calcaire est souvent marqué par une forêt le long des vallées importantes. Ces forêts

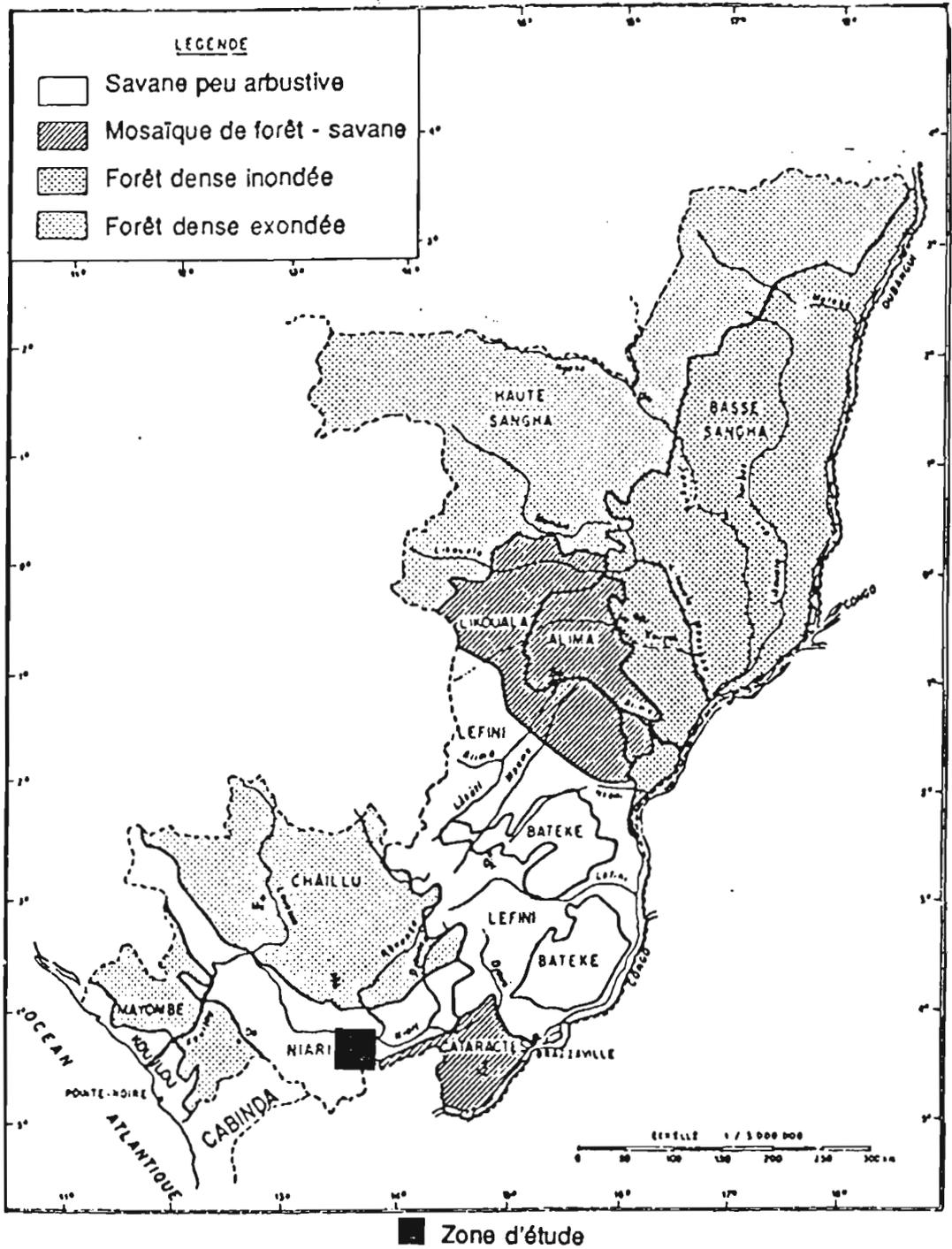


Figure 1.8: Principaux type de végétation au Congo  
(Source: VENNETIER, 1965)

galeries sont partout plus ou moins dégradées par les défrichements agricoles des paysans locaux.

Par endroits en zones de savane, sur les plateaux ou au sommet de certaines collines, des bosquets anthropiques indiquent l'emplacement d'anciens villages.

## 2. SAVANES TROPICALES HUMIDES

Du point de vue biogéographique, le synclinal schisto-calcaire du Niari représente une région particulière, où domine (à cette latitude de 3° Sud), la savane (KOECHLIN, 1966).

AUBREVILLE (1949, 1965) (figure 1.8), évoque dans ce cas les relations étroites qui existent entre la nature géologique du sous-sol (donc le sol) et la végétation naturelle dominante. Cependant, LANFRANCHI et SCHWARTZ (1990), préconisent ici aussi une origine paléoclimatique.

Une végétation de savane recouvre la quasi-totalité des sols développés sur Schisto-calcaire du Niari.

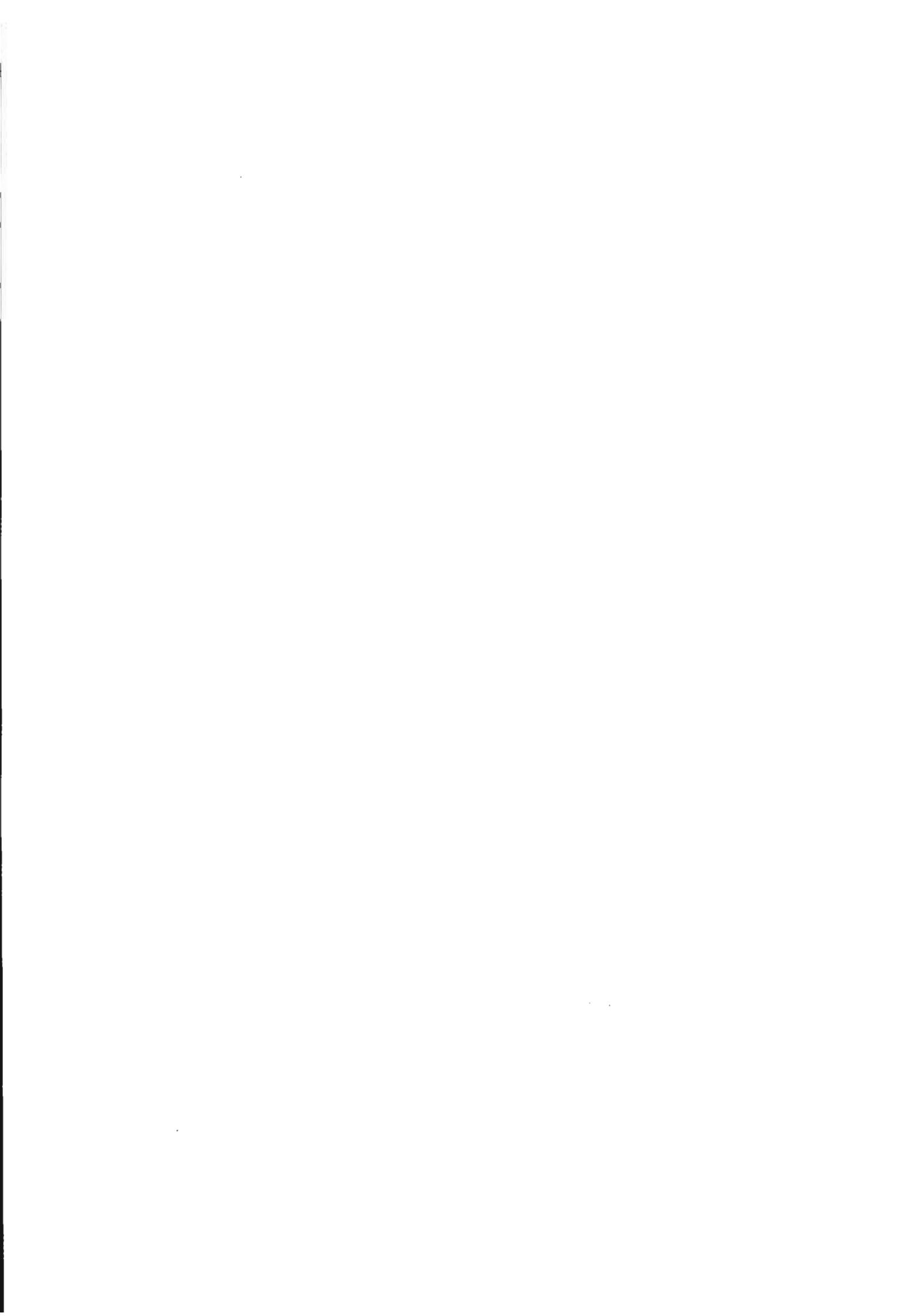
C'est une formation faiblement arbustive et assez homogène, avec, sur les plateaux et collines subaplanies (KOECHLIN, 1966):

- une strate arbustive assez basse (1 à 4 m de haut), caractérisée par l'absence de l'*Hymenocardia acida*. Dans ces savanes des plateaux de la plaine du Niari, *Annona arenaria* permet de reconnaître des zones mieux ressuyées et *Bridelia ferruginea* des endroits à drainage assez imparfait;
- une strate herbacée, haute (2 à 3 m), dominée, sur les plateaux, par une graminée de haute taille, *Hyparrhenia diplandra* qui possède un système racinaire très traçant et structurant.

Dans les dolines marécageuses (surtout dans la Boucle du Niari), une végétation mi-herbacée mi-buissonnante pousse sur un sol plus ou moins organique, laissant progressivement place à une prairie flottante et au centre à un papyrus.

Sur les collines de calcaires dolomitiques plus ou moins érodées, il n'existe plus qu'une végétation herbacée clairsemée et basse (moins de m de haut). Elle est essentiellement constituée par *Hyparrhenia lecomtei* et *Andropogon pseudapricus*.

Le long des principales vallées alluviales, les bourrelets de berges portent "un peuplement presque pur de *Pennisetum purpureum*, ou herbe à éléphants" (KOECHLIN, 1966).



a



b



c



Planche I.1: Plateaux et savane de la Vallée du Niari

a: Vue générale d'une partie des plateaux de la Vallée du Niari et des reliefs périphériques  
b: Vue détaillée de la savane à *Hypparhenia diplandre* dans le Niari  
c: Brûlis annuel de la savane en saison sèche (mois de juillet)



## **E. COUVERTURES PEDOLOGIQUES**

Les sols sont répartis dans trois principales classes: on trouve ainsi des sols ferrallitiques, des sols hydromorphes et des sols alluviaux (figure I.9).

Mais dans la zone sur schisto-calcaire, on peut observer, très localement, des rendzines grises, tropicales sur les collines dolomitiques du Schisto-calcaire supérieur (SC III) et, en piedmont, des vertisols topolithomorphes dans des bas fonds.

### **1. SOLS FERRALLITIQUES**

La plupart des sols bien drainés du Bassin du Niari se rangent dans la classe des sols ferrallitiques, quelles que soient les roches dont ils sont issus (de BOISSEZON et GRAS, 1970).

A l'exception des sols rajeunis par l'érosion du Mayombe et du Plateau des Cataractes, le reste appartient à la sous-classe de sols ferrallitiques fortement désaturés en bases dans l'horizon B.

#### **a. SOLS FERRALLITIQUES DU MAYOMBE ET DE LA PLAINE COTIERE**

Dans le Mayombe, la presque totalité des sols ferrallitiques est aussi fortement désaturée dans l'horizon B. Mais cependant, les sols faiblement ou moyennement désaturés sont observés localement, en liaison plus évidente avec la roche-mère (sur altérite de roches vertes ou de granites calco-potassiques, par exemple), qu'avec la topographie.

En raison de l'orographie particulière de cette région, les sols du Mayombe sont en grande partie issus de matériaux plus ou moins rajeunis: peu profonds sur les pentes et colluviaux en bas de pente.

Il faut noter qu'en raison de la présence fréquente de minéraux primaires non altérés (muscovite), dans certains types de sols ferrallitiques du Mayombe, nous les avons placés récemment dans le groupe des ferralsols (MAPANGUI, 1989).

#### **b. SOLS FERRALLITIQUES DU SYNCLINAL SCHISTO-CALCAIRE DU NIARI**

Malgré une grande uniformité apparente, les sols ferrallitiques de cette région sont assez variés (DENIS et *al.*, 1975; MARTIN, 1975; MAPANGUI, 1976, 1981):

- sur argillites du haut plateau de Mouyondzi, les sols sont très argileux (jusqu'à 90 % d'argile dans les horizons B), et bien structurés. Mais leur réserve minérale est faible

et leur teneur en bases échangeables peu élevée;

- sur le Schisto-calcaire inférieur (SC I), les sols argileux, ocre-jaune en B (Hue de 7,5 Y R à 10 YR), et localisés sur les collines de la rive droite du Niari, sont fortement désaturés, peu épais et très sensibles à l'érosion en nappe;
- sur le Schisto-calcaire moyen (SC II), de la Vallée du Niari, les sols sont aussi jaunes (Hue de 7,5 YR à 10 YR) et fortement désaturés. Mais ils ont une texture plutôt limono-argileuse à argilo-limoneuse (50 à 70% d'argile en B). Ces sols sont profonds (deux mètres et plus), et l'altérite, sur laquelle ils se développent, peut dépasser cinq mètres d'épaisseur.

En piedmont des reliefs du Schisto-gréseux, la texture des sols ferrallitiques fortement désaturés devient plus légère: de texture argilo-sableuse à sablo-argileuse, avec des taux de sables fins supérieurs à ceux des sables grossiers.

### **C. SOLS FERRALLITIQUES DU PLATEAU SCHISTO-GRESEUX**

Cette région très érodée possède, là où le niveau I n'a pas été entièrement déblayé, des sols ferrallitiques fortement désaturés, tronqués, de texture argileuse et de couleur ocre rouge sur argillite, et de texture argilo-sableuse et de couleur ocre jaune sur grès arkosiques.

### **D. SOLS FERRALLITIQUES DU MASSIF DU CHAILLU**

Englobant la région des séries de la Bouénza (surfaces pénéplanées en prolongation des hautes collines schisto-calcaires), et du massif cristallin, le "Niari forestier" possède des sols ferrallitiques fortement désaturés qui se différencient en fonction du type de roche-mère:

- sur les grès bouénziens, les sols, argilo-sableux et fortement désaturés, contiennent parfois moins de 20 % d'argile en surface;
- sur granites du Chaillu, les sols sont jaunes et aussi argilo-sableux (50 % d'argile et 30 % de sable grossier). Ils font également partie de la sous classe fortement désaturée.

## **2. SOLS HYDROMORPHES**

### **A. SOLS HYDROMORPHES DE LA REGION SCHISTO-CALCAIRE**

Ces sols, dont les caractères évolutifs sont dus à un excès d'eau (permanent ou temporaire), par remontée de la nappe phréatique dans toute ou partie du profil, sont essentiellement localisés ici dans les dépressions karstiques du synclinal schisto-calcaire du Niari.

Les sols hydromorphes occupent ainsi, dans cette région morpho-pédologique, des superficies assez importantes:

- dans les grandes dépressions de la Boucle du Niari et celles s'étendant entre les chaînes de collines dans les zones de Kimongo et de Boko-Songo;
- dans les dolines plus ou moins circulaires des hauts plateaux (Mouyondzi), et des bas plateaux (Vallée du Niari), du Schisto-calcaire.

On y distingue les sols hydromorphes plus ou moins organiques caractérisés par une accumulation de matières organiques en surface et les sols hydromorphes minéraux à gley oxydé ou réduit. Généralement ces sols forment une séquence centrée dans une même doline: des sols hydromorphes à pseudogley en bordure, on passe aux sols hydromorphes à gley et/ou organiques, au centre de la dépression.

#### **b. SOLS HYDROMORPHES DU MAYOMBE, DU CHAILLU ET DU PLATEAU DES CATARACTES**

Dans les autres régions morpho-pédologiques avoisinant le synclinal schisto-calcaire, les sols hydromorphes sont essentiellement localisés dans les portions mal drainées des vallées. Ils se développent de ce fait sur des matériaux plus ou moins hétérogènes, d'origine alluviale (dans le Chaillu) et/ou colluviale (dans le Mayombe et sur le Plateau des Cataractes).

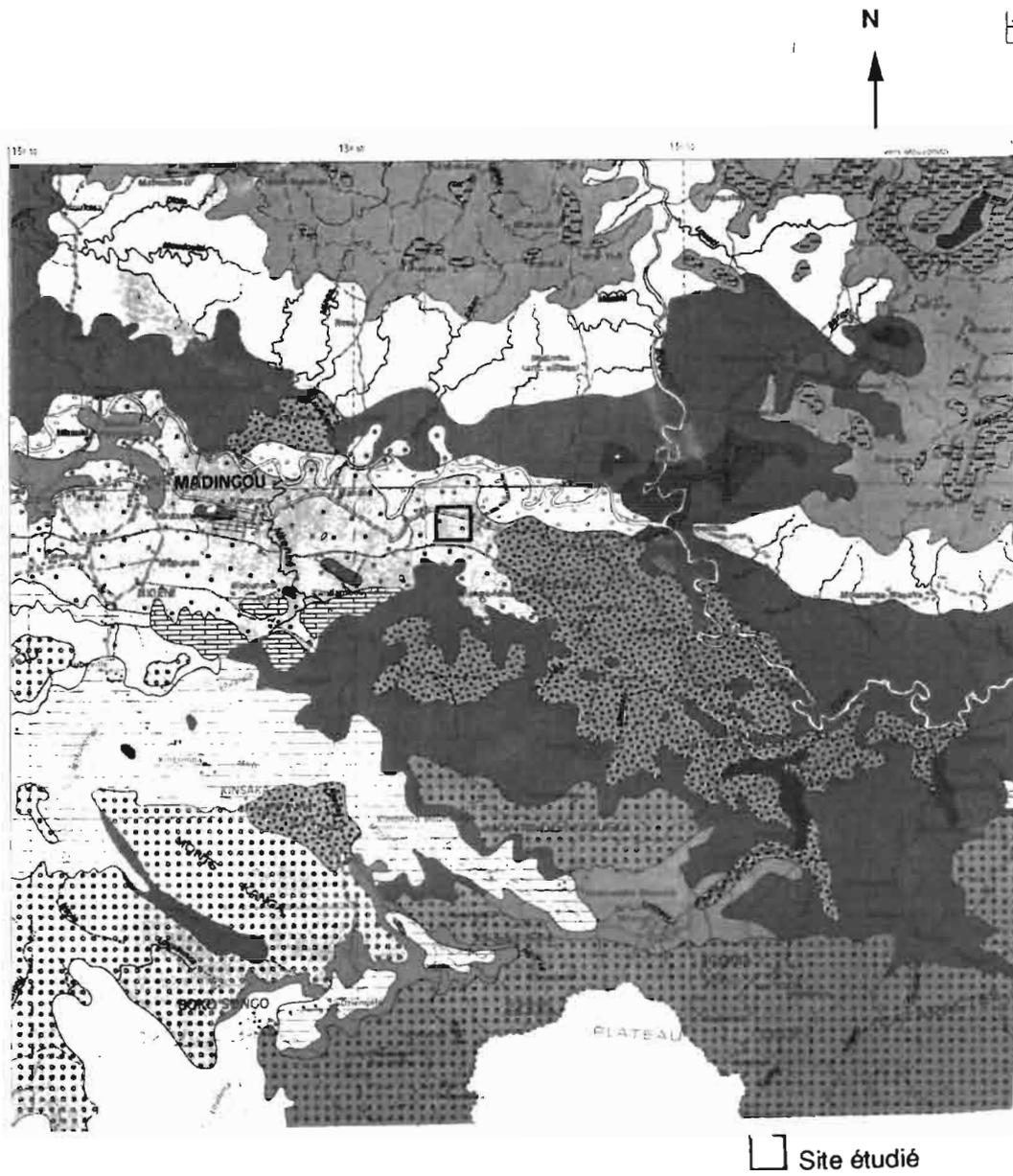
L'intensité de l'hydromorphie (modalités et durée d'engorgement de tout ou partie du profil), la nature du matériau originel affecté et le type de végétation couvrant le sol, font que les sols hydromorphes observés dans ces régions morpho-pédologiques sont d'une grande diversité.

### **3. SOLS ALLUVIAUX**

Les alluvions déposées par le fleuve Niari (entre la Bouénza et la Kibouba), et certains de ses affluents de la rive gauche (Nkenké et Loudima), constituent, comme nous l'avons indiqué précédemment, trois terrasses étagées dont la plus importante est la terrasse moyenne.

Les sols de la terrasse moyenne sont plus évolués que ceux de la terrasse basse. Ils ont été classés comme sols ferrallitiques fortement désaturés à pseudogley de taches et de concrétions (GRAS, 1967). Leur texture est sableuse en surface et sablo-argileuse en profondeur. Dans quelques dépressions karstiques, on observe des sols hydromorphes minéraux à pseudogley et à gley.





Echelle: 1/400 000

4 km

Site étudié

Figure 1.9: Carte pédologique de la Vallée du Niari (entre Loutété et Jacob) et de ses environs (extrait de la carte pédologique de Madingou dressée par DENIS et RIEFFEL, 1975)

JUXTAPOSITIONS  
SEQUENCES

**SOLS MINERAUX BRUTS  
NON CLIMATIQUES**  
D'EROSION  
LITHOSOLS  
Sur calcaires

**SOLS PEU EVOLUES  
NON CLIMATIQUES**  
D'EROSION  
REGOSOLS  
Sur calcaires

JUXTAPOSITIONS

**SOLS FERRALLITIQUES  
FORTEMENT DESATURES**  
TYPIQUES  
JAUNES  
Sur matériau argilo-sableux issu du Schisto-calcaire

**HYDROMORPHES**  
Sur matériau issu de l'altération des calcaires

**APPAUVRIS  
MODAUX**  
Sur colluvions à texture variable

**SOLS HYDROMORPHES  
MINERAUX**  
A PSEUDOogley  
A TACHES ET CONCRETIONS  
Sur matériau colluvio-alluvial sablo-argileux

**SOLS DES TERRASSES DU NIARI**

**SOLS PEU EVOLUES  
NON CLIMATIQUES**  
D'APPORT ALLUVIAL  
HYDROMORPHES  
Sur alluvions du Niari

**SOLS FERRALLITIQUES  
MOYENNEMENT DESATURES**  
APPAUVRIS  
HYDROMORPHES  
Sur matériau argilo-limonéux

**FORTEMENT DESATURES**  
TYPIQUES  
JAUNES OU HYDROMORPHES  
Sur matériau argilo-sableux à argileux

**SOLS HYDROMORPHES  
MINERAUX**  
A PSEUDOogley  
A TACHES ET CONCRETIONS  
Sur matériau alluvionnaire à texture variable

**A GLEY  
D'ENSEMBLE**  
Sur matériau alluvionnaire à texture variable

**SOLS HYDROMORPHES  
MOYENNEMENT ORGANIQUES**  
HUMIQUES A GLEY  
A ANMOOR ACIDE  
Des dépressions calcaires

**SOLS PEU EVOLUES  
NON CLIMATIQUES**  
D'APPORT COLLUVIAL  
MODAUX  
Sur colluvions calcaires ou /  
Sur colluvions gréseuses

**VERTISOLS  
TOPOLITHOMORPHES**  
NON CRUMOSOLIQUES  
A CARACTERES VERTIQUES MOYENNEMENT ACCENTUES  
Sur calcaires

**SOLS CALCOMAGNESIMORPHES  
RENDZINIFORMES**  
RENDZINES VRAIES  
CRISES "TROPICALES"  
Sur calcaires et dolomies

**RENDZINES A HORIZONS  
BRUNS CALCAIRES**  
Sur dolomies

**SOLS FERRALLITIQUES  
FAIBLEMENT DESATURES**  
TYPIQUES  
RAJEUNIS  
Sur matériau argilo-limonéux (DE ZONES SABLEES)

**PENEVOLES  
AVEC EROSION ET REMANIEMENT**  
Sur marnes du Schisto-calcaire inférieur (DE ZONES FORTES)

**MOYENNEMENT DESATURES  
APPAUVRIS**  
JAUNES A Bgr PROFOND  
Sur matériau argileux issu du Schisto-calcaire moyen (DE ZONES SABLEES)

**INDURES, A RECOUVREMENT EPAIS**  
Sur marnes du Schisto-calcaire inférieur (DE ZONES SABLEES)

**INDURES TRONQUES PAR EROSION**  
Sur marnes du Schisto-calcaire inférieur (DE ZONES SABLEES)

**RAJEUNIS, A Bgr (gr) A FAIBLE PROFONDEUR**  
Sur matériau argilo-limonéux à argileux issu du Schisto-calcaire

**APPAUVRIS  
JAUNES**  
Sur matériau argileux issu du Schisto-calcaire inférieur (DE ZONES SABLEES)

**PENEVOLES  
MODAUX**  
Sur grès argileux de la Mpioka inférieure (DE ZONES SABLEES)

**AVEC EROSION ET REMANIEMENT**  
Sur grès argileux de la Mpioka inférieure (DE ZONES SABLEES)

**TYPIQUES  
MODAUX**  
Sur grès de la Mpioka inférieure (DE ZONES SABLEES)

**MODAUX, TRONQUES PAR L'EROSION**  
Sur grès de la Mpioka inférieure (DE ZONES SABLEES)

**FORTEMENT DESATURES  
TYPIQUES**  
JAUNES A Bgr PROFOND  
Sur matériau argileux issu du Schisto-calcaire moyen (DE ZONES SABLEES)

**RAJEUNIS, A Bgr (gr) A FAIBLE PROFONDEUR**  
Sur matériau argilo-limonéux à argileux issu du Schisto-calcaire inférieur et moyen (DE ZONES SABLEES)



## F. CONCLUSION

Le Bassin versant du fleuve Niari constitue donc une région morpho-pédologique caractéristique du Sud Congo, avec son climat bas-congolais qui varie, d'une unité de paysage à l'autre, en fonction des influences dues essentiellement à l'altitude et au type de Végétation.

La Vallée du Niari, au sein de cette région naturelle, est très spécifique en raison des terres argileuses développées sur d'assez vastes plateaux et de sa végétation de savane, plus facile à défricher que les forêts denses des reliefs environnants. C'est ce paysage morpho-pédologique dont les sols sont très cultivés que nous allons maintenant étudier dans le chapitre II suivant.

---



## CHAPITRE II

### “VALLEE DU NIARI”, UNITE DE PAYSAGE MORPHO - PEDOLOGIQUE

---

*La Vallée du Niari est un paysage morpho-pédologique particulier qui fait partie du bassin du fleuve Niari. C'est une zone subaplanie située essentiellement sur la rive gauche du lit moyen du Niari, où la savane climacique a quasiment remplacé la forêt.*

*Elle est constituée d'un ensemble de bas plateaux de très faible altitude (200 m en moyenne) et dont la couverture pédologique est dominée par **la classe de sols ferrallitiques jaunes, acides qui sont surtout caractérisés par une texture granulométrique argileuse.***

## A. MORPHOGENESE DE LA VALLEE DU NIARI

La Vallée du Niari, dépression monoclinale, "logée" sur le flanc Nord d'un vaste synclinal sédimentaire, occupe l'emplacement d'une grande dépression subsidente qui était coincée, à l'époque de la sédimentation, entre le massif du Chaillu et la chaîne du Mayombe (BIGOTTE, 1954, cité in Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari, 1965).

Une étude bibliographique succincte nous a permis de résumer les grandes lignes de l'évolution sédimentologique du géosynclinal schisto-calcaire (figure II.1) dans les termes:

- "Immédiatement après la phase glaciaire continentale de la Tillite supérieure du Niari, il s'est produit un épisode certainement lagunaire (niveau calcaire SC I c), prélude à la transgression marine;
- "La transgression marine débutant réellement avec le SC I b, se poursuit en SC I a, pour se terminer par des dépôts de faible profondeur (sommet oolithique du SC I a: récifs de stromatholithes en voie d'envasement, etc).
- "La régression ainsi amorcée amène un afflux soudain d'apports terrigènes qui marquent le début du SC II. Cette régression est suivie, au cours de SC II, par une série d'oscillations marquant une transgression de faible envergure. Le SC III, paraît au moins en partie régressif.

L'ensemble est suivi par une émergence" (CAHEN et *al.*, 1966). Après son émergence totale, au cours des périodes anciennes très humides (alors que les eaux de percolation étaient acides et riches en gaz carbonique), le géosynclinal schisto-calcaire a dû servir de niveau de base dans l'évolution des différentes surfaces d'érosion du bassin du Niari, par une intense décarbonatation de la partie supérieure de son substratum schisto-calcaire (planche II.1).

D'une façon générale, la persistance de nombreuses surfaces d'érosion en Afrique, notamment depuis le mi-Tertiaire, est en faveur de l'existence de différents types de "stones lines" (SEGALEN, 1969; GRAS, 1970; RIQUIER, 1969...).

Des auteurs belges (CAHEN et *al.*, 1948, 1966; LEPERSONNE, 1956; D'HOORE, 1954...) ont également tenté d'établir une chronologie du Quaternaire de l'Afrique Centrale et notamment celle du Zaïre Sud-occidental (ayant une nette continuité géo-morpho-pédologique avec le Congo méridional), à l'aide de la datation par les industries lithiques préhistoriques des "stones lines", donc des différentes surfaces d'érosion qui les contiennent.

Cependant, "l'âge important de la plupart de ces "stone lines", plus de 40.000 ans, est aussi une difficulté à leur interprétation, mais leur genèse est continue et actuelle" (RIQUIER, 1969).

LEPERSONNE (1956) a distingué, dans la partie occidentale du Bas-Zaïre (voisine du Congo méridional), cinq surfaces d'érosion correspondant à des périodes paléoclimatiques données: Sangoen, Lupembien, Tchitolien et Néolithique.

Cependant STOOPS (1967), explique que la nappe de gravats observée dans les sols du Bas-Zaïre se serait formée au cours du Léopolvillien (période subaride), qui aurait suivi une période humide et chaude (le Ndjilien), pendant laquelle, se seraient développés les sols ferrallitiques de cette région. Tandis que le niveau I meuble recouvrant la "stone line" ne daterait que de la fin du Léopoldvillien et du début de la période actuelle (le Kibangien).

La divergence entre ces deux interprétations chronologiques des formations superficielles d'une même région morpho-pédologique, montre combien ce problème est loin d'être résolu.

Mais, GRAS (1970), donne, sur cette question, les arguments suivants (figure II.2 b):

- l'existence dans le synclinal schisto-calcaire et sur son pourtour, de vestiges des surfaces P 1, P 2, P 2 b, P 3 et P 4 quelle que soit la nature de la roche-mère;
- la nette individualisation des pédons ferrallitiques en trois niveaux I, II et III, et la rareté des colluvions récentes caractérisées par le mélange d'éléments grossiers non jointifs et de terre fine;
- la différenciation de la nappe de gravats en couches se distinguant par la nature de leurs constituants grossiers. Quatre principales surfaces d'aplanissement, résultant des anciens cycles "érosion-colluvionnement", se succèdent ainsi depuis les hauts reliefs jusqu'à la plaine du Niari:
  - P 1 (800 m d'altitude et plus): sommets des massifs du Mayombe et du Chaillu;
  - P 2 (650 - 700 m): crêtes secondaires du Mayombe et du Chaillu ainsi que des sommets du plateau des Cataractes et de ses avancées dans le Niari;
  - P 2 b (450 - 550 m): quelques petits bassins dans le Mayombe et plateaux plus ou moins étendus de Sibiti et de Mouyondzi;
  - P 3 (350 m): collines prémayombiennes et celles dolomiques du SC III;
  - P 4 (180 - 250 m): vaste plaine Niari (Vallée du Niari, plateau de Dolisie).

En raison de la nature des différents éléments grossiers de la "stone line" et des mouvements ayant affecté cette nappe de gravats, de nombreux auteurs ont été persuadés que ce sont là des reprises d'érosion localisées et qui s'expliquent, dans le passé, par des particularités de topographie, de roches, de végétation ou d'action humaine (CAHEN, 1954; LAPORTE, 1962; SEGALEN, 1969; RIQUIER, 1969; GRAS, 1970...).



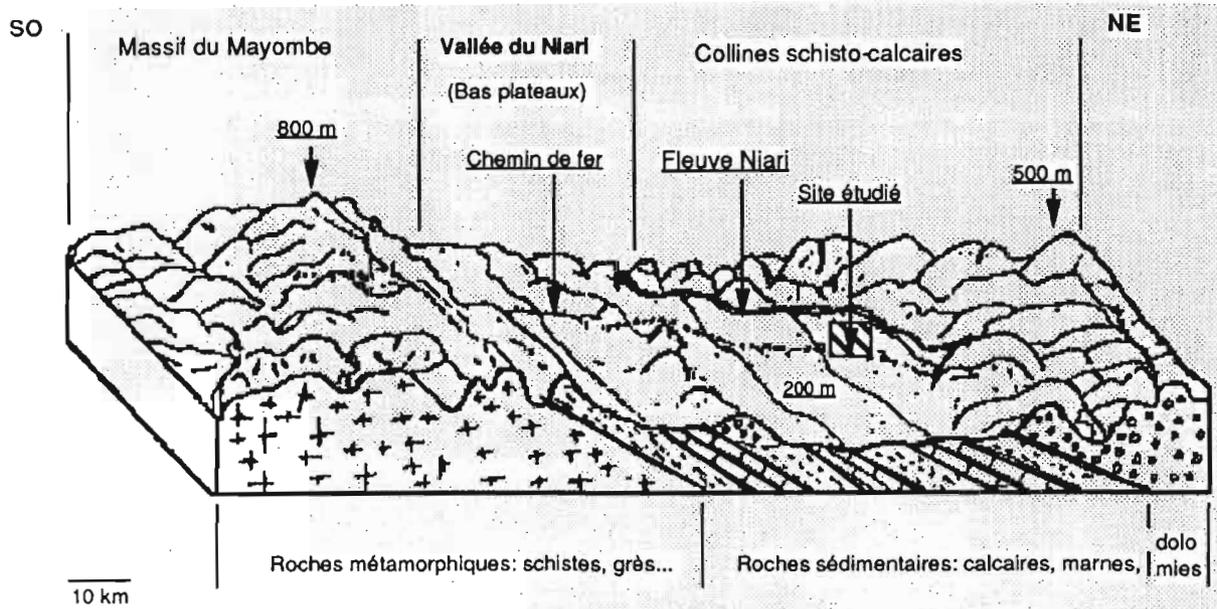


Figure II.1 : Bloc diagramme de la Vallée du Niari et de ses environs : topographie, hydrographie et substratum géologique.

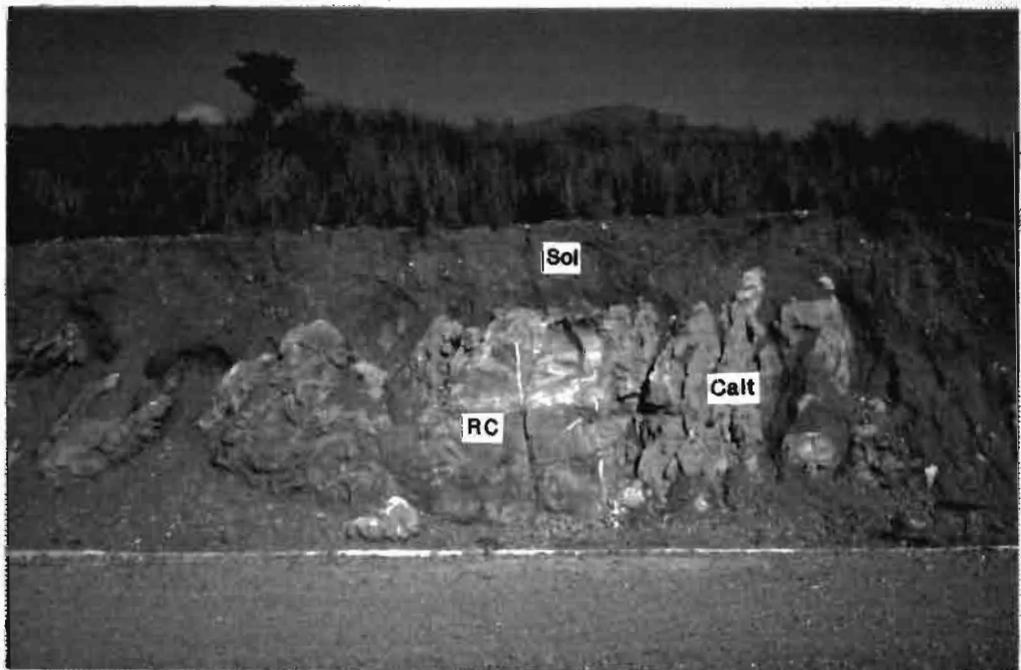


Planche II.1: Altération de la roche calcaire dans la Vallée du Niari (zone de collines)

RC: Roche calcaire saine

Calt: Calcaire altéré



## B. TYPES DE SOLS DE LA VALLEE DU NIARI

La morphologie complexe des profils pédologiques observés en de nombreux endroits, ainsi que le fort degré d'altération des matériaux originels, constituant les altérites étudiées, permettent de conclure que, exceptés les sols alluviaux et colluviaux, la genèse de la couverture pédologique de la Vallée du Niari, essentiellement ferrallitique, est très ancienne et complexe.

### 1. CLASSIFICATION DES SOLS

Au point de vue classification des sols, parmi les classes définies dans la classification française, seules trois d'entre elles sont représentées dans la Vallée du Niari (AUBERT, 1965) (figure II.2 a):

- **Les sols peu évolués d'apport alluvial et/ou colluvial**, sur les terrasses actuelles du fleuve Niari et de ses principaux affluents;
- **Les sols hydromorphes**, dans les dépressions karstiques sur plateaux ou sur terrasses basses. Leur évolution est conditionnée par un excès d'eau, généralement dû aux remontées de la nappe phréatique karstique en saison de pluies. Ils correspondent aux gleysols de la Soil Taxonomy et de la légende FAO/UNESCO (GAUCHER, 1967);
- **Les sols ferrallitiques fortement désaturés** typiques, à Bgr ou B (u, gr) profond (à plus de deux mètres). Ces sols sont très microagrégés, jaunes (10 YR 5/8 à 6/8), très argileux (généralement plus de 50 % d'argile granulométrique dans les horizons B). Ces sols correspondent aux oxisols (Haplorthox), de la Soil Taxonomy et aux ferralsols de la légende FAO/UNESCO (GAUCHER, 1967).

***La "richesse en argile" est donnée par COSSON (1955), comme l'un des caractères généraux propres à ces sols ferrallitiques des bas plateaux de la Vallée du Niari.***

Au Bas-Zaïre, ce même type de sols a été classé, par les pédologues de l'ancien Institut d'Etudes Agronomiques du Congo belge (INEAC), comme "Kaolisol" (CAHEN et al., 196), en raison de sa très grande richesse en monosiallite de type Kaolinite (60 % de leur fraction argileuse).

### 2. ORGANISATION SPATIALE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI

Rappelons que la structure géologique de la Vallée du Niari et de ses environs immédiats est celle d'un vaste synclinal localement plissé (collines calcaires et dolomitiques)

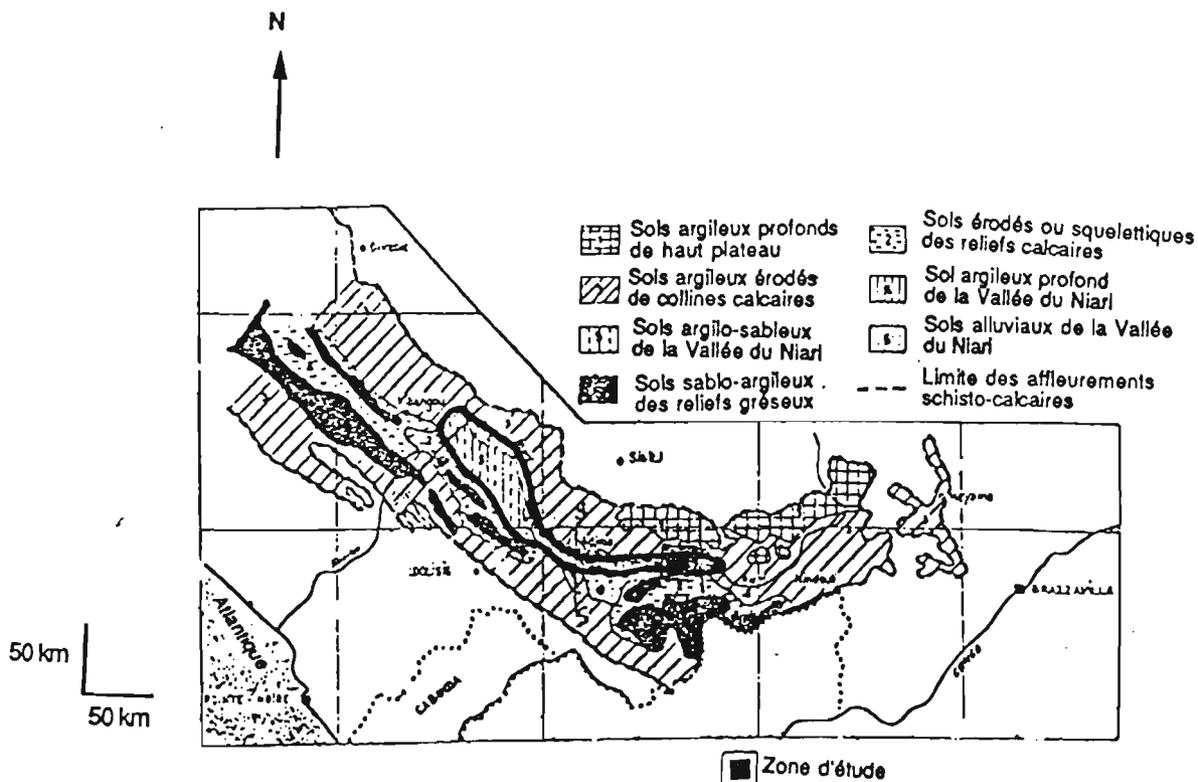


Figure II.2 a : Distribution spatiale des sols du géosynclinal Schisto-calcaire, entre Loudima et Loutété (Source GUILLEMIN et al., 1959)

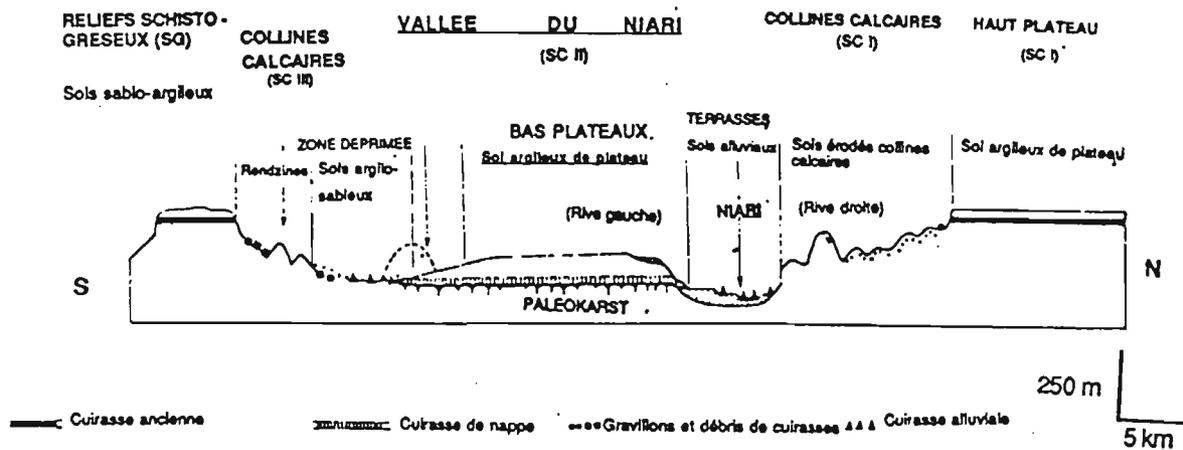


Figure II.2 b : Coupe schématique, N.S., du géosynclinal Schisto-calcaire, entre Loudima et Loutété (Source GUILLEMIN et al., 1959)

et dont l'axe est souligné par un aplanissement appelé Vallée du Niari. Le cours moyen du fleuve Niari est ici entaillé dans les couches dures du Schisto-calcaire inférieur (SC I).

Ainsi, en raison à la fois des faibles pendages du Schisto-calcaire et d'une altération intense et profonde des calcaires et des marnes du niveau moyen (SC II), la morphologie de surface des interfluves est celle d'une succession de plateaux: les plateaux de Mantsoumba, de Madingou, de Télémine, de Loudima et de la plaine de la Dihéssé etc...

Le relief quasi horizontal de ces bas plateaux (200 m d'altitude en moyenne) c'est-à-dire l'essentiel de la Vallée du Niari, est cependant marqué par (figure II.2 b):

- **une série de petits talus d'un mètre environ de haut, qui limitent localement de vastes polders en glacis**, soit en bordure de plateau, au Nord (BERTRAND et MAPANGUI, 1980), soit en piedmont des reliefs schisto-gréseux, au Sud (RAUNET, 1982). Ces glacis ou plateaux se distinguent en:

+ Plateaux à drainage interne moyen à médiocre, qui se situent au Sud, en piedmont des reliefs schisto-gréseux. Le sol de ce type de glacis, développé sur des roches tendres marno-gréseuses, est un sol ferrallitique acide, jaune, de texture limono-argilo-sableuse.

+ **Plateaux à drainage interne rapide, qui occupent les deux tiers de la Vallée du Niari** (150 000 ha en moyenne). Le sol de ce type de glacis, développé sur roches calcaires et mameuses, est un sol ferrallitique jaune, acide et argileux. La percolation des eaux de pluies dans ce sol est extrêmement rapide, en raison de la capacité d'absorption et de la perméabilité qui y sont importantes: en période pluvieuse, quelle que soit l'intensité des précipitations, l'eau ne stagne pas en surface et n'engorge pas longtemps le sol sous savane spontanée ou sous la plupart des cultures. C'est cette **qualité physique essentielle**, qui fait la particularité de ce sol très argileux et qui le distingue nettement de l'unité pédologique précédente.

- **un réseau de bas-fonds et de dépressions**, plus ou moins marécageuses ou hydromorphes, qui occupent une faible partie des plateaux de la Vallée du Niari. Ces dernières **correspondent à des dolines karstiques** plus ou moins anastomosées.

Le passage des plateaux aux plaines alluviales du fleuve Niari et de certains de ses affluents se fait généralement par un talus d'une trentaine de mètres de dénivellée, qui est occupé par des sols ferrallitiques tronqués par l'érosion.

La plaine alluviale, comme nous l'avons déjà décrit au chapitre I, est très localisée et est constituée par de lambeaux de terrasses supérieures moyennes et inférieures qui sont occupés par des sols alluviaux graveleux ou sablo-argileux.

## **C. MISE EN VALEUR DE LA VALLEE DU NIARI**

### **1. UTILISATION AGRICOLE DU SOL FERRALLITIQUE ACIDE ET ARGILEUX DE LA VALLEE DU NIARI**

#### **a. ACTIVITES DE RECHERCHES**

Elles concernent essentiellement les travaux scientifiques, menés entre 1949 et 1964, qui ont marqué l'aboutissement de quinze années d'efforts en indiquant quelques solutions retenues pour les problèmes d'actualité.

"Il a d'abord été prouvé expérimentalement ce que les expériences malheureuses des colons avaient mis en évidence mais qu'il importait de vérifier. La dénudation ou non-couverture du sol pendant une année et demie produit le même effet de détérioration que six cultures consécutives de l'arachide" (Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari, 1965).

En dehors de la canne à sucre, l'arachide étant, à cette époque, la seule production assurée d'un marché, il était indispensable de pouvoir atténuer les risques de dégradation physique et chimique des sols résultant de sa culture continue et fortement mécanisée en introduisant, dans un assolement, les plantes fourragères qui couvrent mieux le sol. Mais l'emploi de tels engrais verts (maïs, sorgho, *Tithonia* et *Mucuna*) a été ensuite abandonné car leur effet était très fugace.

Dans ces sols ferrallitiques profonds du Niari, s'acidifiant et s'appauvrissant rapidement en humus et en bases échangeables, il était intéressant d'expérimenter les plantes à enracinement profond: le *Stylosanthes gracilis*, avec une valeur fourragère comparable à celle de la luzerne et supportant 1 à 2 têtes de bovins par hectare, a été préféré, après essai, au pois d'angle couvrant mal le sol.

Pour combattre la toxicité manganique (et aluminique) consécutive à l'acidification de ces sols, des doses de 3 à 6 tonnes/hectare de calcaire broyé (exploitable dans tout le synclinal schisto-calcaire du Niari) ont été recommandées dans le cas des sols ayant des pH inférieurs à 4,5. De tels apports importants d'amendement calcique avaient une action immédiate sur le rendement/hectare des arachides.

*En ce qui concerne les problèmes de mécanisation du travail du sol, les recherches ont abouti aux propositions suivantes:*

- *travail suffisant pour assurer les meilleures conditions de végétation sans*

*dégradation;*

*- prix de revient le plus réduit possible, en limitant le nombre de passages des engins dans une même parcelle;*

*- simplification des opérations culturales et des outils mécaniques...*

Pour les opérations superficielles, le pulvériseur lourd à disques crantés (rome-plow), ne retournant pas le sol (donc n'enterrant presque pas la mince couche superficielle active) donnant de meilleurs résultats, que des engins à disques, a été retenu. Les engins de ce type étant en fait polyvalents sont également utilisables pour les défrichements de la savane et les travaux d'amélioration des pâturages naturels ou cultivés.

Par ailleurs, à cause des cultures mal conduites, des milliers d'hectares ont été envahis par les plantes adventices: *Carex, Mimosa, Imperata cylindrica...*

Du point de vue agro-pédologique, les travaux effectués par les pédologues de l'O.R.S.T.O.M. dans la Vallée du Niari montrent que de nombreux résultats ont été mis en évidence:

- dès l'ouverture de la savane, la lixiviation chimique entraîne des modifications profondes dans l'état physique et le statut biologique des sols. De telles transformations importantes entraînent une nette diminution du niveau de fertilité naturelle;
- l'aération du profil cultural qui en résulte "entraîne une prolifération microbienne responsable de phénomènes de minéralisation intense.

Dans ce milieu acide désaturé, les complexes humus-fer ou humus-cations bivalents sont entraînés par lessivage en profondeur d'où une altération profonde des qualités de la couche de terre superficielle; qualité d'agrégation, de déficit hydrique, de capacité de fixation , etc..." (Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari, 1965).

L'importance du drainage et de ses effets, en fonction de l'époque de l'année (plus abondant, en fin de saison de pluies), sur la lixiviation des éléments solubles, dépendent strictement de la qualité de la couverture du sol.

*Bien que les principaux résultats aient permis de proposer des moyens de lutte encourageants, les mécanismes de ce processus de dégradation du sol cultivé n'ont pu être, jusqu'à maintenant, étudiés de façon approfondie. Par ailleurs, les solutions préconisées n'ont été que très partiellement ou parfois même mal appliquées dans les exploitations.*

## **b. UNITES AGRO-INDUSTRIELLES ET "PAYSANNATS"**

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, tout l'effort de développement rural du Niari s'est porté sur la Vallée; à l'exception de l'installation éphémère (à Malolo) de la Société

des Fibres et du Coton (SO.FI.CO.) du seul colon opérant au Nord-Ouest de Loudima et du paysannat de la route de Mbomo, la Boucle du Niari (qui par ailleurs se vidait) est demeurée sans initiatives importantes.

A partir de 1955, la Vallée du Niari était déjà le théâtre d'une "expérience agricole grand style" (SAUTTER, 1966). En effet, jusqu'à 1947, "la colonisation n'était que le fait de rares individus ou entreprises isolés, mais, à partir de cette date, on pouvait parler d'un "rush" sur la Vallée" (Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari, 1965).

C'est ainsi que toutes sortes de techniques ont été expérimentées, aussi bien dans les stations de recherches, dans les fermes de colons que dans les sociétés d'Etat (la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux, par exemple).

Mais déjà en 1955, l'avenir de la culture intégralement mécanisée et continue de l'arachide, paraissait incertain (sur les deux premiers cycles de culture on avait environs 2 tonnes/hectares, donc loin des 2,5 à 3 t/ha escomptés et jugés rentables), et des activités de remplacement étaient déjà préconisées, tout en renonçant, du coup, à tirer partie de toutes les immenses surfaces disponibles:

- la culture de la canne à sucre avec la création de la Société Industrielle et Agricole du Niari (S.I.A.N.) à Jacob;
- l'élevage des bovins en se basant sur la technique du ranching (troupeaux en semi-liberté);
- l'exploitation forestière des régions environnantes pour maintenir un certain équilibre entre la Vallée et le reste du Bassin du Niari;
- le développement de "paysannats" semi-mécanisés (décidé en Janvier 1953, lors de la première réunion du Comité d'Aménagement de la Vallée du Niari), devrait faire bénéficier les villageois les plus entreprenants des possibilités offertes par la mécanisation et leur procurer aussi une assistance sur le plan agronomique.

Deux formules étaient en vigueur: d'une part, "paysannats d'entreprise (sorte de métayage entre entreprises européennes et les familles de certains salariés), à l'initiative des colons et d'autre part, "paysannats" collectifs (initiative à caractère mutualiste), entreprise, en fin 1961, par la Société d'Aménagement de la Vallée du Niari (S.A.V.N.), elle-même société coopérative. Au même titre, une action a été entreprise par le Service d'élevage pour implanter l'élevage bovin en milieu paysan.

"Faute d'avoir su mettre sur pied la culture mécanique intégrale, les entreprises européennes ont accéléré cette évolution qui accroît leurs difficultés" (Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari, 1965): plusieurs anciens salariés, recrutés au loin, s'établissent à leur propre compte, engendrant ainsi une opposition d'intérêts entre les deux parties prenantes...

En 1966, SAUTTER fait le point de la mise en valeur de la vallée du Niari à cette date, des résultats acquis et des difficultés qui restent à vaincre:

- en ce qui concerne la faillite de la culture intégralement mécanisée, "il serait parfaitement vain d'incriminer le milieu naturel: celui-ci réunissait un ensemble de conditions satisfaisantes tel qu'on en rencontrait difficilement l'équivalent dans le reste de l'Afrique tropicale. On avait en réalité trop fait crédit aux machines... A vouloir de la "culture soignée" en pensant que le sol rendrait en proportion du travail reçu..., dans la Vallée, on s'est enfoncé davantage. Ce dont le sol avait besoin, c'est d'être protégé, entretenu, réenrichi, faute de quoi les meilleures "façons" culturelles ne pouvaient qu'en hâter la destruction (SAUTTER, 1966).
- en ce qui concerne les perspectives à venir, il constate que "le remue ménage dont la "Vallée aux mille espoirs" (écrivain congolais Jean MALONGA, 1958), est le théâtre depuis une quinzaine d'années, l'exemple donné par les exploitations européennes, les salaires distribués, l'activation sociale, l'équipement de la région, tous ces facteurs étroitement imbriqués ont fini par entraîner les Congolais, d'abord tenus en marge de la "mise en valeur" officielle...

Mais il faudrait pouvoir combler tant soit peu le fossé qui sépare les fermes paysannes des entreprises de colonisation, et assurer en tout état de cause la perpétuation des techniques agricoles et pastorales si laborieusement mises au point (SAUTTER, 1966).

Cependant en 1966, trois ans après la rédaction de cette conclusion, l'avenir de la Vallée du Niari comportait quelques éléments nouveaux de développement: introduction de la culture attelée, sylviculture de l'eucalyptus ou des pins tropicaux, extension importante de la culture de la canne à sucre...

A partir de 1975, par la nationalisation de certaines entreprises européennes, des complexes agro-industriels et sociétés agricoles d'Etat, vont être créés, avec parfois l'introduction de cultures nouvelles, tels que le manioc à Mantsoumba, le coton puis le maïs et le paddy à proximité de Madingou.

Même s'il semble que, les recherches aient abouti à des résultats tels que l'on sache ce que l'on peut faire dans la Vallée du Niari tous les problèmes n'en sont pas résolus pour autant: mise en place d'itinéraires techniques ou de systèmes de cultures viables et conservateurs de la fertilité du milieu écologique.

### **C. AGRICULTURE PAYSANNE: DEFRICHE-BRULIS ITINERANTE**

Le système de cultures le plus répandu, dans la Vallée du Niari comme dans l'ensemble du Congo, est la défriche-brûlis qui est une agriculture itinérante, avec déplacement (et dispersion) des parcelles et alternance, sur chaque parcelle, de cultures annuelles

(arachide, maïs, pois d'angole...), associées à des plantes bisannuelles (manioc principalement), avec une jachère plus ou moins longue (3 à 10 ans), selon qu'on soit en savane ou en forêt.

Les techniques culturales sont variées et généralement assez soignées:

- sous savanes, les graminées encore assez vertes sont coupées à l'aide d'une houe, en Mai-Juin; le mulch ainsi formé se dessèche au cours de la saison sèche et n'est brûlé qu'avant les premières grosses pluies d'Octobre. Ensuite le sol est remué légèrement et le semis des cultures annuelles ainsi que le bouturage du manioc sont faits à cette même période de l'année. Sous forêt, le recépage du sous bois en Mai-Juin est suivi de l'abattage (à l'aide des haches), de la quasi totalité des arbres, mais la mise en feu n'intervient aussi qu'en Octobre avant les pluies;
- ou bien, en fin de saison sèche, après la mise à feu de la savane, les souches de graminées sont coupées à la houe et brûlées en petits tas. En Octobre, on y réalise le houage, le semis et le bouturage des plantes.

Dans la Vallée du Niari, région parmi les plus peuplées du Congo, la densité moyenne de la population est encore assez faible (< 10 ha/km<sup>2</sup>) et les ménages autochtones trouvent encore des terres disponibles.

Mais, sur le plateau de Mouyondzi, où la concentration des populations est la plus forte du pays (> 10 habitants au km<sup>2</sup>), "les ruraux ont dû faire preuve d'esprit inventif, et mettre au point des méthodes agricoles plus évoluées" (VENNETIER, 1966), telle "maala" (écobuage).

Ces techniques d'intensification de la production agricoles ont été introduites, depuis peu, dans la Vallée du Niari (entre Madingou et Loutété), par les immigrants Béembé venus des hauts plateaux de Mouyondzi. L'écobuage consiste en la préparation des billons herbacées (en Avril-Mai), avant que la savane ne se dessèche. Une fois bien secs, ils sont recouverts de terre humifère et aussitôt on met le feu qui les consume pendant quelques jours. Le semis et le bouturage se font dès les premières pluies en même temps que le désherbage des plantes adventices (*Imperata cylindrica*).

Le calendrier agricole local distingue bien le premier maximum pluvieux, correspondant au "premier cycle" (permettant les semis), à partir du 15 Octobre, la petite saison sèche en janvier ou février (favorable aux récoltes et au semis du cycle suivant), le second maximum de pluies (ou second cycle agricole), jusqu'au 15 Mai, et la grande saison sèche (le début correspondant à une période nuageuse et fraîche jusqu'au 15 Août, la seconde moitié étant marquée par un réchauffement dû au rétablissement de l'ensoleillement).

Dans le catalogue de cultures utilisées, le manioc (doux ou amer), constituant la base de l'alimentation des congolais, est la culture principale généralement associée à des cultures annuelles (arachides, maïs, légumes, poids d'angole, ignames etc...), à des densités variables selon l'importance alimentaire ou économique de chacune d'entre elles.

## D. CONCLUSION

Ici encore, comme à l'échelle du Bassin versant du fleuve Niari (chapitre I), c'est la structure géologique du substratum et sa lithologie qui expliquent directement l'origine des différentes unités morpho-pédologiques de la Vallée du Niari: plateaux-sols, dépressions-sols et bas-fonds-sols.

*Le sol ferrallitique argileux de sommet des plateaux, qui est très utilisé du point de vue agricole et qui nous intéresse dans ce travail, est le mieux représenté dans cette unité de paysage couramment appelée Vallée du Niari. Il présente par rapport aux unités environnantes les atouts suivants:*

- topographie plane;
- drainage interne rapide, en raison de sa structuration en microagrégats;
- couverture végétale constituée essentiellement de graminées, ce qui facilite la mise en valeur du milieu.

Mais la mise en valeur de la Vallée du Niari a très tôt connu de nombreux problèmes liés:

- d'une part, *aux conditions climatiques moins favorables de cette région, située pourtant à 250 km de l'Atlantique sud, mais qui est abritée par des reliefs et particulièrement par la chaîne montagneuse et forestière du Mayombe qui constitue une efficace barrière aux influences océaniques. Aussi les brûls saisonniers et les propriétés karstiques de son substratum schisto-calcaire accentuent la sécheresse du pédoclimat. Ces dernières contribuent au fort abaissement du niveau des rivières et des nappes en saison sèche, qui dure près de 4 à 5 mois dans l'année.*
- d'autre part, *à l'introduction des techniques culturales intensives et mécanisées non adaptées à ce type de milieu qui, malgré les apparences, est très fragile.*

Nous allons maintenant, dans le paragraphe suivant, rappeler succinctement l'histoire de la mise en valeur agricole de la Vallée du Niari, particulièrement des problèmes

agronomiques auxquels elle s'est confrontée. Dans ce même chapitre nous allons aussi donner la caractérisation du site de l'expérimentation agronomique dans lequel nous avons échantillonné notre matériel de travail.

Les conséquences directes de l'utilisation agricoles des sols de la Vallée du Niari varient selon le type d'agriculture.

Dans l'agriculture paysanne la rapide perte de fertilité des sols est compensée par de longues jachères et le nomadisme cultural.

Dans l'agriculture intensive avec mécanisation du travail du sol et apport d'intrants agricoles, la dégradation des terres malgré cela a été à l'origine de la faillite économique des agriculteurs dès les années 50.

Des études agro-pédologiques menées dans la Vallée du Niari, dès cette époque, ont permis de décrire ou de caractériser partiellement ce phénomène (MARTIN G., 1966; BERTRAND R. et MAPANGUI A., 1980; MAPANGUI A., 1982; BRAUDEAU E., 1987...).

---

## CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La Vallée du Niari apparaît donc comme un paysage fortement anthropisé mais favorisé par:

- sa pluviométrie suffisante (> 1000 mm par an);
- sa topographie plane faiblement ondulée (plateaux résultant d'un aplanissement);
- sa végétation herbacée (savane peu arbustive);
- ses terres de plateaux de très bonne qualité physique;
- la présence des roches calcaires, source bon marché d'amendements calciques;
- de son réseau de communication important ( chemins de fer et routes);
- de sa proximité avec l'océan Atlantique Sud.

Dans un sens la Vallée du Niari a joué et va encore jouer un rôle important dans le développement du Congo, et d'un autre côté, les hommes ont contribué à modeler celle-ci de façon durable. Nous pensons, en particulier aux centres secondaires agro-industriels (sucrierie de canne, huilerie d'arachide, fabrique de farine de manioc) ou industriels (industrie du ciment et de broyage de calcaire), devenus de véritables villes secondaires, à la présence du Chemin de Fer Congo Océan (CFCO), à la Route National n° 1 et au réseau routier secondaire.

**Mais l'une des principales contraintes de la production agricole dans la Vallée du Niari, située dans la zone tropicale humide, est la pauvreté chimique et la fragilité physique de ses sols acides et argileux** qui constituent la quasi totalité des sols bien drainés.

C'est pourquoi la mise en valeur agro-industrielle intensive de cette région a abouti à la rapide perte de fertilité des sols qui s'est traduit par une chute importante des rendements des cultures et la ruine des agriculteurs qui ont pourtant eu, au départ, beaucoup de raisons pour espérer.

Malgré les essais agronomiques, qui ont été menés entre 1949 - 1964 et qui ont marqué l'aboutissement de quinze années d'efforts scientifiques, les solutions proposées n'ont été que très partielles et sont arrivées un peu tardivement.

***Ainsi, cette véritable "charrue devant les boeufs", dans la "Vallée de mille espoirs", s'est plantée dès les années 50.***

L'étude de nombreux travaux de recherches agronomiques réalisés dans la Vallée du Niari, montre que, sans nier leur valeur, ces expériences n'ont abouti qu'à des conclusions parfois trop partielles. En effet, les études, qui ne se sont guère intéressées qu'aux 20 cm supérieurs du sol sous culture et sans sol témoin de départ sous savane, ont surtout concerné l'évolution de l'état chimique et de la stabilité structurale des sols.

Ainsi donc l'étude de l'évolution des propriétés physiques des sols mis en culture mécanisée, par rapport au sol témoin sous savane, a été beaucoup moins réalisée, certainement en raison des problèmes méthodologiques que leur étude soulève.

*C'est pourquoi notre présent travail se veut être une première contribution à l'analyse des modifications des propriétés physiques du sol ferrallitique argileux de Vallée du Niari au Bas Congo, consécutives à sa mise en culture intensive et mécanisée.*

Nous allons maintenant, dans la deuxième partie, caractériser le sol témoin sous savane et mettre évidence les modifications de ses caractéristiques chimiques et physiques dues à la culture fertilisée et mécanisée de manioc.

---

## DEUXIEME PARTIE

### MATERIEL, METHODES ET CARACTERISATION DE L'EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE

*Après la présentation de la Vallée du Niari dans son environnement morpho-pédologique (première partie), il s'agit, dans cette deuxième partie, de préciser l'origine des échantillons étudiés, les principales caractéristiques du site expérimental, des horizons dont ils sont issus: caractérisation du sol témoin sous savane et de son évolution sous culture mécanisée de manioc. Quant aux méthodes utilisées, nous indiquerons, pour chacune d'entre elles, l'objectif visé et les conditions d'utilisation.*



## INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'étude des propriétés physiques de matériaux pédologiques argileux est complexe, car elle consiste généralement en une appréciation de la répartition de l'eau et de l'air dans les pores, de l'énergie de rétention de cette eau, ainsi que de l'évolution de la géométrie de l'espace poral en fonction de l'état hydrique du milieu.

Il s'agit donc de choisir des méthodes d'étude qui permettent d'analyser l'évolution des propriétés physiques d'un sol ferrallitique argileux en fonction de son état d'hydratation (chapitre III).

Ensuite, nous allons, dans le chapitre IV décrire le dispositif expérimental, puis dans le chapitre V étudier les principales caractéristiques du sol de référence sous savane, enfin dans le chapitre VI mettre en évidence, les modifications dues à la mécanisation de ce sol.

---



## **CHAPITRE III**

### **METHODES D'ETUDE PHYSIQUE D'ECHANTILLONS DE SOL NON PERTURBES**

---

*Nous préciserons, dans ce chapitre III, d'abord les modalités d'échantillonnage et de conservation d'échantillons, puis indiquerons, pour chacune des méthodes d'étude le principe de base des mesures et les modalités de mise en oeuvre.*

## A. METHODE

Notre but est avant tout d'étudier, en laboratoire, des échantillons de sol non perturbés afin de mieux comprendre les propriétés physiques in situ. Des profils culturaux, sous culture mécanisée de manioc, seront comparés au sol témoin sous savane, afin d'en montrer les transformations structurales.

L'étude de la réorganisation du sol reposera sur *l'analyse physique*, et *l'analyse morphologique*.

*L'approche physique* est basée sur les courbes de retrait (BRAUDEAU, 1988, 1989 a et b), les courbes de potentiel de l'eau et les courbes de porosimétrie à mercure.

*L'approche morphologique* est rendue possible par l'utilisation, à l'INA-Grignon, d'un équipement d'analyse d'images, doté du logiciel Visilog. Pour ce faire, il nous a fallu d'abord fabriquer, à partir d'échantillons préparés à différents potentiels de l'eau, des lames minces des échantillons cylindriques standards du sol en utilisant une résine fluorescente aux UV.

Pour l'étude des échantillons au laboratoire:

- des cylindres de sols non perturbés ont été conservés au frais;
- les techniques de déshydratation ont eu pour but de limiter au minimum les modifications de l'espace poral.

L'originalité de notre approche a consisté aussi à rapporter dans un système de présentation unique les données relatives au volume des différentes phases du sol (solide, air et eau). Cette expression des résultats en volume spécifique (ou volume massique), permet de différencier les niveaux d'organisation du sol susceptibles d'être atteints par les modifications dues aux contraintes climatiques et/ou culturelles.

## B. ECHANTILLONS DECIMETRIQUES DE SOL NON PERTURBES

On sait que les conditions de prélèvement des échantillons et de leur conservation peuvent être à l'origine de changements de l'état physique des matériaux d'étude.

Les données expérimentales utilisées dans notre travail ont été obtenues en dessiccation. Il a été nécessaire de respecter certaines conditions d'échantillonnage et de conservation d'échantillons dont la structure interne est conservée.

### 1. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SOL NON PERTURBES

Le prélèvement a été effectué, en sol humide (proche de la capacité au champ), à l'aide d'un appareillage (Soil Moisture), particulièrement adapté pour des prélèvements dans

des sols meubles d'échantillons pédologiques non perturbés. Cet équipement est constitué d'un carottier avec un "container" d'anneaux, d'une masselotte et d'anneaux en laiton (100 cm<sup>3</sup> environ) (planche III.1). Le carottier est enfoncé, par à coups à l'aide d'une masselotte. Le bord tranchant découpe le cylindre de sol qui rentre sans frottement dans l'anneau de diamètre légèrement supérieur, à l'intérieur du carottier.

Sur chaque parcelle étudiée, dans un profil pédologique ou cultural ouvert récemment et décrit au préalable, trois échantillons cylindriques de sol ( $d = 5,6$  cm et  $h = 3$  cm), ont été extraits **verticalement dans chaque horizon**, sur des "marches d'escalier".

## 2. CONSERVATION DES ECHANTILLONS DE SOL NON PERTURBES

Les échantillons ainsi prélevés ont été transportés et stockés, en restant contenus dans des anneaux hermétiquement fermés par des couvercles en matière plastique, renforcés par un ruban adhésif imperméable aux fluides. Les échantillons ont ensuite été mis dans des sachets plastiques et rangés bien serrés dans des caisses en bois ou dans des malles.

Au laboratoire, les échantillons ont été conservés humides dans une salle climatisée ou dans un frigidaire.

## C. DESHYDRATATION ET IMPREGNATION DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL NON PERTURBES

### 1. RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE ET LIMITES DE LA METHODE

Les résines utilisées en vue de la fabrication de lames minces ou de sections polies ne sont pas miscibles dans l'eau.

La dessiccation de tout matériau argileux, c'est connu, provoque, en outre, un retrait plus ou moins important avec apparition de fissures. L'état structural des échantillons étudiés à sec risque donc d'être très différent de celui des échantillons hydratés.

Plusieurs méthodes, de déshydratation et d'imprégnation de matériaux argileux permettant de préserver la géométrie des pores, ont été décrites dans la littérature (MORAN et al., 1988). Nous allons rappeler brièvement quelques unes d'entre elles:

- Dessèchement à l'air: c'est un mode de déshydratation qui dans le cas de matériau argileux peut altérer la microstructure des argiles et affecter les pores de  $R_{eq} > 1$  nm environ, ce qui a généralement pour conséquences de provoquer une fissuration macroscopique.
- Cryodessiccation: du fait du refroidissement par la périphérie des échantillons, la croissance de cristaux peut modifier l'espace poral, particulièrement au centre

de l'échantillon (TESSIER et BRUAND, 1987). Par ailleurs, elle ne serait pas une méthode indiquée pour déshydrater des sols riches en sels solubles (KOOISTRA, 1979).

- Déshydratation des échantillons pédologiques par différents solvants organiques ou minéraux (figure III.1): son principe consiste à remplacer l'eau de l'échantillon par un liquide miscible, tout en évitant que les forces capillaires viennent perturber l'organisation du sol. Elle a été utilisée par plusieurs auteurs (BRINDLEY et *al.*, 1969; CASAL and RUIZ-HITZKY, 1986; GREENE-KELLY, 1973; MURPHY, 1985; SAX, 1975; WINDHOLZ et *al.*, 1983; FRITZPATRICK et *al.*, 1990; MIEDMA et *al.*, 1974). Les effets des différents solvants montrent que l'acétone augmente, de quelque peu, le volume poral de l'argile, surtout à de faibles concentrations (MORAN et *al.*, 1988), tandis que le dioxane 1,4 et la morpholine maintiennent plus constant le volume et la géométrie des vides du sol. Mais cependant, ils sont très inflammables, et dégagent en s'oxydant des vapeurs nocives.

La déshydratation des échantillons pédologiques reste donc une opération délicate.

**Dans notre travail, c'est la méthode permettant, en flux continu, l'échange eau-acétone puis acétone-résine (SPURR, 1969), que nous avons retenue, pour fabriquer, à différents potentiel de l'eau (pF 0, 3 et 4), des lames minces orientées verticalement**

## 2. MODE OPERATOIRE

Des cylindres de sols conservés au frais dans des anneaux ont été amenés à saturation sur des plaques poreuses, en 48 heures. Ils ont été ensuite équilibrés, dans le dispositif de Richard, aux pF 3 et 4. Les échantillons ont été ensuite placés, munis de leurs anneaux mais sans leurs couvercles, dans le dispositif permettant l'échange eau-acétone et la substitution acétone-résine.

Le dispositif d'imprégnation, à l'INA-Grignon, permet de réaliser une substitution lente et progressive de l'eau des échantillons par de l'acétone, puis par un mélange de résine polyester et de monostyrène (SPURR, 1969) auquel on a ajouté un produit fluorescent au rayonnement Ultra Violet (Uvitex) (Figure III.1). On peut ainsi distinguer les pores des quartz en réflexion (épiscopie) sur sections polies.

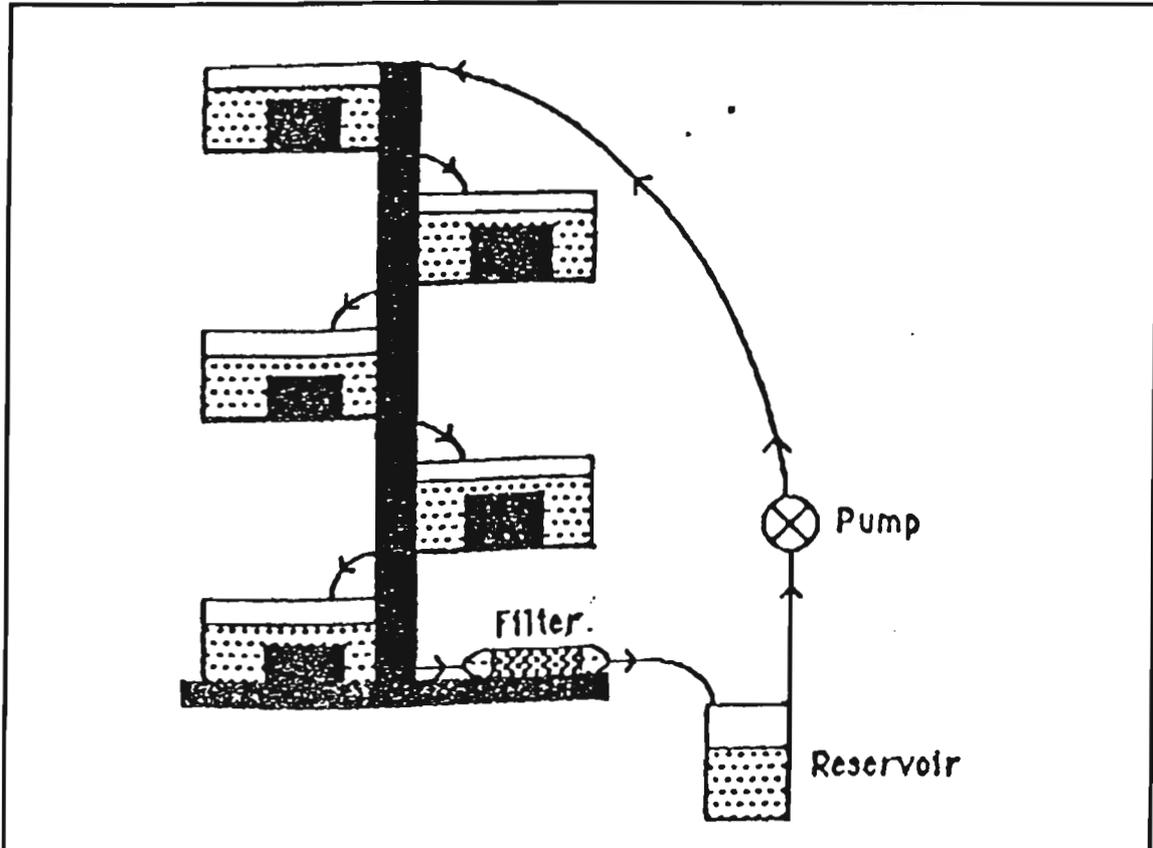


Figure III.1: Echange eau-acétone-résine, en flux continu, pour la déshydratation et l'imprégnation d'échantillons de sol non perturbés (Source: MORAN et al., 1988)

Le dosage du catalyseur permet de contrôler la polymérisation, pour obtenir un durcissement lent (4 semaines minimum), afin d'éviter une trop forte rétraction volumique de la résine susceptible d'entraîner des modifications importantes de la géométrie de l'espace poral.

Après passage à l'étuve, pour parfaire le durcissement (24 h à 40°C), on peut découper dans les échantillons indurés des plaquettes de quelques millimètres d'épaisseur pour le façonnage des lames minces (GUILLORE, 1980), et/ou des sections polies.

Enfin, d'autres sections polies ont été fabriquées, à l'INRA de Versailles, dans des cylindres de sol préalablement séchés à l'air, puis à l'étuve à 40°C et imprégnés sous une pression de 1,5 MPa, par la même résine polyester contenant aussi de l'Uvitex (HARTMANN, 1991). Cette seconde méthode, plus rapide, n'a été appliquée qu'aux échantillons séchés à l'air.

*Lames minces et sections polies ont permis l'observation micromorphologique "classique" de la nature et de l'organisation des constituants du sol (analyse qualitative), ainsi que l'analyse morpho-mathématique de l'espace poral à l'aide du logiciel Visilog (analyse quantitative).*

## D. MESURES PHYSIQUES: CHOIX D'UN SYSTEME DE REFERENCE

### 1. OBJECTIF DE L'APPROCHE MASSIQUE

De nombreux travaux ont montré que l'application des contraintes quelconques à un sol ou à un matériau argileux se traduisait par un transfert de matière qui concerne essentiellement les phases liquides et gazeuses (TESSIER, 1984). Ce transfert de matière aboutit, et particulièrement pour les sols argileux, à une modification du volume apparent des échantillons.

Ainsi, l'étude de l'organisation du sol doit s'appuyer sur une caractérisation précise de la répartition des différentes phases constitutives au sein du volume considéré (figure III.2), ceci afin de comparer, de façon satisfaisante, les différents échantillons pédologiques étudiés.

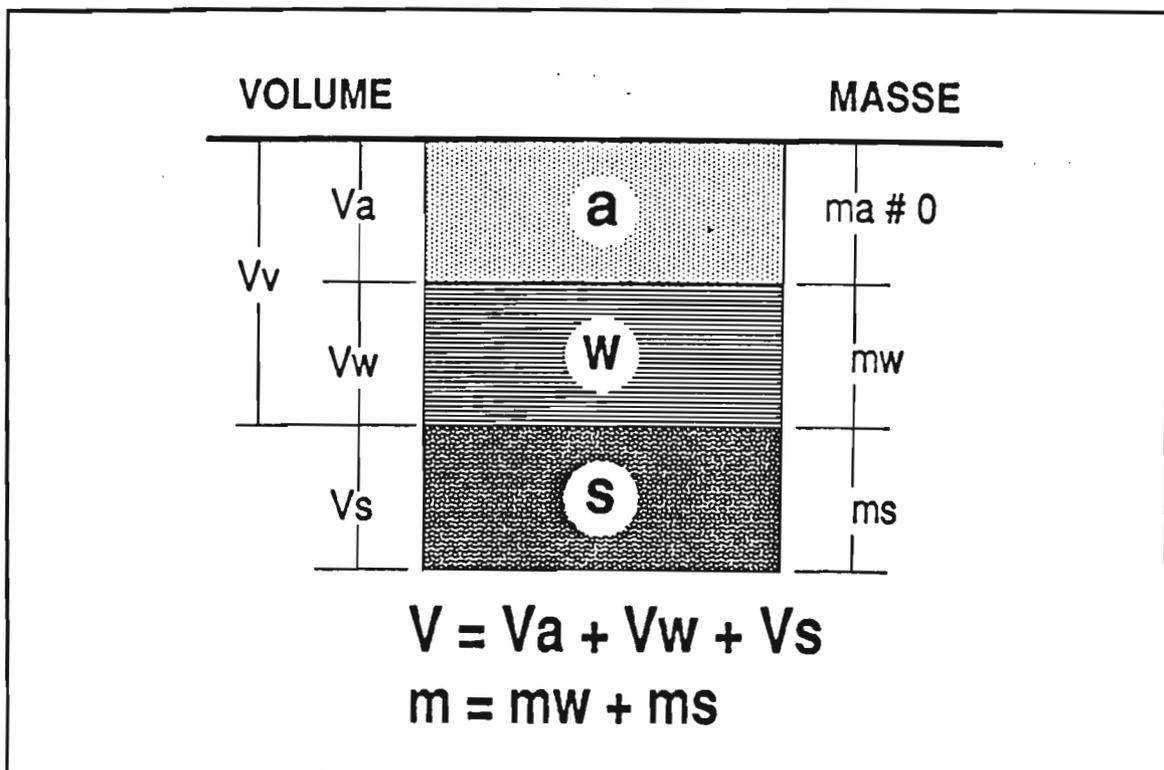


Figure III.2: Représentation schématique des relations volumiques et massiques entre les trois phases du sol: particules solides (s), eau (w) et air (a) (ANGULO, 1989)

### 2. PRESENTATION DU SYSTEME DE REFERENCE UTILISE

En raison de la simplicité de mesure de la masse sèche de solide ( $M_s$ ), d'une part, et de la difficulté d'atteindre la valeur du volume de solide ( $V_s$ ) correspondant à l'état anhydre de l'argile du sol, la référence à la masse sèche de solide permet de comparer les résultats

relatifs aux variations du volume global des échantillons et de leur volume poral en fonction de la teneur en eau pondérale.

A partir de là, il est possible de rapporter le volume total d'un échantillon de sol ainsi que les volumes partiels de ses trois phases (solide, liquide et gazeuse) à l'unité de la masse sèche de solide.

De ce fait, les volumes de solide, d'eau et d'air rapportés à la masse sèche de solide sont des *données additives*; sachant que la masse de l'air est très négligeable, le volume spécifique global ( $v$ ) du sol s'écrit:

$$\begin{aligned} v &= V/M_S \\ &= (V_S + V_W + V_A)/M_S \\ &= v_S + v_W + v_A \\ &= v_S + v_V \quad \text{où:} \\ v_S &\text{ - volume spécifique de solide} \\ v_W &\text{ - volume spécifique de l'eau} \\ v_A &\text{ - volume spécifique de l'air} \\ v_V &\text{ - volume spécifique de vide} \end{aligned}$$

En effet, en raison du modèle de retrait-gonflement tridimensionnel isotrope d'un sol, on suppose que la masse des particules solides ( $M_S$ ), contenue dans un volume donné d'un échantillon de sol ( $V$ ), ne varie pas au cours du temps.

Dans notre étude, la référence massique utilisée correspond à un chauffage à 105°C pendant 24 heures, qui permet notamment pour les kaolinites, d'éliminer l'eau d'hydratation liée aux cations (<150°C).

### 3. NOTATIONS UTILISEES

Les symboles utilisés dans ce travail sont les suivants:

- M: Masse total d'un échantillon
- M<sub>S</sub>: Masse de solide
- M<sub>w</sub>: Masse d'eau
- M<sub>a</sub>: Masse d'air
- V: Volume total d'un échantillon
- V<sub>S</sub>: Volume des particules solides
- V<sub>w</sub>: Volume de la phase liquide (eau)
- V<sub>a</sub>: Volume de la phase gazeuse (air)
- ρ<sub>d</sub>: Masse volumique sèche
- ρ<sub>S</sub>: Masse volumique des particules solides
- v: Volume massique (ou spécifique) d'un échantillon

$v_s$  : Volume massique (ou spécifique) de solide  
 $v_w$  : Volume massique (ou spécifique) d'eau  
 $v_a$ : Volume massique (ou spécifique) d'air  
 $v_v$ : Volume massique (ou spécifique) de vides  
A, B, C, E et F: Points particuliers de la courbe de retrait  
 $K_1$ : Constante de retrait ou pente de la phase F - E  
 $K_2$ : Constante de retrait ou pente de la phase C - B  
 $K_3$ : Constante de retrait ou pente de la phase au-delà de A  
 $V_{vmi}$ : Volume microporal  
 $\Delta V$ : Variation de volume massique du sol  
 $\Delta V_w$ : Variation du volume massique d'eau de l'échantillon  
t: temps  
 $P_o$ : Poids de l'échantillon  
 $P_n$ : Poids du néoprène  
 $P_s$ : Poids sec de l'échantillon  
d ou  $\varnothing$ : Diamètre de l'échantillon proche de la saturation  
 $d_f$ : Diamètre final de l'échantillon à la fin du retrait  
H: Pression capillaire de l'eau  
h: hauteur de l'échantillon  
 $h_o$ : hauteur initiale du mercure dans le capillaire  
P: Pression  
 $P_a$ : Pression atmosphérique  
kPa: kilo Pascal  
 $\gamma$ : Tension superficielle du liquide (eau ou mercure) dans un pore  
D: Dimension fractale de la structure du sol  
RX: rayon X  
UV: Ultra Violet  
W: watt  
p: Périmètre linéaire de pores  
l: Intercept  
 $l_f$ : Indice de forme de pores  
 $a_r$ : aire ou surface de pores  
 $R_{eq}$ : Rayon équivalent de pores  
 $\alpha$  Angle de raccordement du ménisque avec la paroi du pore  
 $\text{Log } R_{eq}$ : Logarithme décimal du rayon équivalent de pores  
 $\sigma$ : Ecart-type de la variable  
CV: Coefficient de variation

## **E. ORGANISATION DU SOL ET DE L'ARGILE DU SOL**

Pour connaître l'organisation du sol, il est intéressant d'aborder simultanément l'étude de l'arrangement, aux échelles macroscopique et microscopique, des constituants solides qui le constituent et celle de la géométrie de l'espace poral qui en résulte (CHAUVEL, 1977; CRECY, et *al.*, 1979; BRESSON, 1981 b, 1987; van OORT, 1984; CHRETIEN, 1986, 1987; CAMBIER, 1986; BEAUDOU et *al.*, 1987; COULON, 1988; KILASARA, 1990; ROMEO, et *al.*, 1991; HARTMANN, 1991).

### **1. ORGANISATION DES MOTTES DE SOL, EN MICROSCOPIE OPTIQUE**

Des lames minces confectionnées à partir de cylindres ( $d = 5,6$  cm;  $h = 3$  cm) de sols déshydratés et imprégnés de résine fluorescente aux rayons UV ont permis:

- d'une part, d'étudier l'arrangement des constituants solides par reconnaissance des phases naturelles et structurales en microscopie optique en utilisant la terminologie de BREWER (1964);
- d'autre part, de mesurer le spectre macroporal à l'aide des méthodes morpho-mathématiques utilisant l'analyse d'images de sol. Le détail de cette méthode est donné au chapitre suivant.

### **2. ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL**

#### **a. A L'ECHELLE MICROSTRUCTURALE, EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE, EN RETRODIFFUSION**

L'organisation microstructurale de la phase argileuse a été faite en microscopie électronique à balayage avec émission d'électrons rétrodiffusés.

L'émission de rétrodiffusion varie en fonction du numéro atomique  $Z$  des différents constituants (minéraux et organiques) du sol, ainsi que de la résine d'imprégnation de lames minces de sols ou de roches.

L'intensité ou le niveau de gris de chaque image obtenue dépend alors des coefficients de rétrodiffusion pondérés des constituants observés.

L'émission d'électrons rétrodiffusés présente l'avantage de pouvoir visualiser, sur lames minces polies, simultanément le réseau poreux, la distribution des constituants et leurs formes.

L'appareillage que nous avons utilisé est un MEB Philips SEM équipé d'un détecteur d'émission électronique secondaire ou émission de rétrodiffusion (BISDOM et *al.*, 1981; CHRETIEN et *al.*, 1983; FIES et *al.*, 1990).

Nous avons pu obtenir des images numériques binaires (en deux niveaux de gris de 0 pour le noir et 1 pour le blanc).

Chaque image observée occupe une surface représentée par 150 pixels environ ( $5 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>2</sup> de la taille de l'échantillon).

#### **b. A L'ECHELLE ULTRASTRUCTURALE, EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION, A BASSE ET MOYENNE RESOLUTION**

L'étude de l'organisation ultrastructurale de la phase plasmique du sol a été faite sur de très petits agrégats ( $d \leq 50 \mu\text{m}$ ) obtenus par fractionnement après échange eau-méthanol, séchage et tamisage sur une colonne de tamis (maille allant de 10 mm à 50  $\mu\text{m}$ ). Les agrégats ainsi obtenus ont été ensuite préparés suivant le protocole développé par TESSIER (1984):

- les échantillons préalablement équilibrés à une pression hydrique constante de 32 hPa ( $p_F 1,5$ ) ont été soumis successivement à des échanges eau-méthanol, puis méthanol-oxyde de propylène et enfin oxyde de propylène-résine Spürr de basse viscosité. Cette technique permet d'assurer la pénétration de la résine dans les espaces intercrystallites et favorise l'imprégnation de l'échantillon sans en perturber l'organisation générale (TESSIER, 1984);
- les échantillons imprégnés et inclus dans les blocs de résine sont ensuite polymérisés dans une étuve thermostatée à 60° C pendant 24 heures;
- des coupes ultraminces de 50 nm d'épaisseur ont été préparées avec un ultramicrotome Reichert équipé d'un couteau de diamant.

Les observations ont été réalisées, au centre INRA de Versailles, à l'aide d'un microscope électronique à transmission Philips STEM, à basse résolution (MET) avec grossissement de 4900 et à moyenne résolution avec grossissement de 31000.

## **F. VARIATION DE VOLUME DU SOL EN FONCTION DE SA TENEUR EN EAU: COURBES DE RETRAIT DE CYLINDRES DE SOL**

Dans l'analyse de propriétés physiques, l'étude du retrait-gonflement du sol permet de connaître la relation qui lie la variation du volume de l'échantillon à celle du volume d'eau:  $\Delta V$  ( $\Delta w$ ).

Ce type de recherche n'est pas nouveau en pédologie (HAINES, 1923; LAURITZEN, 1948; STIRK, 1954; QUIRK et *al.*, 1962; WHITE, 1962; HENIN et *al.*, 1964; SPOSITO et *al.*,

1976; STENGEL, 1979, 1981; GRIMALDI, 1981, 1986; TESSIER, 1984; TESSIER *et al.*, 1979, 1980; CHAN, 1982; MULLINS *et al.*, 1984; BRUAND, 1985; McGARRY *et al.*, 1987, 1988; VOLTZ *et al.*, 1988; HALLAIRE, 1988 a et b; ZELER *et al.*, 1988).

Mais la mesure du retrait n'avait pas encore fait l'objet d'une étude en continu comme on peut le faire en rétractométrie (BRAUDEAU, 1988).

## 1. RAPPEL DE LA MODELISATION DE LA COURBE DE RETRAIT, MODELE CONTINU

Si la courbe de retrait représente la variation de volume du sol en fonction de la teneur en eau, celle-ci permet surtout de connaître les points particuliers des différentes phases du retrait et donc de repérer les coordonnées et les paramètres de la courbe de retrait.

D'après les résultats de BRUAND (1985) et BRAUDEAU (1988) la courbe de retrait d'un sol présente généralement la forme d'une sigmoïde. De nombreux auteurs ont cherché à modéliser cette courbe (figure III.3 a). A cet effet, on distingue trois phases principales dans le retrait des sols (figure III.3 b):

- un **retrait macroscopique**, qui correspond à la première phase du retrait, est encore appelé "retrait structural" (McGARRY, 1988);
- un **retrait de grande ampleur** est aussi désigné "**retrait normal**" pour de petits agrégats (McGARRY, 1988). Quand c'est le cas, tout départ d'eau entraîne un changement de volume identique. Comme pour les mottes de taille décimétrique, le retrait est souvent loin du caractère normal, nous désignerons ce dernier "**textural**", car son importance dépend de la teneur et de la nature de la phase argileuse du sol étudié;
- enfin un **retrait résiduel** lorsqu'on élimine la dernière fraction d'eau d'hydratation du matériau.

L'intérêt du modèle développé par BRAUDEAU est d'analyser chaque phase majeure du retrait en affectant les trois parties linéaires de la courbe de coefficients ou pentes de retrait (K) (figure III.3 b):

- $K_1$ , pour le retrait structural, pour la phase F-E;
- $K_2$ , pour le retrait "textural" ou normal, pour la phase C-B;
- $K_3$ , pour le retrait résiduel, pour la phase A-Ao.

Il a été montré que les pentes de droites de retrait structural et résiduel sont proches de 0, mais que la pente de la droite de retrait "textural" tend à se rapprocher de l'unité.

A partir des considérations précédentes, BRAUDEAU a pu définir deux grands types d'espace poral associés aux pentes  $K_1$  et  $K_2$ :

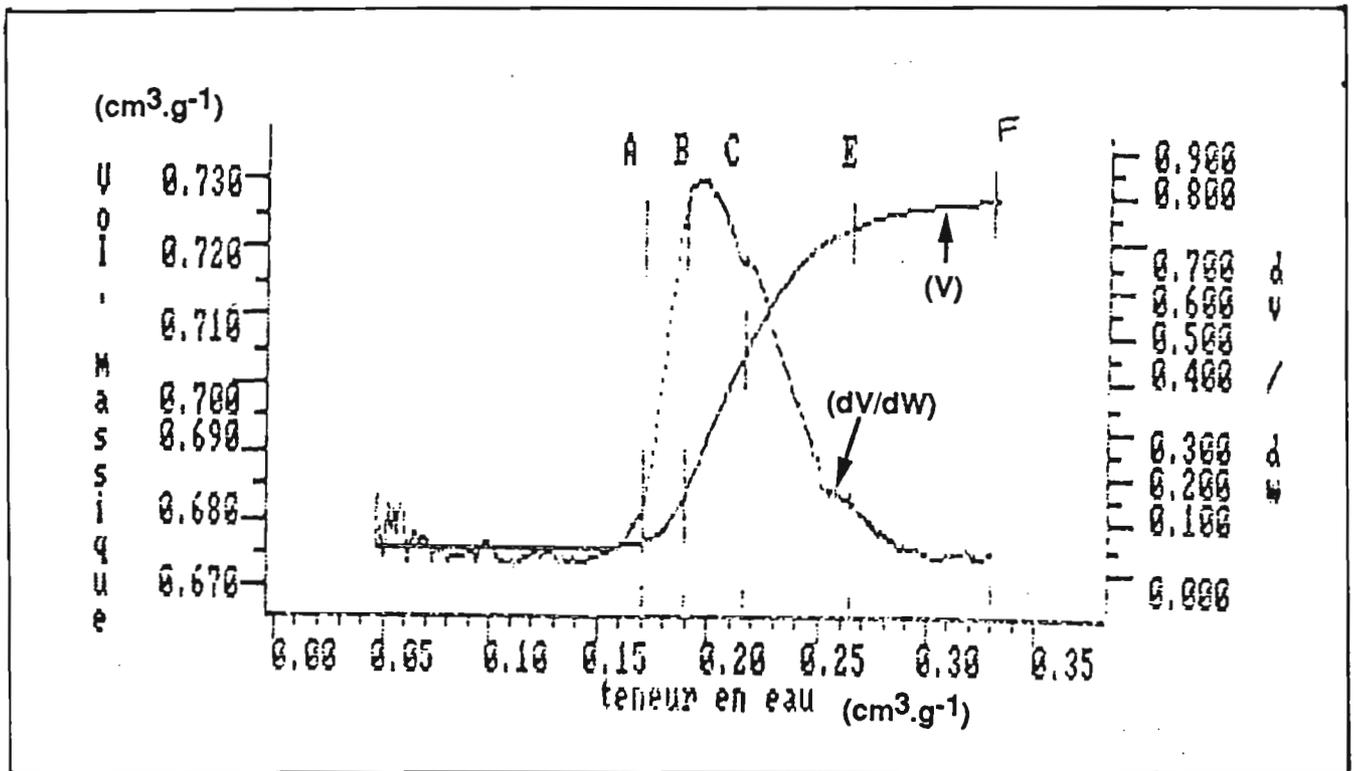


Figure III.3 a: Courbe de retrait sigmoïdale ( $v$ ) et sa dérivée ( $dV/dw$ ), pour des échantillons décimétriques de sol

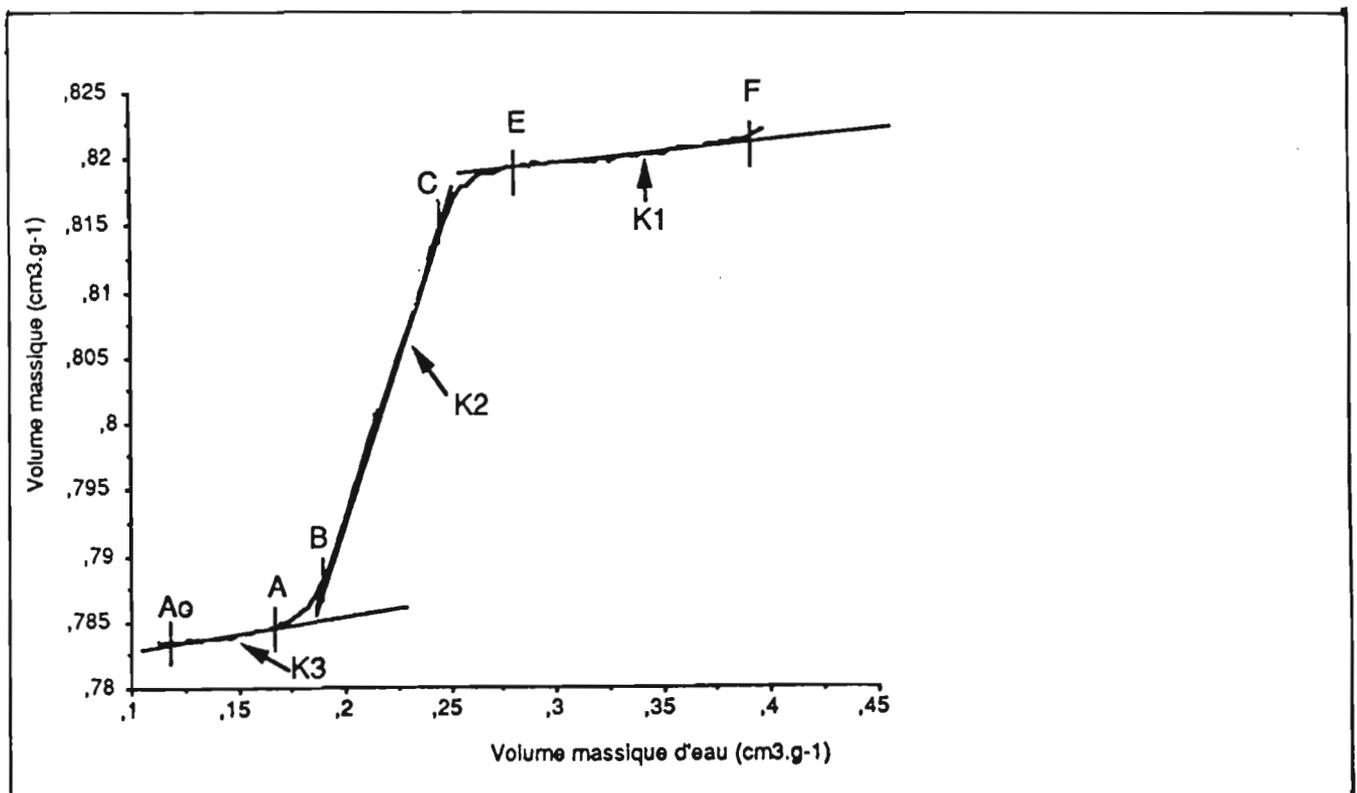


Figure III.3 b: Courbe de retrait sigmoïdale: représentation des différentes phases de retrait d'un échantillon décimétrique de sol ferrallitique argileux





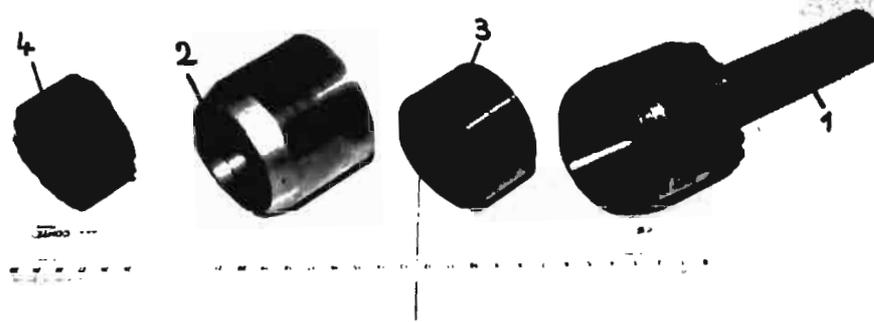


Photo 1 : Préleveur d'échantillons de sols non remaniés (démonté) 1=Poignée, 2=Bord tranchant, 3=Partie amovible, 4=échantillon.

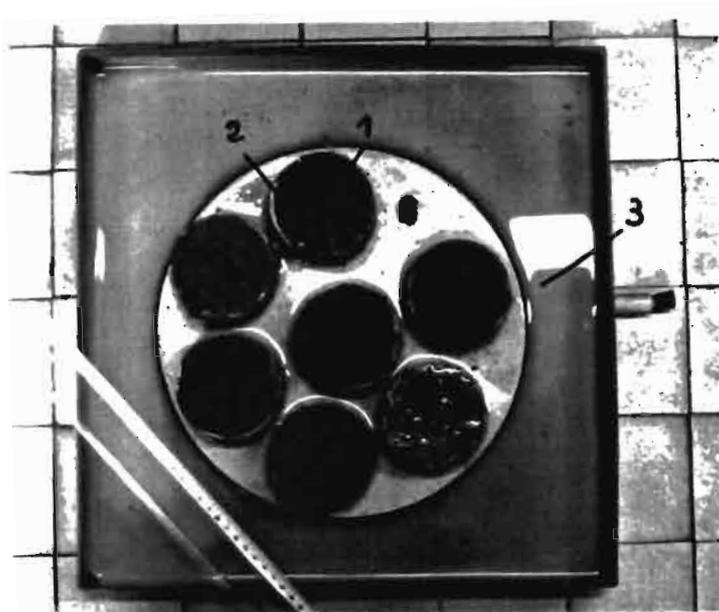


Photo.2 : Echantillons en cours d'humectation 1=Echantillon, 2=Néoprène, 3=Lame d'eau

Planche VI.1: *Equipement de prélèvement d'échantillons non perturbés (photo 1) et échantillons humides en cours d'humectation jusqu'à saturation (photo 2)*  
Source BRAUDEAU (1989)

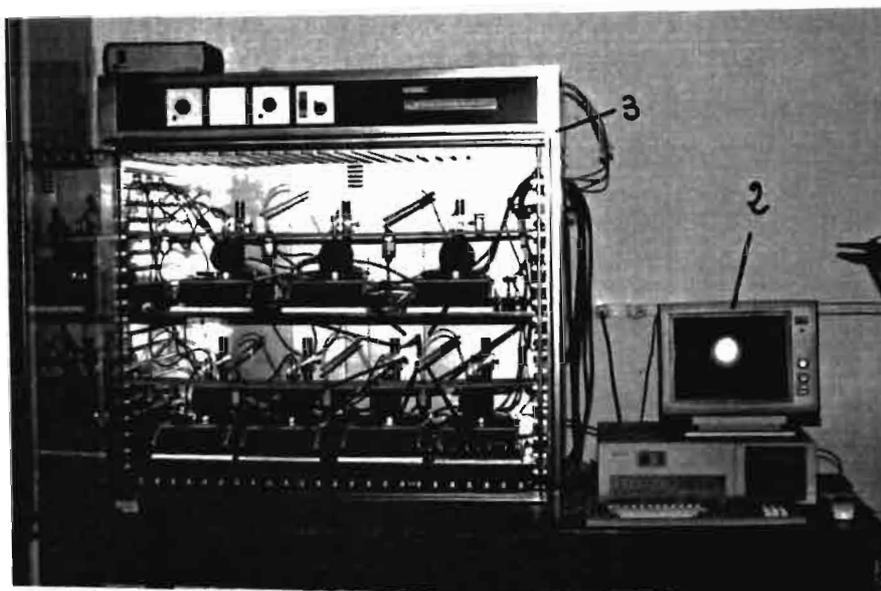


Figure VI.3: *Dispositif expérimental de mesure du retrait de sols 7 voies (1=balances, 2=ordinateur de saisie, 3=étuve),*  
Experimental device



paramètres caractéristiques de chaque courbe expérimentale et particulièrement les coordonnées des points A, B, C, E et F, ainsi que les pentes  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et les coefficients  $x_1$  et  $x_2$ .

Tableau III.1: Valeurs des coefficients  $K$  et  $x$  dans chaque phase de retrait d'un échantillon décimétrique de sol non perturbé et nature du retrait

Phases	F - E	E - C	C - B	B - A	A - A <sub>0</sub>
$K =$	$\Delta V_{FE}/\Delta W_{FE}$		$\Delta V_{CB}/\Delta W_{CB}$		$\Delta V_{AA_0}/\Delta W_{AA_0}$
$x =$		$e^{W_E-W/W_E-W_C-1}/e-1$		$e^{W-W_A/W_B-W_A-1}/e-1$	

## 2. MATERIEL DE MESURE

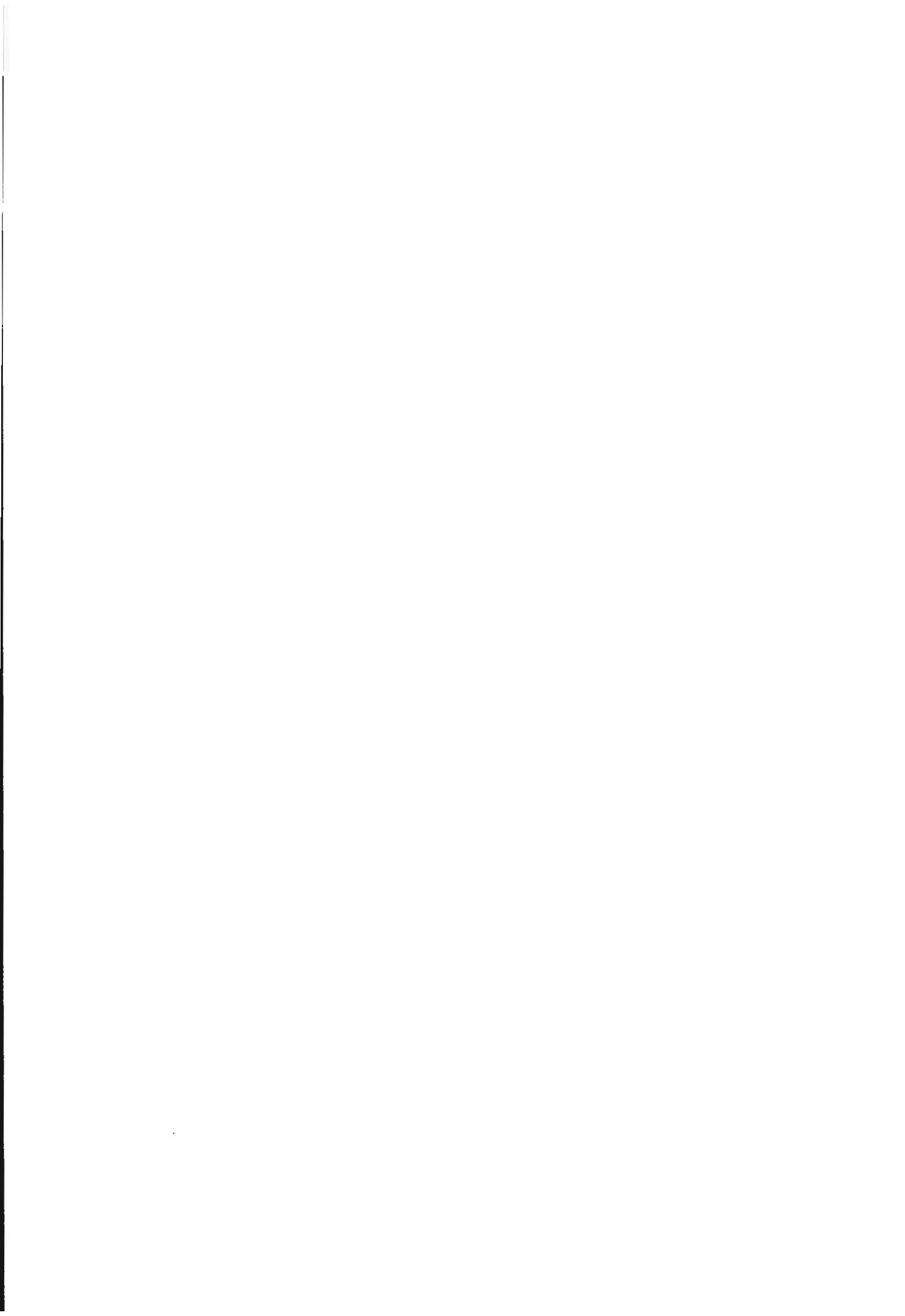
Cette méthode utilise un appareil désigné sous le nom de *rétractomètre*, assisté par micro-ordinateur qui permet de mesurer le retrait apparent des échantillons de sols non perturbés et non contraints mécaniquement, au cours d'un dessèchement contrôlé. Il comprend deux grands ensembles (photos 2, 3, 4 et 5 des planches III.1 a, III.1 b et III.2):

- un ensemble de mesure constitué par une enceinte thermostatée contenant des postes de mesures (placés sur des supports métalliques): des balances électroniques précises au 1/100 ème de gramme permettent de suivre la perte de poids. Le déplacement du plateau n'excède pas 1 mm sur toute la gamme de variation du poids de chaque échantillon (10 à 30 g). De petites bougies poreuses sont reliées à des capteurs de pression, permettant de déterminer le potentiel de l'eau. Des capteurs de déplacement linéaire, libre (ayant une sensibilité inférieure à 0,01 % pour une course nominale de la tige de + 5 mm), sont montés verticalement sur des bras à hauteur réglable;
- un ensemble de saisie automatique: un micro-ordinateur et des interfaces nécessaires le reliant aux postes de mesures.

## 3. PROCEDURE DE MESURE

La préparation des échantillons cylindriques de sol non perturbés consiste à enrober de néoprène le côté cylindrique de chacun d'eux. Après un séchage du néoprène pendant 24 h environ, les échantillons sont mis sur des plaques poreuses recouvertes d'une fine lame d'eau pendant une semaine, afin de les amener à un gonflement maximum.

Avant l'expérimentation, nous avons fait le réglage et la calibration des balances, des capteurs de déplacement et du système de mesure du potentiel de l'eau des échantillons.



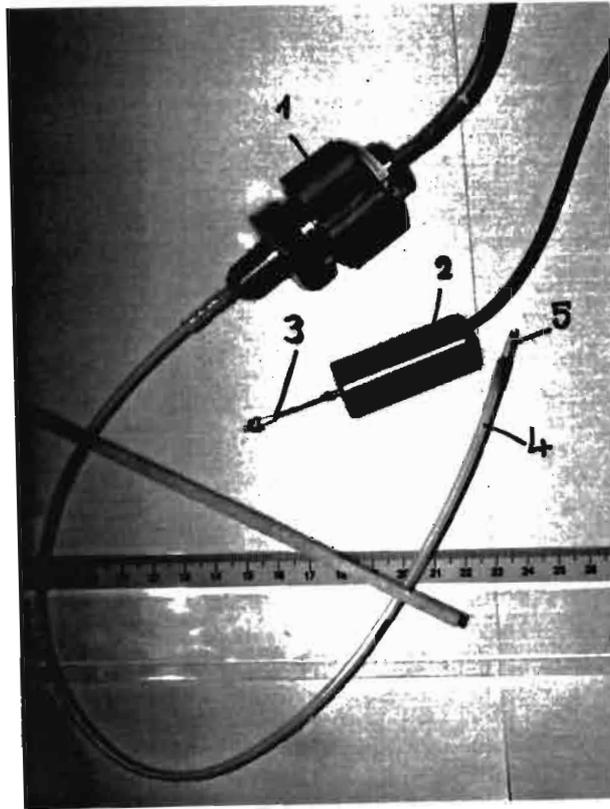


Photo 4 Capteurs de déplacement et de potentiel de l'eau  
 1=Capteur de Pression, 2=Capteur de déplacement, 3=tige du capteur de déplacement, 4=tube capillaire, 5=bougie poreuse.

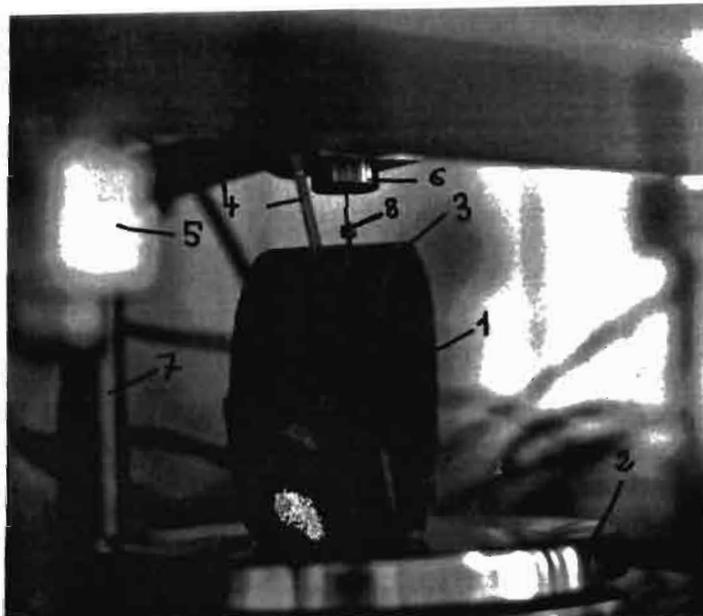


Photo.5: Vue rapprochée montrant la disposition relative des capteurs et de l'échantillon.

L'échantillon (1) est placé sur la balance (2), sur sa tranche enduite de colle Néoprène(3). La mini-bougie est installée dans la masse de l'échantillon, après que le capillaire (4) qui la relie au capteur de pression(5) ait été rempli d'eau. Le capteur de déplacement (6) est fixé sur une potence en aluminium (7) sa tige (8) venant au contact de l'échantillon.

Figure VI.4: Détail du dispositif de mesure du retrait



Les mesures ont été réalisées, au Centre ORSTOM de Bondy, dans une enceinte thermostatique en température (20 °C) et en humidité (80 %).

Une expérimentation consiste à amener un cylindre de sol, au départ saturé d'eau, jusqu'à l'état sec et à étudier le retrait simultanément.

A cet effet, la perte de masse des échantillons est faite par pesée, leur changement de diamètre à l'aide des capteurs de déplacement et la mesure de la succion à l'aide de petits tensiomètres.

Les mesures enregistrées par un micro-ordinateur, se font à pas de temps de 5 minutes: ce qui est court par rapport au temps nécessaire à la dessiccation.

Dans le programme conçu par BRAUDEAU, la variation du volume des cylindres de sol est considérée isotrope, ce qui est généralement admis dans certains sols (WILDING et TESSIER, 1988).

L'étude de la variation du diamètre de l'échantillon permet de calculer un changement de volume par l'équation suivante:

$$v/v_f = (d/d_f)^3$$

où:

v et d sont respectivement le volume et le diamètre initiaux du cylindre de sol;

v<sub>f</sub> et d<sub>f</sub> sont respectivement le volume et le diamètre finaux du cylindre de sol.

Des mesures complémentaires sont nécessaires pour calculer la courbe de retrait. Ainsi, à la fin de l'expérimentation le néoprène séché et les tensiomètres, faisant partie de la tare, sont pesés. Les échantillons sont pesés, après séchage à l'étuve à 105°C, pour déterminer leur masse sèche (M<sub>s</sub>). Ils sont ensuite enrobés de paraffine pour mesurer leur volume apparent par poussée d'Archimède dans l'eau. D'un autre côté, la masse volumique du solide (ρ<sub>s</sub>), permettant de calculer le volume massique des particules solides (v<sub>s</sub>), est aussi mesurée par la méthode au pycnomètre à eau.

#### 4. TRAITEMENT DES DONNEES OBTENUES

A partir de l'ensemble des résultats ainsi obtenus, nous avons pu tracer les courbes de retrait v(v<sub>w</sub>). Nous avons ensuite calculé tous les paramètres de la courbe de retrait de chaque échantillon de sol.

#### 5. PRECISION DES DONNEES OBTENUES

Pour un échantillon de 60 g environ, l'erreur maximum sur la teneur massique en eau est de + 2.10<sup>-3</sup> cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>, en évaluant Δ(M<sub>s</sub> + M<sub>n</sub>) = +0,1 g et Δ(M<sub>s</sub>) = Δ(M<sub>n</sub>) = +0,5 g.

L'erreur sur le volume final du cylindre de sol ( $V_f$ ) est plus difficile à évaluer, mais elle provient essentiellement de la méthode de mesure du volume final de l'échantillon qui est effectuée après passage à l'étuve à 105°C, l'échantillon ayant pu y subir une faible modification de volume après dessiccation à l'air. C'est pourquoi, il est nécessaire de mener l'expérimentation de façon à atteindre la limite de retrait.

Le néoprène mal appliqué (couche épaisse), et la mesure du volume sec final faite sur une petite partie du cylindre de sol constituent des causes secondaires de l'erreur sur le volume spécifique de l'échantillon étudié ( $v$ ).

## **G. SPECTRE MACROPORAL DE CYLINDRES DE SOL: COURBES DE POTENTIEL DE L'EAU**

### **1. RAPPEL DE LA MODELISATION DE LA RELATION PRESSION CAPILLAIRE-TENEUR EN EAU [H(W)]**

La mesure de la teneur en eau du sol est importante en physique du sol, mais elle ne suffit pas à elle seule pour décrire l'état de l'eau et le comportement d'un sol déformable au cours du dessèchement. Pour analyser les variations de contenu en eau en terme d'organisation et de distribution de la taille des pores, il est nécessaire de relier la teneur en eau à l'état énergétique de l'eau du sol (potentiel de l'eau ou succion). Il s'agit donc de pouvoir mesurer sur le même échantillon la teneur en eau et le potentiel de l'eau.

Dans le cas d'un matériau argileux, la définition du potentiel de l'eau n'est pas sans poser de problème, car la matrice argileuse ne peut être considérée comme rigide. Dans le domaine dit "capillaire" du milieu poreux, les mesures du potentiel de l'eau se fait à l'aide du tensiomètre. Sur des matériaux très gonflant comme la bentonite, ANGULO et *al.* (1990 a et b) ont introduit un terme de correction correspondant au gonflement du sol et qui tient compte de la charge du sol s'exerçant au-dessus du tensiomètre, soit:

$$\rho \cdot V_w z$$

où:

$\rho$  est la masse volumique du sol surmontant le tensiomètre placé à la côte  $z$  et  $V_w$  est le volume spécifique de l'eau, égal à la pente de la courbe de gonflement (ANGULO et *al.*, 1990 a et b).

La modélisation de la relation pression capillaire-teneur en eau au sein de cylindres décimétriques (BRAUDEAU, 1989; BOIVIN, 1990; RIEU, 1991), nous a permis de calculer la dimension fractale ( $D$ ) des macropores du sol.

## 2. PROCEDURE DE MESURE

En laboratoire, cette charge peut être négligée et les bougies tensiométriques, implantées au centre des échantillons permettent de déterminer directement le potentiel de l'eau et ce, de façon continue entre 0 à 900 millibars, simultanément à la mesure de retrait libre. On obtient ainsi les courbes de potentiel de l'eau qui sont caractéristiques du sol étudié (BRAUDEAU, 1990; BOIVIN, 1990).

## 3. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats sont présentés sous forme de courbe de potentiel (figure III.4).

Les valeurs du potentiel de l'eau pouvant être déduites des mesures tensiométriques, il s'agit de savoir quelles répercussions cela peut avoir sur la présence d'eau dans l'espace poral du sol.

La formule de Jurin appliquée à un modèle de pores cylindriques est la suivante:

$$H = 2\gamma \cdot \cos\alpha / R_{eq \text{ max.}}$$

où:

H: potentiel ou pression négative de l'eau (en millibar ou kPa),  
de l'échantillon;

$\gamma$ : Tension superficielle de l'eau;

$\alpha$ : Angle de raccordement du ménisque à la paroi des pores;

$R_{eq \text{ max.}}$  : rayon équivalent maximum de capillaires cylindriques;  
ou planaires (en nm ou  $\mu\text{m}$ ), remplis d'eau.

En admettant que les surfaces des constituants sont hydrophiles  $\cos\alpha = 1$  et en prenant pour valeur de  $\gamma$  80 dynes/cm, la relation qui lie H et  $R_{eq}$  est la suivante:

$$R_{eq \text{ max}} = 1500/H$$

Ceci signifie en fait qu'à chaque valeur de pression de l'eau, et dans l'hypothèse la plus favorable (matériau hydrophile, seuls sont remplis d'eau des pores d'une taille maximale définie).

De ce fait, nous n'avons pas d'information sur la géométrie des volumes poreux plus petits que ceux que l'on vidange à un potentiel de l'eau donné. En outre, comme les tensiomètres sont utilisables jusqu'à 0,900 bars, seuls les pores de  $R_{eq}$  supérieur à 1,6  $\mu\text{m}$  peuvent être examinés avec les mesures tensiométriques (tableau III.2).

Tableau III.2: Expression de l'état énergétique de l'eau des échantillons secs et taille maximale de pores remplis d'eau (TESSIER, 1984)

Pression (kPa)	pF	Humidité relative à 20°C (%)	Taille maximale ( $R_{eq}$ ) de pores remplis d'eau ( $\mu\text{m}$ )
1	1	99,9993	150
10	2	99,993	15
100	3	99,927	1,5
1000	4	99,27	0,15
10 000	5	92,7	0,015
100 000	6	48,4	0,0015

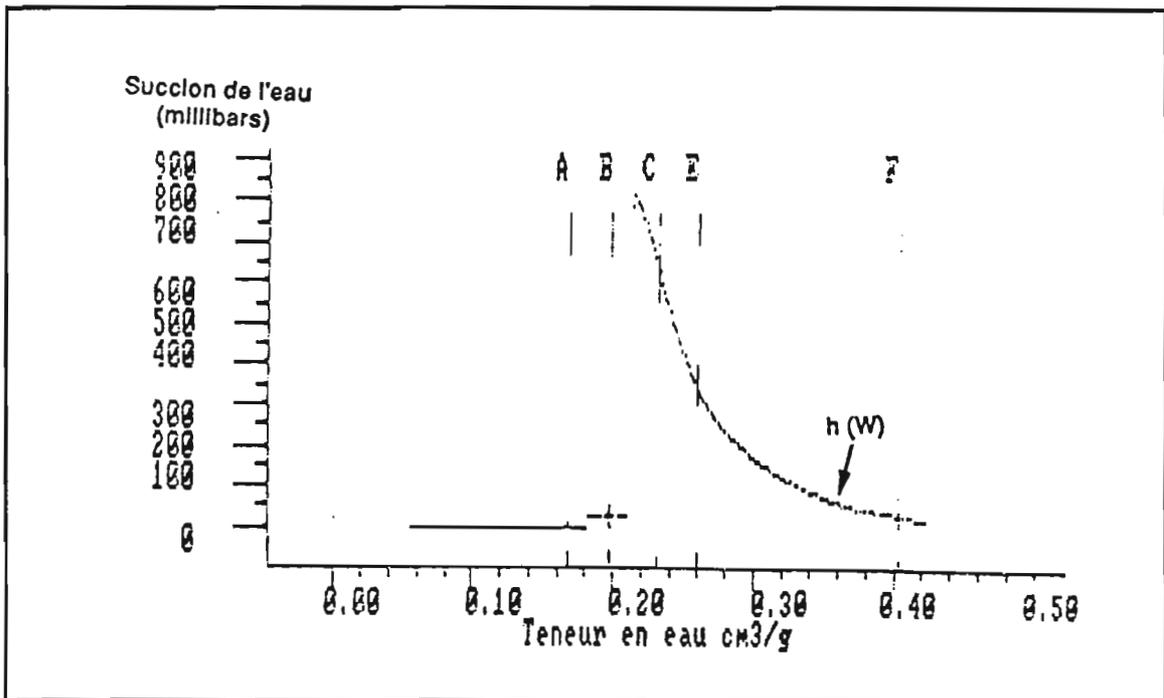


Figure III.4: Courbe de potentiel de l'eau d'un échantillon décimétrique de sol non perturbé

Nous voyons donc que nous sommes limités dans l'étude du spectre poral à la fois dans les petits ( $< 1 \mu\text{m}$ ) et les plus grands ( $> 150, \mu\text{m}$ ) (figure III.4 et tableau III.2). C'est la raison pour laquelle nous allons examiner l'espace poral macroscopique en utilisant l'analyse d'image de lames minces de sol.

#### H. ESPACE MACROPORAL TOTAL PAR ANALYSE D'IMAGES DE LAMES MINCES ET MESURES MORPHO-MATHÉMATIQUES

Autrefois, les mesures sur préparations microscopiques en vue d'étudier l'espace poral restaient essentiellement qualitatives.

Aujourd'hui, l'efficacité du couplage image numérique-traitement informatique, permet de décrire quantitativement l'organisation des matériaux et en particulier de l'espace poral, dans les deux dimensions du plan de la lame mince. Cette étape doit permettre à terme, une extrapolation des résultats dans les trois dimensions de l'espace (stéréologie).

C'est dans cette perspective, et en intégrant des principes dégagés en analyse photographique sur lame mince (GUILLORE, 1985), que la cellule "analyse d'image" du laboratoire des sols de Grignon nous a permis d'aborder la quantification de l'espace macroporal (BRESSON et GUILLORE, 1991).

## 1. ACQUISITION D'IMAGES BINAIRES

L'analyse d'images permet, à la suite d'un traitement, d'obtenir des nombres.

### ANALYSE —> TRAITEMENT —> NOMBRES

Une caméra vidéo CCD noir et blanc, de haute sensibilité (COHU 4700) est montée sur un microscope polarisant, pour la saisie d'images à fort grossissement (champ < 25 mm<sup>2</sup>), ou fixée sur un statif à crémaillère dans une chambre noire, pour la saisie d'images à grand champ et à faible grossissement (champ > 25 mm<sup>2</sup>). Dans les deux cas, différents modes d'éclairage sont disponibles: en réflexion, en transmission, lumière, et une source UV 365 nm permet de travailler en fluorescence. Ces différentes configurations sont utilisables pour la saisie directe sur lame mince (en diascopie) ou sur bloc poli (en épiscopie).

Dans les deux cas de figure énumérés ci-dessus, la caméra a pour fonction de fournir sur le moniteur une image du champ sous caméra qui peut être immédiatement numérisée par une carte de digitalisation (à Grignon, carte Matrox PIP 1024).

L'image numérisée est alors stockée dans la mémoire vidéo ou la mémoire centrale sous forme d'une matrice de  $n$  lignes et de  $m$  colonnes. Un élément de cette matrice représente un point élémentaire de l'image ou *pixel*.

Pour cette étude, nous avons travaillé sur des images acquises selon des résolutions de 512 x 512 points images (pixels) sur 256 niveaux de gris. Chaque pixel de l'image digitalisée est codé sur 8 bits et peut donc prendre toute valeur comprise entre 0 (noir) et 255 (blanc) (figure III.5).

Le logiciel permet également de simplifier l'image ainsi obtenue pour extraire une image binaire: c'est l'opération de segmentation par détection du contour des pores ou "seuillage". Ceci permet de sélectionner une bande plus ou moins étroite de la gamme des 256 niveaux de gris. Elle permet de définir le type d'objet et la forme des objets à analyser. Cette segmentation fournit finalement une image binaire, dans laquelle chaque pixel ne peut avoir que deux valeurs: 0 pour le fond, et 1 pour la forme.

L'image binaire est ensuite transformée par des opérations d'érosion et de dilatation. Il est alors possible de réaliser l'analyse de l'image proprement dite, c'est-à-dire l'identification et

la quantification de l'espace poral du sol: établissement de la granulométrie et mesure de l'aire totale des pores observés.

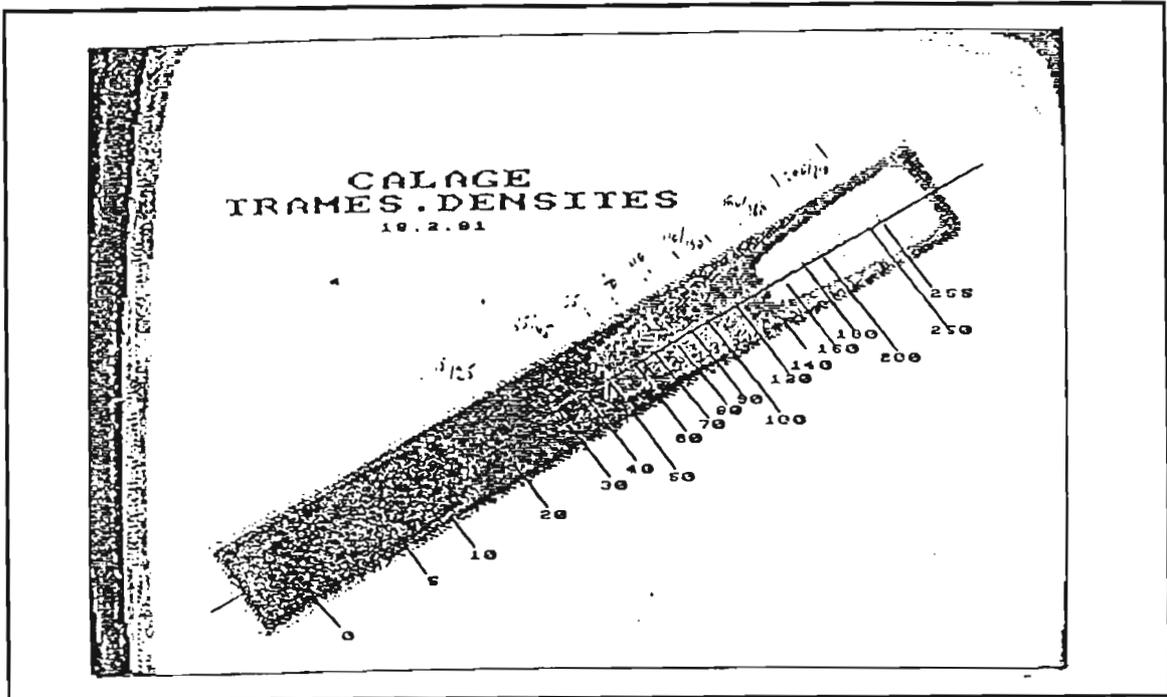


Figure III.5: Gamme de niveaux de gris compris entre 0 (noir) et 255 (blanc), qui permet de digitaliser une image (Source Visilog, cité par Bresson et al. 1991)

## 2. TRAITEMENT D'IMAGES

Dans les deux dimensions d'une lame mince ou d'une surface polie, l'espace poral peut être défini comme l'espace laissé libre entre les constituants solides.

Dans ce travail, l'analyse d'image repose sur l'identification et l'analyse de chacun des pores généralement appelés sous le terme de **poroïdes**. Ceux-ci sont de forme variée et plus ou moins anastomosée. Nous les désignerons comme étant les **pores (ou vides)**, dans la suite de notre mémoire.

### a. NOTION DE CHAMP-IMAGE ET "LIMITE DE RESOLUTION" DE L'IMAGE

En fonction de la morphologie des objets étudiés, les surfaces observées varient entre  $1 \text{ mm}^2$  et  $2,5 \text{ cm}^2$ .

Deux rapports d'agrandissement ont été retenus pour analyser l'espace poral de nos échantillons:

- à faible grossissement, pour analyser le système de pores dont le rayon équivalent est supérieur à  $30 \mu\text{m}$ ;

- à moyen grossissement, pour étudier un champ-image de 1,4 x 1 mm.

En considérant que la forme des objets (pores ou particules) ayant un diamètre minimal de 4 pixels n'a pas de pertinence, on soumet les images binaires avant analyse, à un "nettoyage" qui permet d'éliminer les objets "inférieurs à la limite de résolution". A faible grossissement, les objets éliminés ont un diamètre maximum d'environ 120  $\mu\text{m}$ . Ces objets ne seront analysés, dans de meilleures conditions, qu'à plus fort grossissement.

## **B. SELECTION DE PORES**

### **1). A faible grossissement, en chambre noire**

Elle se fait en épiscopie sur une lame mince ou un bloc poli (résine + Uvitex), sous éclairage UV (deux lampes de 6 W 365 nm): quoique la fluorescence de la résine dans les vides (bleu cyan vif) soit un peu affectée par la dimension des pores (plus forte intensité pour les plus grands pores), le contraste avec le fond sombre est toujours suffisant pour autoriser un seuillage assez facile, entre ces pores et la phase solide.

### **2). A moyen grossissement, au microscope polarisant**

En diascopie et en utilisant la lumière naturelle, les grains de quartz sont quasi transparents et transmettent sensiblement autant de lumière que les vides. Les quartz et les vides ne peuvent donc être distingués. Aussi, peut-on utiliser successivement une lumière naturelle puis polarisée. Pour ce faire, nous avons procédé comme suit:

- Saisie d'une première image en lumière naturelle transmise. Après seuillage, on obtient l'image binaire des vides et des quartz indistinctement [image en lumière naturelle (LN)].
- Sélection des quartz: la biréfringence des quartz permet de les éclairer sélectivement en lumière polarisée à condition de faire tourner ensemble et dans le même sens deux filtres polarisants croisés, disposés de part et d'autre de la lame mince et parallèlement à celle-ci.

Pratiquement, on fait tourner, avant chaque saisie, les polariseurs de quelques degrés, et on stocke chaque image avec les précédentes par la fonction "Maximum" jusqu'à ce que l'image cumulée ne soit plus affectée visuellement par une nouvelle saisie. On peut alors considérer que l'ensemble des quartz présents dans le champ d'observation est sélectionné. Après seuillage, on obtient l'image binaire des quartz seuls [image en lumière polarisée (LP)].

### 3. ANALYSE MORPHO-MATHEMATIQUE D'IMAGES BINAIRES

D'une façon générale, l'analyse d'images a pour but de quantifier les informations recherchées dans une image (SERRA, 1982, 1989; RINGROSE-VOASE *et al.*, 1991).

Avec Visilog, pour chaque image binaire analysée, nous avons obtenu les principaux paramètres récapitulés dans le tableau III.3.

Tableau III.3: Principaux paramètres morphologiques obtenus par analyse d'images sur lames minces de sol en utilisant le logiciel Visilog

PARAMETRES	DEFINITION	ILLUSTRATION
Surface (a)	Somme de tous les pixels composant l'image de la totalité des vides du champ analysé	
Périmètre (p)	Distance du contour de l'ensemble de vides du champ observé	
Indice de forme (If) ou circularité	Ce paramètre est défini à partir de la surface et du périmètre: $p^2 = 4\pi \cdot a$ Cercle -----> 1	
Rayon équivalent ( $r_{eq}$ )	Nombres de pixels du côté ou rayon de l'hexagonal inscrit équivalent au rayon du cercle circonscrit	 $R_{eq} = C$

#### a. PARAMETRES MOYENS

##### 1). Aire porale

La fonction "Area" de Visilog donne immédiatement le nombre de pixels de correspondant à la surface occupée par les pores.

Exprimée en pourcentage, l'aire relative des pores (ar) peut se calculer par la formule suivante:

$$ar (\%) = \frac{\text{"area"} \times 100}{262.144}$$

Pour obtenir l'aire absolue des pores (Aa) en  $cm^2$  par exemple, on calcule de la façon suivante:

$$\text{à grand champ: } a (cm^2) = \frac{\text{"area"} \times 1.8 \times 1.26}{262.144}$$

$$\text{à petit champ: } a (cm^2) = \frac{\text{"area"} \times 0.14 \times 0.10}{262.144}$$

## 2). Périmètre poral

Le nombre donné par la fonction "Perimeter" de Visilog totalise tous les pixels formant la frontière de la forme analysée ("**Boundary**" de Visilog). C'est un paramètre topologique qui doit être distingué du **périmètre métrique** ( $p$ ). En outre, le nombre de pixels obtenu n'est pas le même en maille carrée ou en maille hexagonale (plus proche du cercle).

La formule de CROFTON (cité par BRESSON et al., 1991) est la suivante:

$$p = 2(I_{90^\circ} + 0,707 \times I_{0^\circ})$$

où:  $I$  = Intercept

Pour s'affranchir du problème de la forme rectangulaire des pixels, on pourrait, sur la base de la formule de CROFTON, transformer notre image en maille hexagonale, de façon à obtenir des valeurs du périmètre indépendante de l'orientation de l'échantillon.

Mais le périmètre a été obtenu ici par calcul à partir des valeurs des intercepts (en pixels), mesurées dans trois orientations. Ainsi, la formule de CROFTON transformée, lorsque l'on considère trois orientations ( $0^\circ$ ;  $60^\circ$  et  $120^\circ$ ) est la suivante:

$$p = (0,707 \times I_{0^\circ} + 0,866 \times I_{60^\circ} + 0,866 \times I_{120^\circ})$$

## 3). Indice de forme des pores

Dans le cas de pores de forme circulaire, le rapport périmètre sur aire des pores atteint une valeur maximale. Dès lors que les pores sont de forme plus ou moins irrégulière, le rapport périmètre sur aire augmente d'autant plus que la forme est digitée.

Ainsi, nous avons été amené à définir un "Indice de forme" ( $I_f$ ), selon la formule suivante (HARTMANN, 1991):

$$I_f = p^2/4\pi.A$$

où

$p$ : est le périmètre mesuré et

$a$ : est l'aire mesurée

$4\pi$ : est le facteur correctif pour lequel  $I_f = 1$  pour un pore de forme cylindrique ou planaire.

### b. ANALYSE "GRANULOMETRIQUE" BINAIRE DE L'ESPACE PORAL

Parmi les renseignements morphologiques obtenus en analyse d'image, la taille des pores est le paramètre le plus utilisé. Généralement, on recherche l'élément d'une fonction de distribution de la taille des pores, encore appelée fonction granulométrique (COSTER et al., 1988; COSTER, 1989; MICHELLAND-ABBE et al., 1991).

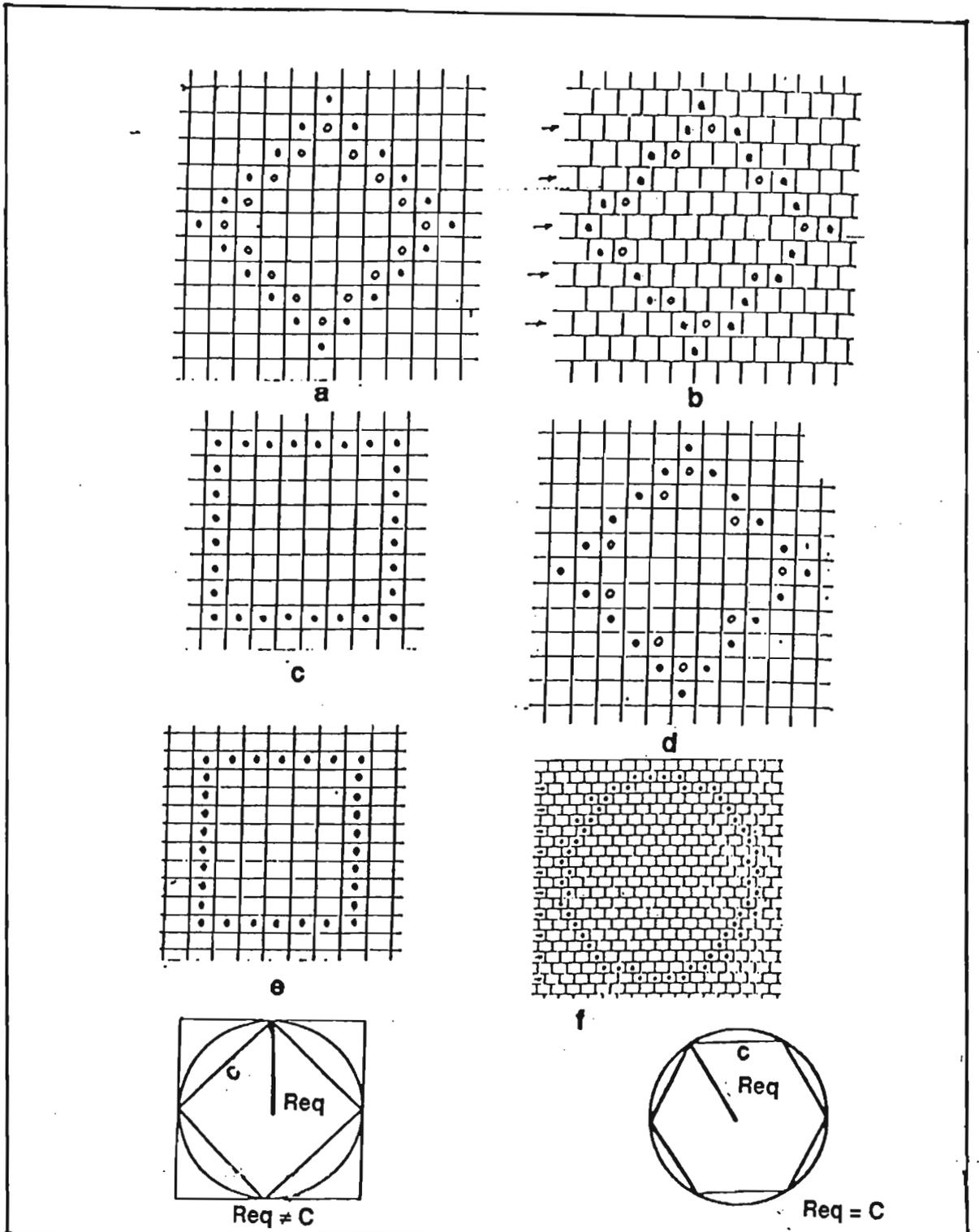


Figure III.5: Mailles carrées (a, b, c, d et e) et hexagonale (f) (Source BRESSON et al., 1992). Rayon équivalent d'éléments structurant rectangulaire et hexagonal (MAPANGUI, 1992)

Rappelons que lorsque l'analyse granulométrique est effectuée par une méthode physique (tamisage, sédimentation, diffusion laser...), le critère de taille et la méthode de classement sont uniques et déterminés par le principe physique utilisé.

En analyse d'images, les critères de taille et les méthodes de classement sont multiples, car en effet, il n'y a pas une définition géométrique unique de la taille, tout comme il y a plusieurs façons de trier les objets. Le choix de la méthode d'analyse et du critère de taille dépendront de la nature topologique de l'ensemble  $X$  à étudier (MICHELLAND-ABBE et *al.*, 1991):

- pour des objets individualisés (particules ou pores isolés), chaque objet (entièrement compris dans le champ-image) pourra être analysé séparément et toute grandeur associée à chaque objet étudié pourra servir de critère de taille;
- si les pores sont interconnectés comme dans le sol étudié ici, la notion d'objets individuels n'a pas vraiment de sens. Dans ce cas, la méthode granulométrique a recouru à un filtrage de l'image avec un élément structurant de forme convexe et de taille croissante (TRICART et *al.*, 1991).

Deux opérations sont utilisées:

- une érosion par un élément de taille donnée. Les pores ou les particules inférieures à la taille de l'élément structurant disparaissent pendant que les objets (vides ou les particules) supérieurs à la taille de cet élément sont transformés;
- une dilatation (reconstruction), par le même élément structurant, qui restitue aux objets transformés leur taille initiale.

Dans notre travail, avec le logiciel Visilog, l'ouverture morphologique a été faite avec ***un élément structurant de forme hexagonale et de taille croissante***, et ce de façon à obtenir un spectre complet de toutes les sections de pores selon leur taille en terme de rayon équivalent: pores et leurs seuils.

## **I. ESPACE MICROPORAL DU SOL PAR INTRUSION DE MERCURE DANS DES AGREGATS CENTIMETRIQUES**

### **1. PRINCIPE DE LA METHODE**

La porosimétrie au mercure consiste à mesurer le volume de mercure introduit, par pressions croissantes, dans des agrégats centimétriques secs ( $d \leq 1$  cm), préalablement dégazés. A cause de son caractère non mouillant, le mercure ne pénètre dans un matériau poreux que sous pression.

En effet, en faisant l'hypothèse que l'espace poral des agrégats est constitué de capillaires interconnectés, cylindriques ou planaires, la valeur de chaque pression d'injection

de mercure ( $P$ ), peut être reliée au rayon de seuils équivalents (ou rayon minimum de pores équivalents), par la loi de Jurin:

$$P = 2\gamma_{Hg} \cdot \cos\alpha / R_{eq \text{ mini.}}$$

où:  $P$ : pression d'injection de mercure (en bar ou kPa)

$\gamma_{Hg}$ : Tension superficielle du mercure dans le vide

$\alpha$ : Angle de contact du mercure sur les constituants solides

$R_{eq \text{ mini.}}$ : rayon équivalent de capillaires cylindriques ou plans (en nm ou  $\mu\text{m}$ ).

La valeur adoptée pour  $\gamma$  est de  $0,481 \text{ Nm}^{-1}$  et celle pour  $\alpha$  est de  $141^\circ$  (LAWRENCE, 1977, 1978), on a:

$$P = 7500/R_{eq \text{ mini.}}$$

$$R_{eq \text{ mini.}} = 7500/P$$

Le système poral d'agrégats de sol est en réalité constitué de pores aux formes et tailles irrégulières, reliés entre eux par des étranglements ou constriction. De ce fait le mercure n'accède à ces pores qu'à partir d'une pression qui dépend de la taille de ces constriction. On est ainsi amené à sous-estimer la véritable taille des pores en déterminant donc plutôt une distribution de la taille équivalente des seuils des pores (VACHIER et *al.*, 1979; DELAGE, 1979).

Les limites de cette méthode ont été précisées par GRIMALDI (1981), VAN OORT (1984) et BRUAND (1985).

## 2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE

Les mesures ont été effectuées au Centre ORSTOM de Cayenne en Guyane, avec un porosimètre de type CARLO-ERBA 2000. Deux caractérisations ont pu être effectuées sur des agrégats

( $d \leq 10 \text{ mm}$ ), séchés à l'air. La reproductivité des résultats est apparue satisfaisante. Chaque agrégat sec est placé dans une cellule (ampoule sur laquelle s'adapte un capillaire calibré) (figure III.78). Dans un dispositif spécialement conçu, cette cellule est soumise à un vide de  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ , afin de dégazer l'échantillon étudié. Toujours sous vide, la cellule est ensuite remplie de mercure jusqu'à une certaine hauteur dans le capillaire ( $h_0$ ) qui correspond ici à la pression initiale des mesures.

Dans une première phase, le vide est cassé par paliers jusqu'à atteindre la valeur de la pression atmosphérique: tous les pores avec un rayon équivalent qui correspond à des pressions variant de  $h_0$  (0,07 bar), à  $P_a + h_0$  (1,1 bars). Connaissant le rayon du capillaire, le volume du mercure pénétré dans les pores de l'agrégat est mesuré en suivant visuellement, à l'aide d'un cathétomètre, la descente du ménisque dans le capillaire.

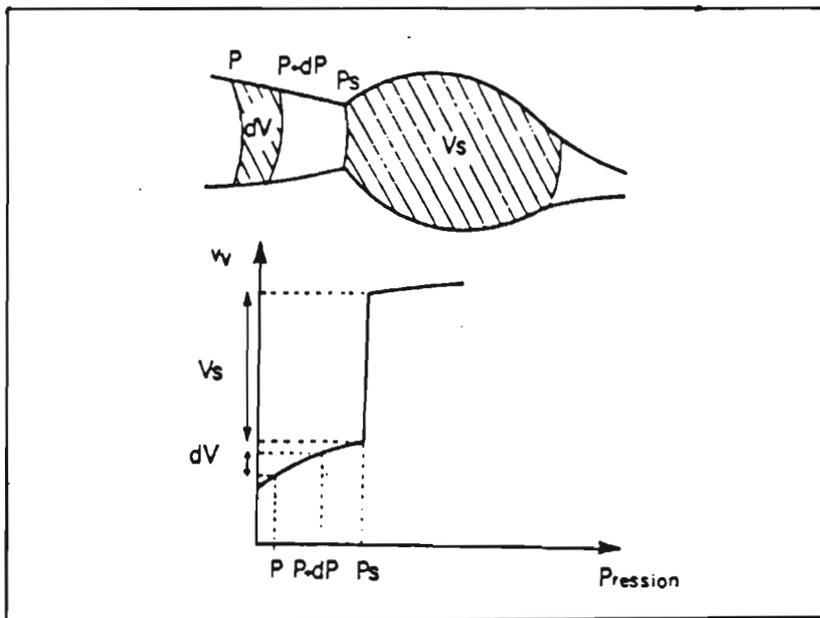


Figure III.7: Schéma montrant la pénétration du mercure dans un pore de forme quelconque (d'après VACHIER et al., 1979)

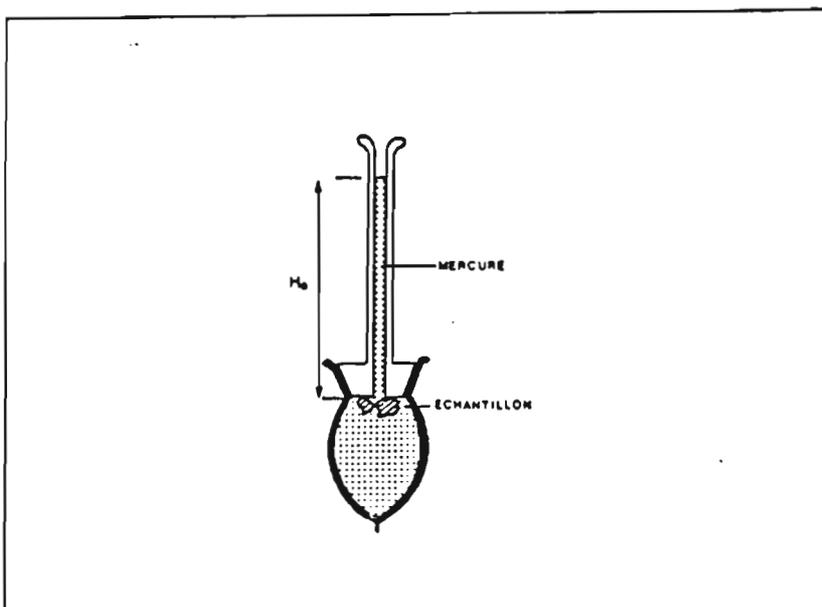


Figure III.8: Cellule de porosimétrie à mercure.  
 $h_0$  = hauteur initial du mercure  
 au-dessus des échantillons

Pour les pressions supérieures à 1,1 bars, on place la cellule dans le porosimètre. Les mesures de volume du mercure injecté en fonction de la pression est faite en continue, de façon automatique.

Sur le fonctionnement du porosimètre à mercure des précisions ont été données par DELAGE (1979) et PELLERIN (1980).

### 3. PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS

Les volumes des pores ( $V_V$ ), mesurés à l'aide du porosimètre à mercure, sont exprimés ici en volumes massiques ( $v$  en  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ), par référence à la masse du sol séché à l'étuve à 105 °C

Les résultats obtenus en porosimétrie au mercure sont présentés uniquement sous forme d'histogramme de répartition du volume poral en différentes classes (ou spectre poral dérivé de courbes de volume poral cumulé), définies par un accroissement constant du logarithme décimal du rayon équivalent minimum des constriction ( $R_{eq \text{ mini.}}$ ).

Il s'agit de valeurs moyennes à partir de deux déterminations au minimum, en raison de l'homogénéité du matériau et de la très faible dispersion des résultats pour les échantillons étudiés.

Ces résultats seront confrontés aux courbes de retrait et à l'analyse d'image.

## J. CONCLUSION

Ce chapitre avait essentiellement pour but de présenter l'ensemble des techniques permettant une étude d'échantillons de sol non perturbés afin d'étudier les modifications de la géométrie de l'espace poral notamment lors du dessèchement du sol (tableau III.4).

Dans ce qui suit, des échantillons non remaniés seront analysés à différents états hydriques, soit de façon continue, soit de façon discontinue et dans ce cas en conservant l'organisation correspondante à une humidité déterminée.

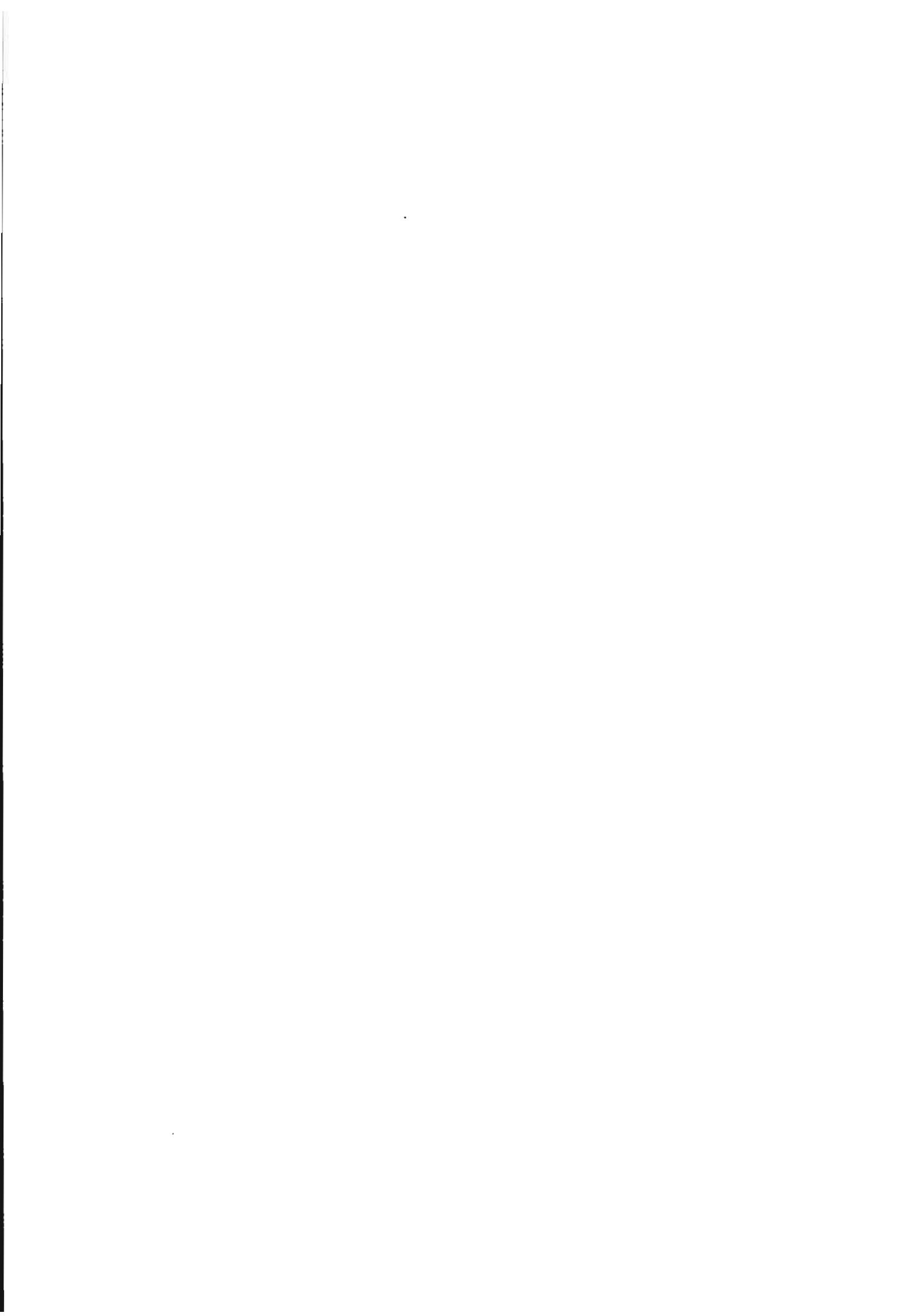
L'originalité de notre approche consiste donc en une combinaison de mesures morphologiques et de mesures physiques. Elle permet une étude à la fois, du volume et de la géométrie de l'espace poral ainsi que des propriétés hydriques du sol.

L'analyse des phénomènes se produisant simultanément à différentes échelles, d'une part et la mise en évidence de leur synergies, d'autre part, devrait nous permettre de fournir des interprétations sur le comportement et les mécanismes d'évolution d'un sol ferrallitique jaune et argileux de la Vallée du Niari.

Tableau III.4: *Présentation résumée des méthodes d'analyse et d'observation utilisées, des échelles d'observation et des avantages et inconvénients*

METHODES ANALYTIQUES	Taille des pores mesurée	Taille de l'échantillon	Avantages des méthodes	Limites des méthodes
Courbes de retrait en continu	1,5 - 150 $\mu\text{m}$	d = 5,6 cm; h = 3 cm	- mesure en continu, précise, et répétitive; - système dynamique; - résultats volumiques; - mesure simultanée	- mesure seulement du volume moyen  - mesure partielle ( $\leq 900$ mbars)
Courbes potentiel - teneur en eau				
Injection de mercure	7,5 nm - 100 $\mu\text{m}$	d = 1 cm	- mesure précise du spectre de la taille de pores; - résultats volumiques	- petits échantillons secs; - système figé
Morphologie sur lames minces	3 $\mu\text{m}$ - 1,3 mm	d = 5,6 cm; h = 3 cm	- visualisation et mesure précise du spectre de la taille de pores	- déshydratation délicate; - système figé
METHODES D'OBSERVATION	Grossissement utilisé	Dimensions observées	Avantages des méthodes	Limites des méthodes
L'œil nu	(mm au km)	L = 2 m; Pr = 1 m	- observation in situ de l'organisation du sol	- observation globale et qualitative
Loupe binoculaire	6 à 50 x (mm au cm)	d = 5,6 cm; h = 3 cm	- détermination de la porosité et de l'organisation macroscopique de la phase solide	- observation surtout qualitative; - système figé
Microscope polarisant	10 à 500 x ( $\mu\text{m}$ au mm)	d = 5,6 cm; h = 3 cm		
M.E.T.	20 000 à 500 000 (nm au $\mu\text{m}$ )	d = mm h = $\mu\text{m}$	- détermination, au niveau de particules et feuillets de l'organisation du matériau	- système figé

où: d = diamètre, h = hauteur, L = longueur et Pr = profondeur



## CHAPITRE IV

### DISPOSITIF DE L'ESSAI AGRONOMIQUE

---

*Ce travail repose sur la caractérisation et l'analyse de l'évolution de parcelles de **deux essais agronomiques installés sous l'égide de l'IBSRAM** (International Board for Soil Research And Management), à Mantsoumba: essai central sur les systèmes de culture et essai périphérique sur le travail du sol.*

*La station de Mantsoumba se trouve au Sud Congo dans la Vallée du Niari, à proximité de la gare ferroviaire de Lebriz (4°10' S et 13°15' E).*



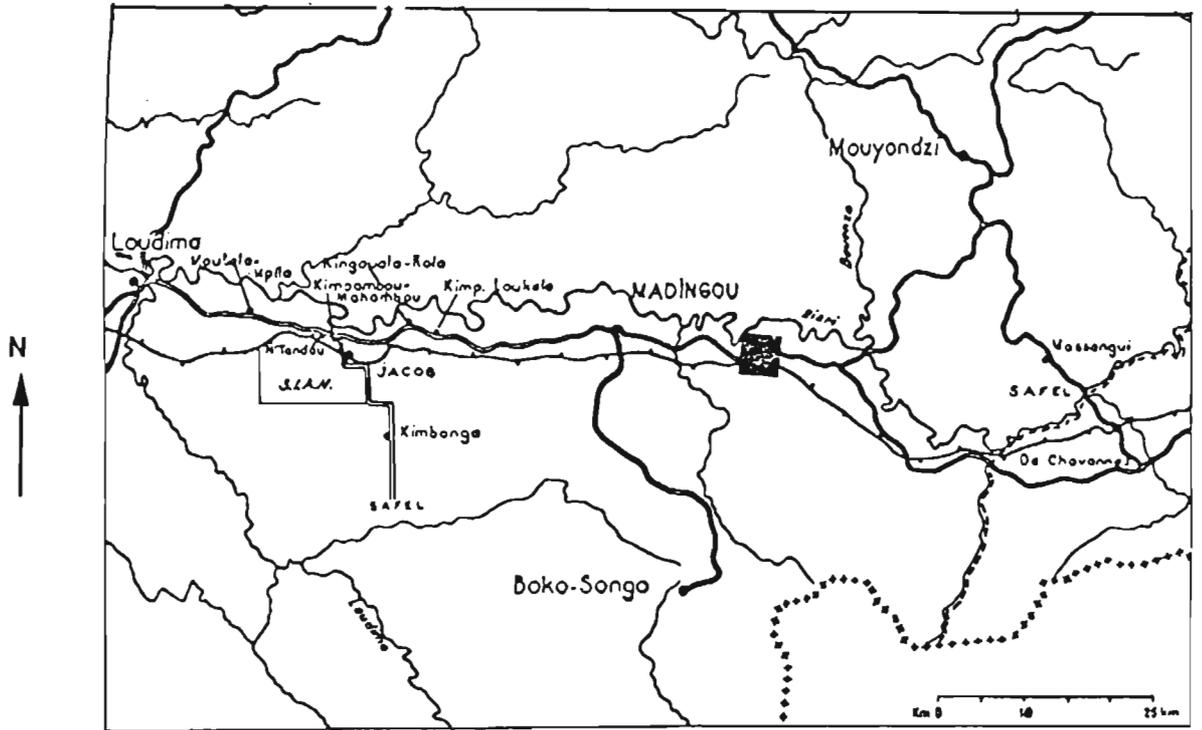


Figure IV.1 a: Situation du site expérimental dans la Vallée du Niari

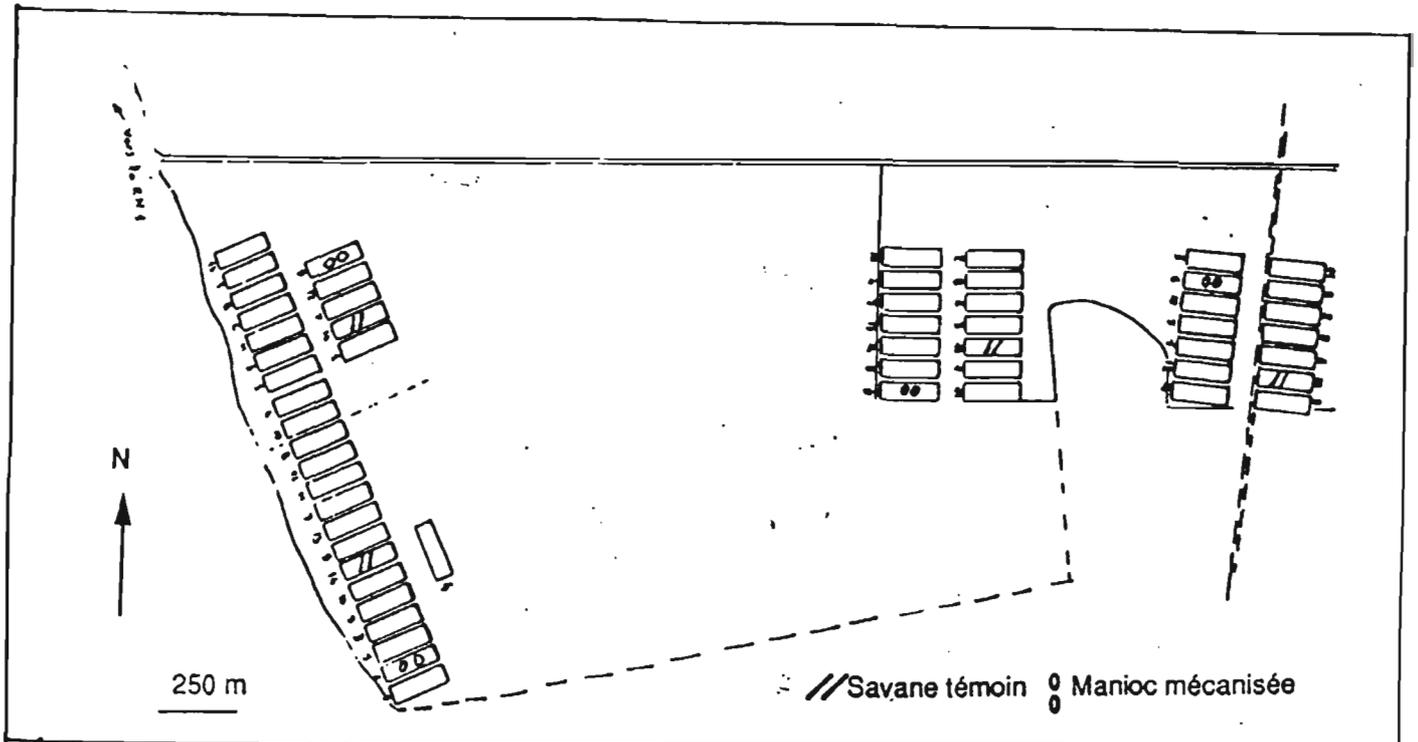


Figure IV.1 b: Le dispositif de l'essai central à Mantsoumba

## A. GENERALITES

Le dispositif expérimental considéré correspond à deux essais agronomiques mis en place, sous l'égide de l'IBSRAM, sur deux sites très voisins, différenciés uniquement par leur histoire culturale: site non dégradé, en ouverture de la savane et site dégradé, sur la plantation de manioc industriel de Mantsoumba.

Ces essais sont nécessairement de longue durée, surtout pour le manioc utilisé ici (cycle végétatif de 24 mois).

Mais l'expérimentation a été envisagée de deux façons suivantes:

- à court terme, en étudiant l'effet immédiat d'une technique donnée par rapport au sol de référence sous savane et/ou à la technique témoin du système cultural de référence;
- à long terme, avec pour objectif d'étudier les effets résiduels et/ou cumulatifs de nouvelles techniques par rapport au sol de référence sous savane et/ou à la technique témoin du système de référence.

Le dispositif "en séries" permet de vérifier, à long terme, la généralité des résultats, l'intérêt économique d'un changement éventuel de technique et de faire la part des contingences climatiques. Il est constitué de blocs Fisher, avec 6 à 8 traitements et quatre répétitions (ou blocs). Un tel dispositif a été adopté pour tous les essais de la station de Mantsoumba.

Dans ce mémoire, nous ne présenterons que les résultats obtenus sur des parcelles choisies, dans les deux essais, pour étudier l'effet immédiat du labour aux disques sur la dégradation (par compaction), du sol sous manioc par rapport au sol sous savane.

Dans ce chapitre IV, nous allons d'abord préciser le dispositif parcellaire de chaque essai, puis nous présenterons les techniques culturales utilisées dans les parcelles sélectionnées et les caractéristiques de la plante testée (manioc).

## B. PARCELLES EXPERIMENTALES

### 1. PARCELLES DE L'ESSAI CENTRAL SUR SAVANE, EN SITE NON DEGRADE

Les parcelles de l'essai central ou essai systèmes de culture ( figure IV.1 b et tableau IV.1), ont été créées à partir d'une savane à *Hyparrhenia diplandra* (ou longue jachère paysanne qui n'a jamais été mécanisée auparavant). La parcelle élémentaire type fait 208 m<sup>2</sup>.

Les parcelles de l'essai périphérique (essai travail du sol), ont été installées derrière une jachère cultivée de 2 ans (*Pueraria javanica*), sur un site dégradé par 15 ans de mécanisation de la culture du manioc.

L'essai travail du sol avait pour objectif principal d'étudier à long terme, dans ce cadre bien défini, les moyens de régénérer les caractéristiques physiques de ce sol ferrallitique argileux, dégradé par compaction, afin d'améliorer sa productivité en manioc.

Cet essai fait également partie de l'expérimentation agronomique d'accompagnement du projet FAC (Fond d'Aide et de Coopération), sur la plantation de plateau du Complexe Agro-Industriel d'Etat de Mantsoumba (CAIEM). Il fait suite à la cellule technique gérée par le Bureau pour le Développement de la Production Agricole (BDPA), qui, de 1972 à 1985, a conduit les essais dont découle le système cultural pratiqué sur la plantation du CAIEM.

Tableau IV.1: Répartition des soles de l'essai central, en ouverture de la savane, depuis son implantation en novembre 1987

Année. (Cycle de culture)	TRADIT		BASINT		Hautint 1 et 2			Témoin P14
	P1	(P2 et P3)	P4	(P5)	P6	(P7)	[P8]	
1987. (**1er cycle)	Manioc	(Jachère)	Manioc	(Pueraria)	Manioc	(Arachide)	[Soja]	savane
1988. (*2ème cycle)	Manioc X	(Jachère) X	Manioc X	(Pueraria) X	Manioc X	(EV) X	[EV] X	savane Z
1988. (1er cycle)	Manioc	(Jachère)	Manioc	(Pueraria)	Manioc	(Maïs)	[Maïs]	savane
1989. (2ème cycle)	Manioc X	(Jachère) X	Manioc X	(Pueraria) X	Manioc X	(EV) X	[EV] X	savane ZZ

où

EV: culture d'un engrais vert, au second cycle cultural,  
X et Z: étude de profils culturaux et pédologiques en mai 1988 et 1989  
ZZ: analyses complètes  
\*: 1er cycle cultural: Octobre - Janvier  
\*: 2ème cycle cultural: Février - Mai.  
P: Parcelles expérimentales

L'essai central a pour objectif de comparer l'effet, sur l'évolution et la productivité d'un sol ferrallitique argileux, de quatre systèmes de culture et d'une savane continue. Les quatre systèmes expérimentés sont les suivants:

- TRADIT: Système traditionnel, sans intrants agricoles (travail manuel du sol).  
Première année: manioc et arachide; 2ème année: manioc, puis 6 ans de jachère naturelle;
- BASINT: Système à bas niveau d'intrants (apport de calcaire broyé, travail manuel).  
Première année: manioc et arachide; 2ème année: manioc, puis 2 ans de jachère cultivée (*Pueraria javanica*);

- HAUTINT 1: Système intensif et continu, à haut niveau d'intrants (mécanisation, apport d'engrais et de calcaire broyé).  
Première année: manioc et arachide; 2ème année: manioc, puis engrais vert. Aucune jachère dans cette rotation.
- HAUTINT 2: Système intensif et continu, déjà expérimenté avec succès dans le Niari au CRA de Loudima (mécanisation, engrais vert, apport d'engrais minéraux et de calcaire broyé).  
Au 1<sup>er</sup> cycle, maïs ou soja et au 2<sup>ème</sup> cycle, engrais vert. Aucune jachère naturelle ou cultivée dans la cette rotation.

## 2. PARCELLES DE L'ESSAI PERIPHERIQUE, SUR SITE DEGRADE PAR 15 ANS DE CULTURE MECANISEE DE MANIOC

Tableau IV.2: Répartition des soles de l'essai périphérique, sur site dégradé, depuis son implantation en novembre 1987

Année. (Cycle de culture)	Charrue à socs		Dents lourdes		Disques lourds		Jachère cultivée P7
	P1	(P2)	P3	(P4)	P5	(P6)	
1987. (**1 <sup>er</sup> cycle)	manioc	(manioc)	manioc	(manioc)	manioc	(manioc)	Pueraria
1988. (*2 <sup>è</sup> cycle)	manioc X	(manioc) X	manioc X	(manioc) X	manioc X	(manioc) X	Pueraria X
1988. (1 <sup>er</sup> cycle)	manioc	(manioc)	manioc	(manioc)	manioc	(manioc)	Pueraria
1989. (2 <sup>ème</sup> cycle)	manioc XX	(manioc) XX	manioc XX	(manioc) XX	manioc XX	(manioc) XX	Pueraria X

Où

X: observation de profils culturaux et échantillonnage en juin 1988 et mai 1989

XX: analyses complètes

\*\* : 1<sup>er</sup> cycle cultural: Octobre - Janvier

\* : 2<sup>ème</sup> cycle cultural: Février - Mai

P: Parcelles expérimentales

Le système de référence qui, malgré tout, dégrade par compaction le sol peut être schématisé par (tableaux IV.2 et 3):

- une rotation, en théorie, quadriennale: alternance d'un manioc récolté à 24 mois avec une jachère cultivée (*Pueraria javanica*), de 2 ans;
- mécanisation du travail du sol: disques lourds pour le labour et disques légers pour réduire les grosses mottes;
- apport d'une fumure minérale: calcaire broyé et engrais complet NPK.

## C. CHOIX DES PARCELLES POUR L'ETUDE PHYSIQUE DU SOL

Pour étudier l'effet cumulatif de la mécanisation du manioc sur la dynamique simultanée de la structure et de l'état hydrique d'un sol ferrallitique argileux, les études doivent porter sur des parcelles installées sur un même type de sol mais très différenciées par leur histoire culturale.

Tableau IV.3: Parcelles étudiées dans l'essai central (I) et l'essai périphérique (II) et fumure minérale moyenne (kg.ha<sup>-1</sup>)

Histoire culturale du site	Précédent culturel de la parcelle	Plante ou culture	Essai: Parcelles étudiées	Année de culture	Amendement calcaire (kg.ha <sup>-1</sup> )	Engrais: NPK 20:20:10 (kg.ha <sup>-1</sup> )
Savane - cultures manuelles, jamais mécanisées	Savane	Savane	I: <b>P14</b>	1987 - 1989	-	-
Jachère - Manioc mécanisé depuis plus de 15 ans	<i>Pueraria</i> (2 ans)	Manioc	II: <b>P1 - P6</b>	1987 - 1989	1500	250

Tableau IV.4: Production de racines fraîches de manioc et de biomasse aérienne sèche des plantes naturelles (à 9 mois), ou cultivées à la récolte (moyennes de 8 mesures dans 4 parcelles)

Parcelles observées	Plante spontanée ou cultivée	Tubercules frais à 24 mois		Matière sèche	
		(t.ha <sup>-1</sup> )	CV (%)	(t.ha <sup>-1</sup> )	CV (%)
P14 (savane continue)	<i>Hyparrhenia diplandra</i>			20	18,5
P6 (mécanisée: 1 an)	Manioc (Moudouma local)	27	18,9	15,5	19,2
P5 (mécanisée: 15 ans)	Manioc (Moudouma local)	18	3,7	10,8	13
P7 (mécanisée: 15 ans)	<i>Pueraria javanica</i>			5,6	15

Nous ne traiterons ici que des échantillons provenant de quatre parcelles choisies dans les deux essais décrits précédemment. Les parcelles étudiées sont présentées dans le tableau IV.3 ci-dessus.

Dans le tableau IV.4 ci-après, nous donnons, pour les parcelles étudiées, le rendement moyen en racines fraîches de manioc (27 t.ha<sup>-1</sup>), sur le site non dégradé et 18 t.ha<sup>-1</sup>, sur le site dégradé (ARRIVETS, 1989; NYETE, 1991; communications personnelles), et la production moyenne de biomasse aérienne sèche produite par chaque type de plante considérée.

Il faut rappeler qu'une grande partie de la matière sèche produite par la savane est perdue par incinération. Mais les tiges et feuilles de manioc sont en général gyrobroyées avant la récolte des racines et sont plus tard enfouies par disquage, tout comme le *Pueraria javanica*.

## **D. TRAVAUX CULTURAUX PRATIQUES DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES**

Pour les parcelles N° 6 et 14 de l'essai central et les parcelles N° 5 et 7 de l'essai périphérique, les travaux cultureux mécanisés effectués concernent le rabattage ou le gyrobroyage, le labour, le pulvérisage, le bouturage et les sarclages du manioc.

### **1. RABATTAGE**

En ouverture de la savane, après le dessouchage manuel des arbustes avec la pioche, le rabattage de l'*Hyparrhenia diplandra* a été fait au pulvériseur offset (disques légers). L'herbe ainsi rabattue a été par la suite brûlée.

Sur le site dégradé, le *Pueraria javanica* a été gyrobroyé et enfoui.

Dans les deux cas étudiés, le rabattage a été réalisé à partir du mois d'Avril.

### **2. LABOUR**

Le labour a été réalisé trois à quatre semaines après l'arrêt des grandes pluies (Mai), en sol ressuyé. Les parcelles choisies pour cette étude sont celles qui ont été traitées avec la charrue à soc sur le site non dégradé et aux disques lourds cannelés (rome-plow), sur le site dégradé. La profondeur de travail était partout de 25 cm en moyenne.

### **3. PULVERISAGE**

Après apport de 1,5 tonnes par hectare de calcaire broyé, la reprise des 10 cm supérieurs, aux disques légers ou pulvériseur offset (en 2 à 3 passages), a été réalisée dès les premières pluies (Octobre). Cette opération appelée pulvérisage, très souvent effectuée en humide, permet de réduire les grosses mottes. Cependant, le pulvérisage tasse, malheureusement, la partie inférieure du labour précédent (10 à 25 cm).

A défaut des outils à dents légères qui ne compacteraient pas le sol, le pulvérisage dans l'essai central (sur site non dégradé), a été fait manuellement avec des houes.

### **4. RAYONNAGE**

Le rayonnage, à 1 m d'intervalle, consiste à creuser les sillons de plantation, dans lesquels seront déposées les boutures de manioc. Il est réalisé avec un outil de fabrication locale appelé la "rayonneuse".



a



b



c



d

Planche III.1: Travaux culturels pratiqués dans les parcelles sous culture de manioc à Mantsoumba (Vallée du Niari)

- a: Désherbage manuel (à 1 an de la plantation)
- b: Gyrobroyage du manioc envahi par le *Mimosa pudica* (à 2 ans)
- c: Récolte du manioc par dessouchage des tubercules à l'aide d'une pioche (à 2 ans)
- d: Labour de la parcelle de grande culture quelques jours après la récolte



## 5. PLANTATION ET ENTRETIEN DU MANIOC

Le bouturage du manioc a été manuel: 1 m sur 1 m avec des boutures de 2 ans, placées à plat et légèrement enterrées. Un apport en localisé d'engrais complet (NPK: 20, 20, 10, à la dose de 250 kg.ha<sup>-1</sup>), a été effectué à la plantation. Toutes les parcelles des deux essais ont été sarclées à la houe.

## E. CHOIX DE LA VARIETE DE MANIOC TESTEE DANS LES ESSAIS

De la famille des *Euphorbiacées*, *Manihot esculenta* ou manioc est une plante à racines originaire de l'Amérique du Sud. Introduite en Afrique, bien avant la colonisation européenne, par des navigateurs portugais, le manioc constitue encore près de la moitié des disponibilités énergétiques de l'ensemble des populations de l'Afrique équatoriale et particulièrement celles du Congo. Le manioc compte de très nombreuses variétés locales et améliorées (produites par les Instituts de recherche dans le monde).

C'est Moudouma, la variété locale de manioc amère, qui a été choisie comme principale plante test dans les essais installés à Mantsoumba. Cette variété de manioc, est cultivée dans la plantation du CAIEM et dans les champs paysans du Niari. Moudouma perd la quasi totalité de ses feuilles en saison sèche et fraîche (Juillet, Août), et le nouveau feuillage couvre encore mal le sol pendant les grandes pluies d'octobre et Novembre. Le manioc Moudouma est aussi caractérisé par une tubérisation superficielle (fasciculée ou oblique).

## F. CONCLUSION

Le dispositif expérimental décrit dans ce chapitre IV est donc localisé sur deux sites très voisins mais différenciés uniquement par leur histoire culturale.

Le rendement en tubercules et/ou la matière sèche de la variété locale de manioc et de l'*Hyparrhenia diplandra* donne une idée, d'une part, sur la diminution des rendements sur le site dégradé et d'autre part, sur la biomasse sèche des résidus des récoltes ou du *Pueraria javanica* qui est retournée au sol ou au contraire celle de savane, qui est perdue en fumée (tableau IV. 4). De ce fait, en choisissant **les deux situations les plus contrastées**, c'est-à-dire **la savane et la culture de manioc, fertilisée et mécanisée de plus près de 15 ans**, nous allons pouvoir donc comparer l'effet cumulatif de cette culture sur l'évolution des propriétés physiques de ce sol ferrallitique acide et argileux.

Dans le chapitre V suivant, nous allons d'abord caractériser le sol témoin, sous savane.

---



## CHAPITRE V

### CARACTERISATION DU SOL TEMOIN DE SAVANE

---

*Il s'agit dans ce chapitre V de fournir les caractéristiques pédologiques nécessaires à l'étude de l'évolution de la dynamique de la structure et particulièrement de l'espace poral des différents horizons **du sol ferrallitique acide, jaune et argileux de la Vallée du Nlari sous savane**, en fonction de leur état hydrique.*

*Cette caractérisation permet de mettre en évidence (chapitre VI), les modifications des caractéristiques physico-chimiques de ce sol ainsi que d'analyser (chapitre VII), l'évolution des propriétés physiques consécutives à la culture mécanisée de manioc.*

## A. DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL SOUS SAVANE

La description de profils pédologiques permet de distinguer les différents horizons en précisant leur organisation macroscopique. Elle aboutit aussi à la détermination de leur disposition relative dans les profils et de reconnaître les unités et/ou les niveaux d'organisation du sol, visibles à l'oeil nu (planche V.1).

L'observation, sous savane, de quatre profils pédologiques (jusqu'à 200 cm de profondeur), nous a permis de différencier les horizons pédologiques suivants (MAPANGUI, 1987):

*absent dans la légende*

0 - 10 cm: **horizon A1**, riche en matière organique, brun foncé en humide (7,5 YR 3/2), texture limono-argileuse, structure grumeleuse moyenne et fine, nette, meuble, plus allégé sur les 5 cm supérieurs (A11), puis structure de plus en plus polyédrique subanguleuse moyenne, peu compact en A12 (de 5 à 10 cm), transition inférieure nette;

10 - 35 cm: **horizon AB**, peu humifère, brun vif en humide (7,5 YR 4/4), la texture (au toucher) paraît plus argileuse, structure polyédrique subanguleuse grossière avec peu de micronodules, très compact, transition inférieure graduelle;

35 - 55 cm: **horizon B21**, de pénétration humifère en taches ou traînées verticales (7,5 YR 4/4), ocre jaune en humide (7,5 YR 5/8), texture argileuse, structure polyédrique subanguleuse moyenne associée à de nombreux micronodules, compact à très compact, transition inférieure diffuse;

55 - 200 cm (limite d'observation): **horizon B22**, minéral, ocre jaune en humide (7,5 YR 5/8), texture (au toucher) argileuse après malaxage prolongé, alors qu'elle paraît argilo-limoneuse au début, structure polyédrique subanguleuse fine, peu nette, associée à de très nombreux micronodules, d'aspect arrondi à l'oeil nu, peu compact.

Les racines fines de l'*Hyparrhenia diplandra*, qui pénètrent profondément dans le sol (jusqu'à 2 m et parfois plus), sont surtout concentrées sur les 5 cm supérieurs dans lesquels elles ont un grand effet sur l'ameublissement et la structuration en grumeaux de cet horizon.

La description de la partie supérieure des profils pédologiques (jusqu'à 200 cm de profondeur), montre donc, du bas en haut, une différenciation de l'organisation macroscopique de ce sol: du matériau ferrallitique épais et microagrégé (horizon B2) on passe à un horizon AB sub-superficiel, plus compact ou plus consistant, puis à l'horizon de surface A1, meuble et allégé par la matière organique.

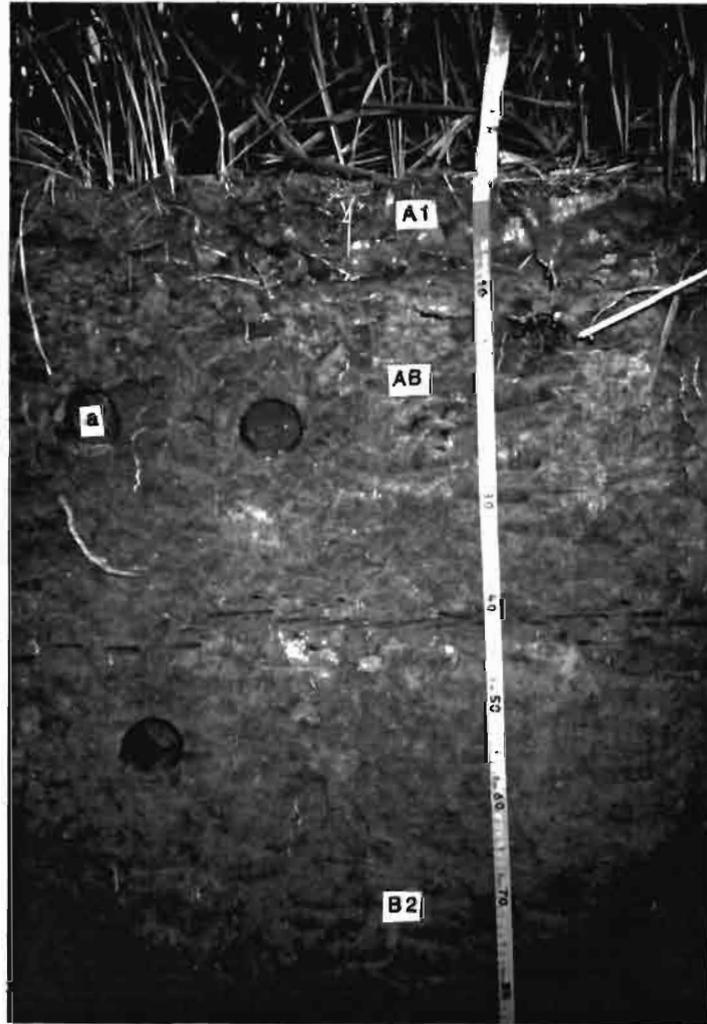


Figure IV.1: Profil du sol ferrallitique jaune argileux (sous savane) de la Vallée du Niari (Congo)

- a: prélèvement pour la densité apparente
- A1: Horizon humifère superficiel
- AB: Horizon subsuperficiel de transition
- B2: Horizon profond (matériau ferrallitique)



## B. CARACTERISTIQUES MICROMORPHOLOGIQUES DU SOL SOUS SAVANE

Celle-ci est commune à tous les échantillons étudiés provenant aussi bien du sol témoin sous savane que du sol sous culture mécanisée de manioc.

### 1. MATERIEL ET METHODE

Pour connaître l'organisation d'un matériau pédologique, il est intéressant d'aborder simultanément l'étude de l'arrangement des particules qui le constituent et celle de l'espace poral qui en résulte (CAMBIER et PROST, 1981).

Nous avons utilisé pour cela, des cylindres de sol non perturbés qui ont été imprégnés à différents potentiels de l'eau [à pF 0, pF 3, pF 4 et à pF 6 (séché à l'air)], de résine additionnée d'un produit fluorescent aux rayons UV. Des lames minces orientées horizontalement nous ont permis d'étudier, plus particulièrement l'arrangement latéral des particules, par reconnaissance des phases naturelles et structurales en microscopie optique.

La terminologie utilisée ici est celle de BREWER (1964). De la sorte, on espère reconnaître certains niveaux d'organisation et connaître pour chacun d'eux le mode d'assemblage des constituants.

### 2. DIFFERENCIATION DE L'ORGANISATION A L'ECHELLE DES CONSTITUANTS DANS LE PROFIL DU SOL SOUS SAVANE

#### a. RESULTATS

Les observations microscopiques, sur lames minces provenant de cylindres décimétriques de sol humide (pF égal à 0) inclus après échange eau-acétone-résine, donnent les résultats suivants (planche V.2):

#### - Horizon B2

*Fond matriciel* constitué de (photo B2 de la planche V.2).

- + Plasma intramatriciel argileux, jaune, abondant et qui présente en lumière polarisée des extinctions tachetées correspondant à la présence de domaines anisotropes;
- + Squelette composé essentiellement de quartz et de quelques éléments ferro-manganites indurés. Environ 1/3 des quartz représenterait les résidus de carbonates: quartz cariés, plus gros et allongés, contenant des inclusions ferro-manganiques de couleur rouge et noire;
- + Fraction limoneuse assez importante (19 % environ), riche en quartz fins (taille de 40

µm environ);

*Traits pédologiques observés dans certains pores seulement et au sein du fond matriciel:*

- + concentrations plasmiques, sous forme soit de nodules brun rouges et brun noires, pour la plupart en discontinuité structurale avec le fond matriciel, soit de taches aux limites plus diffuses.
- + quelques cutanes d'argile fine qui sont présents seulement dans un nombre très limité de pores tubulaires. Ces plasmas cutaniques ou argillanes (de 1 µm environ d'épaisseur), sont non fragmentés et souvent lités (photo B2 de la planche V.2);
- + orientations plasmiques sans direction dominante, qui sont généralement localisées au sein du fond matriciel et plus faiblement autour des agrégats ou de grains du squelette;
- + ferruginisation actuelle ou subactuelle sous forme de taches ferro-manganites qui indiquent ainsi une hydromorphie très temporaire.

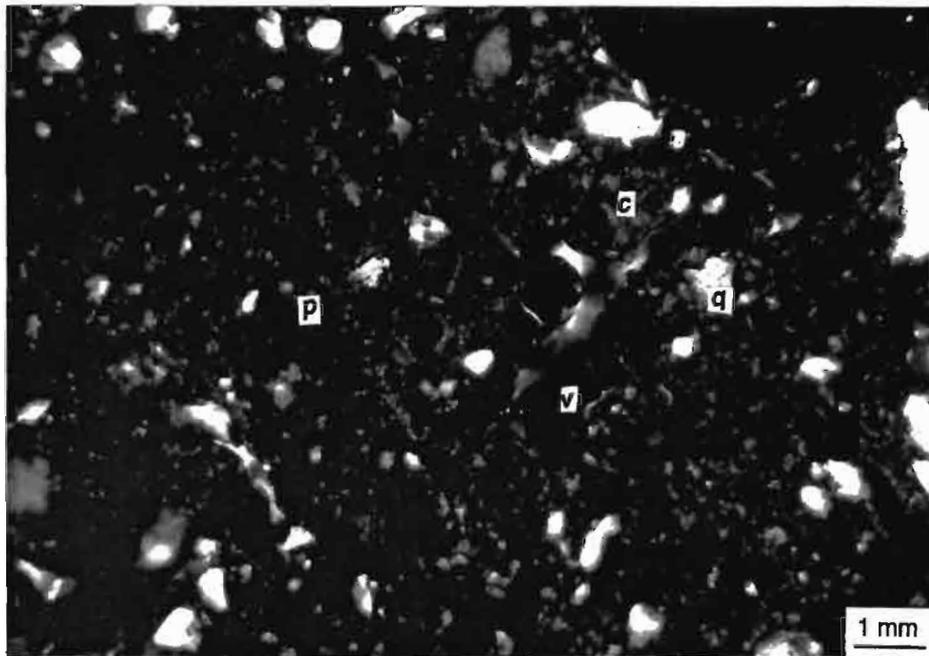
- Horizon AB

*Fond matriciel* comportant (photo AB de la planche V.2);

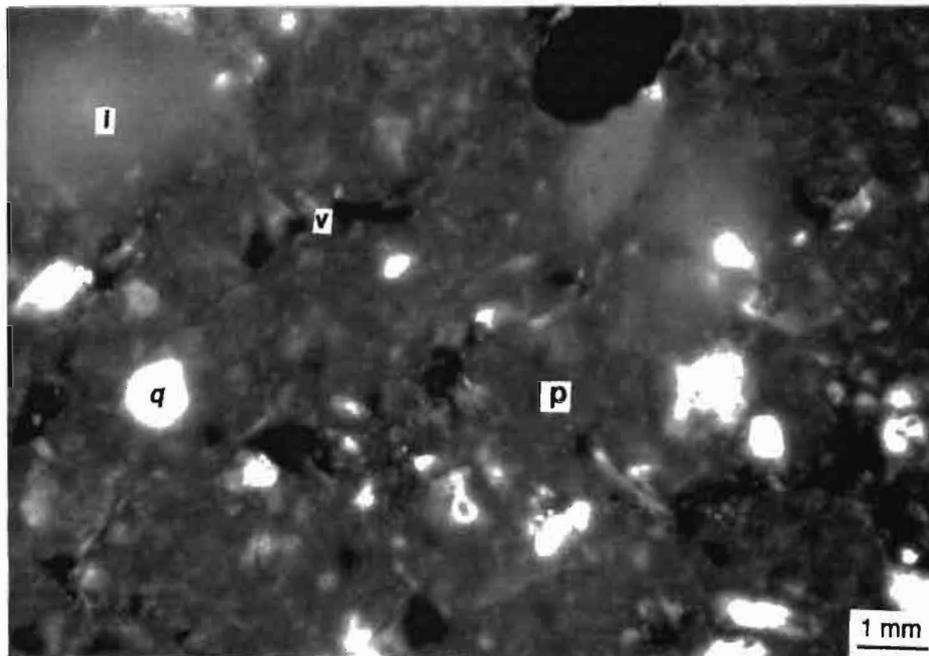
- + Plasma intramatriciel argilo-organique, brun sombre, abondant et qui présente également une extinction tachetée;
- + Squelette essentiellement quartzeux avec quelques nodules ferro-manganiques. On note aussi la présence de quelques gros quartz allongés et cariés, avec des inclusions d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse;
- + Fraction limoneuse essentiellement constituée de quartz fins (40 µm environ de taille);

*Traits pédologiques moins abondants que dans l'horizon B2:*

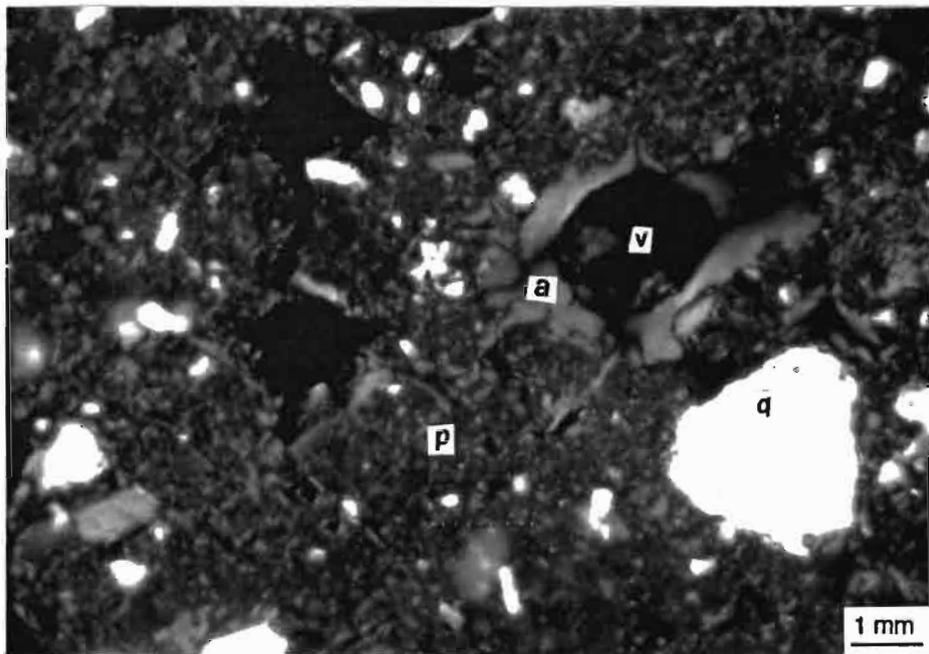
- + concentrations plasmiques brun noires et brun rouges, sous forme de nodules ou de taches au sein du fond matriciel;
- + rares cutanes, d'argile grossière dans quelques pores biologiques;
- + très faibles orientations plasmiques le long de certains pores entassement d'agrégats et certains grains de quartz;
- + quelques intercalations ou dépôts argileux au sein du fond matriciel;
- + débris de charbon de bois, distribués assez régulièrement dans la masse. Ils sont parfois partiellement oxydés;
- + quelques remontées de l'horizon B2 jaune sous-jacent.



A1



AB



B2

Planche IV.2: Organisation du sol de savane: plasma abondant (p); vides nombreux (v); quelques traits pédologiques tels que concentrations plasmiques (c) en A1, intercalations (i) en AB et argillanes (a) en B2; squelette essentiellement quartzeux (q)



- Horizon A1

*Fond matriciel*: il comprend (photo A1 de la planche V.2):

- + Plasma organo-argileux, sombre, abondant, qui présente aussi une extinction tachetée;
- + Squelette essentiellement quartzeux avec quelques nodules ferro-manganites. On note aussi la présence de quelques gros quartz allongés et cariés, avec des inclusions d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse;
- + Fraction limoneuse essentiellement constituée de quartz fins (40  $\mu\text{m}$  environ de taille);

*Traits pédologiques* composés principalement de:

- + débris de charbon de bois, plus nombreux et distribués assez régulièrement dans la masse. Certains d'entre eux sont partiellement oxydés;
- + quelques remontées brunes de l'horizon AB sous-jacent.
- + quelques concentrations plasmiques brun noires à brun rouges au sein du fond matriciel.

## **b. DISCUSSION**

La présence de cutanes, en profondeur, indique que les argiles fines migrent très partiellement avec les eaux d'infiltration et se déposent, sous forme d'argillanes lités, dans certains vides d'entassement les plus fins.

Le matériau ferrallitique argileux (horizon B2), présente des orientations plasmiques dans plusieurs directions, qui sont des manifestations de nombreuses tensions isolées ou en réseau dues à l'activité biologique et/ou aux phénomènes saisonniers de retrait-gonflement.

L'horizon sub-superficiel (AB), qui apparaît moins poreux, présente quelques dépôts argileux au sein du fond matriciel.

Dans les horizons de surface (A1), l'activité faunique est plus importante et se traduit par un système de vides interagrégats grossiers, contenant parfois du charbon de bois, des boulettes organiques et de débris de chitine.

La présence de quartz grossiers plus allongés, cariés et contenant des inclusions de fer et de manganèse, semble démontrer le lien parental que tous les horizons étudiés auraient entre eux et avec le substratum schisto-calcaire.

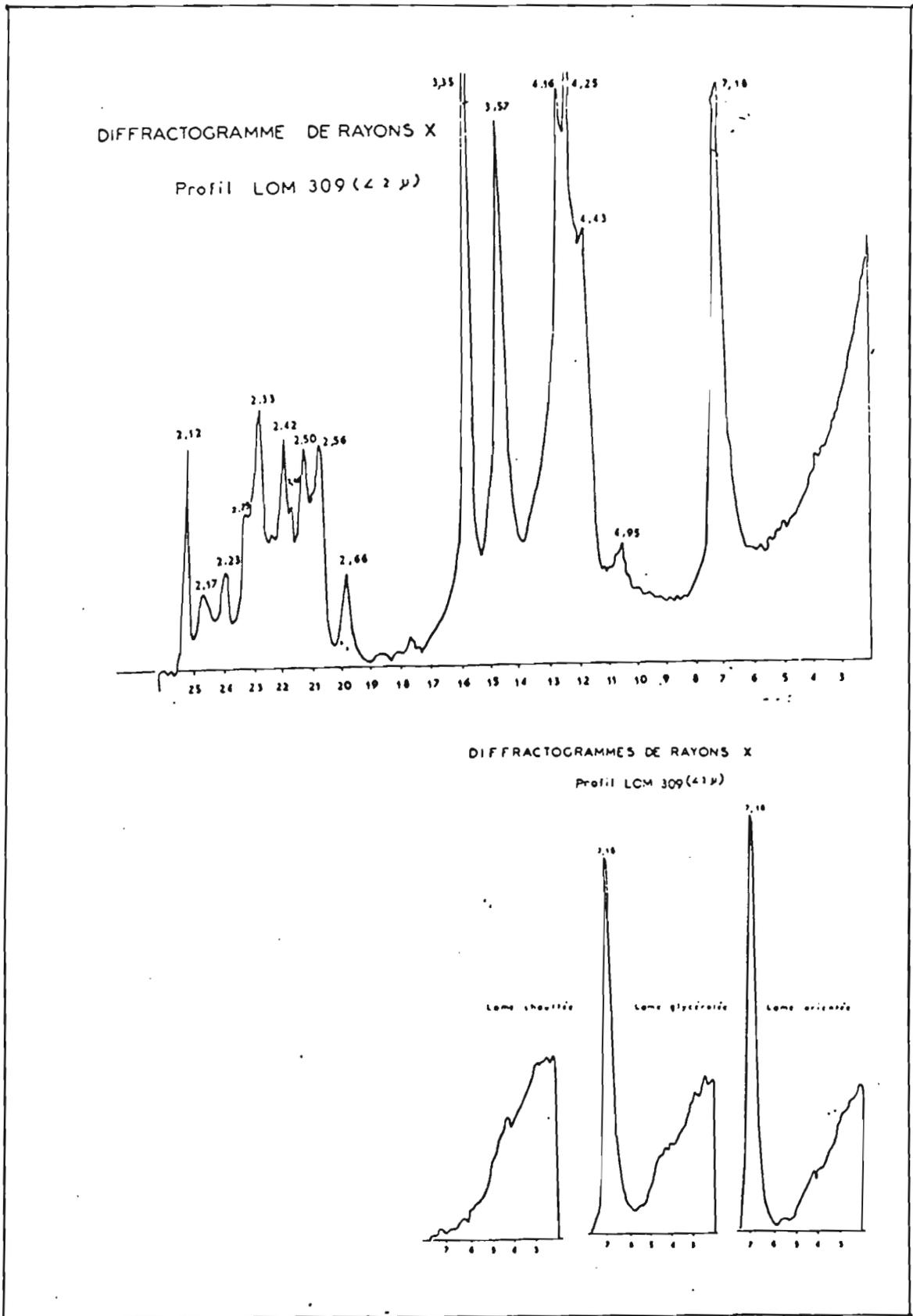


Figure V.1: Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B2 du sol témoin sous savane

## C. MINÉRALOGIE DU SOL SOUS SAVANE

### 1. DIFFRACTION AUX RAYONS X DE LA PHASE ARGILEUSE

#### a. MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'étude minéralogique qualitative de la fraction argileuse a été effectuée par diffraction des rayons X au Centre INRA de Versailles, à partir d'échantillons prélevés à trois niveaux dans les quatre profils sous savane. Elle a été faite avec un diffractomètre Siemens, équipé d'un tube cobalt. La méthode de séparation des argiles ainsi que les interprétations des diagrammes obtenus ont été conformes aux descriptions de ROBERT et TESSIER (1974).

#### b. RESULTATS ET DISCUSSION

Les diffractogrammes de poudre de tous les échantillons étudiés (figure V.1), présentent des pics bien marqués du quartz (4,25 Å; 3,35 Å; 2,42 Å), de la goethite (4,16 Å), de l'hématite (2,68 Å) et de la kaolinite qui y est dominante et bien cristallisée (7,18 Å; 3,57 Å et triplets nets).

Les spectres obtenus par divers traitements (lames orientées, chauffage, traitement au glycérol), donnent des résultats qui confirment la composition minéralogique précédente, tout à fait conforme aux traits généraux décrits auparavant.

Tous les spectres de DRX montrent une grande homogénéité dans la composition minéralogique des différents horizons pédologiques du sol étudié: kaolinite, quartz et goethite y sont dominants.

### 2. ANALYSE THERMO-GRAVIMÉTRIQUE

#### a. MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'étude minéralogique semi quantitative a été réalisée, par analyse thermo-gravimétrique, sur la terre fine (< 2 mm), réduite en poudre. L'appareil utilisé est de type SETERAM MTB 10-8, comprenant un four symétrique avec l'analyseur thermique combiné à la microbalance. Les mesures, simultanées ATD-ATG, ont été faites sur 50 mg de matériau, à une vitesse de chauffe de 1000°C par heure.

Les mesures sont généralement effectuées sous atmosphère naturelle c'est-à-dire oxydante. Mais dans les horizons de surface riches en matières organiques, elles ont été faites sous atmosphère d'azote, ce qui permet d'éliminer les phénomènes de combustion des matières organiques du sol, afin de mieux faire apparaître les réactions endothermiques

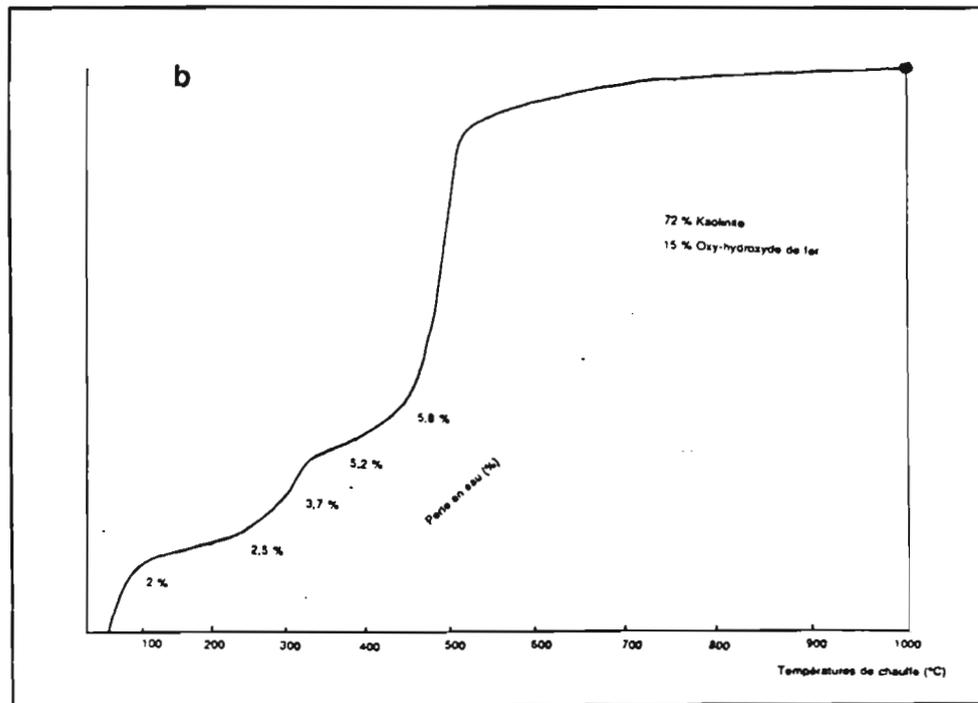
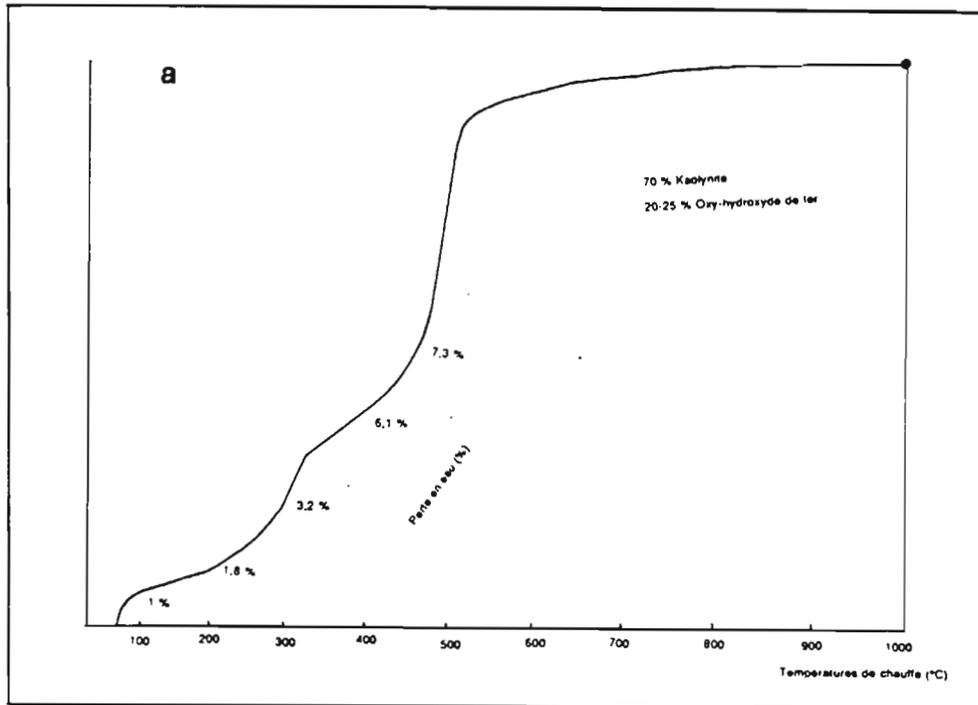


Figure V.2: Courbes thermo-gravimétrique des horizons A1 (a) et B2 (b) du sol sous savane

(bonne cristallinité), ou exothermiques (mauvaise cristallinité), des oxy-hydroxydes de fer principalement.

## **b. RESULTATS ET DISCUSSION**

Les résultats de l'analyse thermique différentielle sont donnés sur les figures V.2 et 3. La présence d'un pic intense à 500°C indique la présence de la kaolinite dominante et bien cristallisée. La hauteur du pic à 70°C (eau d'hydratation), indique la présence de particules de kaolinites très fine. Celui à 325°C révèle l'existence de la goethite et/ou de la gibbsite. Le pic à 575°C est caractéristique du quartz. Le pic endothermique est peut être dû à la présence de minéraux bisiallitiques (2/1). Mais, ceci n'est pas visible sur les spectres de rayons X.

Ces données sont en accord avec les résultats de la DRX et montrent que la minéralogie des différents horizons de ce sol est dominée par la présence de la kaolinite, du quartz et des oxy-hydroxydes de fer.

## **D. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL SOUS SAVANE**

### **1. MATERIEL ET METHODES**

Sur la terre fine, les déterminations physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire du CIRAD, à Montpellier, en utilisant les méthodes suivantes:

- CEC et cations échangeables, par la méthode au chlorure de cobaltihexamine: mesures réalisées au pH eau du sol (AFNOR, 1985);
- pH H<sub>2</sub>O et pH KCl: mesures faites en suspension, avec un rapport solide/liquide égal à 1/2,5;
- matières organiques du sol, par la méthode qui utilise un flux d'oxygène.

### **2. RESULTATS ET DISCUSSION**

Les résultats obtenus sont présentés de deux manières:

- dans les tableaux V.1 et 2 qui donnent les résultats par horizon;
- sur les figures (4, 5, 6 et 7) où ils sont représentés en fonction de la profondeur du sol, jusqu'à 100 cm, (limite de prélèvement).

La capacité d'échange cationique (CEC) est faible: 5 me.100 g<sup>-1</sup> dans l'horizon A1 et 3,7 à 2,7 me.100 g<sup>-1</sup> dans les horizons AB et B2.

La somme des bases échangeables est aussi faible: 2,6 me.100 g<sup>-1</sup> dans l'horizon A1, et 1,4 à 0,5 me.100 g<sup>-1</sup> dans les horizons AB et B2 sous-jacents.

Le taux de saturation, mesuré au pH du sol, est égal à 75 - 84 % dans l'horizon A1, à 68 % dans l'horizon AB et à 79 % dans l'horizon B2.

Les taux en aluminium et manganèse échangeables sont très faibles dans les 10 cm supérieurs : respectivement de 0 à 0,6 me.100 g<sup>-1</sup> (avec une saturation en Al de 0 à 18 %), et de 0,3 à 0,8 me.100 g<sup>-1</sup>, avec une saturation en Mn de 7 à 25 %). Ils augmentent dans l'horizon AB: respectivement de 0,87 à 1,40 me.100 g<sup>-1</sup> (avec des taux de saturation en Al échangeable de 27,5 % à 49 %), et de 0,19 à 0,78 me.100 g<sup>-1</sup> (avec une saturation en Mn échangeable de 7,5 % à 25 %).

Tableau V.1: *Caractéristiques physico-chimiques du sol témoin, sous savane (extraction au chlorure de cobalthexamine) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)*

Horizon	Profondeur (cm)	Ca <sup>++</sup> (me.100g <sup>-1</sup> )	Mg <sup>++</sup> (me.100g <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> et Na <sup>+</sup> (me.100g <sup>-1</sup> )	Σ BE (me.100g <sup>-1</sup> )	CEC (me.100 g <sup>-1</sup> )	Saturation (%)
<b>A1</b>	5	2,05	0,40	0,20	2,6	5,1	82
	10	1,00	0,20	0,15	1,3	3,5	89
<b>AB</b>	20	1,05	0,23	0,14	1,4	3,7	93
	30	0,80	0,10	0,10	1,0	3,5	80
<b>B2</b>	50	0,20	0,01	0,04	0,2	2,7	68
	100	0,15	0,01	0,05	0,2	3,5	79

Les pH H<sub>2</sub>O et pH KCl sont acides dans tout le profil du sol: respectivement de 5 à 5,5 et de 3,85 à 4,5.

Le taux de matière organique est de 5,0 % dans l'horizon A1, de 1,5 % dans l'horizon AB, et de 1,05 % dans l'horizon B2 observé jusqu'à 100 cm de profondeur au moins.

Le rapport C/N est, dans l'horizon A1 superficiel, moyen et varie peu: de 12 à 14. En profondeur, il descend à 9 - 7.

*Il ressort des données physico-chimiques précédentes (tableau V 2) que les sols étudiés sont acides (pH eau ≤ 5,5), avec un complexe d'échange faiblement garni en bases échangeables.*

Pour des sols ferrallitiques, la teneur pondérale en matière organique est importante dans l'horizon A1 (5 %). Mais en dessous, elle baisse rapidement à 1,5% dans l'horizon AB sous-jacent et à 1,05 % jusqu'à 100 cm de profondeur. Le rapport C/N faible (≤ 14), indique que cette matière organique est assez évoluée, sous forme d'humus de type "mull acide".

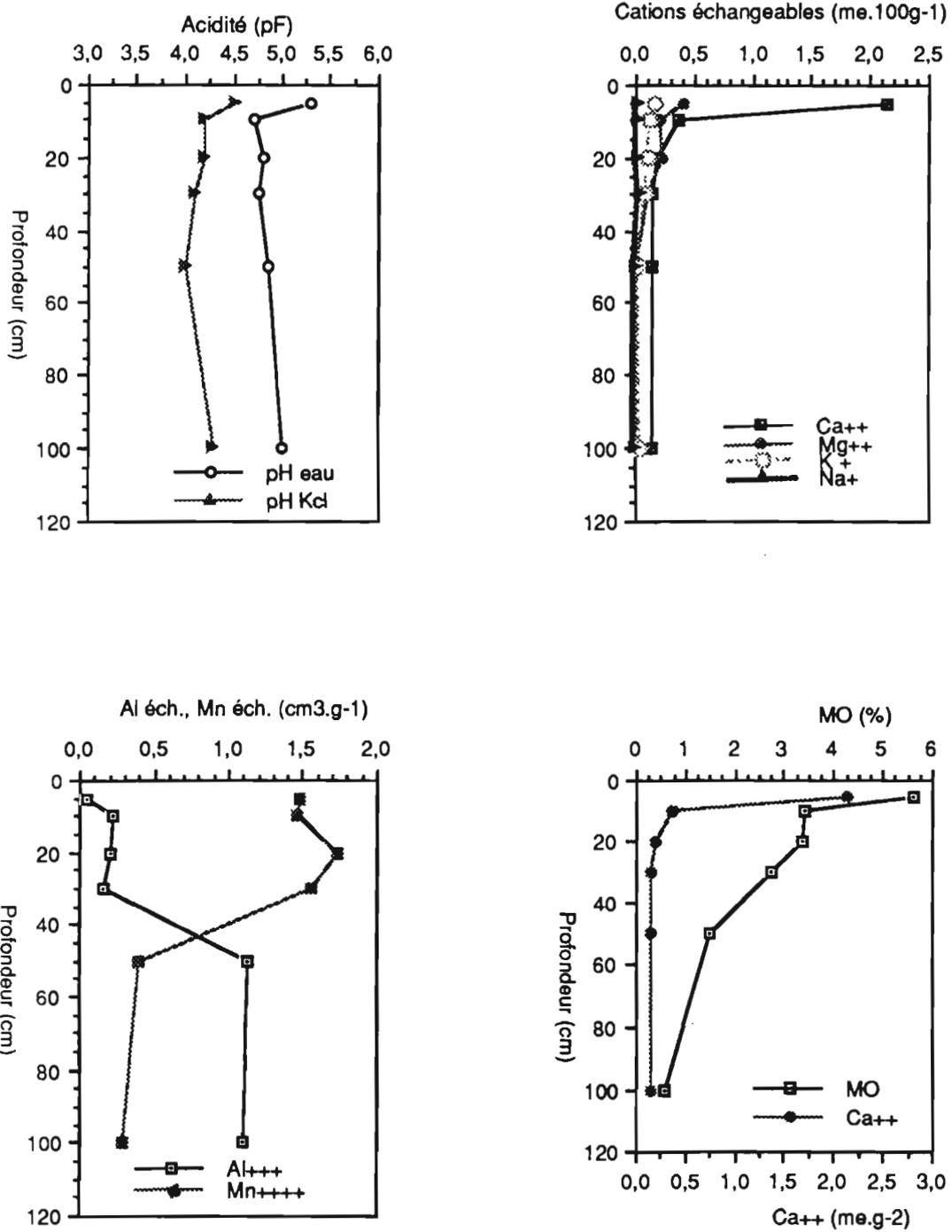


Figure V.3: Principales caractéristiques physico-chimiques (pH, cations échangeables) et teneur en matière organique du sol sous savane

Tableau V.2: Taux de matière organique, du fer total et acidité du sol témoin, sous savane (extraction au chlorure de cobaltihexamine) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

Horizon	Profondeur (cm)	M O %	C total %	N total ‰	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Fer total %
A1	5	5,61	3,62	2,3	5,3	4,5	9,15
	10	3,42	1,99	1,49	4,7	4,2	9,15
AB	20	3,37	1,96	1,45	4,8	4,2	7,8
	35	2,72	1,58	1,18	4,8	4,1	7,8
B2	50	1,51	0,92	1,11	4,9	4,0	7,85
	100	0,58	0,30	0,89	5,0	4,3	7,85

La faiblesse relative de la capacité d'échange cationique est ici en accord avec la présence de kaolinite. Dans les horizons humifères, elle est plus élevée en relation avec la teneur en matière organique.

## E. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL SOUS SAVANE

### 1. GRANULOMETRIE DE LA TERRE FINE

#### a. MATERIEL ET METHODE

L'analyse granulométrique des échantillons étudiés a été effectuée sur la terre fine (< 2 mm), au laboratoire du CIRAD à Montpellier. La méthode consiste à prélever les fractions fines à la pipette Robinson et à séparer les fractions grossières au tamis, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée (pendant 24 heures), dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium, agitation aux ultrasons (pendant 10 minutes) et sédimentation.

Toutes les fractions granulométriques fines et grossières obtenues sont pesées, après séchage à l'étuve à 105°C.

#### b. RESULTATS ET DISCUSSION

Bien que présentant au toucher une texture limono-sableuse, le sol ferrallitique des plateaux du Niari est argileux. L'analyse granulométrique des échantillons étudiés montre que ce sol a une texture fine argileuse dans tout le profil (Tableau V 3):

- Les taux d'argile (< 2 µm) varient entre 52 %, en surface, et 65 % jusqu'à 100 cm de profondeur.
- La teneur en limons fins (2-20 µm) est de 16 % en surface et de 8 % en profondeur.

Celle des limons grossiers (20-50  $\mu\text{m}$ ) est partout inférieure à 11 %.

- Le taux de sables fins (50-200  $\mu\text{m}$ ) est de 14 à 16 % en surface et de 12 % en profondeur. Celui des sables grossiers (200  $\mu\text{m}$  - 2 mm) est de 8 % en surface et de 5 % en profondeur.

D'après les résultats de l'analyse granulométrique, on observe un faible appauvrissement en argile granulométrique dans les 10 cm supérieurs (taux d'appauvrissement moyen de 1/1,2). Cependant, il n'y a pas de ventre d'argile dans le profil.

Tableau V.3: *Granulométrie du sol sous savane (terre fine après destruction de la matière organique) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)*

Horizon	Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)
A1	5	52,3	16,3	8,9	14,2	8,3
	10	52,9	14,2	8,3	16,0	8,6
AB	20	60,6	12,8	7,1	14,6	4,9
B2	100	64,8	8,0	10,8	11,6	4,7

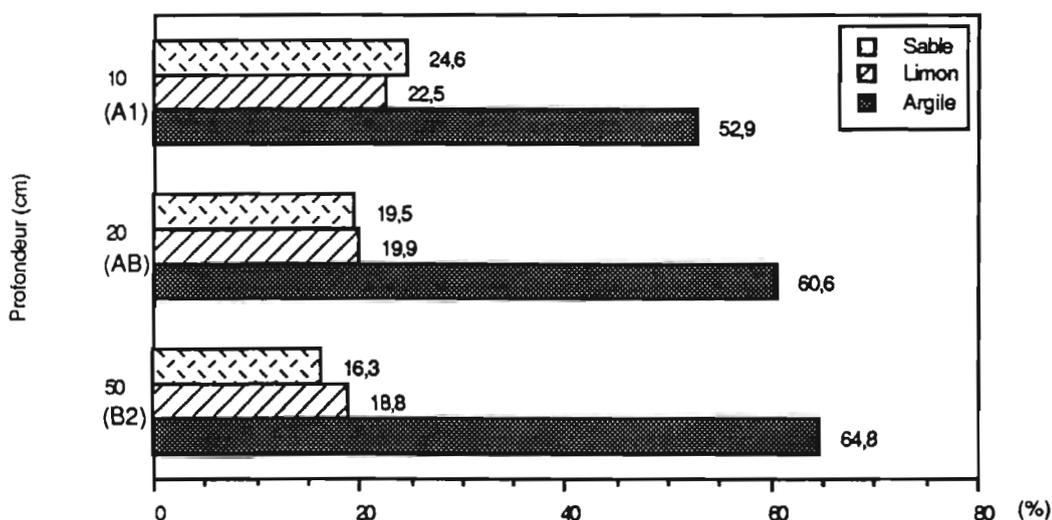


Figure VI.8: Granulométrie de la terre fine du sol sous savane

## 2. VOLUME MASSIQUE DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DU SOL SOUS SAVANE

### a. MATERIEL ET METHODE

Le volume et la masse des échantillons décimétriques, provenant des horizons pédologiques étudiés, ont été mesurés: échantillonnage à l'aide de cylindres standards de 100

cm<sup>3</sup>, pesés avant et après une mise à l'étuve à 105°C, pendant 48 h. Les prélèvements ont été faits en pleine saison sèche, verticalement, jusqu'à 200 cm de profondeur au maximum.

L'hétérogénéité du terrain a été précisée par quatre à six répétitions.

Un profil de volume massique (ou spécifique) moyen est présenté sur la figure V.5.

## b. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent que le volume spécifique total du sol, qui est constant dans le matériau ferrallitique profond (horizon B2), baisse dans l'horizon AB subsuperficiel puis augmente fortement dans l'horizon A1 de surface. Ainsi de bas en haut, le volume spécifique du sol varie de la façon suivante (tableau V.4):

- dans l'horizon B2 microagrégé,  $v_d$  moyen est stable et égal à 0,75 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>;
- dans l'horizon AB massif mais grossièrement fragmenté en sec par les fentes de retrait,  $v_d$  moyen est de 0,69 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>;
- dans l'horizon A1 grumeleux et meuble,  $v_d$  moyen est de 0,98 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>.

Sous savane, les profils de volume massique du sol étudié indiquent la présence d'un horizon AB sub-superficiel, plus compact et d'un horizon A1 de surface plus meuble (figures V.5). Ainsi, le poids des horizons sus-jacents n'est donc pas un facteur essentiel de l'assemblage des particules solides.

Les profils de volume massique moyen de cylindres décimétriques et de particules solides du sol témoin sous savane présentent, une allure similaire à Mantsoumba comme à Loudima (MAPANGUI, 1981). De ce fait, elle est donc caractéristique de la Vallée du Niari (figure V.5).

Tableau V.4: *Volume massique total et masse volumique de cylindres du sol sous savane à Mantsoumba (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)*

Horizon	A1	AB	B2		
Profondeur (cm)	5	25	50	100	150
Volume massique ( $v_d$ ) (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	0,98	0,69	0,74	0,75	0,75
Masse volumique ( $\rho_d$ ) (g.cm <sup>-3</sup> )	1,02	1,45	1,35	1,33	1,33
Ecart-type	0,13	0,05	0,03	0,08	0,05

### 3. VOLUME MASSIQUE DES CONSTITUANTS SOLIDES DU SOL

#### a. MATERIEL ET METHODE

Le volume occupé par une masse connue de particules solides du sol a été obtenu par la méthode classique au pycnomètre: des échantillons séchés, tamisés à 2 mm, et réduits en poudre sont placés dans des pycnomètres de 50 cm<sup>3</sup> remplis d'eau distillée et soumis au dégazage sous vide.

La fraction du volume total du sol occupée par les particules solides ( $V_s$ ), rapportée à l'unité de leur masse sèche ( $M_s$ ), exprime le volume massique de solide (noté  $v_s$ ):

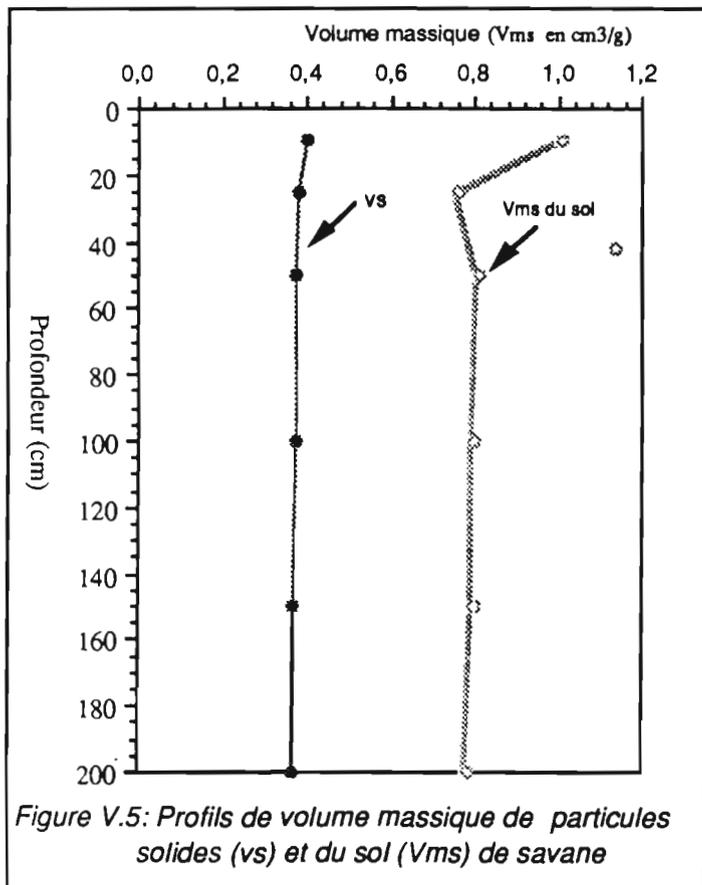
$$v_s = V_s/M_s \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$$

En effet, si  $d_r$  est la densité réelle des particules solides, le volume massique de solide ( $v_s$ ), qui est aussi égal à l'inverse de sa masse volumique ( $\rho_s$ ), se calcule:

$$v_s = 1/\rho_s = 1/\rho_w \cdot d_r \quad (\text{où } d_r = \rho_s/\rho_w \text{ et si } \rho_w = 1),$$

$$v_s = 1/d_r \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$$

#### b. RESULTATS ET DISCUSSION



Six répétitions ont permis d'avoir une bonne valeur moyenne des résultats.

Le tableau V.5 montre que  $v_s$  est de  $0,40 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dans l'horizon A 1, de  $0,39 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dans l'horizon AB et de  $0,37 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dans l'horizon B2. Les variations verticales du volume spécifique des particules solides sont très faibles dans le sol sous savane. Ces résultats sont en accord avec ceux de KILASARA (1990), mettant en évidence la variation du volume spécifique des constituants solides en fonction de la teneur en matière organique qui diminue fortement en profondeur.

Le volume massique de solide du sol ferrallitique argileux des plateaux de la Vallée du Niari est assez constant dans le profil du sol sous savane.

Tableau V.5: *Volume massique et masse volumique des particules solides du sol sous savane (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)*

Horizon	A1	AB	B2		
Profondeur (cm)	5	20	50	50	200
Volume massique de solide [ $v_s$ ] ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,40	0,39	0,37	0,37	0,37
Masse volumique de solide [ $\rho_s$ ] ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2,50	2,56	2,72	2,72	2,72
Ecart-type	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

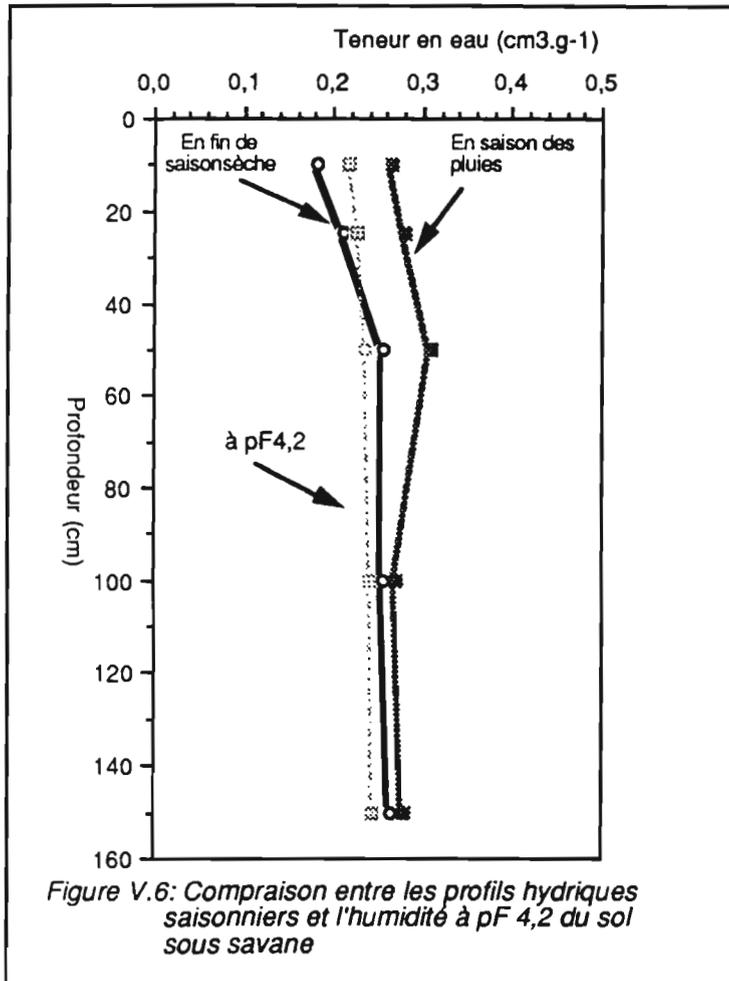
## F. PROFILS HYDRIQUES SAISONNIERS DU SOL SOUS SAVANE

### 1. MATERIEL ET METHODES

Les profils hydriques saisonniers (jusqu'à 200 cm de profondeur), ont été réalisés de janvier (en pleine saison de pluies), jusqu'au mois d'août (en fin de saison sèche). Ainsi, les prélèvements ont été faits à la tarière tous les 10 cm dans les 50 cm supérieurs et tous les 50 cm jusqu'à 200 cm de profondeur. En cas de grosses pluies, les prélèvements ont été effectués après un ressuyage de 24 heures environ. Les échantillons ainsi prélevés ont été pesés avant et après séchage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ .

Les résultats sont exprimés également en volume massique d'eau (noté  $v_\theta$ ), c'est-à-dire en volume d'eau par unité de masse d'échantillon sec (à  $105^\circ\text{C}$ ).

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION



La figure V.6 et le tableau V.6 présentent les profils hydriques de pleine saison de pluies, de début et de fin de saison sèche.

On observe un écart important entre les périodes pluvieuse et sèche: de la surface jusqu'à 50 cm de profondeur, l'écart entre les deux extrêmes varie de 0,08 à 0,06  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . En dessous, cet écart diminue progressivement pour se stabiliser à 0,02  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  entre 100 et 200 cm.

Aux extrêmes saisonniers le volume poral occupé par l'eau augmente nettement de haut en bas des profils:

- en saison de pluies, après des grosses averses, le volume d'eau dans le profil s'établit rapidement (au bout de 24 à 48 h) à une valeur considérée comme la capacité au champ: de 0,26  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  dans les 10 cm supérieures, elle augmente fortement, jusqu'à 0,31  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  entre 10 et 40 cm, puis rediminue jusqu'à 0,28  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  entre 100 à 200 cm de profondeur;

- en fin de saison sèche l'humidité est bien au-dessous du pF 4,2 (0,21-0,24 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>), dans les 40 cm supérieurs, puis elle se maintient proche de la capacité au champ, jusqu'à 200 cm.

Tableau V.6: *Volume massique d'eau, en saison de pluies, en saison sèche et à pF 4,2, du sol sous savane (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)*

Horizon	A1	AB	B2			
Profondeur (cm)	5	25	50	100	150	200
Volume massique d'eau ( $V_e$ ) (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ), en saison de pluies	0,27	0,28	0,31	0,27	0,28	0,28
Volume massique d'eau ( $V_e$ ) (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ), en saison sèche	0,18	0,21	0,26	0,26	0,27	0,27
Volume massique d'eau ( $V_e$ ) (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> ), à pF 4,2	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24

Le comportement hydrique de ce sol de savane de la Vallée du Niari, est bien caractéristique de cette région: un seul cycle majeur, en saison normale, d'humectation-dessiccation par an, et l'humidité du sol ne descend pas en dessous de pF 4,2 entre les pluies. En saison sèche, après le brûlis des graminées, le sol ne se dessèche fortement (humidité très inférieure à pF 4,2) que dans les 40 cm supérieurs.

Cela indiquerait qu'il s'y produit une importante dessiccation par évaporation directe. Cette dessiccation poussée au-dessus de pF 4,2 concerne donc les horizons A1 et AB supérieurs.

Ainsi, la différenciation du pédon en horizons majeurs qui a été précédemment révélée par les profils de volume massique se retrouve aussi dans la dynamique saisonnière de l'eau.

## G. CONCLUSION

Toutes les caractéristiques étudiées montrent que le sol ferrallitique argileux, qui occupe les sommets bien drainés des interfluves de la Vallée du Niari, présente, jusqu'à 2 m de profondeur, une composition minéralogique assez simple: kaolinite, quartz et oxy-hydroxydes métalliques.

Du point de vue physico-chimique, ce sol est acide, pauvre en cations échangeables et assez pourvu en matières organiques (dans les 10 cm supérieurs).

Cependant, morphologiquement et physiquement, les profils observés jusqu'à 200 cm de profondeur, se différencient nettement en trois types d'horizons:

- l'horizon A1, superficiel bien agrégé, friable et allégé par l'activité biologique (racines de graminées et faune du sol);
- l'horizon AB, sub-superficiel compact, massif en humide et largement fissuré en sec. Ces caractères s'observent bien en période sèche;
- l'horizon B2 (profond), d'aspect massif, peu compact.

La texture (au toucher), qui est argilo-limoneuse au départ, devient argileuse, dans tous les horizons, après malaxage prolongé.

A ce stade de l'étude, les parts respectives du climat et de l'homme dans le déterminisme de cette différenciation zonale du profil pédologique sont difficiles à préciser.

En raison d'une plus grande sécheresse du climat local, les brûlis saisonniers de la savane accentuent certainement la condensation des horizons AB sub-superficiels.

Cependant, le pédoclimat qui n'est pas identique en tous points des plateaux de la Vallée du Niari, devrait moduler la dégradation naturelle (par condensation sub-superficielle), qui représente vraisemblablement la variation zonale maximale.

---



## CHAPITRE VI

### MODIFICATIONS DU SOL SOUS CULTURE INTENSIVE ET MECANISEE DE MANIOC

---

*La caractérisation du sol sous savane (chapitre V) a démontré que le sol ferrallitique de la Vallée du Niari est acide, argileux mais il est bien pourvu en matière organique et finement microstructuré en profondeur.*

*Sous culture, nous nous intéressons surtout aux 25 premiers cm perturbés par la mécanisation du travail du sol, dans la Vallée du Niari.*

*L'étude de profils culturaux, sur le terrain, nous a permis l'identification de volumes culturaux élémentaires qui ont été échantillonnés et analysés.*

*Dans ce chapitre VI, nous allons pouvoir caractériser le sol sous culture mécanisée et fertilisée de manioc afin de mettre en évidence les modifications physico-chimiques consécutives à la mise en culture.*

## A. DESCRIPTION DES PROFILS CULTURAUX SOUS CULTURE MECANISEE DE MANIOC

### 1. MATERIEL ET METHODE

Dans les parcelles cultivées retenues pour cette étude, nous avons décrit 12 profils culturaux creusés perpendiculairement au sens du travail du sol (2 m x 0,5 m x 0,5 m). L'appréciation des types de structure et de leur netteté a été faite en utilisant les techniques d'observation pédologique. Mais, les différents éléments structuraux créés par le travail du sol ont été considérés comme des surstructures des assemblages naturels.

### 2. RESULTATS ET DISCUSSION

Sur les terres dégradées par quinze ans de mécanisation, on observe l'individualisation d'un horizon anthropique superficiel. Epais de 25 cm en moyenne, il est différencié en deux couches superposées et bien contrastées, quant à leur état structural et leur consistance (planche VI.1):

- Dans les 10 cm superficiels, pulvérisés par des disques légers, s'individualise une couche meuble, constituée de petites mottes emballées dans des agrégats polyédriques et grumeleux. Cette couche superficielle de disquage (Ap1), de couleur brun sombre (10 YR 3/2 en humide), présente de petits agrégats stables. Après les précipitations, une croûte de battance fine (0,5 - 1 cm d'épaisseur) est très localisée dans les creux entre des mottes centimétriques. Certaines de ces mottes sont très massives et non cohérentes en sec. Ces dernières sont vraisemblablement des reliques de semelles de disquages antérieurs. Cette croûte superficielle est temporaire mais elle semble constituer, à la surface du sol, un véritable mulch "organo-minéral" qui empêche les horizons supérieurs de se dessécher plus rapidement. Elle est cependant poreuse, avec de nombreux tubes biologiques et de nombreuses fentes de retrait, en sec. De nombreuses racelles de manioc et des termites y sont souvent observées.
- En dessous, la partie inférieure du labour (de 10 à 25 cm de profondeur) a été entièrement compactée par le disquage en conditions humides. Cette semelle de disquage (Ap2) est massive en humide. Cependant en sec, elle est fragmentée par de nombreuses fentes de retrait. Quelques noyaux nettement plus compacts et non fissurés représentent des volumes ou mottes provenant des semelles de disquages précédents. Cette couche compactée n'est que très faiblement exploitée par les racines de manioc qui peuvent, pour certaines, descendre jusqu'à 50 cm de profondeur et parfois plus.

a



b



c

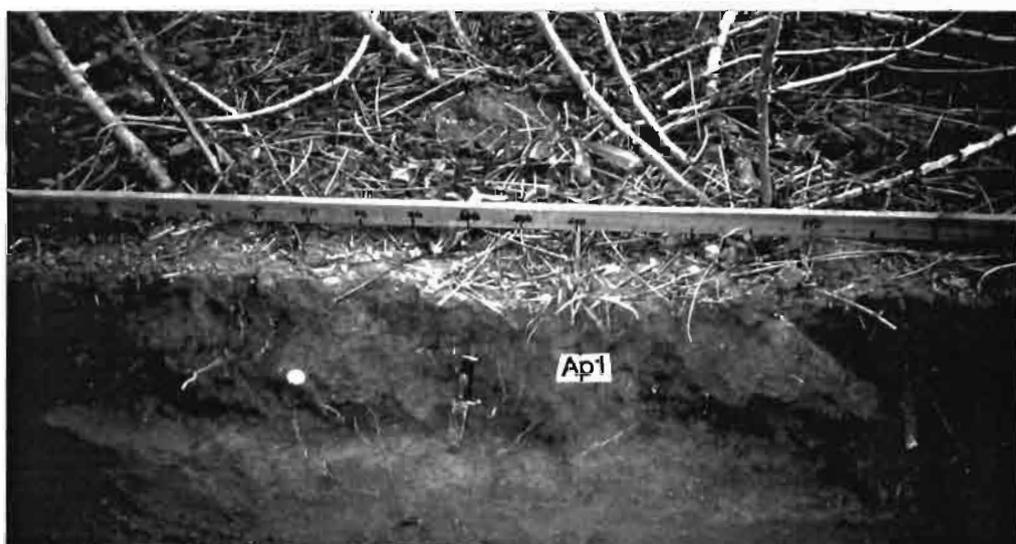


Planche V.1: Profils culturaux sous culture de manioc mécanisée depuis 15 ans (à Mantsoumba dans la Vallée du Niari)

- a: Labour aux disques
- b: passage de la roue de tracteur
- c: Labour à la charrue à soc
- t: Tubercule de manioc
- r: trace de roue de tracteur



En dessous des 25 cm, se succèdent les mêmes horizons pédologiques qui caractérisent le sol ferrallitique argileux des plateaux du Niari.

## B. MODIFICATIONS DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL CULTIVE

Les analyses chimiques du sol sous culture mécanisée de manioc, ont été réalisées aussi au laboratoire du CIRAD/IRAT de Montpellier, avec les mêmes méthodes analytiques déjà décrites dans le chapitre IV.3.

### 1. COMPLEXE D'ÉCHANGE DU SOL CULTIVE

#### a. RESULTATS

En milieu dégradé par une mécanisation lourde depuis environ 15 ans, sous culture de manioc mécanisée et fertilisée ( $1500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de roches calcaires broyées et engrais complet NPK: 20-40-20), les résultats des analyses indiquent une modification importante des caractéristiques physico-chimiques des 25 cm supérieurs perturbés (tableau VI.1, figures VI.1 et 2):

- une grande différence apparaît pour le complexe d'échange cationique entre les horizons Ap1 superficiel et Ap2 sub-superficiel:

- + les principaux cations échangeables plus représentés dans l'horizon superficiel Ap1 qu'en Ap2 sous-jacent (tableau VII.4);
- + la somme des cations échangeables est aussi faible, mais varie entre  $5,7 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  dans l'horizon Ap1 à  $0,6 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  en Ap2;
- + la capacité d'échange cationique est très faible mais passe de 6 à  $5 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  dans l'horizon Ap1 à  $2 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  dans l'horizon Ap2);
- + le taux de saturation du complexe, mesuré au pH du sol, est égale à 94 à 86 % dans tout le profil cultural;
- + les pH eau et KCl sont acides dans les 10 cm supérieurs c'est-à-dire en Ap1 (respectivement 5,4 - 5,3 et 5,0 - 4,7), et très acides entre 10 et 25 cm de profondeur c'est-à-dire en Ap2 (respectivement 4,5 - 4,3 et 4,0).
- +Le taux d'aluminium échangeable très faible en Ap1 est élevé en Ap2 ( $1,4 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ), par contre, celui de manganèse échangeable est, par contre, très faible dans les deux horizons. (très inférieur à  $1 \text{ me} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ).

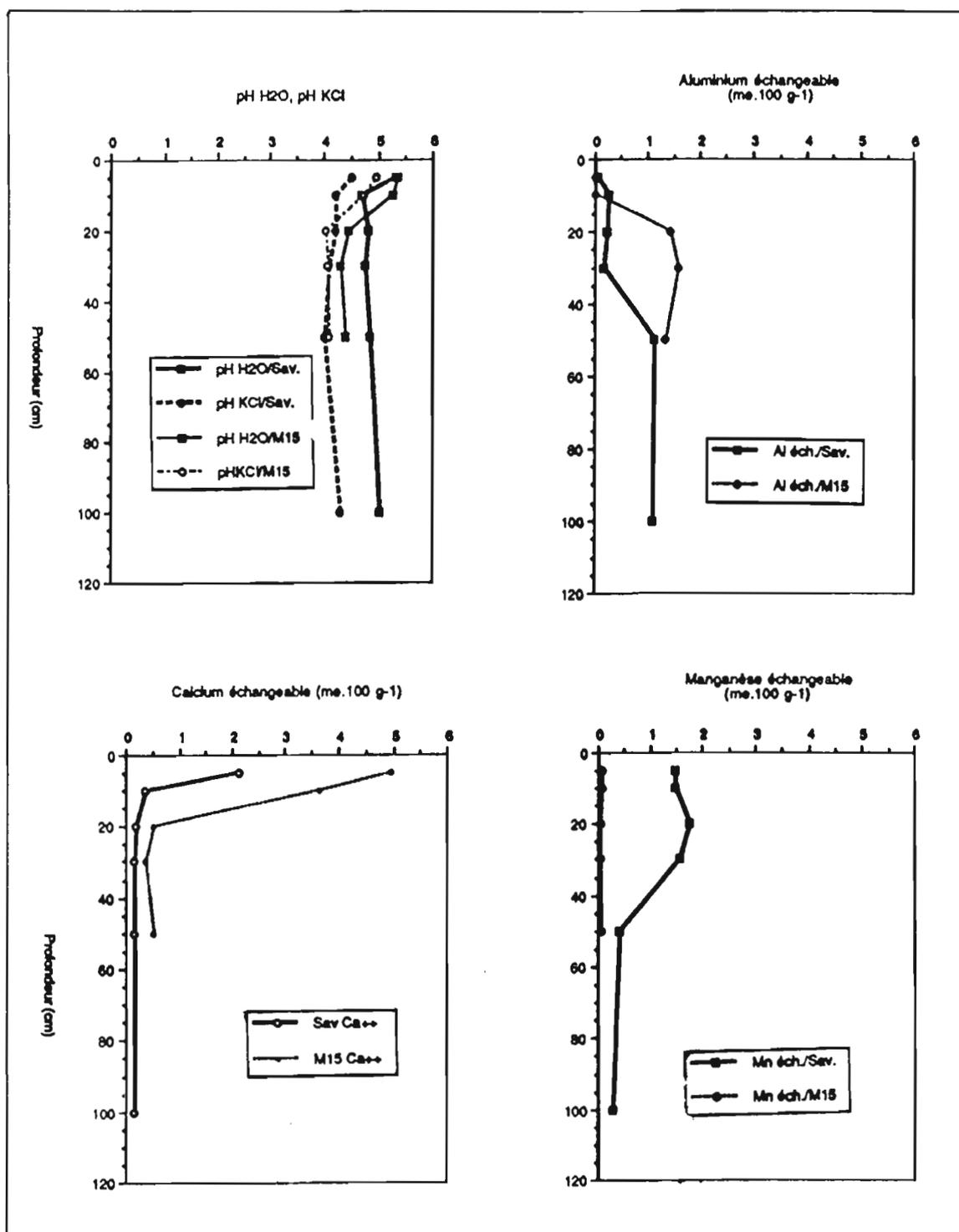


Figure VI.1: Evolution des caractéristiques physico-chimiques (pH, aluminium, calcium et manganèse échangeables) et de la teneur en matière organique du sol sous culture mécanisée de manioc

Tableau VI.1: Caractéristiques physico-chimiques du sol, sous culture de manioc sur site dégradé par quinze ans de mécanisation (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

Horizon	Profondeur (cm)	Ca <sup>++</sup> me.100g <sup>-1</sup>	Mg <sup>++</sup> me.100g <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> et Na <sup>+</sup> me.100g <sup>-1</sup>	Σ BE me.100g <sup>-1</sup>	Mn <sup>++++</sup> me.100g <sup>-1</sup>	Al <sup>+++</sup> me.100g <sup>-1</sup>	CEC me.100g <sup>-1</sup>
Ap1	5	4,97	0,66	0,11	5,7	0,06	0,0	6,2
	10	3,63	0,47	0,12	4,2	0,07	0,01	5,0
Ap2	20	0,51	0,04	0,04	0,6	0,03	1,43	2,2

## b. DISCUSSION

Au total, ces résultats montrent une grande différenciation du profil cultural en deux horizons du point de vue de leur complexe d'échange qui:

- d'une part, s'enrichit, en raison des apports en fertilisants chimiques, en amendements calciques et en biomasse végétale, dans les 10 cm supérieurs c'est-à-dire en Ap1;
- d'autre part, s'appauvrit nettement entre 10 et 25 cm (inférieurs compacts), c'est-à-dire en Ap2, comme si tous les apports superficiels n'y trouvaient de conditions favorables pour s'y accumuler. De ce fait il constitue une véritable barrière physico-chimique pour l'activité biologique et particulièrement le développement des racines de manioc.

En comparaison avec le sol témoin sous savane et particulièrement les horizons supérieurs A1 et AB, les horizons du sol sous culture de manioc sont:

- soit plus riches en cations échangeables en Ap1, mais avec un taux de matière organique un peu plus faible ainsi que la capacité d'échange cationique;
- soit plus pauvres en cations échangeables et en matière organique.

*Au total, la dépréciation de l'état physico-chimique du sol cultivé ne s'observe donc guère que dans l'horizon subsuperficiel Ap2. Par contre, dans les 10 cm supérieurs, les propriétés chimiques du sol cultivé s'améliorent nettement, excepté le taux de matière organique qui, lui, baisse de 5 à 3 %.*

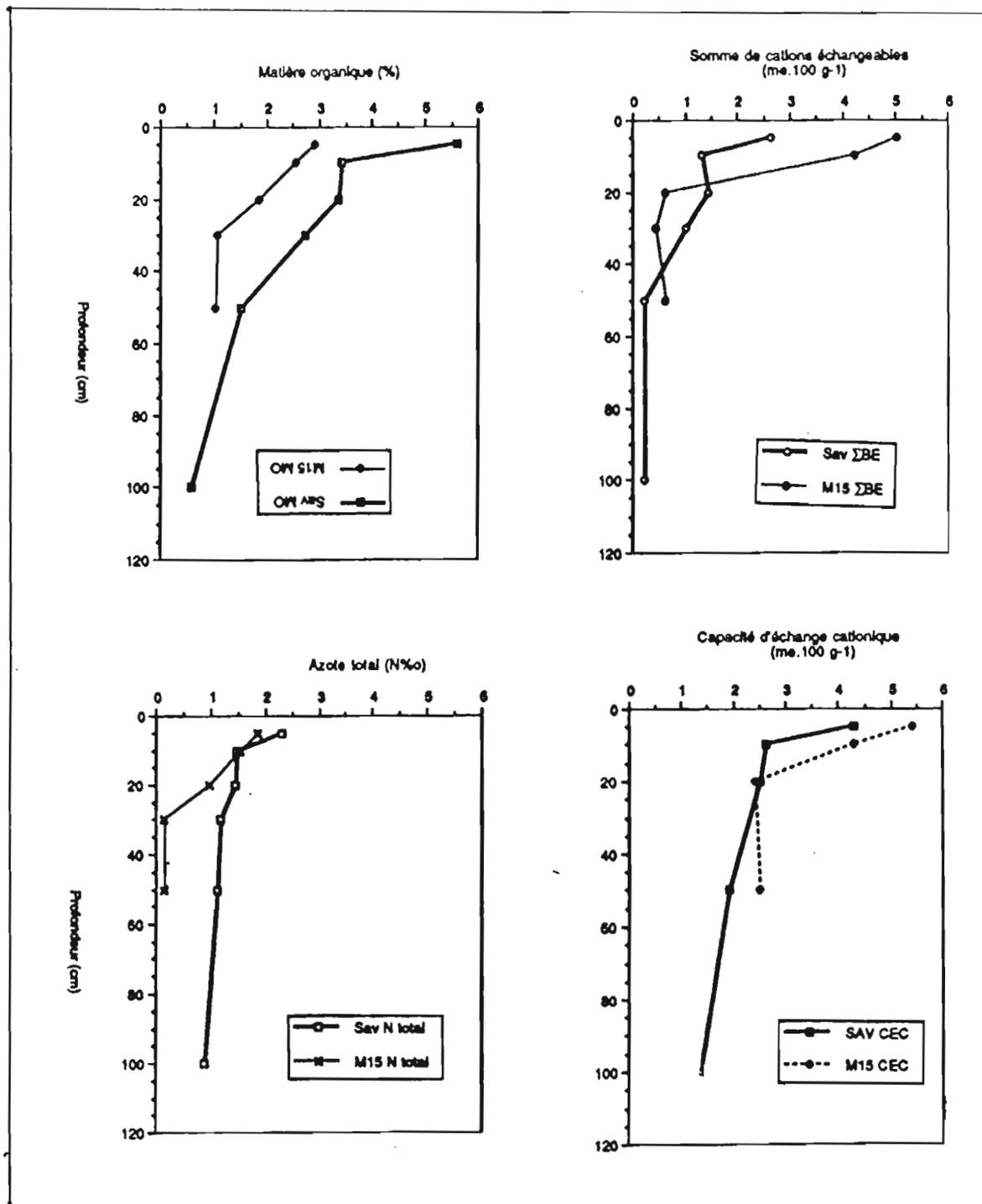


Figure VI.2: Evolution des caractéristiques physico-chimiques (Somme de bases échangeables, azote total et capacité d'échange cationique) et de la teneur en matière organique du sol sous culture mécanisée de manioc.

## 2. MATIERE ORGANIQUE DU SOL CULTIVE

### a. RESULTATS

Tableau VI.2: Taux de matière organique, du fer total et acidité du sol sous manioc, sur site dégradé (extraction au chlorure de cobaltihexamine)(moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

Horizon	Profondeur (cm)	M O %	C total %	N total ‰	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Fer total %
Ap1	5	3,1	1,79	1,86	5,4	5,0	9,15
	10	2,6	1,53	1,54	5,3	4,7	9,15
Ap2	20	1,6	0,92	1,12	4,4	4,0	7,8

La teneur en matières organiques (tableau VI.2) baisse jusqu'à 3 - 2,6 % dans la couche ameublie (0 - 10 cm), et à 1,6 % dans la couche compactée (Ap2). Le rapport C/N est cependant faible dans tout le profil cultural (9,9 à 6,0).

### b. DISCUSSION

Les taux de matières organiques sont faibles malgré une quantité importante de biomasse enfouie (6 t.ha<sup>-1</sup> en moyenne d'engrais vert ou de résidus de récoltes tous les deux ans) lors de la préparation des terres.

*La matière organique explique en partie les variations observés dans la CEC et le taux des cations échangeables entre les horizons Ap1 et Ap2 du sol sous culture de manioc. Mais en comparaison avec le sol sous savane, une telle constatation ne se vérifie plus.*

## C. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL CULTIVE

### 1. GRANULOMETRIE DE LA TERRE FINE

La granulométrie de la terre fine a été obtenue selon la méthode décrite au chapitre III.

Le tableau VI. 3 et la figure VI.1, indiquent que les horizons du sol sous culture mécanisée de manioc ont une texture très argileuse dès la surface du sol: 68 à 71 % d'argile respectivement en Ap1 et en Ap2.

*En comparaison avec le sol témoin sous savane (tableau VI.3 et figure VI.8), nous constatons que le sol sous culture mécanisée de manioc est nettement plus argileux, dès la surface, que le sol sous savane: le taux d'argile granulométrique est de 70 % environ dans les horizons Ap contre 53 à 65 % dans le sol sous savane.*

Tableau VI.3: Granulométrie du sol sous culture de manioc en mécanisé depuis près de 15 ans (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

Horizon	Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)
Ap1	5	70,7	6,3	5,5	12,3	4,4
Ap2	20	67,6	12,5	5,8	10,7	3,2

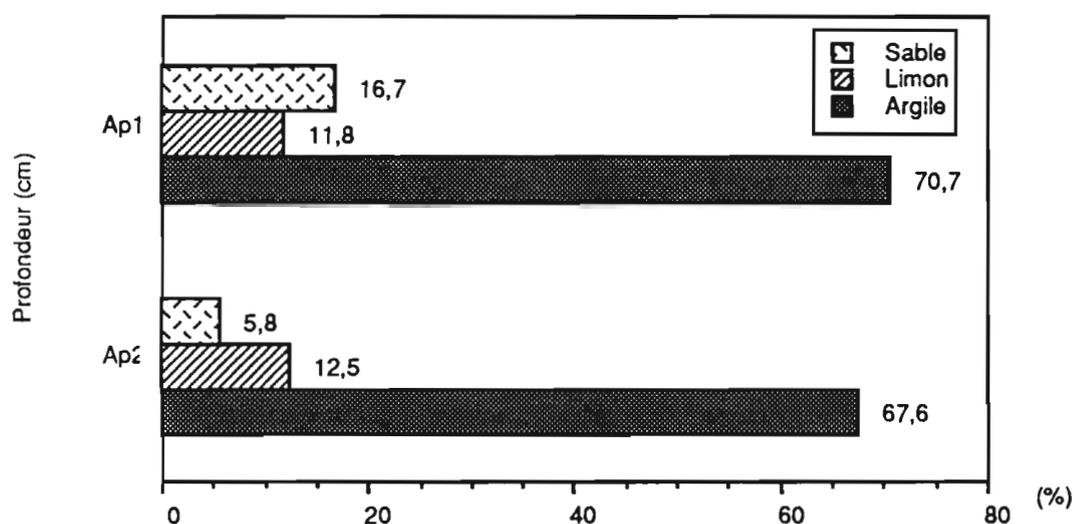


Figure VII.3: Granulométrie de la terre fine du sol sous culture de manioc

## 2. VOLUME MASSIQUE DES PROFILS CULTURAUX

### a. MATERIEL ET METHODE

Dans les profils culturaux observés, des horizons culturaux ont été décrits, échantillonnés et étudiés selon les méthodes présentées au chapitre III.

### b. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus indiquent que, sous culture mécanisée de manioc, sur site dégradé (M15), le profil culturel présente deux horizons distincts aussi par la valeur de leur volume massique moyen (tableau VI.4, figures VI.5):

- dans l'horizon superficiel (Ap1), le volume massique est de  $0,76 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en moyenne;
- dans l'horizon sous-jacent compact (Ap2), le volume massique descend à  $0,71 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en moyenne.

Tableau VI.4: Volumes massiques et masses volumiques de cylindres du sol, et des particules solides, sous manioc, du sol dégradé (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

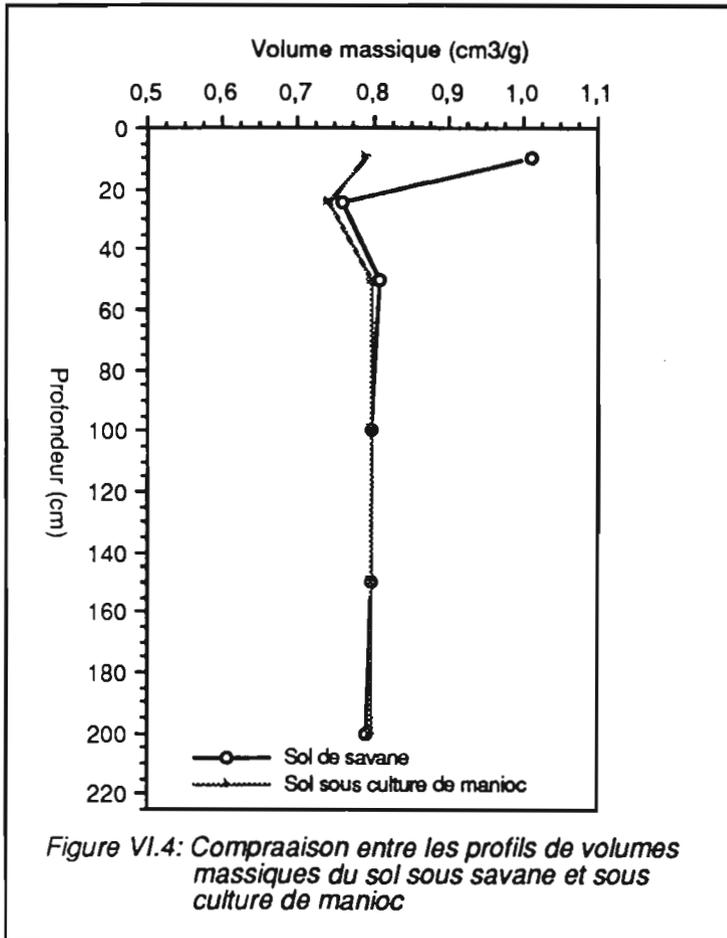
Horizon	Ap1	Ap2	B21
Profondeur (cm)	5	25	50
Volume massique ( $V_d$ ) ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,76	0,71	0,75
Masse volumique ( $\rho_d$ ) ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1,32	1,40	1,33
Ecart-type	0,05	0,05	0,02
Volume massique de solide ( $V_s$ ) ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	0,39	0,39	0,37
Masse volumique de solide ( $\rho_s$ ) ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2,56	2,56	2,72
Ecart-type	0,01	0,01	0,02

En comparaison avec le sol sous savane (tableau V.4 et figure V.5), nous constatons:

- Une forte diminution du volume massique, par rapport à l'horizon A1 superficiel sous savane, dans les 25 cm supérieurs du sol sous culture de manioc:  $0,74 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en moyenne contre  $0,98 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .
- Une légère augmentation de celui-ci, par rapport aux horizons profonds du sol sous savane (AB et B2), dans les horizons Ap du sol cultivé:  $0,74 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  contre respectivement  $0,70$  et  $0,75 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Le travail mécanique du sol en conditions humides, quelle qu'en soit la fréquence ou la pression appliquée, peut tasser, presque au maximum, les couches sous-jacentes.

Ainsi les valeurs de volume massique sont très proches sous manioc mécanisé depuis 15 ans et sous canne à sucre cultivée avec une puissance motrice beaucoup plus importante depuis plus de 30 ans (MAPANGUI, 1987).



#### D. CONCLUSION

L'analyse des profils culturaux, en comparaison avec le sol témoin sous savane, nous a permis de mettre en évidence des modifications importantes de l'état physico-chimique (amélioration en Ap1 superficiel et dépréciation en Ap2 sous-jacent) et de l'état physique (diminution du volume massique c'est-à-dire une augmentation de la densité apparente en Ap1 et Ap2, par rapport à l'horizon A1 du sol sous savane).

Le rôle de la fertilisation minérale et de l'apport du calcaire broyé ne se manifeste positivement que dans les 10 cm supérieurs c'est-à-dire en Ap1. Malgré d'importants enfouissements de débris végétaux, le taux des matières totales est plutôt en baisse de 2 % environ. En Ap 2 par contre, tout se passe comme si le sol n'était ni fertilisé, ni amendé, au contraire, par rapport aux 35 cm supérieurs du sol témoin sous savane, toutes les caractéristiques physico-chimiques de cet horizon sont en diminution.

*De ce qui précède, si nous pouvons démontrer les modifications, par rapport au sol témoin sous savane, de l'ambiance physico-chimique consécutives à la culture mécanisée du manioc, nous ne pouvons cependant affirmer qu'il s'agit d'une aggradation partielle en Ap1 et d'une dégradation en Ap2.*

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'étude du sol de référence sous savane, dans le chapitre VI, a permis de caractériser une différenciation de son état physico-chimique et physique de bas en haut du profil pédologique:

- le complexe d'échange s'améliore de bas en haut: les cations échangeables et le taux de matière organique sont en nette augmentation depuis l'horizon B2 profond jusqu'à l'horizon A1 superficiel;
- du matériau ferrallitique argileux microagrégé de profondeur (horizon B2), on passe progressivement à l'horizon AB sub-superficiel massif et dense, puis à l'horizon A1 supérieur, fortement structuré et allégé par l'activité biologique (racines des graminées et macrofaune du sol).

Le rôle de la fertilisation et des apports d'amendements calcaïques et organiques (débris végétaux) n'apparaît efficace que dans les 10 cm supérieurs (horizon Ap1) du sol sous culture de manioc fertilisée et mécanisée depuis près de 15 ans. En dessous, entre 10 et 25 cm, les caractéristiques physico-chimiques de l'horizon Ap2 sont, par rapport aussi bien au sol témoin sous savane qu'à l'horizon Ap1 sus-jacent, en nette dégradation.

Du point de vue physique, si l'horizon Ap1 est ameubli tout en contenant encore quelques mottes très massives et denses, l'horizon Ap2 inférieur est, par contre tassé par le pulvérisage et les sarclages mécaniques aux disques, qui sont généralement réalisés en périodes humides.

Rappelons que les agronomes qui ont suivi les essais concernés attribuent la baisse des rendements du manioc, en grande partie, à ces modifications importantes des propriétés physico-chimiques et de la densité apparente entre 10 et 25 cm dans le sol sous culture mécanisée c'est-à-dire dans l'horizon Ap2 sub-superficiel.

*Cependant, si la différenciation puis l'évolution ainsi mises en évidence sont patentes, les mécanismes par lesquels celles-ci interviennent doivent être élucidés. Il reste que la connaissance des modifications naturelles et anthropiques de la structure et du comportement hydrique de ce sol doit donner lieu à une étude des mécanismes mis en cause.*

*Nous allons maintenant, dans la troisième partie suivante, analyser les effets de la culture de manioc, fertilisée et mécanisée depuis 15 ans, sur l'organisation du sol à différentes échelles et les modifications qui en résultent sur les propriétés physiques de ce sol ferrallitique argileux de savane tropicale humide*

---

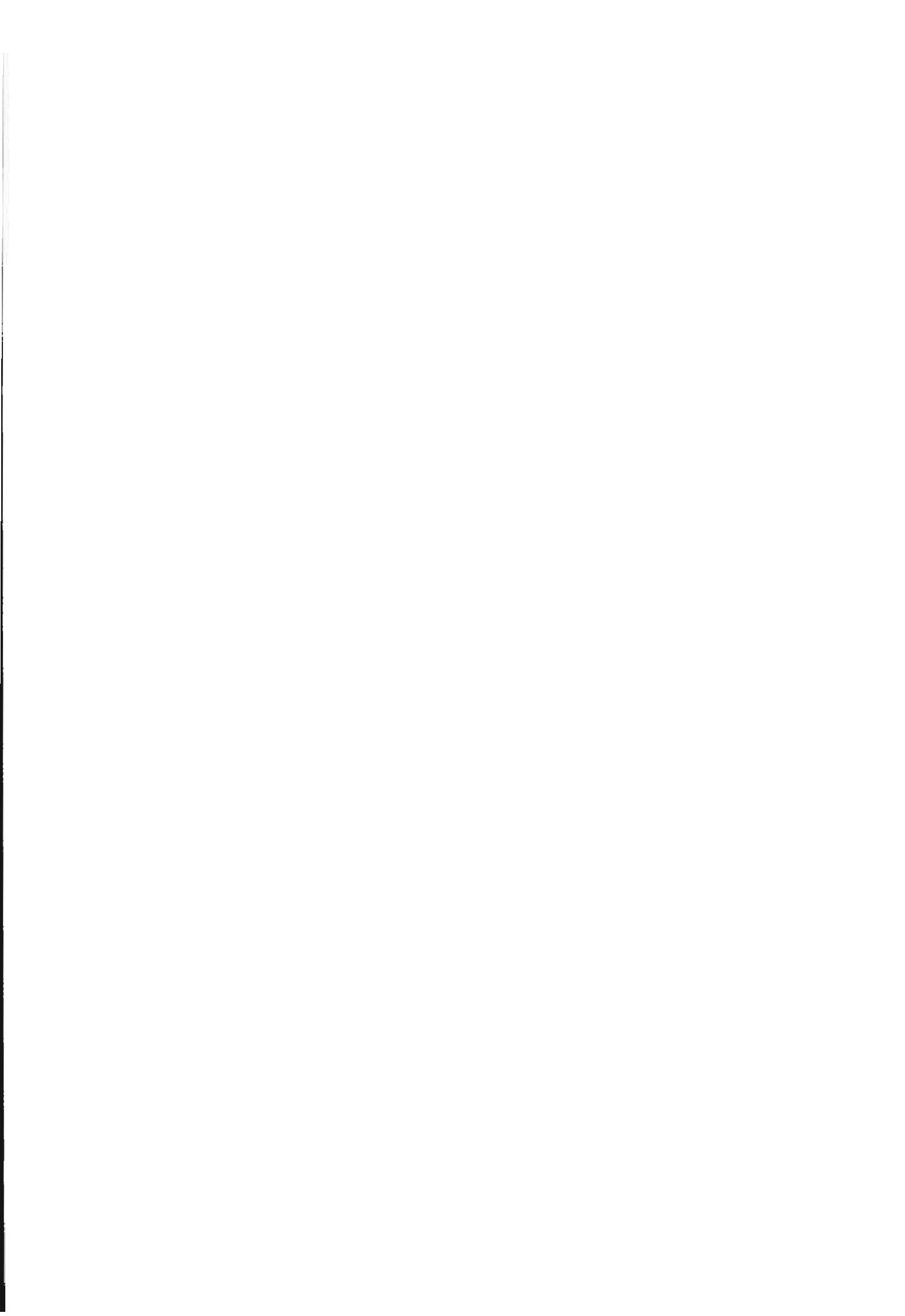


## TROISIEME PARTIE

# ANALYSE DU ROLE DE L'ORGANISATION DU SOL, A DIFFERENTES ECHELLES, SUR SES PROPRIETES PHYSIQUES EN FONCTION DE L'ETAT HYDRIQUE

*Il s'agit ici d'analyser précisément le rôle de l'organisation , depuis l'échelle microscopique c'est-à-dire celle de la phase argileuse jusqu'à l'échelle macroscopique c'est-à-dire celle de la motte de sol de taille décimétrique, sur les propriétés physiques macroscopiques telles que le retrait du sol et particulièrement ses mécanismes et ses conséquences structurales.*

*Rappelons que les cylindres ont été prélevés verticalement. Les mesures de la variation de volume ont été faites sur la face latérale des cylindres ainsi prélevés. L'analyse d'image a été faite sur des lames minces préparées à partir d'échantillons prélevés de la même face de façon à étudier le retrait latéral du sol et ses conséquences.*



## INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE

Le volume et la géométrie de l'espace poral d'un sol sont en général liés à la nature et au mode d'assemblage de ses constituants solides, ainsi qu'à son état hydrique.

Les transformations minéralogiques, physiques et chimiques ainsi que les modifications de l'organisation du sol, qui se produisent, sous les effets des contraintes climatiques et/ou anthropiques et particulièrement culturelles, peuvent être à l'origine des variations importantes du comportement physique du sol (HUMBEL, 1974, 1976; CHAUVEL, 1977; VANNIER, 1987).

L'analyse conjointe de l'organisation, à différentes échelles et de la géométrie des systèmes poraux ainsi que de leur dynamique en fonction de l'état hydrique du sol apparaissent comme un moyen efficace pour l'étude de l'évolution des propriétés du sol cultivé en comparaison avec le sol témoin sous végétation spontanée (TESSIER, et al., 1979, 1980, 1992; JONGERIUS, et al., 1980; BISDOM, et al., 1981; TESSIER, 1984; van OORT, 1984; CHRETIEN, 1986; CAMBIER, 1986; BRESSON, 1981 b et 1987; KOOISTRA, 1987; van OORT et al., 1987; CHRETIEN et al., 1983; 1987; 1988; SHEIN et al., 1988; BRUAND et al., 1988; AZZAOU, 1988; BUI et al., 1989; CHAUVEL et al., 1991; ROBERT et al., 1991; HARTMANN, 1991.

L'approche méthodologique que nous avons utilisée dans ce but est fondée sur des analyses physiques (par rétractométrie et intrusion de mercure) et morphologiques (par analyse d'images de lames minces de sol orientées verticalement).

Mais ces deux types d'analyses sont entièrement réalisées sur des échantillons de sol non perturbés, de taille décimétrique, prélevés verticalement à l'état humide (voisin de la capacité au champ) et fractionnés, pour certains, en agrégats de taille millimétrique ou micrométrique.

---



## CHAPITRE VII

### ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PROPRIETES PHYSIQUES MACROSCOPIQUES DU SOL

---

*Il s'agit de montrer, dans ce chapitre VII, l'intérêt de l'analyse de l'évolution, au cours de la dessiccation, du volume et de la géométrie de différents compartiments de l'espace poral pour la caractérisation de l'évolution des propriétés physiques du sol sous culture mécanisée et fertilisée de manioc, en comparaison avec le sol témoin sous savane.*

*Ces modifications dans les premiers 100 centimètres supérieurs du sol, seront reliées à l'organisation respectivement du <sup>sol</sup> sous culture de manioc et du sol sous savane.*

## A. ORGANISATION DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL EN MICROSCOPIE OPTIQUE

Les observations, sur lames minces de dimensions moyennes ( $d = 5,6 \text{ cm}$ ), ont été faites à la loupe binoculaire ( $\times 10$ ) équipée d'un rayonnement UV. Les pores apparaissent en bleu, les grains de quartz en noir (photo VII.1. a, b et c).

### 1. EVOLUTION DE L'ORGANISATION DU SOL TEMOIN SOUS SAVANE

Les lames minces étudiées ont été préparées à leur humidité maximale c'est-à-dire proche d'une tension nulle.

Les résultats sont présentés sur les photographies (planches VII.1 et VII.2), en partant de bas en haut c'est-à-dire de l'horizon B profond (matériau ferrallitique) aux horizons AB puis A1.

#### a. RESULTATS

Les photos a, b et c de la planche VII.1 montrent, à l'échelle du microscope optique, la différenciation, de bas en haut du profil pédologique, en principaux niveaux d'organisation des horizons pédologiques B2, AB et A1 dans un sol ferrallitique argileux de la Vallée du Niari.

#### Horizon B2

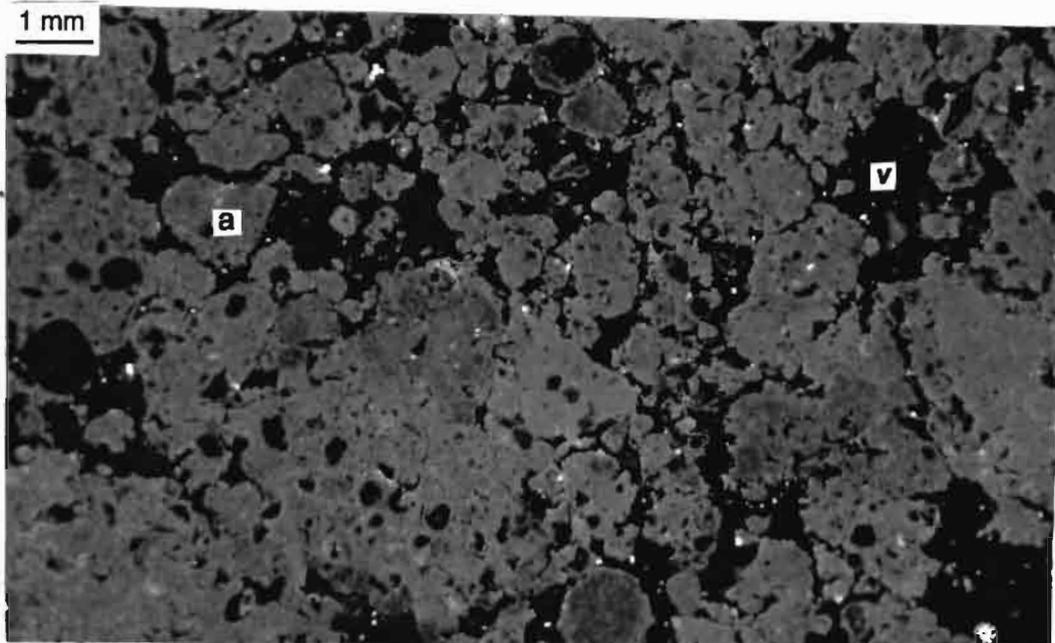
L'assemblage du fond matriciel est porphyrosquelique.

- A l'état humide, cet horizon apparaît assez continu. Mais, deux systèmes de vides sont nettement visibles:

- \* Les pores, résiduels de l'assemblage des agrégats peu nets, sont de forme irrégulière, souvent polyconcave et de rayon équivalent  $< 250 \mu\text{m}$  environ. De nombreuses zones claires indiquent la présence d'autres vides d'entassement très fins ayant une dimension inférieure à celle de la lame mince ( $\varnothing < 25 \mu\text{m}$  environ);

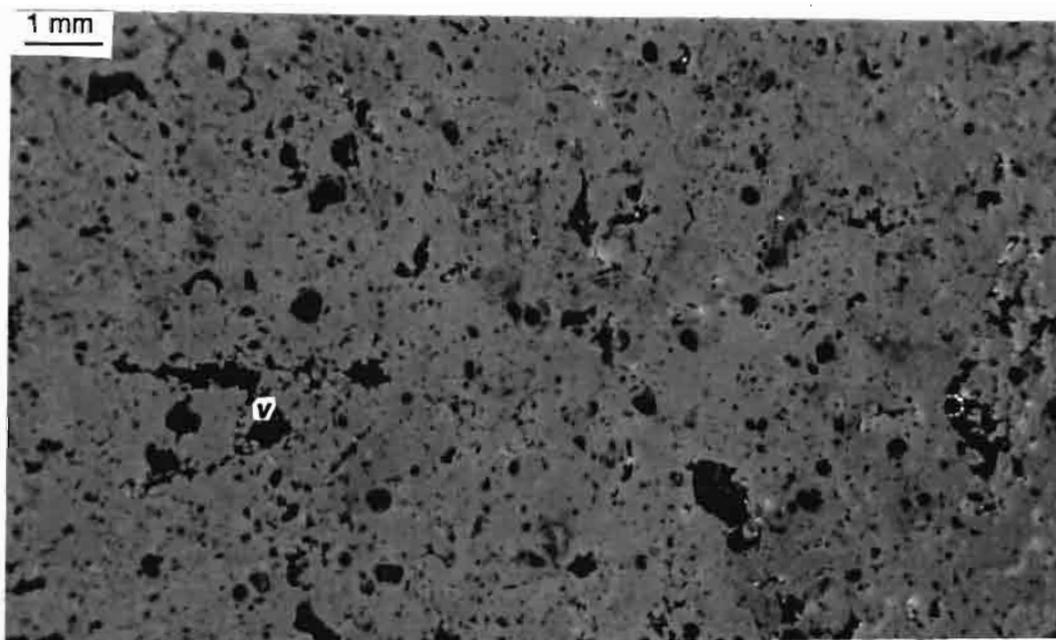
- \* Des cavités et/ou chenaux (parfois remplis d'excréments) sont de forme régulière, plus ou moins allongée. Leur rayon équivalent varie entre 200 et 500  $\mu\text{m}$  environ.

- A l'état sec, cet horizon est cependant fragmenté, par de très fines fisses, en petits agrégats polyédriques plus ou moins nets ( $\times 10$ ).

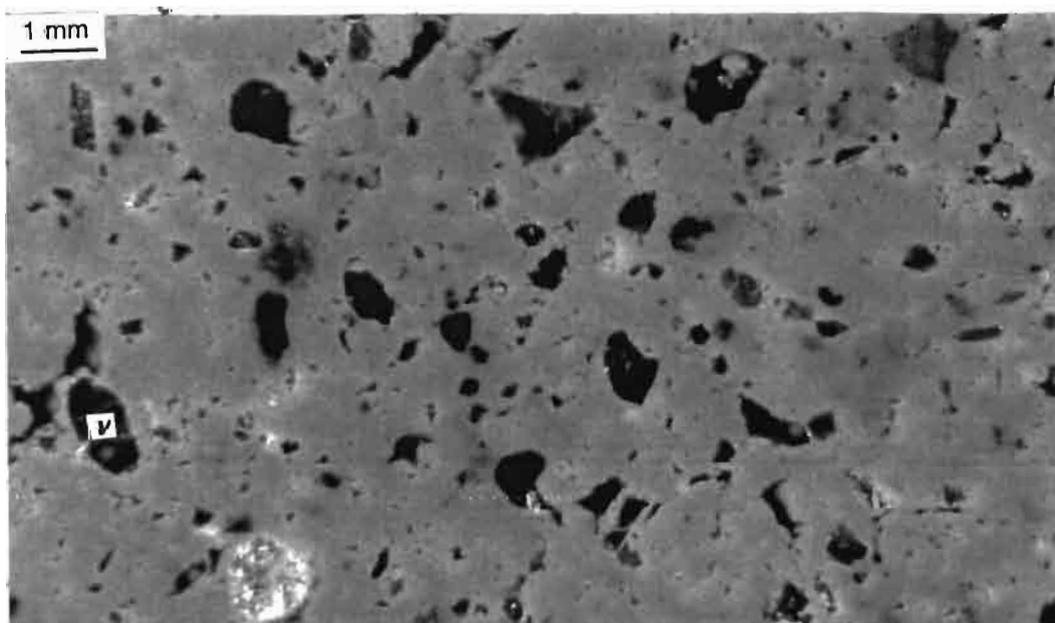


HORIZONS

A1



AB



B2

Planche VII.1: Comparaison, à pF 0 (humidité à saturation), de l'organisation macroscopique des horizons A1, AB et B2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous savane  
 v: vide                    a: agrégat



### Horizon AB

L'assemblage, également porphyrosquelique, présente les deux systèmes de vides déjà décrits précédemment:

- A l'état humide, cet horizon massif montre les mêmes vides polyconcaves, résiduels de l'assemblage d'agrégats très peu nets. Mais, en comparaison avec l'horizon B2, ces vides sont plus petits ( $\varnothing < 300 \mu\text{m}$  environ), et moins nombreux (planche VII.1). Dans la masse du plasma, des zones plus claires indiquent aussi la présence d'autres vides résiduels de très petite taille. Les chenaux et les cavités y sont de plus petite taille ( $\varnothing = 200 - 300 \mu\text{m}$ ).
- Cet horizon présente, à l'état sec (planche VII.2) une structure nettement plus massive que l'horizon B2, avec de larges fissures.

### Horizon A1

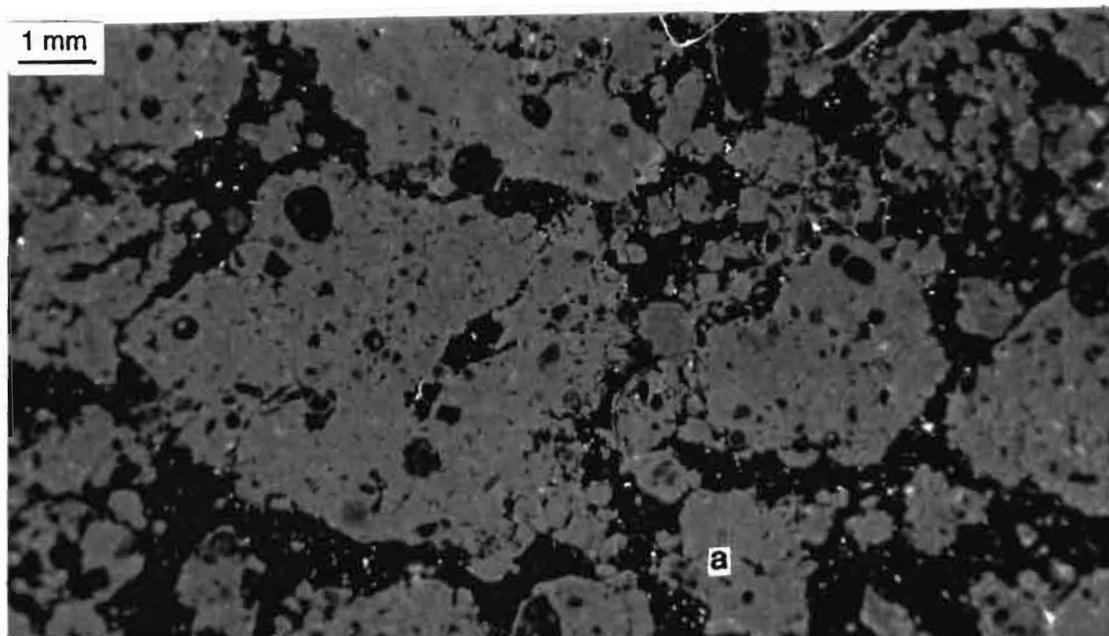
L'assemblage porphyrosquelique de l'horizon A1 superficiel, montre aussi les deux systèmes de vides décrits précédemment. Les variations, par rapport aux horizons B2 et AB sous-jacents, résident uniquement dans l'abondance des différents types de pores identifiés:

- A l'état humide, les pores d'assemblage d'agrégats grumeleux très nets sont en plus grand nombre, plus larges ( $\varnothing \leq 500 \mu\text{m}$ ), et très connectés les uns aux autres que dans les horizons profonds (planche VII.1). Les chenaux et cavités sont aussi plus nombreux, connectés et de grande taille ( $\varnothing = 0,5 - 2 \text{ cm}$ ).
- A l'état sec (planche VII.2), cet horizon est encore plus poreux, en raison de sa structure grumeleuse grossière très nette. Des agrégats plus massifs et de plus grande taille ( $\varnothing \geq 0,5 - 1,5 \text{ cm}$ ), qu'à l'état humide sont clairement visibles et séparés par de larges fissures interconnectées.

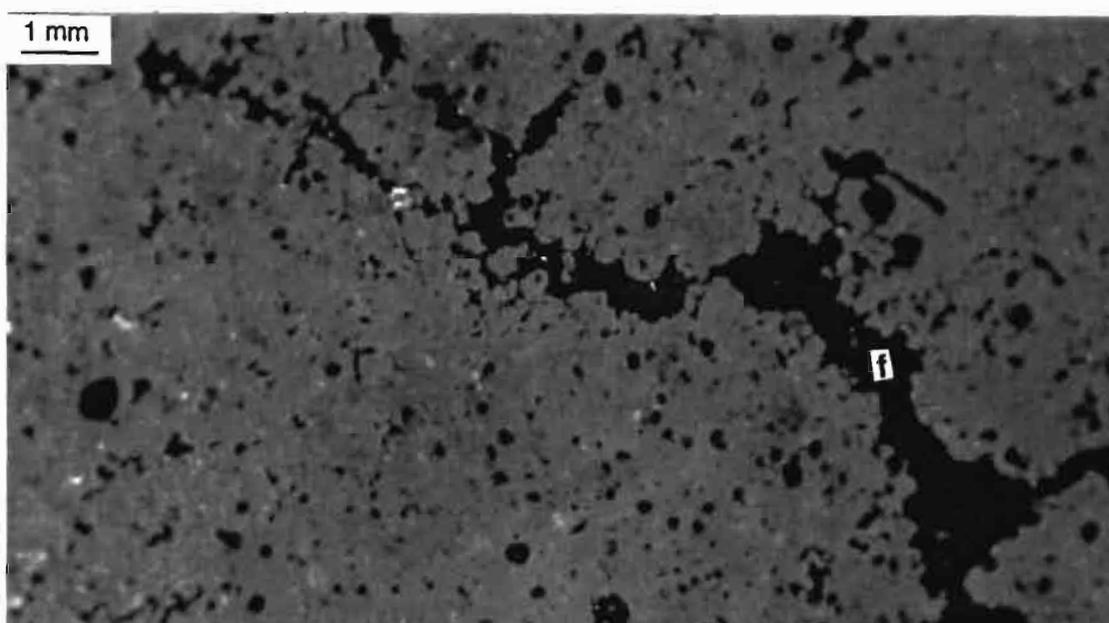
## **b. DISCUSSION**

Les résultats précédents indiquent que l'évolution de l'espace poral est nette de bas en haut du profil: fine, allongée et polyconcave dans les horizons profonds AB et B2, elle est plus large et très interconnectée dans l'horizon superficiel A1. L'espace poral évolue aussi avec l'état hydrique du sol, spécialement dans l'horizon A1. Dans tous les cas, la dessiccation conduit à la formation d'agrégats plus massifs qu'à l'état humide et à l'individualisation de fissures plus larges.

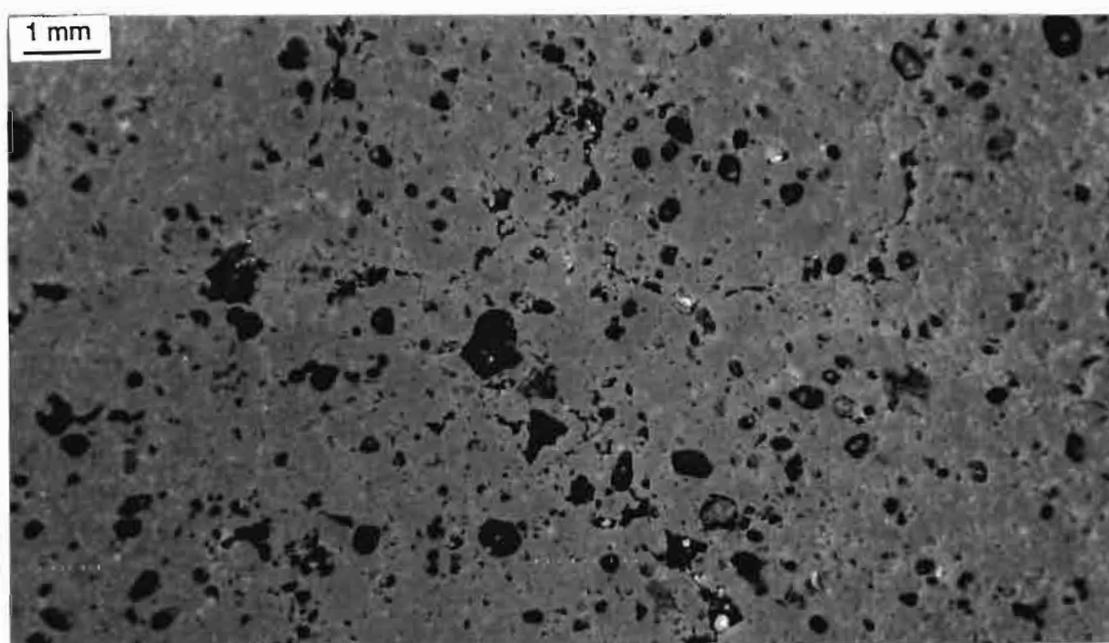




A1



AB



B2

Planche VII.2: Comparaison, à pF 4 (c'est-à-dire en sol sec), de l'organisation macroscopique des horizons A1, AB et B2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous savane  
 f: fissure de retrait  
 a: agrégat



*Ce résultat est en accord avec les observations de terrain, qui montrent, en saison sèche, un réseau de fentes de retrait à la surface du sol ainsi que dans les profils de sols (jusqu'à une profondeur de 50 cm environ).*

## **2. ORGANISATION DU SOL SOUS CULTURE MECANISEE DE MANIOC**

Les photographies a, b, c et d de la planche VII.3 ont été obtenues à partir d'échantillons amenés à pF 6.

### **a. RESULTATS**

Les photos ont été réalisées sur 4 profondeurs du sol: 0-5 et 5-10 cm pour Ap1, photos a et c, respectivement: 10-15 et 15-20 cm pour Ap2, photos b et d, respectivement.

En Ap, l'organisation du sol sec, sous culture mécanisée de manioc, présente de nombreuses fentes de retrait. Elles sont plus larges en Ap1 (0 à 10 cm,  $\varnothing = 3 - 5$  mm, photos a et c) qu'en Ap2 (10 à 20 cm,  $\varnothing = 1 - 2$  mm, photos b et d) .

Les fissures délimitent, dans ces horizons une structure à tendance lamellaire avec la présence de zones très massives, notamment en Ap2.

### **b. DISCUSSION**

La présence d'une structure à tendance plus massive dans les horizons culturaux sous manioc, plus nette en Ap2 qu'en Ap1, est probablement due au tassement de cet horizon, occasionné par la reprise du pulvérisage à disques dans les conditions de sol humide.

En comparaison, à l'état sec, avec les horizons A1, AB et B2, du sol témoin sous savane (planche VII.2), les horizons culturaux Ap1 et 2 (planche VII.3) apparaissent fortement tassés et continus.

## **3. CONCLUSIONS**

*Les résultats précédents montrent plusieurs conclusions importantes sur l'évolution du sol sous culture par rapport au sol de référence.*

*L'organisation du sol sous savane varie de bas en haut du profil: nettement structuré et poreux en surface il devient plus continu en profondeur. Après mise en culture, le sol devient massif. La dessiccation dans tous les cas entraîne une fissuration mais elle est de nature très différente dans les deux types de situations. Sous savane, des agrégats grumeleux sont individualisés, sous culture seules des fissures peu nombreuses délimitant des larges polyèdres sont visibles.*



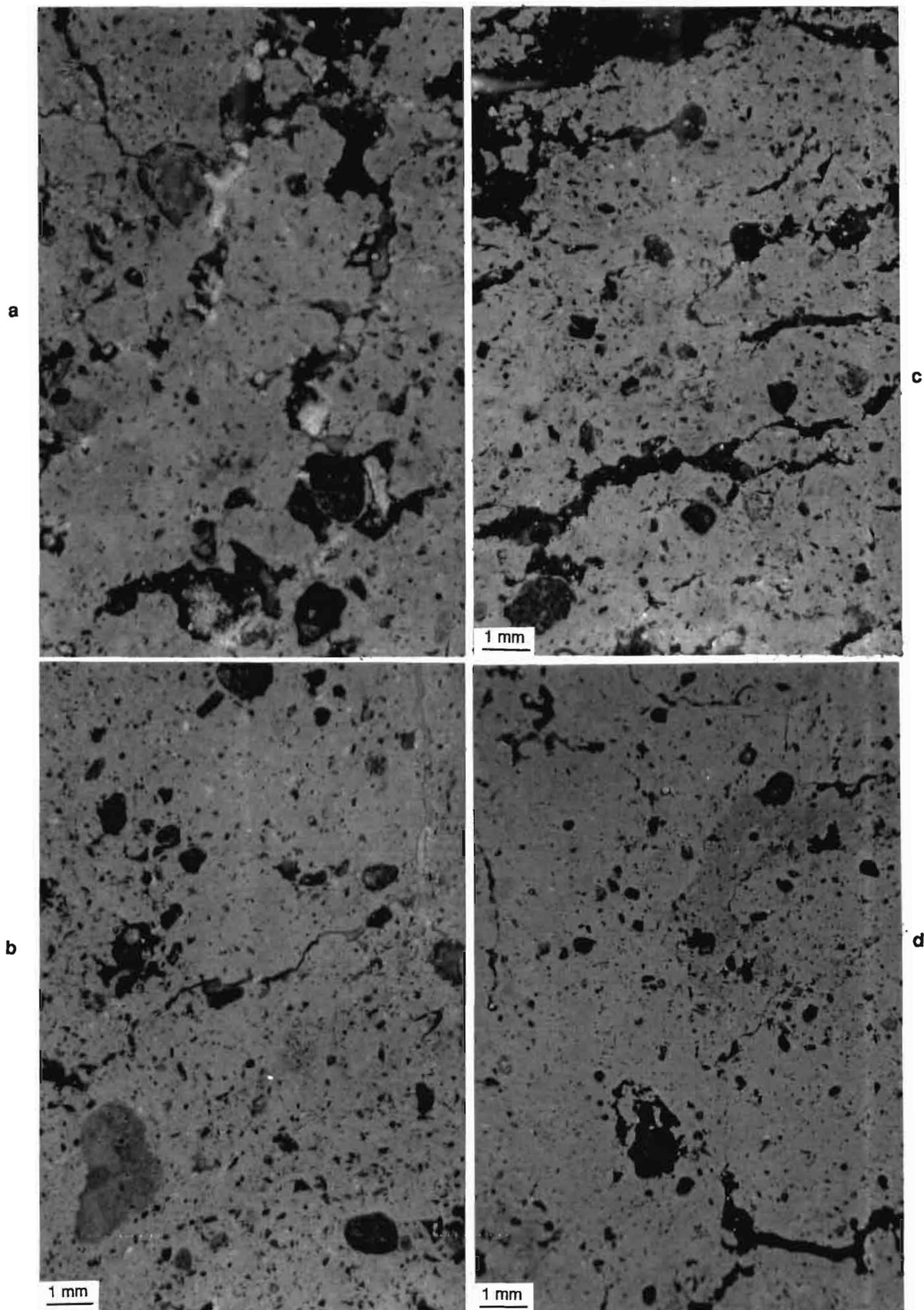
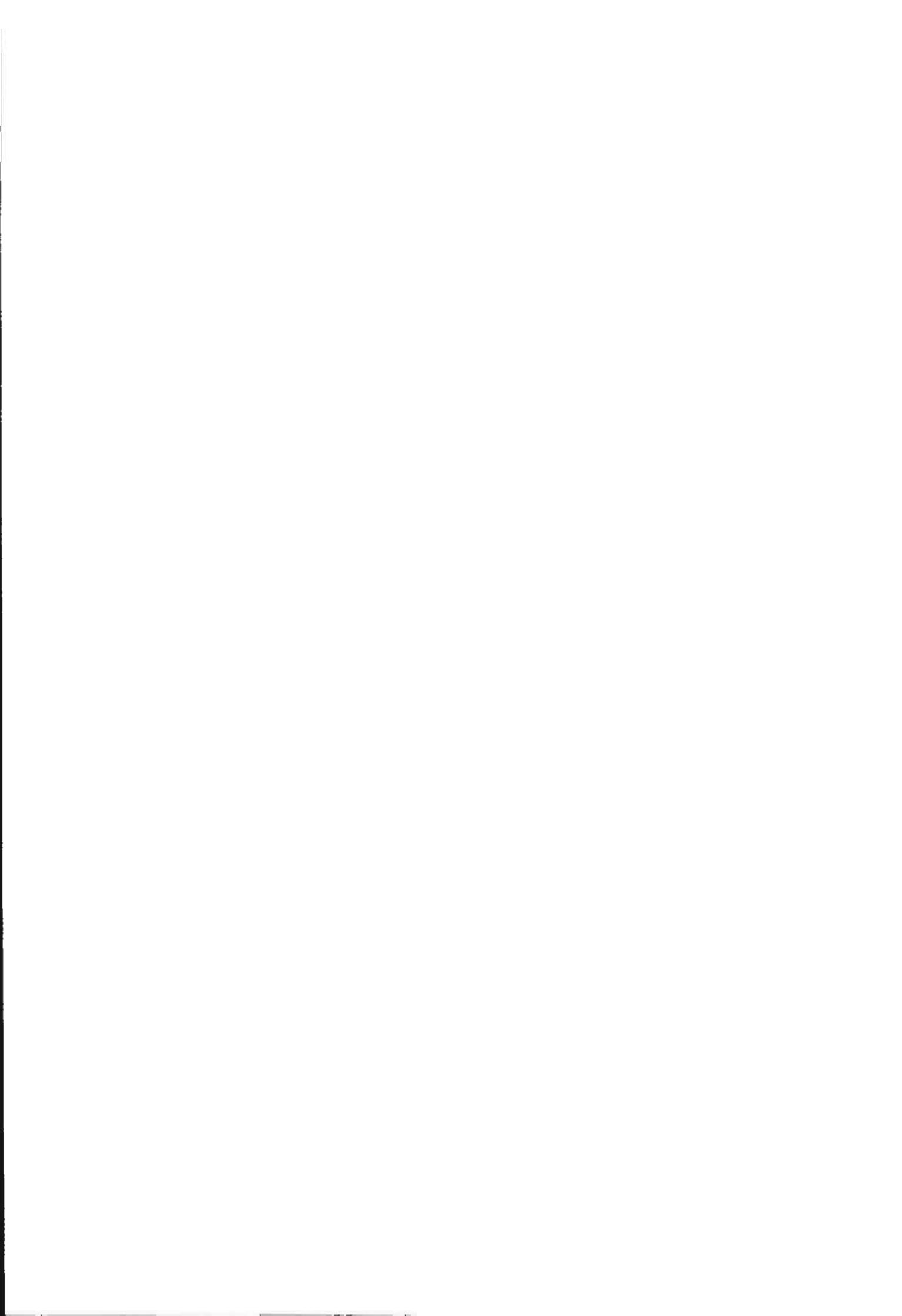


Planche VII.3: Comparaison, à pF 4 (c'est-à-dire en sol sec), de l'organisation macroscopique des horizons Ap1, et Ap2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous culture de manioc

a: Horizon Ap1 (0-5 cm)  
b: Horizon Ap1 (5-10 cm)

c: Horizon Ap2 (10-15 cm)  
d: Horizon Ap2 (15-20 cm)



Nous allons maintenant, dans ce qui suit analyser la l'évolution de l'espace poral du sol témoin sous savane, à l'aide des courbes de retrait de cylindres de sol non perturbés, de taille décimétrique.

## B. DYNAMIQUE, AU COURS DE LA DESSICCATION, DE L'ESPACE PORAL DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL

Nous nous appuyerons sur les courbes de retrait obtenues par rétractométrie.

### 1. VARIATION DU VOLUME DE SOL EN FONCTION DE SA TENEUR EN EAU: COURBES DE RETRAIT DU SOL

Nous nous appuyerons sur les points singuliers qui permettent de distinguer les différentes étapes du retrait.

#### a. VARIATION DE VOLUME DU SOL DE SAVANE EN FONCTION SA TENEUR EN EAU

##### 1). Résultats

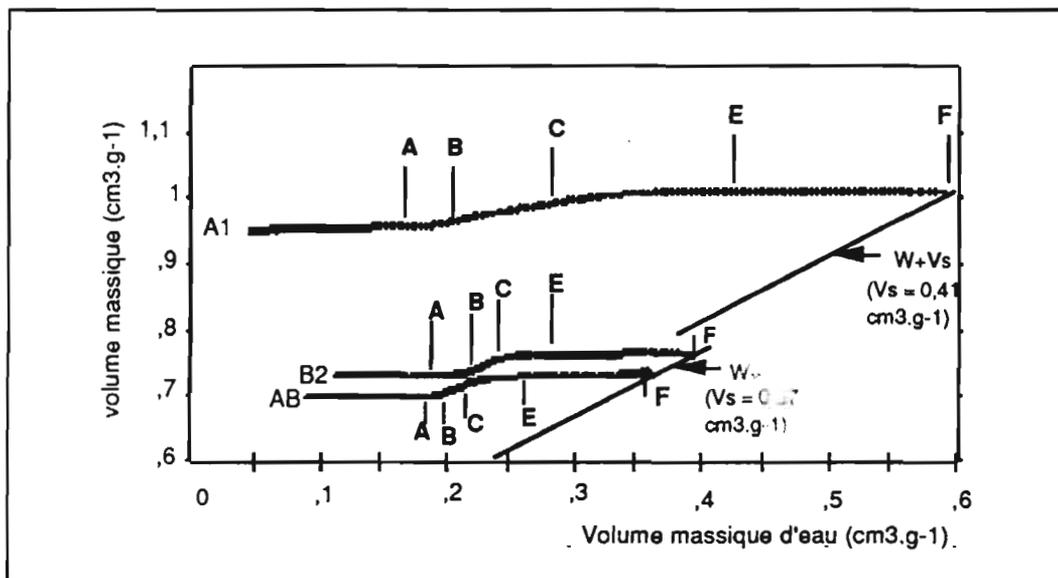


Figure VII.1: Courbes de retrait et courbes de saturation ( $w+vs$ ) des horizons A1, AB et B2 du sol sous savane

La figure VII.1 permet de comparer le comportement des horizons A1, AB et B2 du sol témoin sous savane:

- A l'état humide comme à l'état sec, le volume massique diminue avec la profondeur du sol (tableau VII.1):
  - + L'horizon A1 superficiel est nettement plus poreux que les horizons sous-jacents AB et B2
  - + La différence de volume massique entre les horizons A1 et AB est de  $0,25 - 0,23 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$
  - + L'horizon AB sub-superficiel est légèrement moins poreux que l'horizon B2 de profondeur.

- D'un autre côté, différents points singuliers peuvent être identifiés sur la courbe de retrait (Fig. VII.1). A ces points singuliers correspondent des teneurs en eau qui ont pu être déterminées après ajustement du modèle sur la courbe de retrait:

\* Les valeurs de teneurs en eau aux points singuliers sont considérablement différentes entre A1 d'une part, et B2 et AB, d'autre part (tableau VII.1).

\*Entre les points F et A, c'est-à-dire les points singuliers extrêmes de la courbe de retrait, il apparaît que la dessiccation entraîne toujours une variation du volume des vides ( $\Delta v_v$ ) en fonction du volume d'eau ( $\Delta w$ ). Cette variation est beaucoup plus grande en A1 qu'en B2 et AB.

Tableau VII.1: Volume massique de vides ( $v_v$ ) aux points E et A, écart-types et pente de la droite C-B ( $K_2$ ) du sol sous savane (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

HORIZON	AU POINT E		AU POINT A		DIFFERENCE (E-A)		PENTE $K_2$
	$v_v$ E ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$v_v$ A	écart-type [ $\sigma$ ]	$\Delta v_v$ (E-A)	écart-type [ $\sigma$ ]	
A1	0,64	0,18	0,58	0,17	0,05	0,18	0,4
AB	0,39	0,08	0,35	0,07	0,04	0,11	0,7
B2	0,40	0,02	0,37	0,03	0,03	0,03	0,9

Tableau VII.2: Volume massique de l'eau ( $w_E$ ) aux points E et A et la pente de la droite FE ( $K_1$ ) pour les échantillons provenant du sol sous savane (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

HORIZON	AU POINT E		AU POINT A		DIFFERENCE (E-A)		PENTE $K_1$
	$w_E$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$w_A$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$\Delta w_{E-A}$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	
A1	0,44	0,10	0,16	0,03	0,28	0,09	0,02
AB	0,28	0,05	0,17	0,02	0,11	,05	0,06
B2	0,28	0,02	0,21	0,01	0,07	0,01	

## 2) Discussion

- Elle portera d'abord sur la variation simultanée du contenu en eau et du volume massique entre différents points de la courbe de retrait. Il nous a paru intéressant de suivre les changements entre les points E et A correspondant respectivement au début de changement de volume apparent (E) et à la limite de retrait (A):

\*  $\Delta v_V$ , la variation de volume de vide entre E et A est égale à 0,05  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en A1, à 0,04  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  pour l'horizon AB et à 0,03  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en B2 (tableau VII.1);

\*  $\Delta w$ , la variation de contenu en eau est égale à 0,28  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , en A1, à 0,11  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en AB et à 0,07  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en B2 (tableau VII.2).

Il apparaît donc que pour des variations de volume de vides similaires, les variations de contenu en eau sont considérablement différentes, quatre fois supérieures en A1 qu'en AB et B2.

- D'un autre côté, ces changements de volume apparents différents se traduisent par une évolution de la pente de la droite de retrait ( $K_2$ ) entre les points C et B. Le tableau VII.1 montre que la valeur de  $K_2$  augmente avec la profondeur du sol:

\*  $K_2$  est égal à 0,4 en A1;

\*  $K_2$  est de 0,7 en AB;

\*  $K_2$  atteint 0,9 en B2.

Ainsi, plus la variation de teneur en eau est faible, plus  $K_2$  se rapproche de l'unité. Le retrait du sol en profondeur, même s'il est faible, prend donc un caractère normal. Autrement dit, la variation du contenu en eau est accompagnée d'une variation du volume équivalente.

Ce type de comportement est caractéristique des sols argileux très gonflants comme les vertisols. Soulignons cependant qu'ici, même si le retrait est normal, son ampleur est très faible (environ 10 %).

## b. MODIFICATIONS DU SOL SOUS CULTURE DE MANIOC

### 1). Résultats

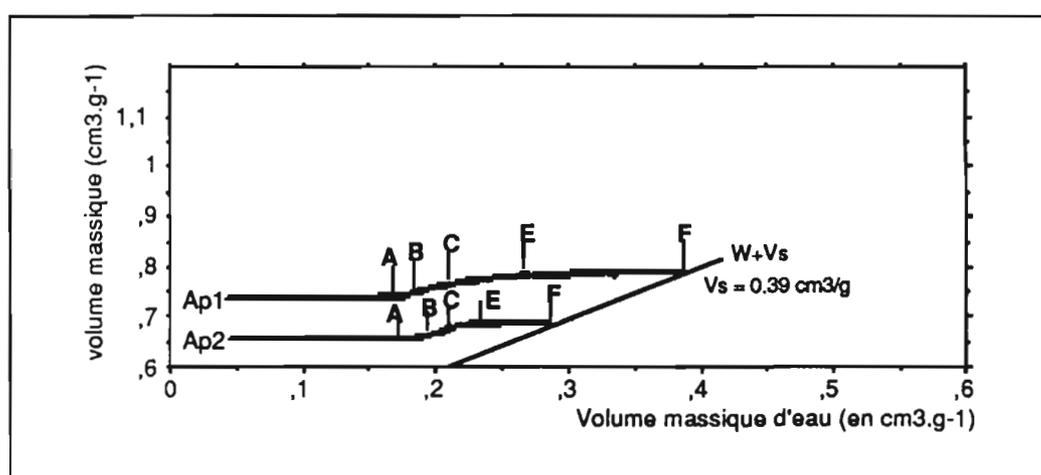


Figure VII.4: Courbes de retrait et courbes de saturation des horizons Ap1 et Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

### 2) Discussion

Tableau VII.3: Volume massique de vides ( $v_v$ ) aux points E et A, écart-types et pente de la droite C-B ( $K_2$ ) du sol sous culture de manioc (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

HORIZON	AU POINT E		AU POINT A		DIFFERENCE (E-A)		PENTE
	$v_v$ E ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$v_v$ A	écart-type [ $\sigma$ ]	$\Delta v_v$ (E-A)	écart-type [ $\sigma$ ]	$K_2$
Ap1	0,37	0,18	0,33	0,17	0,05	0,18	0,7
Ap2	0,34	0,08	0,20	0,07	0,14	0,1	0,9

Comme pour le sol sous savane nous examinerons les variations du contenu en eau et de volume poral ainsi que la pente de la droite K2 (tableau VII.3).

La variation du volume des vides ( $\Delta V_v$ ) et du volume d'eau ( $\Delta w$ ) de ces horizons cultivés est la suivante (tableaux VII.3 et VII.4):

- $\Delta V_v$ , la variation du volume massique entre les points E et A est égale à 0,05  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  en Ap1 et à 0,14  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  en Ap2;
- $\Delta w$ , la variation de contenu en eau entre E et A est de 0,12  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  en Ap1 et de 0,08  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  en Ap2.
- D'un autre côté  $K_2$  moyen est égal à 0,7 en Ap1 et à 0,8 en Ap2;

Dans les deux couches labourées la pente de la droite  $K_2$  est forte, le retrait devient donc quasi normal, ce qui signifie que le sol acquiert un caractère plus argileux.

Tableau VII.4: Volume massique de l'eau ( $w_E$ ) aux points E et A et la pente de la droite FE ( $K_1$ ) pour les échantillons provenant du sol sous culture de manioc (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

HORIZON	AU POINT E		AU POINT A		DIFFERENCE (E-A)		PENTE $K_1$
	$w_E$ ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$w_A$ ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$\Delta w_{E-A}$ ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	
Ap1	0,28	0,10	0,16	0,03	0,12	0,09	0,02
Ap2	0,25	0,05	0,17	0,02	0,08	0,05	0,08

### 3) Comparaison avec le sol sous savane

Nous comparerons les horizons A des sols sous savane et sous culture de manioc.

Il est clair que le comportement des horizons Ap1 et Ap2 cultivés est totalement différent de celui de l'horizon A1 du sol sous savane. Les résultats obtenus montrent essentiellement que le comportement du sol cultivé se rapproche de celui des horizons AB et B2 du sol sous savane:

- $K_2$  moyen est égal à 0,7 en Ap1 et à 0,8 en Ap2 alors qu'il est de 0,4 en A1. Certains échantillons du sol cultivé montrent même des valeurs de  $K_2$  égal 1. Cette valeur de  $K_2$  dans l'horizon Ap est donc similaire à celle des horizons AB et B2 de ces sols.
- Les variations de contenu en eau et de volume apparent entre les points E et A de la courbe de retrait dans l'horizon Ap du sol cultivé deviennent aussi

comparables à celles des horizons AB et B2 sous jacents.

Ainsi, d'après les courbes de retrait, la mise en culture provoque-t-elle une évolution de l'horizon A1 telle que son comportement devient similaire à celui des horizons sous jacents.

On ferait, en quelques sorte, disparaître l'horizon A1 caractéristique du sol sous savane.

## 2. RELATION ENTRE LA PRESSION CAPILLAIRE ET LA TENEUR EN EAU AU SEIN DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL

En même temps que l'évolution du contenu en eau des échantillons nous avons suivi la variation de la pression de l'eau. A cet effet des tensiomètres ont été placés au centre des cylindres.

Nous donnerons comme exemple les courbes potentiel de l'eau/teneur en eau du sol sous savane (horizons A1, AB) et du sol cultivé (horizons Ap1 et Ap2).

### a. CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE MACROPORAL DU SOL SOUS SAVANE

#### 1). Résultats

Nous présentons figure VII.5 a, b, c et d les résultats des échantillons provenant des horizons A1 (a et b) et AB (c).

Ces résultats montrent que les micro-tensiomètres décrochent, pour tous les échantillons étudiés, toujours à une succion égale ou inférieure à - 900 millibars.

Deux types de courbes de potentiel matriciel se distinguent nettement:

- La courbe de l'horizon A1 du sol de savane est caractérisée par (tableau VII.5):

- + une teneur en eau au point E de la courbe de retrait est égale à 0,44  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ , correspondant à un potentiel moyen de -98 millibars;
- + un décrochement du tensiomètre qui intervient à une teneur en eau voisine de 0,25  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ , correspondant à un potentiel moyen de - 810 millibars.

L'extraction de l'eau en A1 se fait d'abord sans variation importante de la pression capillaire de l'eau, puis la pression décroît brutalement et se termine par un changement de pente (figure VII.4 a).

- La courbe correspondant aux horizons argileux sous-jacents (AB et B2) qui est caractérisée par (tableau VII.5):

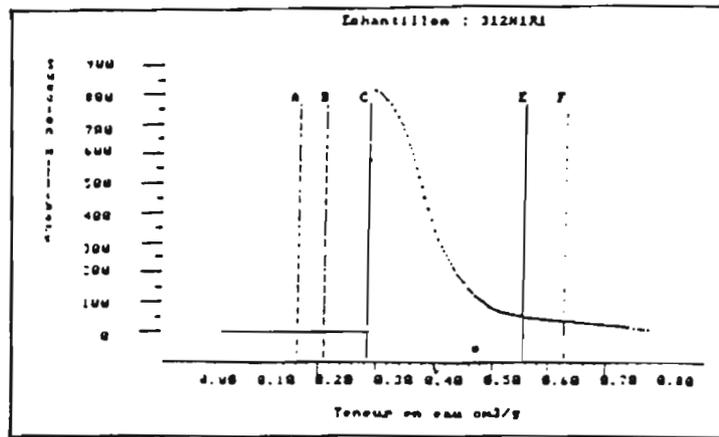


Figure VII.5 a: Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon A11 du sol témoin sous savane

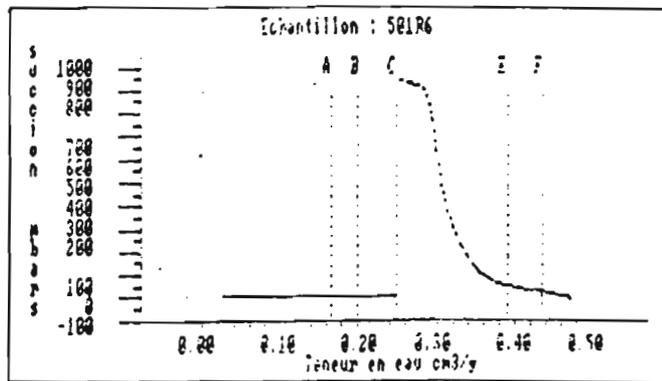


Figure VII.5 b: Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon A12 du sol témoin sous savane

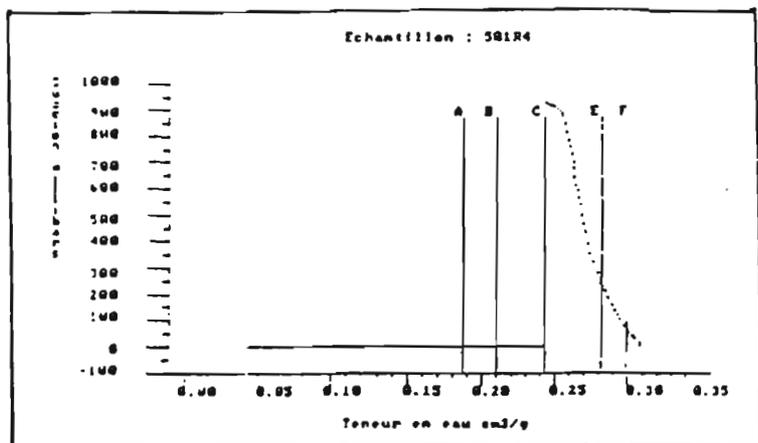


Figure VII.5 c: Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon AB du sol témoin sous savane

+ une teneur au point E de la courbe de retrait est égale à  $0,28 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , correspondant à un potentiel moyen respectivement de - 170 millibars en AB et de -220 millibars en B2;

+ un décrochement du tensiomètre qui intervient à une teneur en eau voisine de  $0,22 - 0,23 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , correspondant à un potentiel moyen respectivement de - 865 mbars en AB et de - 795 mbars.

La variation, en AB et B2, de la pression capillaire avec la dessiccation se produit très rapidement, dès les hautes teneurs en eau (figure VII.4 b).

Tableau VII.5: Volume et potentiel de l'eau au point E ( $w_E$  et  $H_E$ ) et au décrochement du tensiomètre ( $w_{\text{décr.}}$  et  $H_{\text{décr.}}$ ), pour les échantillons provenant du sol sous savane (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

Horizon	Volume d'eau au point E		Au décrochement du tensiomètre		Potentiel au point E		Potentiel au décr.	
	$w_E$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$w_{\text{décr.}}$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	écart-type [ $\sigma$ ]	$H_E$ (mbars)	écart-type [ $\sigma$ ]	$H_{\text{décr.}}$ (mbars)	écart-type [ $\sigma$ ]
A1	0,44	0,10	0,25	0,05	98	0,9	810	1,5
AB	0,28	0,05	0,22	0,02	172	0,9	866	0,9
B2	0,28	0,02	0,23	0,03	219	1,8	795	0,7

## 2). Discussion

Les résultats des mesures du potentiel de l'eau permettent d'interpréter les courbes de rétention d'eau en terme d'évolution de la géométrie de l'espace poral et de l'organisation du sol.

- Dans l'horizon A1, du sol sous savane une grande partie de l'eau se vide aux basses pressions sans variation significative du volume apparent (Fig. VII.5a et b).

- Dans l'horizon AB, au contraire, l'extraction de l'eau se traduit immédiatement par une variation importance de la pression, mais aussi du volume apparent.

Nous en concluons que la nature de l'espace poral des deux horizons est très différente.

- Dans A1, jusqu'à environ - 100 mbars, la variation de volume reste faible, les forces de cohésion intervenant dans le sol ne semblent pas capables de réorganiser le sol et provoquer ainsi le retrait.

- Dans les horizons profonds argileux, la pression nécessaire pour obtenir le

retrait avoisine - 200 mbars. Elle est donc légèrement plus élevée qu'en A1.

De ces résultats il ressort donc que le retrait des échantillons est associé à la présence de pores de relativement petite taille, environ  $10\ \mu\text{m}$ . Autrement dit, plus le sol contient de pores  $< 10\ \mu\text{m}$ , plus il sera sujet à retrait et inversement. Suivant cette hypothèse la disparition des pores les plus grands est l'indice d'une dégradation du sol, non seulement parce que la taille des pores est plus petite, mais aussi parce que la réorganisation du sol se produit du fait du retrait.

## B. MODIFICATIONS DU SOL SOUS CULTURE DE MANIOC

### 1). Résultats

Les résultats sont présentés Fig.VII.6 a et b. Ils montrent les faits suivants:

- Dans l'horizon Ap1, la teneur en eau au point E est de  $0,28\ \text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  (moyenne de 16 mesures) et correspond à un potentiel de l'eau de - 165 mbars . Le décrochement du tensiomètre se fait à une teneur en eau voisine de  $0,22\ \text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ .
- Dans l'horizon cultural Ap2 sous-jacent (tableau VII.6) la teneur en eau au point E est égale à  $0,26\ \text{cm}^3.\text{g}^{-1}$  et correspond à un potentiel de - 260 mbars.

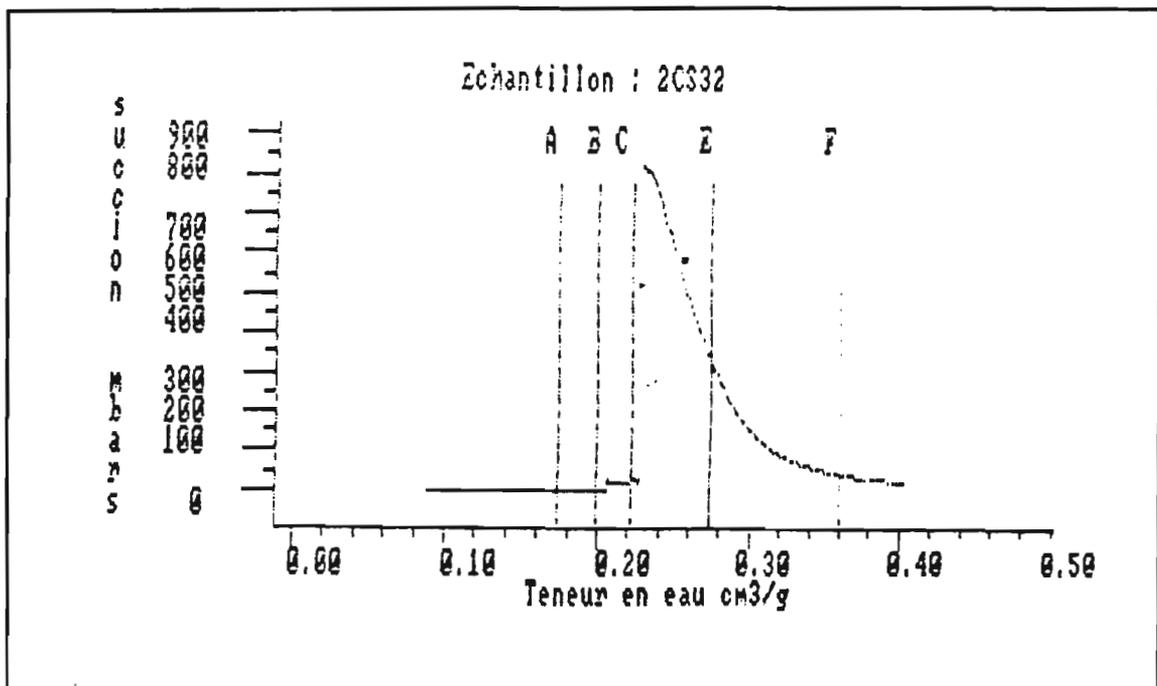


Figure VII.6 a: Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon Ap1 du sol sous culture mécanisée de manioc

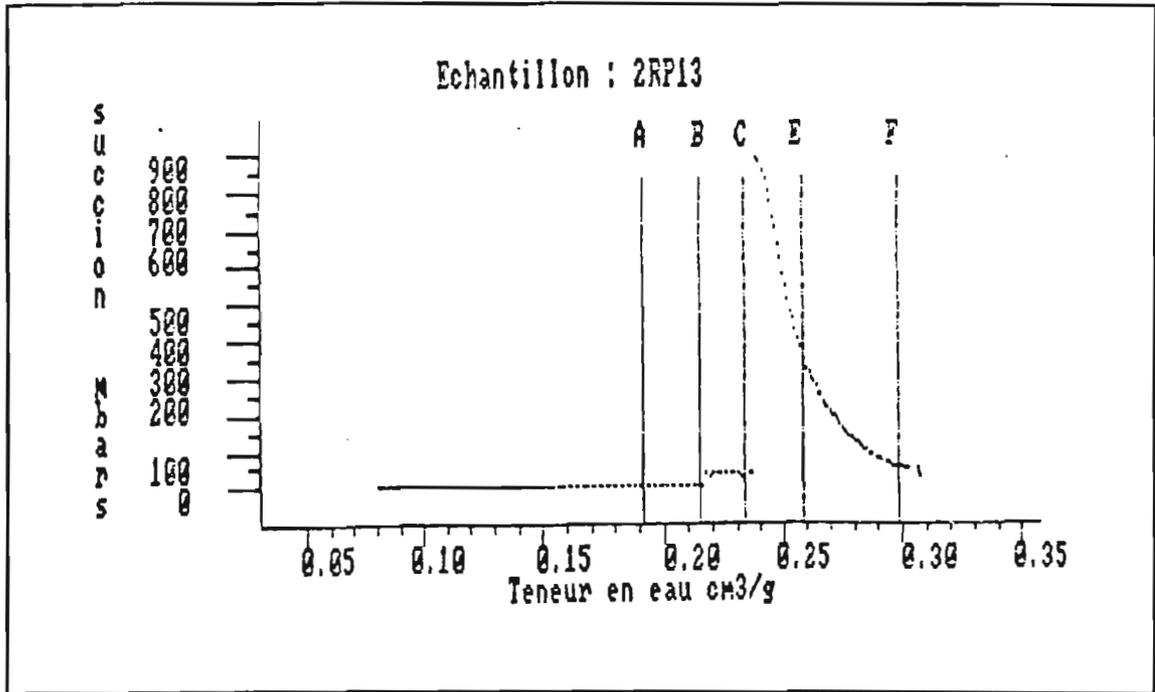


Figure VII.6 b: Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

Tableau VII.6: Volume et potentiel de l'eau au point E ( $w_E$  et  $H_E$ ) et au décrochement du tensiomètre ( $w_{\text{décr.}}$  et  $H_{\text{décr.}}$ ), pour les échantillons provenant du sol sous culture mécanisée de manioc (moyennes de 16 répétitions dans 4 profils)

Horizon	Volume d'eau au point E		Au décrochement du tensiomètre		Potentiel au point E		Potentiel au point de décroch.	
	$w_E$ (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	écart-type [ $\sigma$ ]	$w_{\text{décr.}}$ (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	écart-type [ $\sigma$ ]	$H_E$ (mbars)	écart-type [ $\sigma$ ]	$H_{\text{décr.}}$ (mbars)	écart-type [ $\sigma$ ]
Ap1	0,28	0,10	0,22	0,07	166	1,8	842	1,4
Ap2	0,226	0,05	0,22	0,05	261	1,2	905	1,9

## 2). Discussion

La comparaison des résultats du sol sous savane et du sol sous culture de manioc montre que la courbe de potentiel en fonction de la teneur en eau de l'horizon sous culture de manioc (Ap2) est similaire à celle des horizons AB et B2 du sol sous savane.

Ces résultats montrent aussi que la teneur en eau, au point E des courbes de retrait des horizons du sol sous savane et ceux du sol sous culture mécanisée de manioc, ne correspond pas à une même teneur en eau et à un même potentiel matriciel de l'eau:

- dans l' horizon A1 du sol sous savane et Ap1 du sol sous culture mécanisée de manioc, le point E apparaît à des teneurs en eau élevées qui correspondent à de hauts potentiels (bas pF).
- Dans les horizons sous-jacents AB et B2 du sol sous savane et Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc, par contre, le point E est situé à des teneurs en eau faibles ( $0,26 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$  en Ap2,  $0,28 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$  en AB et en B2) qui correspondent à des potentiels plus bas (pF plus importants). La tension de l'eau au point E est doublée.

*Toutes ces données indiquent qu'une évolution du matériau s'est produite entre les différentes situations. L'examen des lames minces a montré que l'espace poral du sol était, dans l'horizon A1, de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$  et au dessus, donc beaucoup plus grand que dans les autres horizons étudiés. Cette différence de comportement pourrait s'expliquer par l'absence de grands pores ( $> 10 \mu\text{m}$ ) dans les horizons AB, B2 et Ap.*

*Les données sur la rétention d'eau du sol permettent ainsi donc de mieux interpréter les courbes de retrait.*

### **C. CARACTERE FRACTAL DE L'ESPACE PORAL DU SOL SOUS SAVANE ET DU SOL SOUS CULTURE DE MANIOC**

Rappelons qu'un objet fractal est un objet dont une caractéristique mesurable répond à une loi d'échelle. Les courbes de potentiel de l'eau ont été interprétées sur la base du modèle développé par RIEU et SPOSITO (1991).

Selon ce modèle, pour une dimension fractale **D** égale à 3 la porosité des matériaux pédologiques tend vers 0 et le matériau massif.

Plus **D** s'éloigne de 3, plus l'espace mésoporal, entre  $1,5$  et  $10 \mu\text{m}$  est développé.

#### **1) Résultats**

Les résultats présentés dans le tableau VII.7 indiquent que les valeurs de **D**, du sol sous savane et du sol sous culture de manioc, sont toujours égales ou supérieures à 2,8.

Les valeurs de **D** sont plus faibles dans les horizons A1 du sol sous savane que dans les horizons AB et B2 sous-jacents:

- **D** est égal à 2,82 en A1;

- **D** est égal à 2,99 en AB;
- et **D** est égal à 2,97 en B2.

Dans les horizons du sol sous culture de manioc, **D** est respectivement égal à:

- à 2,92 en Ap1
- et à 2,99 en Ap2.

*Tableau VII.7: Valeurs de la dimension fractale (D) et de l'écart-type des échantillons provenant des différents horizons étudiés (moyennes 10 mesures dans 4 parcelles)*

Végétation	Horizon	Profondeur (cm)	Dimension fractale [D]	Ecart-type [ $\sigma$ ]
S A V A N E	A1	50	2,82	0,03
	AB	20	2,99	0,01
	B2	100	2,97	0,02
M A N I O C	Ap1	5	2,92	0,02
	Ap2	20	2,99	0,01

## 2) Discussion et Interprétation

Le caractère fractal de la structure d'un sol peut être définie par l'expression empirique de BROOKS et COREY (cités par RIEU, 1991):

$$[\theta(h)/\Phi] = (h_0/h)^\lambda$$

dont le coefficient présente une interprétation fractale:  $\lambda = 3 - D$ . La différence ( $3 - D$ ) permet de caractériser la finesse de la gamme de pores qui contrôle la relation pression capillaire-teneur en eau.

Les résultats du tableau VII.7 indiquent que  $\lambda$  est égal à 0,18 environ dans l'horizon A1, à 0,01 dans l'horizon AB et à 0,03 dans l'horizon B2. Ils confirment les observations microscopiques qui montrent que la taille des pores diminue avec la profondeur du sol sous savane.

Sous culture de manioc,  $\lambda$  étant égal à 0,08 en Ap1 et 0,01 en Ap2, ceci confirme le caractère fin de l'espace poral des horizons mécanisés qui sont de ce fait similaire des horizons AB et B2 sous savane.

#### **d. CONCLUSION**

Les résultats sur la dimension fractale  $D$  des horizons du sol sous savane (A1, AB et B2) ainsi que ceux du sol sous culture mécanisée de manioc (Ap1 et Ap2), sont accord avec les observations morphologiques. Ils indiquent ainsi que l'horizon A1 est grossièrement structuré avec de mésopores de grande taille tandis que les horizons plus argileux tels AB et B2 du sol sous savane ou Ap1 et Ap2 du sol sous culture de manioc, ont plutôt une structure peu fragmentaire avec des mésopores de taille plus fine. Par mésopores nous entendons les pores de l'ordre de 1,5 à 30  $\mu\text{m}$ .

### **C. EXAMEN DES MACROPORES DU SOL EN ANALYSE D'IMAGES**

Des résultats qui précèdent il est clair que les courbes de rétention d'eau ne nous ont pas permis d'analyser l'espace poral du sol dès lors que les pores dépassent 30  $\mu\text{m}$  environ. Les observations sont restées très qualitatives de sorte qu'il n'a pas été possible de quantifier la taille, la surface des pores et des constituants solides du sol.

#### **1. CARACTERISTIQUES PORALES GLOBALES: AIRE, PERIMETRE ET INDICE DE FORME DES MACROPORES DU SOL**

Les résultats de mesure de l'aire totale des pores ( $a$ ) du périmètre des pores ( $p$ ), et de l'indice de forme des pores ( $l_f$ ), sont présentés dans les tableaux VII.8 et sur les figures VII.7a, VII.7b, VII.8, VII.9 et VII.10. Chaque chiffre représente la valeur moyenne de  $a$ ,  $p$  et  $l_f$  obtenue sur quatre champ-images différents de l'échantillon étudié.

Les lames minces étudiés proviennent des horizons AB et B2 du sol de savane, ainsi que de l'horizon cultural Ap2 du sol sous manioc.

##### **a. AIRE TOTALE DES MACROPORES DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL**

Nous comparerons les horizons AB et B2 du sol sous savane à l'horizon Ap2 du sol cultivé sous manioc qui, rappelons le présentent tous les trois des courbes de retrait similaires (chapitre VII.B.1).

#### **1). Résultats**

Les résultats sont exprimés en  $\text{cm}^2$  de surface porale étudiée par rapport à la surface analysée.

##### **a). Caractéristiques du sol sous savane**

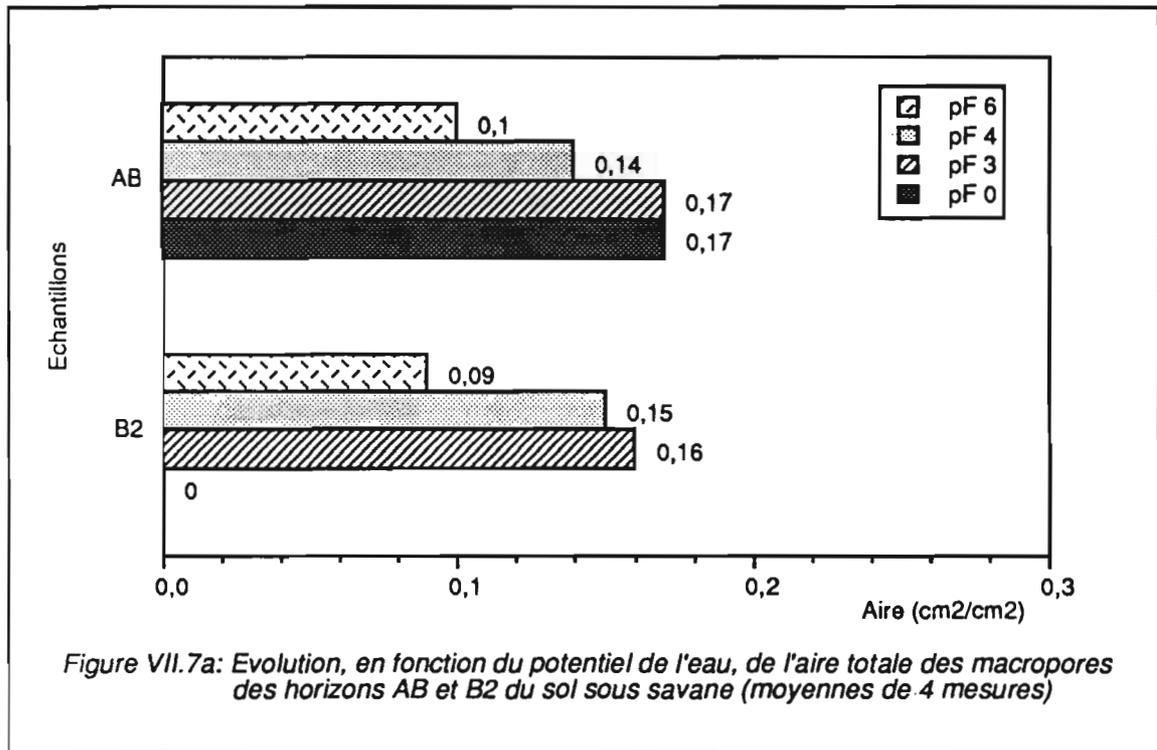


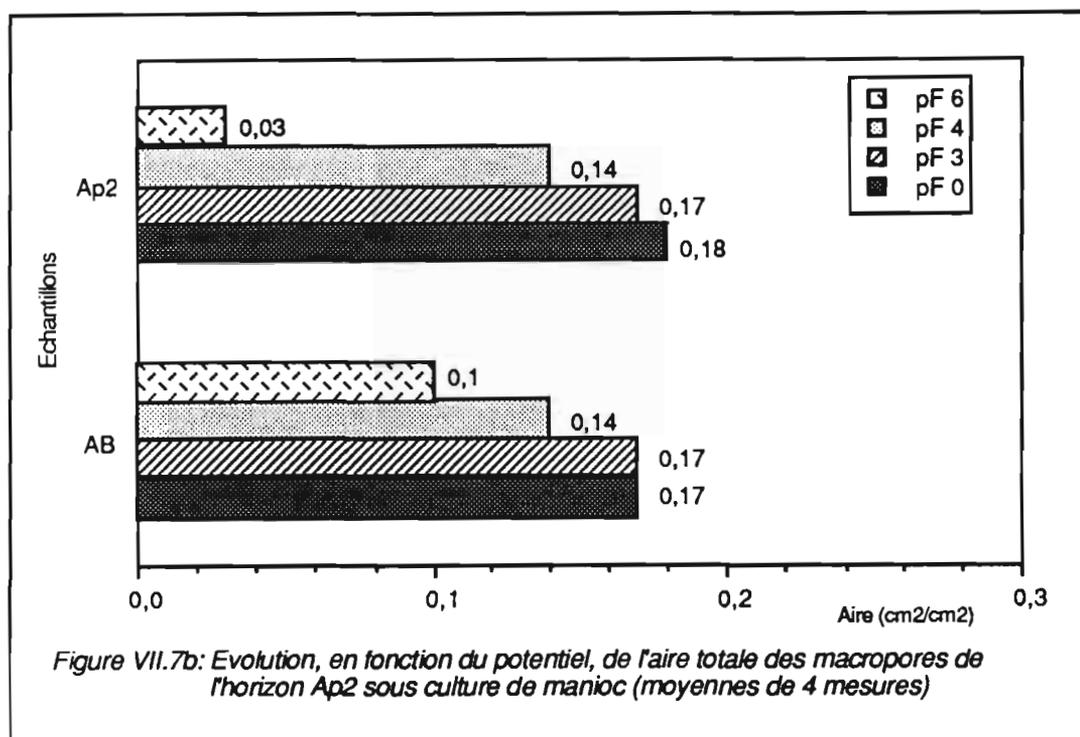
Tableau VII.8: Evolution, en fonction du potentiel de l'eau, de l'aire porale totale (en cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>) des échantillons étudiés (moyennes de 4 mesures)

Echantillon	Profondeur (cm)	pF 0	pF 3	pF 4	pF 6
AB (sous savane)	20	0,17	0,17	0,14	0,10
B2 (sous savane)	100	-	0,16	0,15	0,09
Ap2 (sous manioc)	20	0,18	0,17	0,14	0,03

Le tableau VII.8 et les histogrammes de la figure VII.7a, obtenus à différents potentiels de l'eau, montrent une différenciation de l'aire totale des macropores dans les horizons AB et B2 du sol de savane:

- dans l'**horizon AB, sous savane**, les résultats indiquent une diminution nette de l'aire porale totale entre pF 0 ou pF 3 et pF 6: de 0,17 à 0,10 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>;
- dans l'**horizon B2**, l'aire porale totale similaire à pF 3 devient beaucoup plus faible qu'en AB à pF=6 (0,16 à 0,09 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>).

**b). Evolution du sol sous culture de manioc(Ap2)**



Dans l'horizon Ap2, l'aire des macropores passe de 0,18 (à pF 0) à 0,03 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup> (à pF 6), la diminution, au cours de la déshydratation, de l'aire totale des macropores est donc considérable (figure VII.7b).

La comparaison avec l'horizon AB du sol sous savane, montre que les matériaux à l'état humide (pF 0) et à l'état humide, possèdent des volumes de pores comparables, même s'ils sont significativement différents ( 0,1 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup> dans l'horizon AB à 0,03 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup> dans l'horizon Ap2.

## 2). Discussion

Nous pouvons caractériser les horizons étudiés sur la base de l'aire des pores et de leur évolution au cours de la dessiccation.

- Les horizons AB et B2 du sol sous savane se caractérisent avant tout par une aire porale globale relativement constante quel que soit le potentiel de l'eau. L'aire porale de l'horizon B2 évolue moins que celle de l'horizon AB. L'horizon B2 est donc nettement plus rigide que l'horizon AB. Autrement dit, le sol sous savane est plus rigide en profondeur qu'il n'est en surface.
- L'horizon cultural (Ap2) peut être caractérisé, en revanche, par une très forte diminution

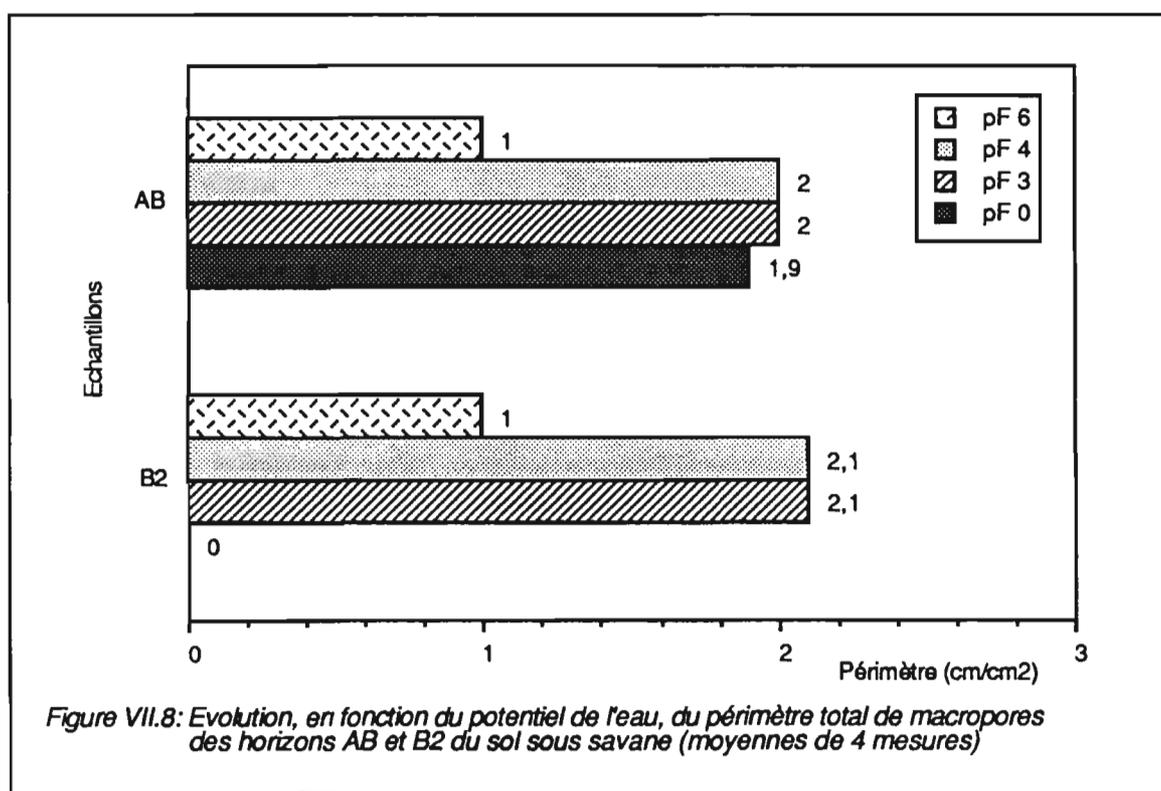
de la surface des macropores entre pF 0 et pF 6, donc par son caractère non rigide.

L'évolution de la structure du sol due à la mise en culture va donc dans le sens d'un retrait macroscopique important, donc d'un caractère plus argileux.

## b. PERIMETRE TOTAL DES MACROPORES DE CYLINDRES DECIMETRIQUES

### 1). Résultats

#### a). Caractéristiques du sol sous savane (horizons AB et B2)



La figure VII.8 permet de comparer l'évolution du périmètre poral des horizons AB et B2 du sol sous savane:

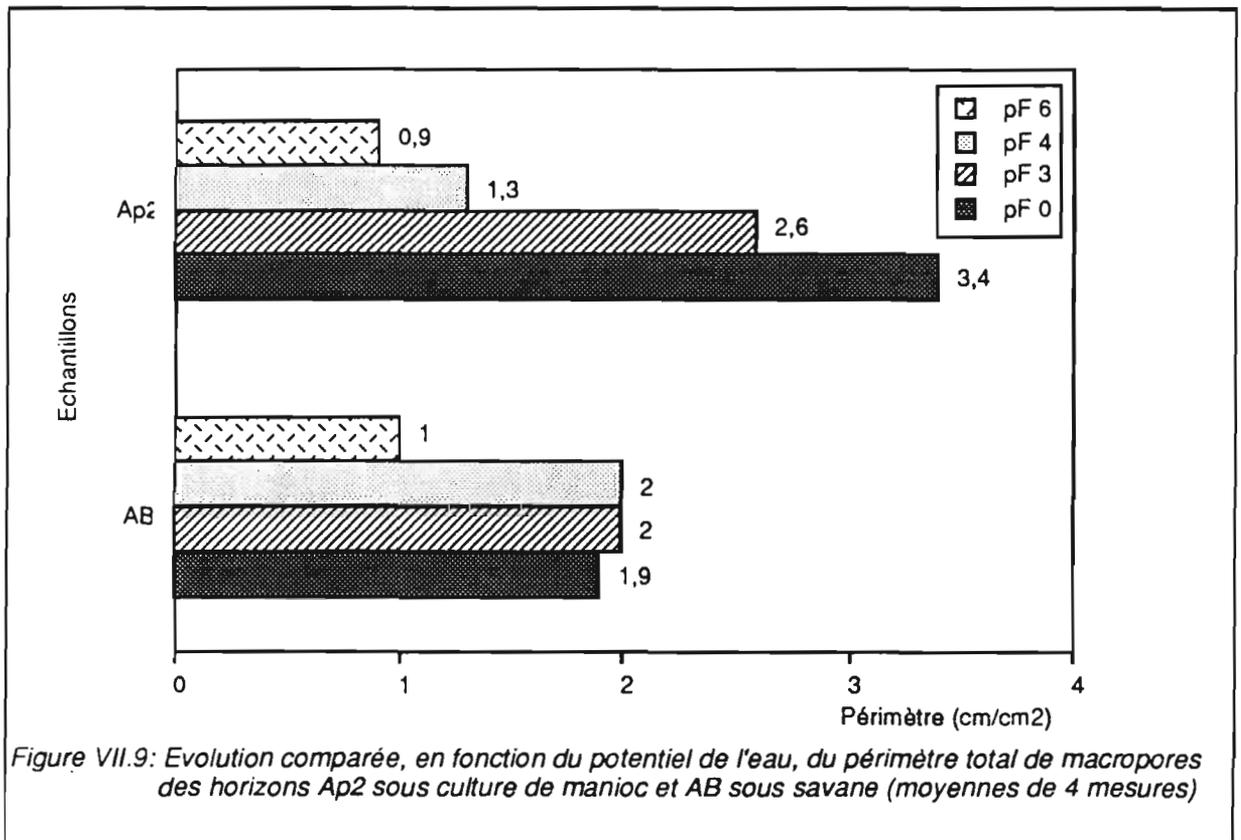
- à pF 3, le périmètre poral total est identique dans les horizons AB sub-superficiel ( $2,0 \text{ cm/cm}^2$ ) et B2 profond ( $2,1 \text{ cm/cm}^2$ );
- le périmètre poral total diminue systématiquement **du sol humide au sol sec**:
  - + en AB on passe de  $2,0 \text{ cm/cm}^2$  (à pF 3) à  $1 \text{ cm/cm}^2$  (à pF 6);
  - + en B2 on passe de  $2,1$  (à pF 3) à  $1 \text{ cm/cm}^2$  (pF 6).

Nous en concluons que si le périmètre mesuré diminue au cours de la dessiccation, soit la forme des objets a changé, soit encore leur taille moyenne a augmenté, ce qui traduirait une prise en masse du matériau.

Tableau VII.9: Evolution en fonction du potentiel de l'eau du périmètre total ( $\text{cm}/\text{cm}^2$ ) des échantillons étudiés (moyennes de 4 mesures)

Echantillon	Profondeur (cm)	pF 0	pF 3	pF 4	pF 6
AB (sous savane)	20	1,9	2,0	2,0	1,0
B2 (sous savane)	100	-	2,1	2,1	1,0
Ap2 (sous manioc)	20	3,4	2,6	1,3	0,9

**b). Modifications du sol sous culture de manioc (Ap2) et discussion**



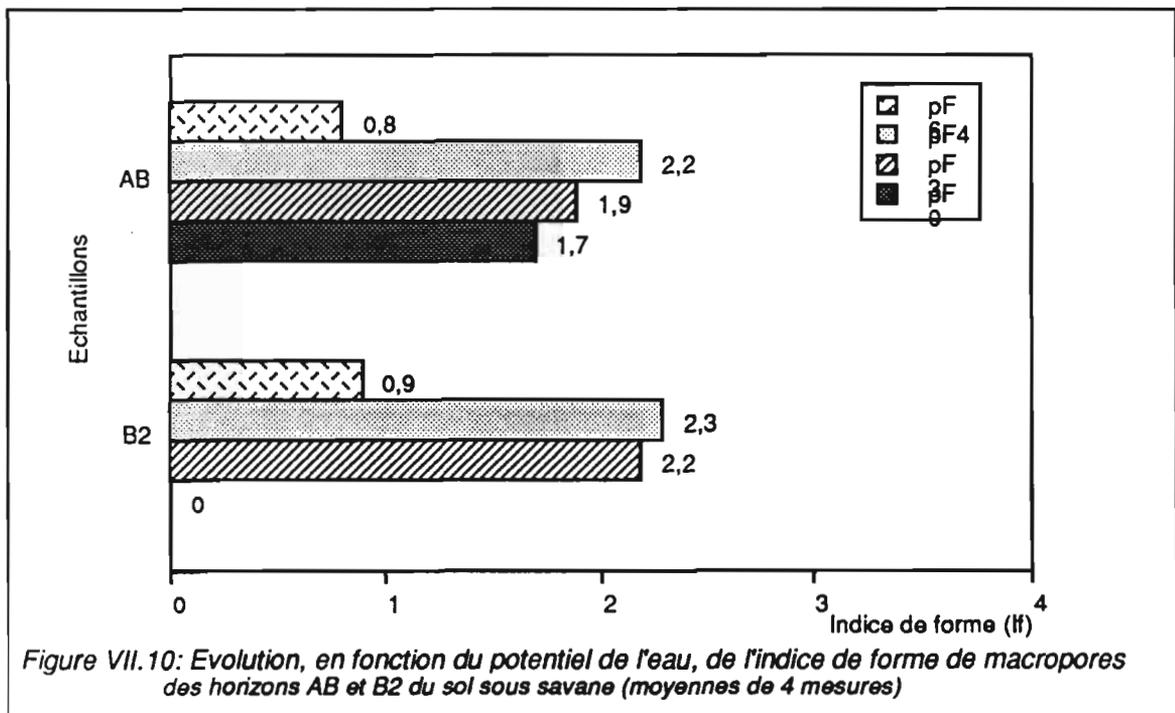
Dans l'horizon Ap2 cultivé, la Fig. VII.9 montre aussi une diminution considérable du périmètre total des macropores entre le sol humide et le sol sec: de 3,4 cm/cm<sup>2</sup> (pF 0) à 0,9 cm/cm<sup>2</sup> (pF 6).

La comparaison avec l'horizon AB du sol de savane indique que les modifications dues à la mécanisation de la culture du manioc, ne se manifestent pas du tout sur le sol sec, mais au contraire sur le sol humide: à pF 0 le périmètre des macropores est de 3,4 cm/cm<sup>2</sup> en Ap2 et de 2,0 cm/cm<sup>2</sup> en AB.

### c. INDICE DE FORME DE L'AIRE MACROPORALE TOTALE ( $I_f$ )

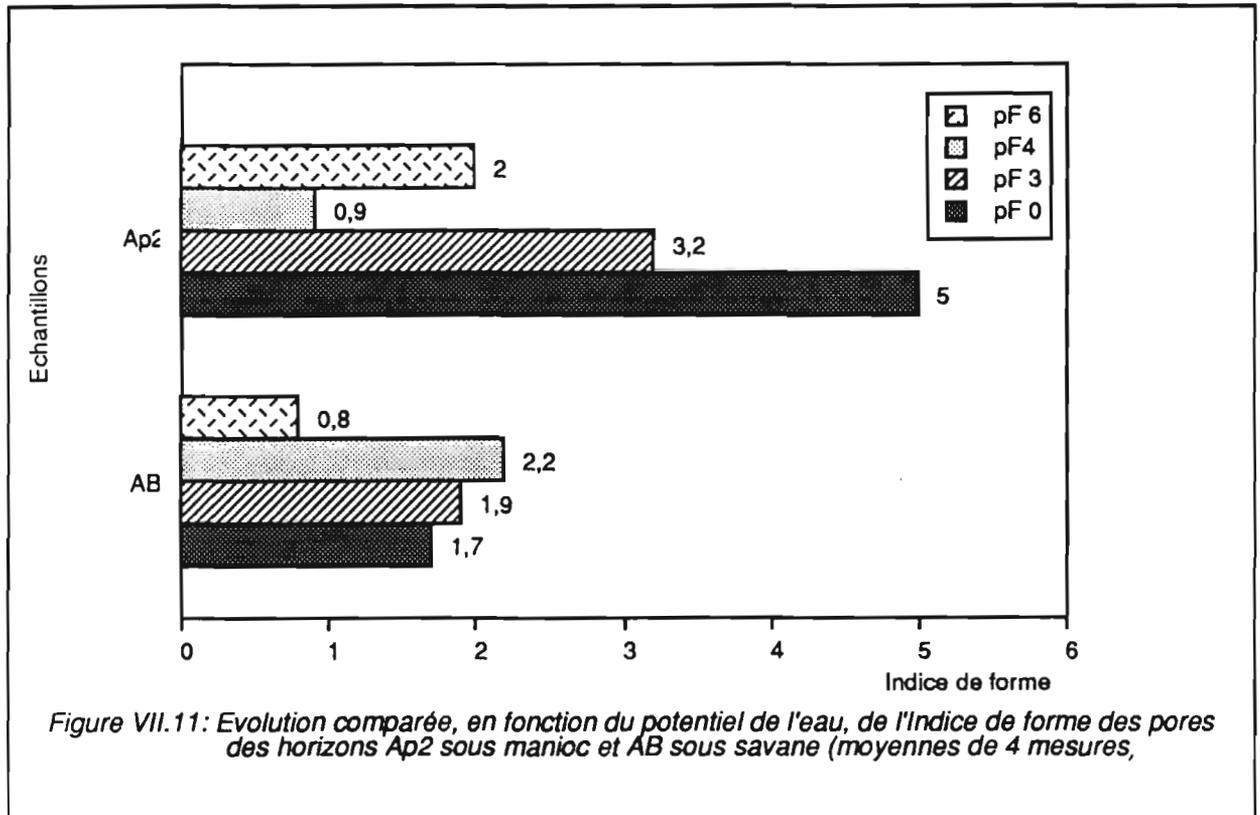
L'aire et le périmètre des pores d'un échantillon de sol pouvant varier de façon contrastée au cours de la dessiccation, il est intéressant de comparer les différentes situations étudiées, et de caractériser l'espace poral par un indice de forme ( $I_f$ ).

#### 1). Résultats



Le tableau VII.10 donne les indices de forme de l'aire porale totale obtenus, à différents potentiels de l'eau du sol, pour les horizons AB, B2 (sous savane) et l'horizon Ap2 (sous manioc mécanisé depuis près de quinze ans).

Rappelons qu'un indice de forme égal à 1 correspond à des pores de forme circulaire ou planaire. Lorsque l'indice de forme devient supérieur à 1, il correspond à des formes de plus en plus tortueuses ou "digitées".



Les figures VII. 10 et 11 montrent que, dans les horizons AB et B2 du sol de savane et Ap2 du sol cultivé, la forme des pores évolue de la façon suivante avec la dessiccation:

- en **AB et B2**, l'indice de forme est de 2 à l'état humide et passe à environ 1 à l'état sec;
- en **Ap2**, l'indice de forme passe de 5 à l'état humide à 1 à pF = 4 à 2 à l'état sec (pF = 6).

Ces résultats indiquent que dans les horizons du sol sous savane, la forme des pores reste similaire au cours du retrait. Au contraire sous manioc une évolution non monotone est observée. De forme digitée au départ ( $I_f = 5$ ), les pores acquièrent ensuite une forme beaucoup plus simple ( $I_f = 1$  à 2), ce qui traduit une réorganisation importante de la géométrie de l'espace poral, et en conséquence du sol à l'échelle macroscopique.

Tableau VII.10: Evolution, en fonction du potentiel de l'eau, de l'indice de forme des macropores (*f*) des échantillons étudiés (moyennes de 4 mesures)

Horizon	Profondeur (cm)	pF 0	pF 3	pF 4	pF 6
AB (sous savane)	20	1,7	1,9	2,2	0,8
B2 (sous savane)	100	-	2,2	2,3	0,9
Ap2 (sous manioc)	20	5	3,2	0,9	2,0

## 2). Discussion

Tableau VII.11: Evolution, au cours de la dessiccation, de l'aire, du périmètre et de l'indice de forme des pores des horizons Ap2 (sous manioc), AB et B2 (sous savane), d'un sol ferrallitique argileux

Horizon	pF	Aire (cm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> )	Périmètre (cm/cm <sup>2</sup> )	Indice de forme
Ap2 (sous manioc)	0	0,18	3,4	5,0
	3	0,17	2,6	3,2
	4	0,14	1,3	0,9
	6	0,03	0,9	2,0
AB (sous savane)	0	0,17	1,9	1,7
	3	0,17	2,0	1,9
	4	0,14	2,0	2,2
	6	0,10	1,0	0,8
B2 (sous savane)	0	-	-	-
	3	0,16	2,1	2,2
	4	0,15	2,1	2,3
	6	0,09	1,0	0,9

- L'ensemble des résultats sont regroupés tableau VII.11. Celui-ci, ainsi que ce qui précède, montre qu'il existe une très nette évolution de l'espace poral, au cours de la dessiccation en terme de surface, de taille mais aussi de forme des pores dans les différents horizons étudiés, du sol sous savane au sol sous culture de manioc. Quand l'indice de forme prend une valeur élevée c'est que le sol est humide. Dans ce cas la forme des pores est très digitée à digitée (HARTMANN, 1991). En sol sec (à partir de pF 4), on aboutit en revanche à des pores de forme mieux définie se rapprochant des formes géométriques simples

c'est-à-dire à des pores de type cylindrique, cubique ou polyédrique. Nous avons vu aussi que cela correspondait à des formes géométriques simples de la phase solide.

- La mise en culture provoque des modifications se traduisent, dans l'horizon Ap2, par un passage très rapide de la forme très digitée des macropores à une forme plus simple, qui, comme le montre la microscopie optique, est circulaire ou plutôt planaire.

## **2. GRANULOMETRIE DES MACROPORES ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) AU SEIN DE CYLINDRES DE SOL: AIRE EN FONCTION DU RAYON DE PORE EQUIVALENT**

Il est important de rappeler que la nature des macropores du sol ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ), et leur dynamique saisonnière jouent un rôle essentiel sur le fonctionnement du sol et particulièrement sur son fonctionnement hydrique.

En effet, la grande perméabilité des sols ferrallitiques argileux et notamment ceux du Niari a intrigué plus d'un observateur. Aucune étude n'a pu cependant permettre de relier les caractéristiques hydrodynamiques au système macroporal de ces sols. Il manquait certainement une description quantitative des macropores.

Rappelons que le spectre des macropores du sol ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ), ne peut vraiment être réellement étudié avec les courbe de rétention d'eau. D'où l'intérêt de l'étudier avec l'analyse d'image de lames minces de sols. Il ne s'agit pas ici d'étudier le spectre poral à l'état sec mais aussi d'analyser les changements de ce système macroporal ( $R_{eq}$  compris entre  $30 \mu m$  et  $1300 \mu m$ ), en fonction du potentiel de l'eau des échantillons. Les mesures ont été effectuées à partir des images obtenues sur les horizons Ap2 sous manioc (10-25 cm), AB (10-25 cm), et B2 (50 > 100 cm), sous savane.

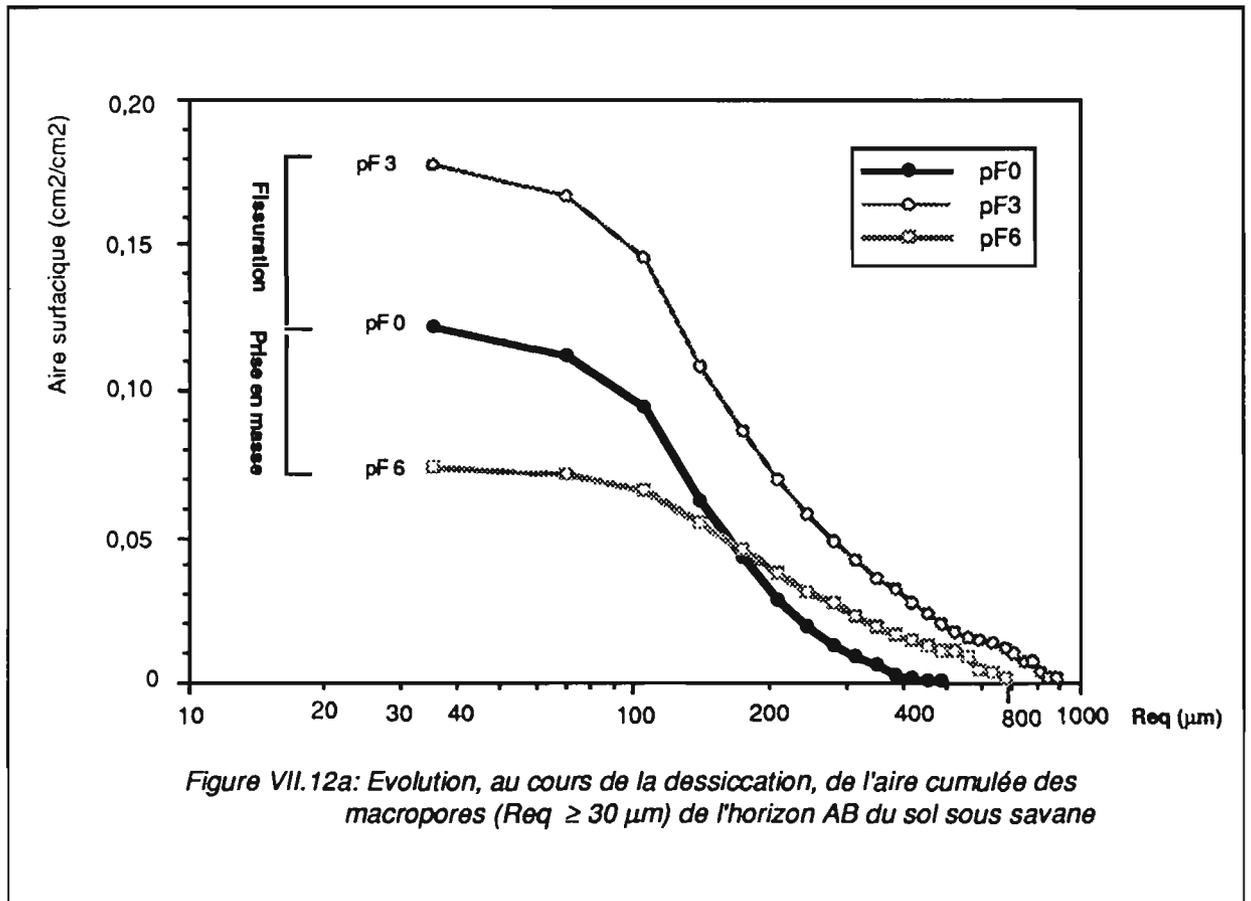
Nous nous limiterons ici au domaine d'humidité rencontré *in situ* lors d'un cycle saisonnier. Tous les échantillons ne se sont pas prêtés à l'inclusion et deux échantillons se sont abîmés au cours de manipulations: échantillon préparé à pF 0 et provenant de l'horizon B2 et échantillon sec provenant de l'horizon Ap2.

L'analyse sera faite en comparant les horizons AB et B2 du sol sous savane et Ap2 du sol sous culture de manioc.

### **a. DYNAMIQUE, EN FONCTION DE L'ETAT D'HYDRATATION, DE L'ESPACE MACROPORAL DE L'HORIZON AB DU SOL SOUS SAVANE**

Rappelons que les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes du spectre et de courbes cumulatives de surfaces (aires) des macropores du sol (moyennes de 4 mesures dans un champ-image).

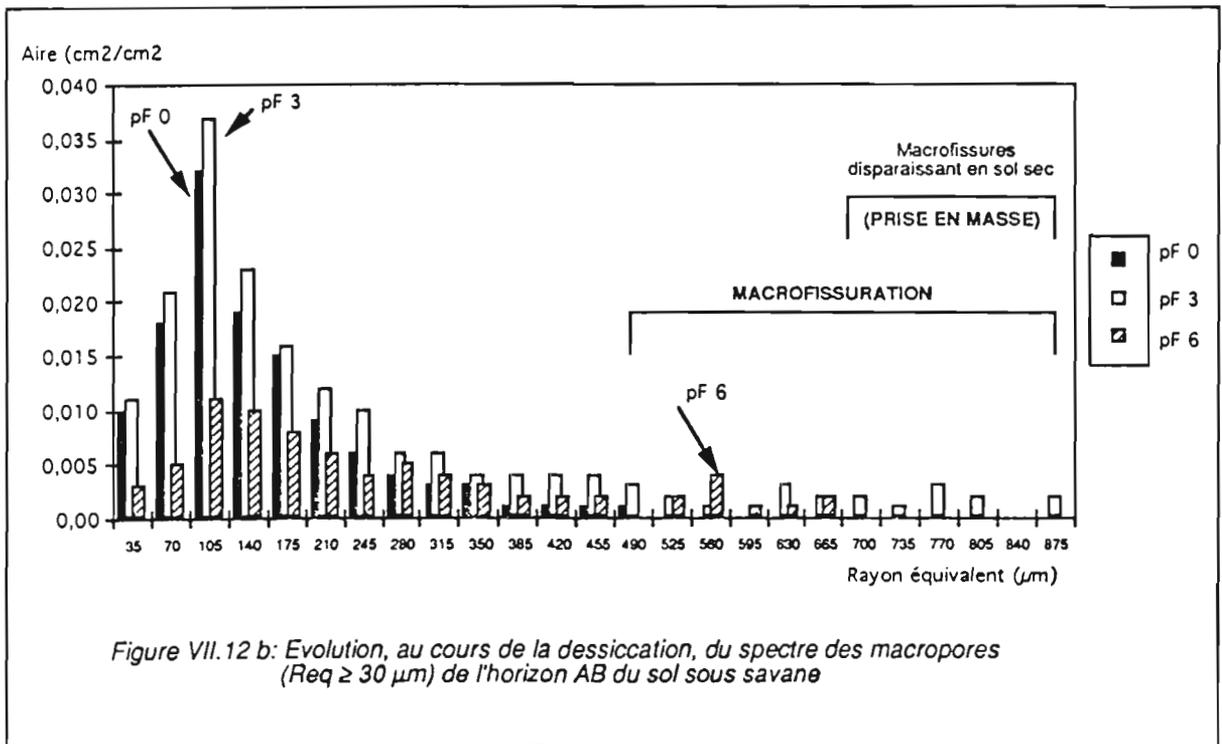
**1). Etude de la réorganisation du sol au cours de sa dessiccation.  
Cas de l'horizon AB**



L'étude en analyse d'images de lames minces, préparées à partir de mottes de taille décimétrique sols à été faite à différents potentiels de l'eau. Des courbes cumulées d'aire porale et des histogrammes ont été préparés. Nous avons aussi, en supposant que l'aire porale puisse être traduite en volume poral, transformé les données surfaciques en données volumiques.

Nous traiterons dans le détail le cas de l'horizon AB du sol sous savane. Pour cet horizon, nous avons tout d'abord classé les pores en fonction de leur taille, cette opération est appelée granulométrie.

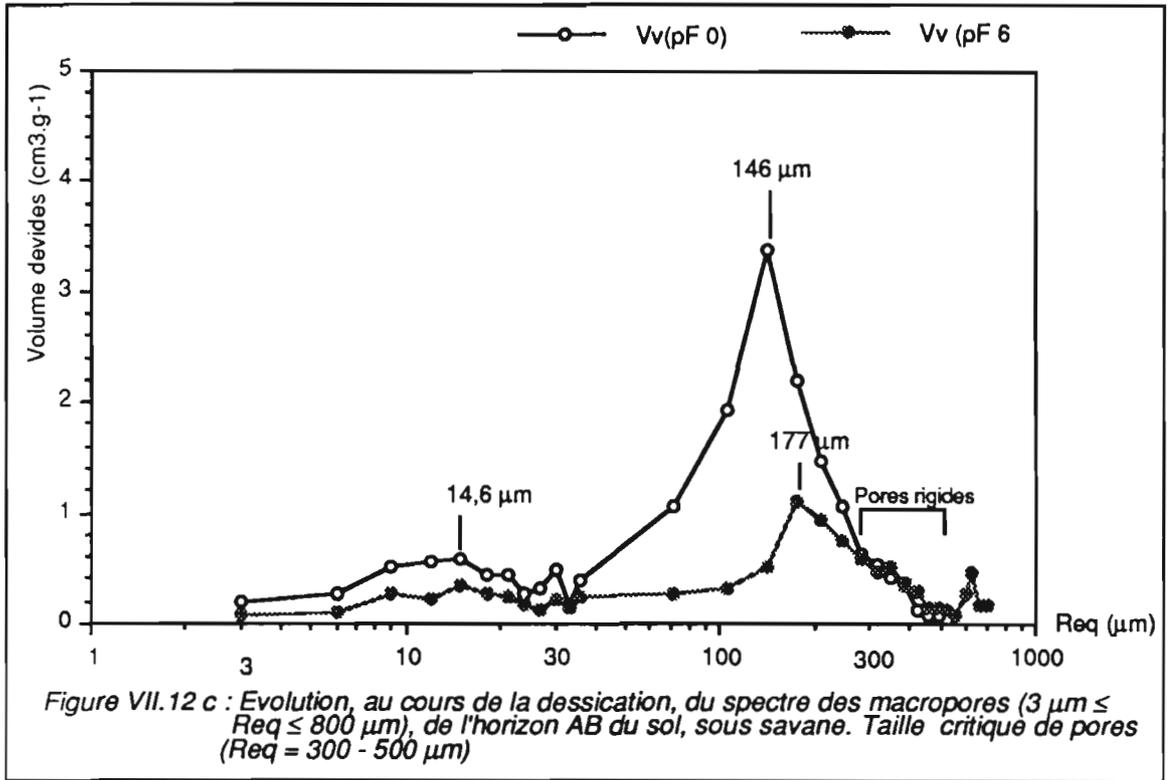
*Nous Remarquons que l'aire macroporale totale cumulée après granulométrie (avec un élément structurant hexagonal) n'est pas nécessairement équivalente à l'aire totale des macropores (figure VII.7), déterminée auparavant par calcul à partir des valeurs des intercepts (en pixels rectangulaires), mesurées dans trois orientations ( $0^\circ$ ;  $60^\circ$  et  $120^\circ$ ).*



Les données granulométriques cumulées sont données Fig.VII.12a, les histogrammes Fig. VII.12b et les données volumiques Fig. VII.12c:

- A potentiel nul, **pF 0**, la courbe des aires cumulées des macropores (figure VII.12) de l'horizon AB du sol sous savane et l'histogramme du spectre macroporal équivalent (figure VII.13) indiquent la présence, en grand nombre, de pores  $< 150 \mu\text{m}$ , mais absence totale de pores de taille  $> 400 \mu\text{m}$ .
- A **pF 3**, la courbe des aires cumulées et l'histogramme du spectre des macropores de cet horizon AB montrent que toutes les classes de pores augmentent. Des pores de l'ordre du millimètre se forment donc au cours de la dessiccation. D'après ce que nous avons vu sur les lames minces, des fissures très larges se forment. C'est le phénomène que nous avons désigné par **fissuration** du sol.
- A **pF 6**, les résultats présentés sous forme de courbe des aires cumulées et d'histogramme des macropores indiquent la disparition des pores les plus grands identifiés à pF = 3. Il y aurait donc fermeture des fissures les plus larges, avec disparition des pores de rayon équivalent  $> 700 \mu\text{m}$ . Une nette diminution de pores de rayon équivalent  $< 200 \mu\text{m}$  est aussi observée.

## 2). Permanence d'un spectre poral entre 300 et 500 $\mu\text{m}$



Les résultats de la Fig. VII.12c montrent qu'au cours de la dessiccation de l'horizon AB du sol sous savane, certaines classes de macropores dont le rayon équivalent est compris entre 280 et 500  $\mu\text{m}$  ne connaissent pas de variations importantes de leur aire. De toute évidence, à l'observation des lames minces il s'agit de pores d'origine biologique. Ces derniers ne sont pas associés au retrait-gonflement du sol, ce qui confirme les observations d'autres auteurs (BRUAND, 1985).

### 3). Discussion et interprétation

L'intérêt de l'analyse d'image est avant tout de donner des informations sur les pores du sol ( $R_{eq} > 30 \mu\text{m}$ ).

Le principal résultat de ce qui précède est cependant de montrer, qu'au cours de la dessiccation, l'espace poral du sol à l'échelle décimétrique n'augmente pas de façon monotone. La première phase du retrait est accompagnée d'une fissuration. En revanche, après  $pF = 3$  l'aire (donnée surfacique) ou le volume (donnée volumique) diminue.

D'après ce que nous avons vu précédemment sur les lames minces, et qui est confirmé de façon quantitative par l'analyse d'image, le volume poral macroscopique diminue tandis que la taille des éléments structuraux du sol augmente. Il y a donc une sorte de **prise en masse du sol lors du retrait au delà de  $pF = 3$** .

L'interprétation de ce phénomène peut probablement est associé à l'effet des forces capillaires de l'eau, qui en fonction de la taille des pores du sol sont susceptibles de réorganiser le matériau. D'après Sala et TESSIER (1992), lorsque des ménisques capillaires dont le rayon est de l'ordre de 1 à 5  $\mu m$  peuvent intervenir entre des pores d'un matériau, leur action sur les parois des pores peut conduire à une prise en masse.

Ceci vient confirmer nos mesures de pression interstitielle, qui indiquaient que l'essentiel de la réduction du volume des échantillons se fait au delà de - 200 mbars à - 800 mbars, c'est à dire des pores de même ordre de grandeur.

Ainsi, du fait de la présence de nombreux pores de taille comprise entre 30 et 1  $\mu m$  en particulier, **un transfert de porosité, conduisant à une prise en masse peut être observé.**

Il est clair aussi que les courbes de retrait obtenues sur échantillons de taille décimétrique ne nous permettent pas d'observer les phénomènes que nous venons de décrire. Soulignons que l'interprétation des courbes de retrait telle que celle développée par BRAUDEAU (1988 a et b) suppose une augmentation monotone de la macroporosité du sol en fonction du retrait.

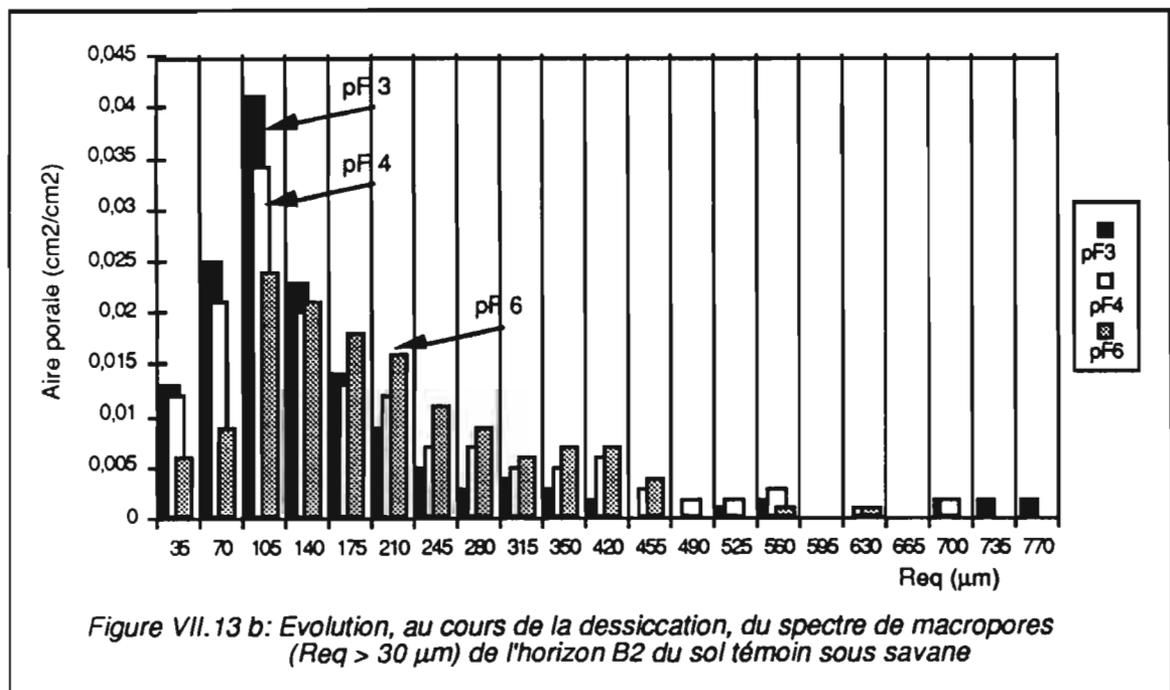
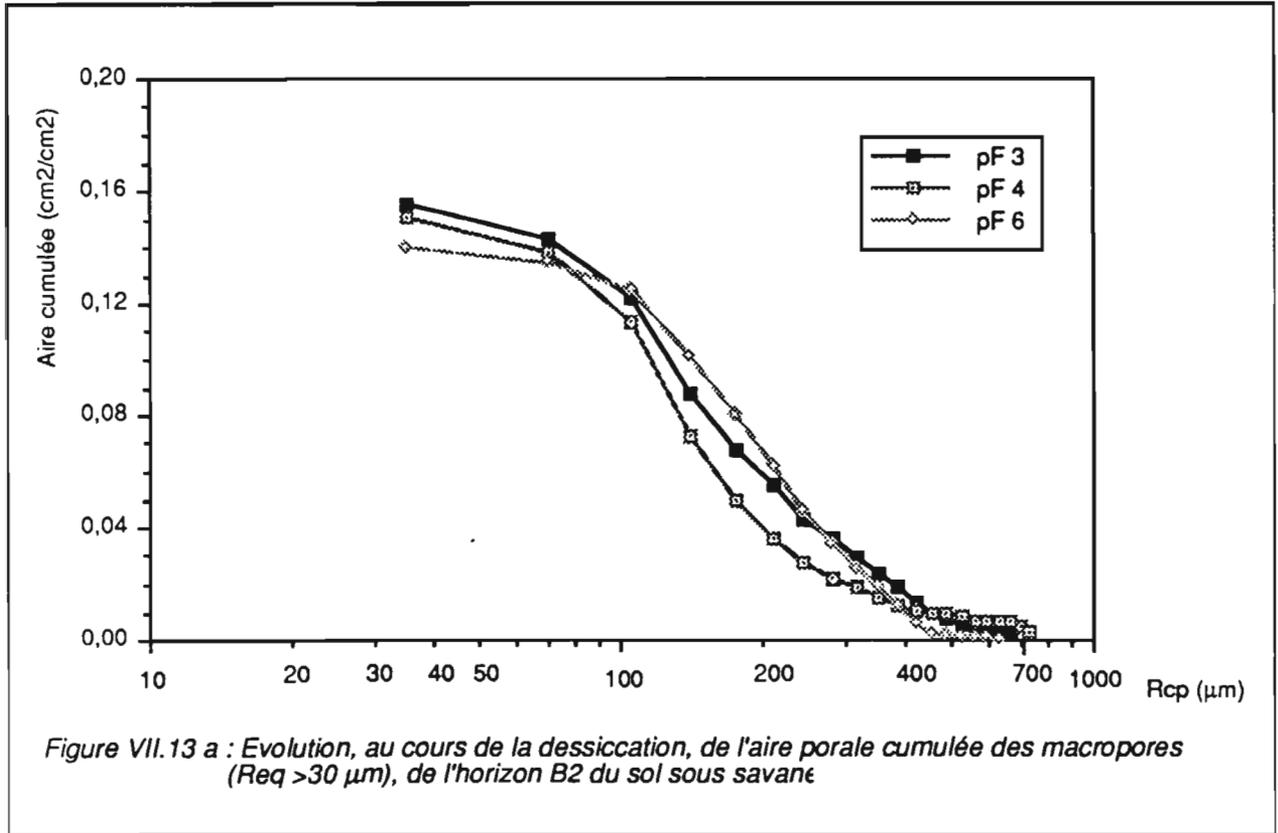
**Ce résultat indique qu'il n'est pas possible de distinguer, dans le retrait à l'intérieur d'un volume donné, la réorganisation de la phase solide du sol, simplement par la seule mesure de son retrait volumique.**

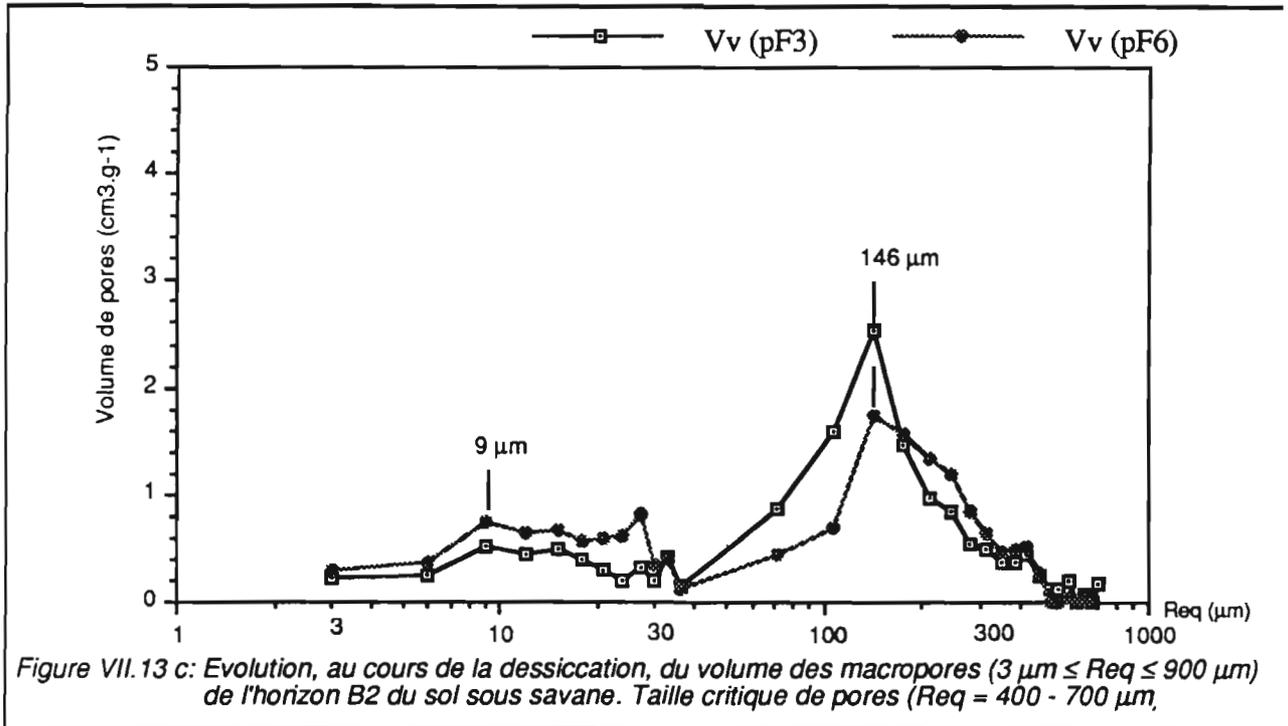
## **B. EVOLUTION DANS LE PROFIL DU SOL SOUS SAVANE: COMPARAISON ENTRE LES HORIZONS AB ET B2**

### **1). Résultats**

D'après les résultats présentés sur la courbe cumulative des aires (figure VII.13 a) et l'histogramme (figure VII.13 b) du spectre des macropores de l'horizon B2 du sol sous savane, nous observons une évolution du système poral analogue à celle de l'horizon AB. Par rapport à l'horizon AB subsuperficiel, l'évolution est, dans l'horizon B2 profond, de très faible amplitude.

Ainsi donc, dans les cylindres de taille décimétrique provenant de l'horizon B2 du sol sous savane, **les phénomènes de fissuration (pores de  $R_{eq} < 800 \mu m$ ), et de reprise en masse ou de retrait résiduel (pores  $R_{eq} < 700 \mu m$ ), sont de très faible ampleur.**

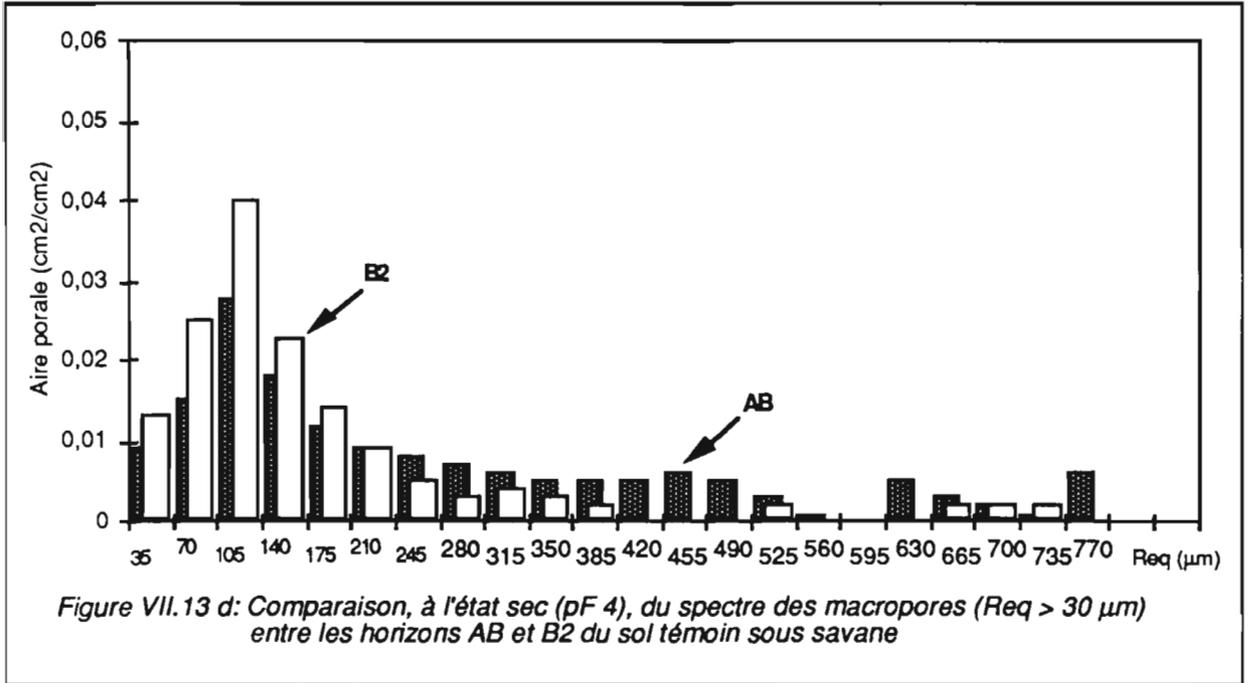




## 2). Discussion

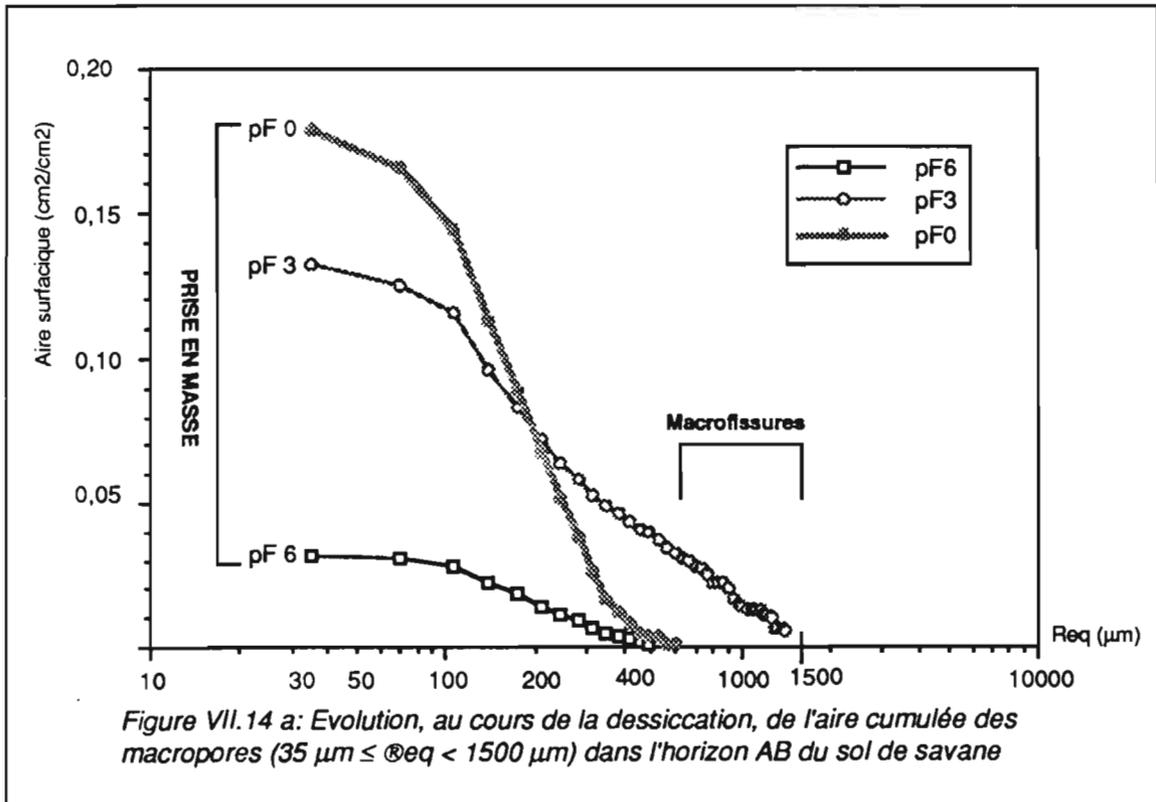
De ce qui précède il apparaît que les phénomènes de fissuration puis de reprise en masse qui ont lieu dans le profil du sol sous savane, sont visibles à l'échelle macroscopique, mais l'effet est atténué en profondeur car les variations du volume poral y sont de plus en plus faibles.

Ce résultat est en accord avec les données des courbes de retrait du sol de savane qui présentent un gonflement bien plus faible dans l'horizon B2 profond que dans les horizons A1 et AB sus-jacents. Dans la nature le retrait doit être encore moindre car le dessèchement ne dépasse pas  $\text{pF} = 4,2$  au delà de 40 cm de profondeur. Il n'y a donc pas de conditions nécessaires pour que les horizons B soient structurés à l'échelle macroscopique.



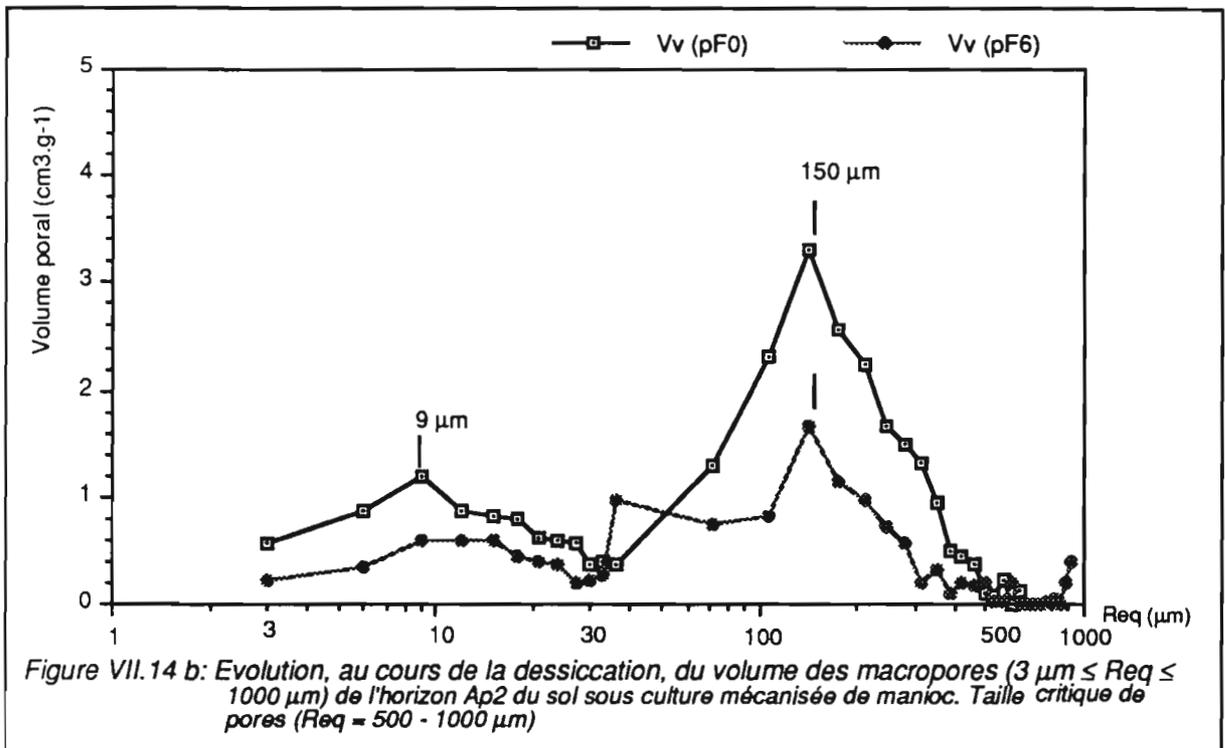
**C. EVOLUTION DANS LES HORIZONS SUB-SUPERFICIELS Ap2 DU SOL SOUS CULTURE MECANISEE DE MANIOC**

**1). Résultats**



Les résultats présentés sur la courbe cumulative des aires (figure VII.14 a et b) des macropores de l'horizon Ap2 du sol sous culture de manioc montrent que:

- à pF 3, la **fissuration**, entre 400 et 1500  $\mu\text{m}$ , **est très abondante** dans l'horizon Ap2 (figure VII.14 a);
- à pF 6, tous les pores dont le rayon équivalent est  $>$  à 600  $\mu\text{m}$  disparaissent et les pores de taille comprise entre 35 et 700  $\mu\text{m}$  sont considérablement diminués.



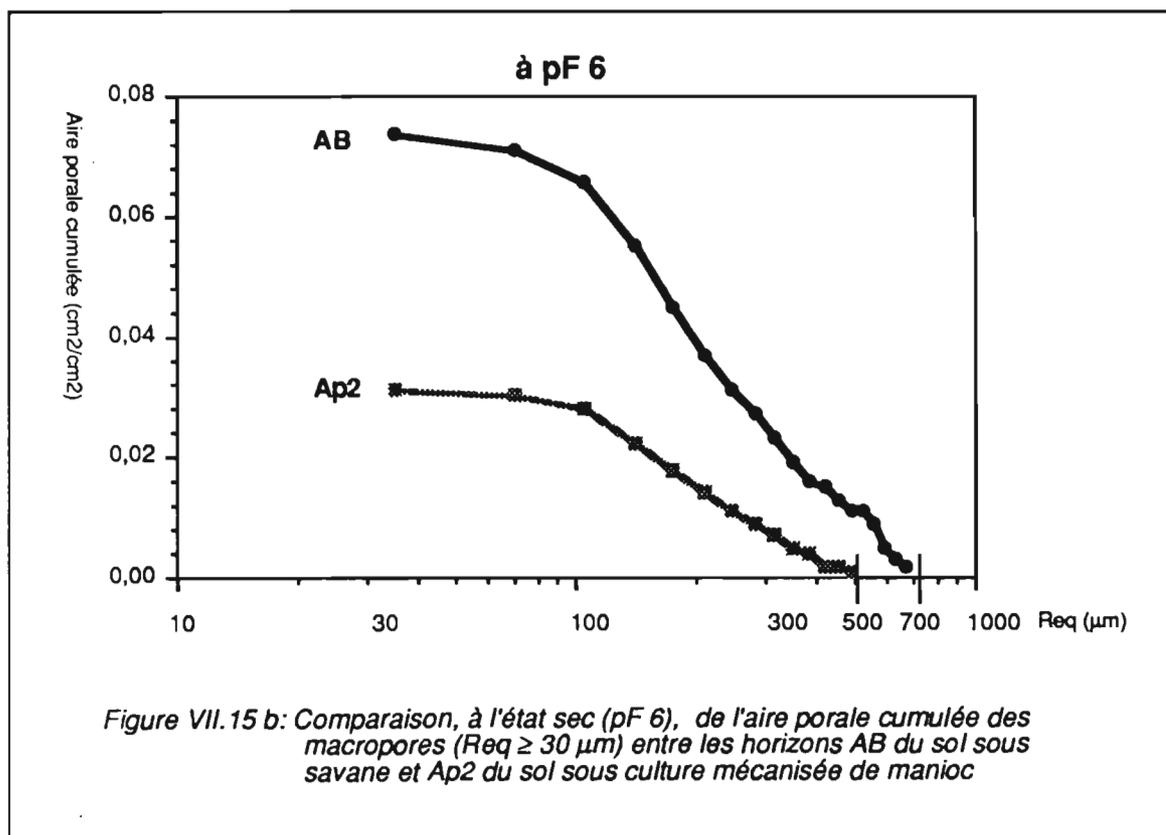
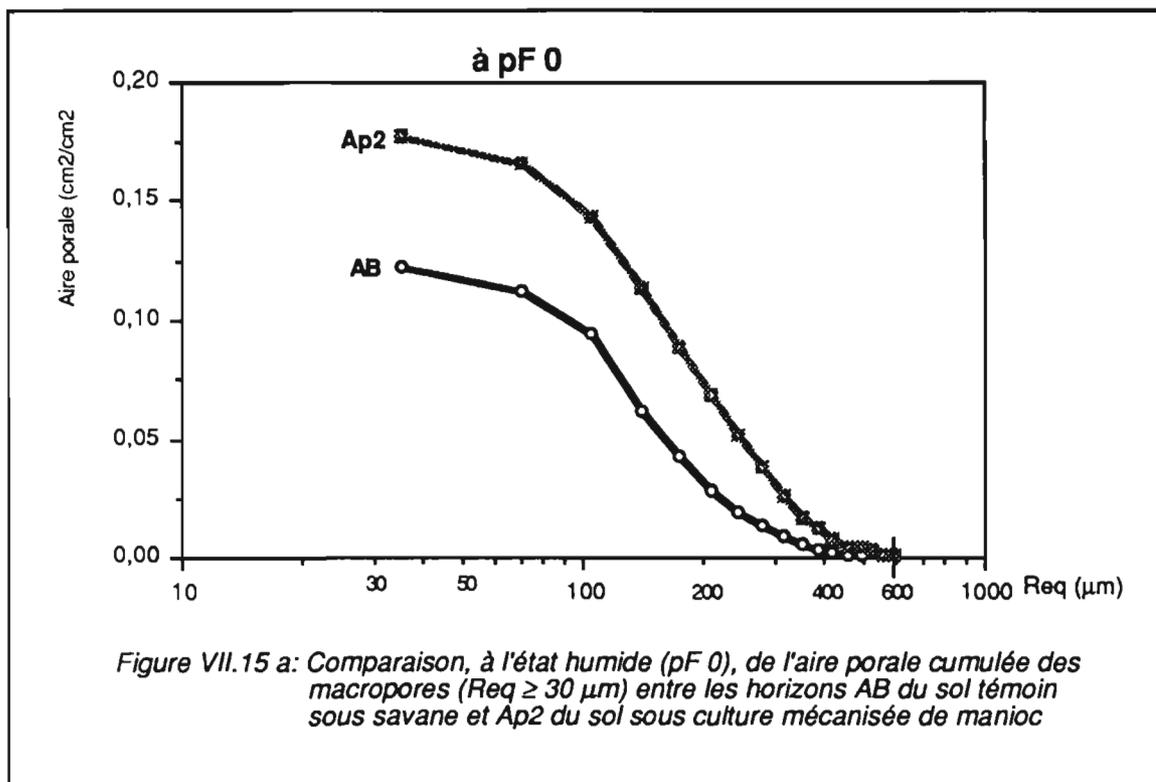
## 2). Discussion

Les résultats précédents indiquent que l'horizon Ap2 du sol cultivé présente un comportement analogue à l'horizon AB du sol sous savane. Comme pour ce dernier, le retrait se produit en deux étapes:

- fissuration abondante,
- prise en masse.

Mais le phénomène est encore accentué par rapport à l'horizon AB (Fig. VII.15 b).

Probablement, en raison de l'importante activité biologique consécutive à l'enfouissement des résidus des récoltes, en conditions humides (pF = 0), l'aire porale cumulée est plus élevée en Ap2 cultivé qu'en AB sous savane (Fig. VII.15a).



## D. CONCLUSION

Les différents résultats des observations microscopiques, des mesures physiques et morphologiques permettent d'aboutir à une synthèse de l'évolution du spectre poral et de l'organisation des sols au cours du dessèchement.

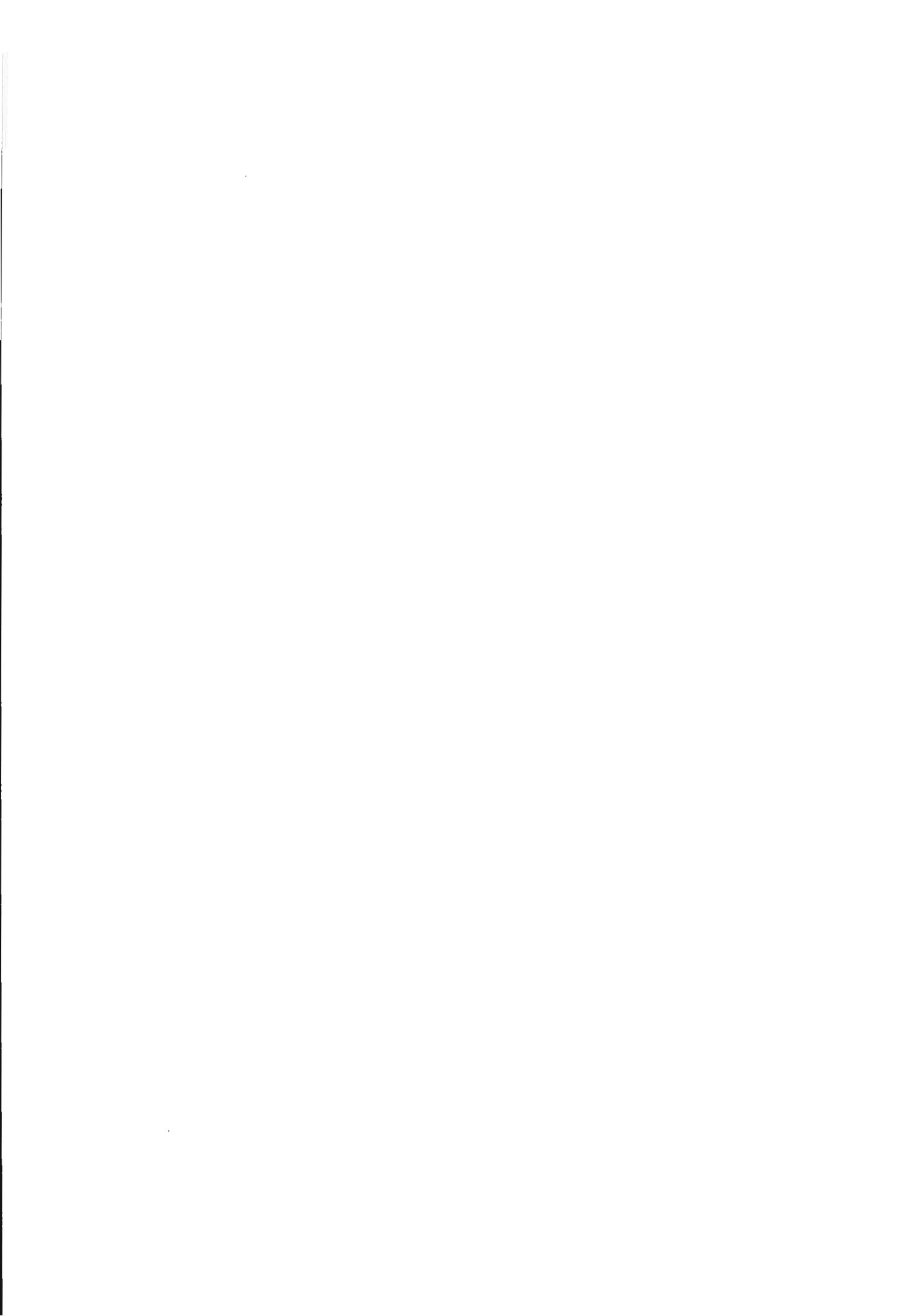
Les résultats d'analyse d'image permettent d'affirmer l'importance des pores de  $R_{eq} > 30 \mu\text{m}$ , dans l'évolution de la structure du sol. Ils montrent clairement, qu'au cours de la dessiccation, le retrait d'un sol argileux peut engendrer successivement des phénomènes de fissuration puis de prise en masse:

**FISSURATION non monotone ---> PRISE EN MASSE croissante**

La conséquence principale de ce qui précède est que, même les niveaux d'organisation du sol les plus macroscopiques (pores  $> 30 \mu\text{m}$  et structures correspondantes) ne sont pas stables au cours des cycles de dessiccation-humectation.

Un tel phénomène avait été observé dans les sols argileux à caractère vertique par HALLAIRE, (1985) mais il n'avait pas pu montrer le transfert de porosité entre les pores  $< 30 \mu\text{m}$  et les pores plus grossiers.

---



## CHAPITRE VIII

# ANALYSE DE L'ORGANISATION ET DE L'ESPACE PORAL DE L'ARGILE DU SOL

---

*Le dessèchement d'un sol argileux provoque, comme nous venons de voir, un retrait qui se manifeste à l'échelle macroscopique par l'apparition de fissures au sein de l'échantillon. TESSIER (1984), attribue ce phénomène à un réarrangement des cristallites de kaolinite et donc à une transformation de la géométrie de l'espace poral délimité par l'arrangement de particules argileuses et leurs niveaux d'organisation supérieurs.*

*Nous allons étudier, dans ce chapitre VIII, les conséquences du retrait sur la géométrie de l'espace poral intra-agrégats en relation avec la structuration macroscopique de cylindres décimétriques de sol.*

## **A. ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL**

Les observations morphologiques ont été faites à l'aide du microscope électronique à transmission à basse résolution (MET) et à moyenne résolution, équipé d'un système de microanalyse.

Nous présenterons les résultats obtenus d'abord sur le sol de savane et ensuite nous montrerons les modifications dues à la culture en mécanisé.

### **1. ASSEMBLAGE DE MICROAGREGATS ET ESPACE PORAL MICROSCOPIQUE INTER-MICROAGREGATS**

#### **a. RESULTATS**

Nous allons comparer les quatre situations suivantes: trois horizons de sol sous savane (A1 de surface, AB sub-superficiel et B2 profond) et un l'horizon de ce sol sous culture de manioc en mécanisé depuis 15 ans (Ap2).

#### **1). Différenciation de l'organisation microscopique de l'argile dans le profil du sol sous savane**

Les observations, faites au MEB équipé d'un dispositif de rétrodiffusion, montrent une différenciation nette de l'organisation de l'argile du sol à l'échelle microstructurale c'est-à-dire à celle de l'arrangement des microagrégats de l'argile:

- Dans l'horizon A1, nous observons, en sol humide, un grand nombre de pores assez arrondis et quelques accumulations humifères (photo a de la planche VIII.1). En sol sec, cet assemblage microstructuré est divisé par quelques fentes de retrait (photo a de la planche VIII.2).
- Dans l'horizon AB, nous observons, en sol humide, des micropores polyconcaves peu allongés, de rares micropores arrondis et de très rares microfissures, mais les limites entre les microagrégats ne sont pas observables (photo b de la planche VIII.1). Tandis qu'en sol sec, des microfentes de retrait viennent fragmenter cet assemblage continu de l'argile (photo b de la planche VIII.2).
- Dans l'horizon B2, nous visualisons, en sol humide, un plus grand nombre de micropores polyconcaves et de rares microfissures délimitant des microagrégats nettement visibles (photo c de la planche VIII.1). Cependant, en sol sec, les fissures sont peu nombreuses (photo c de la planche VIII.2).

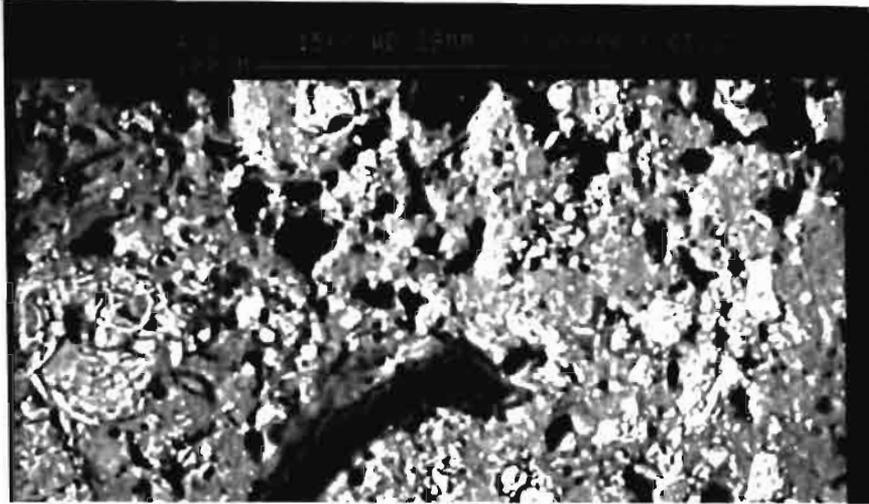


Planche VIII.1 a: Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon A1 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores cylindriques ( $R_{eq} = 3 - 6 \mu m$ )

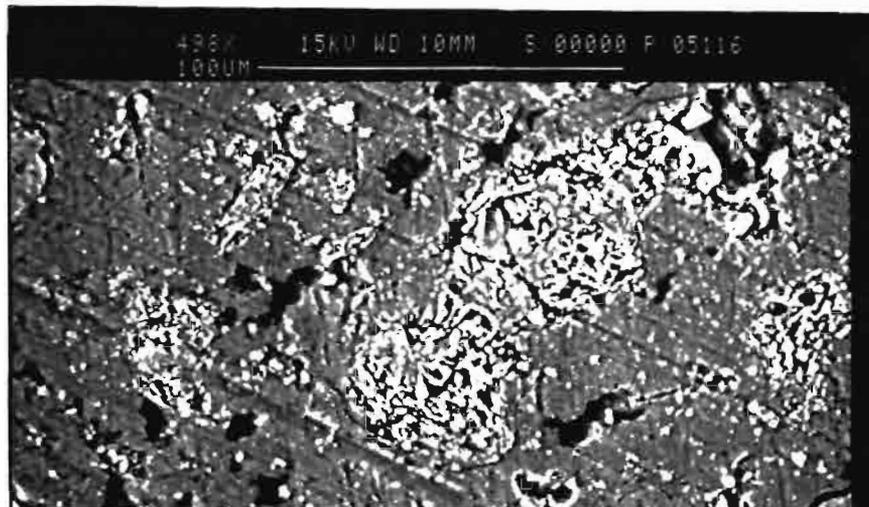


Planche VIII.1 b: Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon AB (observations MEB en rétrodiffusion): peu de pores résiduels polyconvexes ( $R_{eq} = 3 - 6 \mu m$ ) et rares fissures

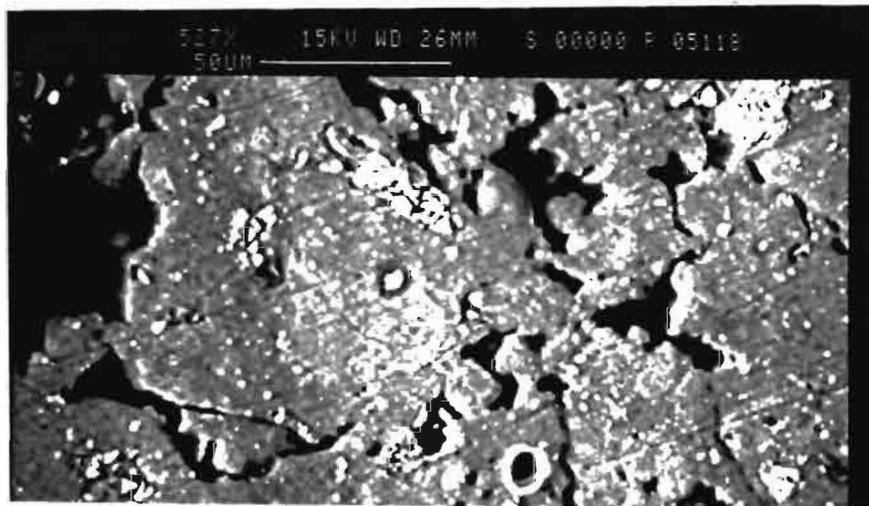


Planche VIII.1 c: Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon B2 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores résiduels polyconvexes ( $R_{eq} = 6 - 12 \mu m$ ) parfois anastomosés



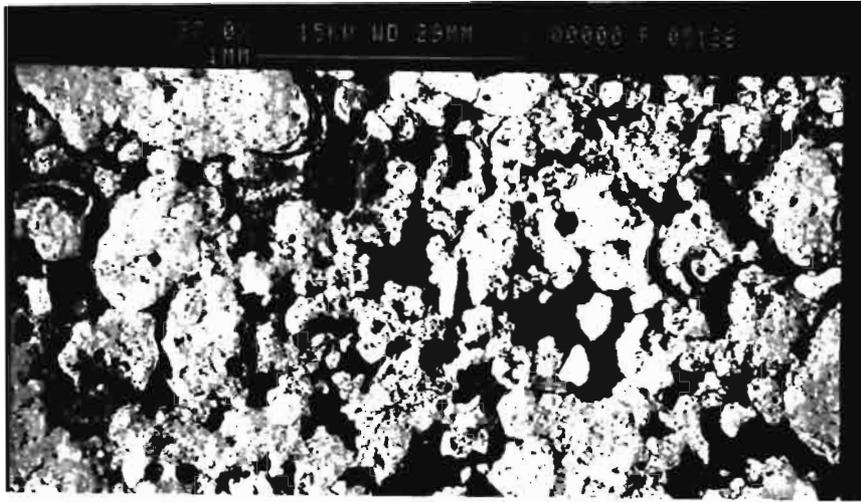


Planche VIII.2 a: Organisation de l'argile, à l'état sec, dans l'horizon A1 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores cylindriques (Req = 3 - 6  $\mu\text{m}$ )

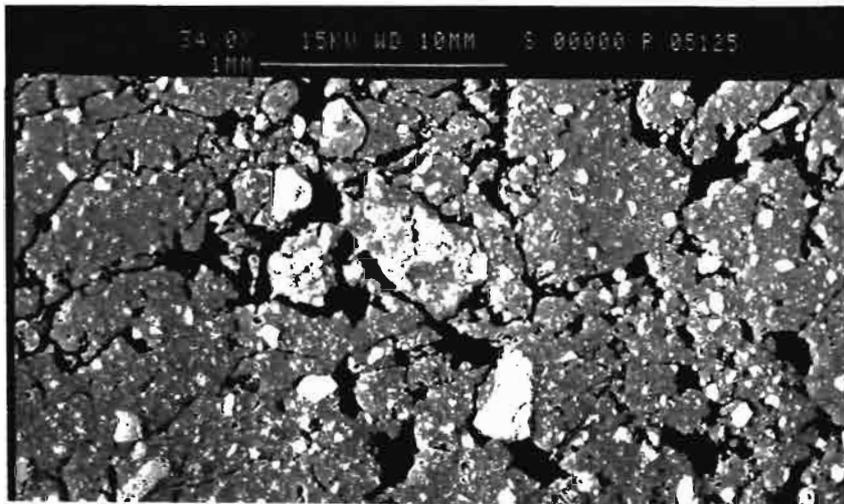


Planche VIII.2 b: Organisation de l'argile, à l'état sec, dans l'horizon AB (observations MEB en rétrodiffusion): peu de pores résiduels polyconvexes (Req = 3 - 6  $\mu\text{m}$ ) et rares fissures

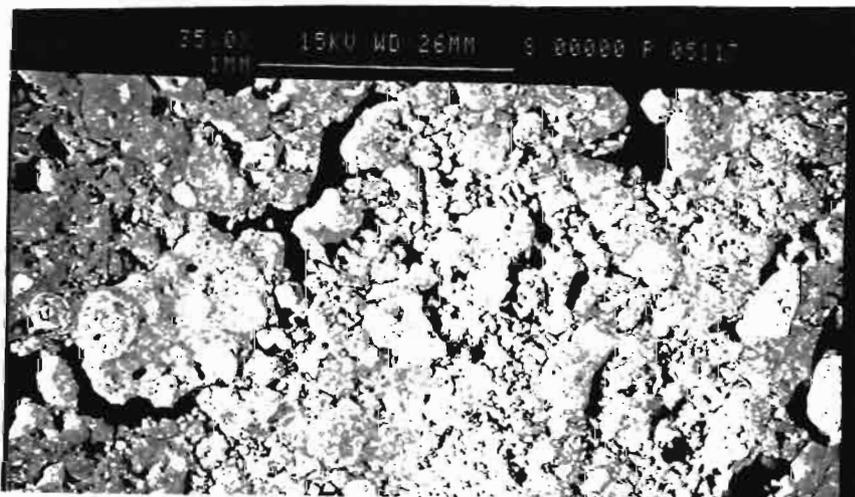


Planche VIII.2 c: Organisation de l'argile, à l'état sec, dans l'horizon B2 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores résiduels polyconvexes (Req = 6 - 12  $\mu\text{m}$ ) parfois anastomosés



## 2). Modifications de l'organisation microscopique de l'argile dans l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

Les résultats obtenus au MEB en rétrodiffusion montrent un changement très net des caractéristiques morphologiques de l'argile de l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc:

- en sol humide, nous observons, en Ap2, une structure continue au sein de laquelle des microagrégats ne sont plus visibles. Cependant, nous observons aussi quelques micropores plus ou moins allongés mais de forme assez régulière (photo a de la planche VIII.3).
- en sol sec, cet assemblage continu est divisé par de nombreuses microfissures (photo b de la planche VIII.3).

### b. DISCUSSION ET INTERPRETATION

Les modifications de l'argile de ce sol sont, à l'état humide et à cette échelle microstructurale (entre 1,5 et 30  $\mu\text{m}$ ), très nettes:

- Dans l'horizon B2, c'est-à-dire le matériau ferrallitique jaune et argileux, l'organisation de l'argile qui est nettement microagrégée se transforme, sous l'effet du pédoclimat, en un assemblage plus continu dans l'horizon AB.
- Dans l'horizon A1, l'activité biologique (racines, matière organique et macrofaune) fabrique une microstructure en agrégats plus ou moins arrondis, très poreuse.
- Dans le sol cultivé, où l'horizon biologique (A1) disparaît entièrement, les horizons Ap plus ou moins compacts, la microstructure est continue, avec quelques rares micropores probablement d'origine biologique.

*En sol sec, tous ces horizons sont plus ou moins microdivisés par de microfentes de retrait et particulièrement les horizons Ap compacts.*

## 2. ARRANGEMENT DES CRISTALLITES ET ESPACE PORAL NANOMETRIQUE OU INTER-CRISTALLITES

### a. RESULTATS

Nous allons comparer les trois situations suivantes: horizons de savane (B2 profond et AB sub-superficiel) à l'horizon sous manioc cultivé en mécanisation, depuis 15 ans (Ap2).



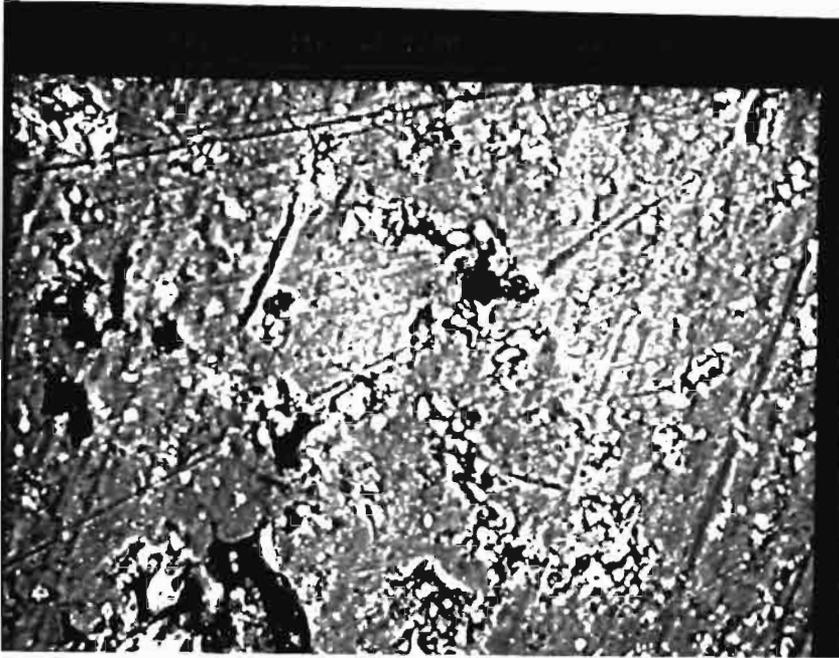


Planche VIII.3 a: Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon Ap2 du sol sous culture de manioc (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores ( $R_{eq} = 3 - 6 \mu\text{m}$ ) et rares fissures

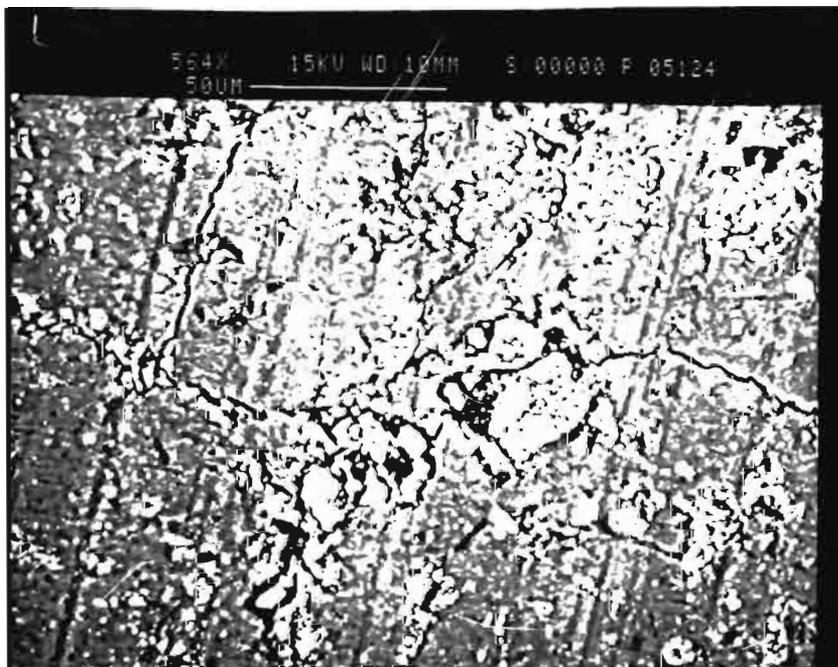


Planche VIII.3 b: Organisation de l'argile, à l'état sec, dans l'horizon Ap2 du sol sous culture de manioc (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores ( $R_{eq} = 3 - 6 \mu\text{m}$ ) et rares fissures



### **1). Différenciation de l'organisation microscopique de l'argile dans le profil du sol sous savane**

Les résultats des observations faites au MET à moyenne résolution (échelle microstructurale) montrent que (planches VIII. 4 et 5) la kaolinite de la Vallée du Niari est très fine, avec des cristallites dont le diamètre est d'environ 0,1 d'épaisseur et 2  $\mu\text{m}$  de largeur. A basse résolution (échelle ultrastructurale), nous observons que l'organisation (planche VIII.6) du sol sous savane se modifie de bas en haut du profil:

- dans l'horizon B2, les cristallites sont organisés en microagrégats ( $\varnothing = 20$  à 30  $\mu\text{m}$  en moyenne); il en résulte une porosité intercristallite de 4 nm environ et une porosité d'assemblage de microagrégats de cristallites nette et grossière ( $\varnothing = 2$  à 5  $\mu\text{m}$  environ). Nous observons aussi que l'arrangement des cristallites y est nettement face à face;
- dans l'horizon AB, par contre, l'arrangement des cristallites est moins compact et nous observons une dispersion partielle (en bandes) des cristallites.

### **2). Modifications de l'organisation microscopique de l'argile dans l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc**

Les résultats obtenus au MET (x 4900) montrent un changement très net des caractéristiques morphologiques de l'argile du sol cultivé: l'assemblage de cristallites forme une structure continue au sein de laquelle des microagrégats ne sont plus visibles. A plus fort grandissement, la distance entre les cristallites devient beaucoup plus grande (planche VIII.4).

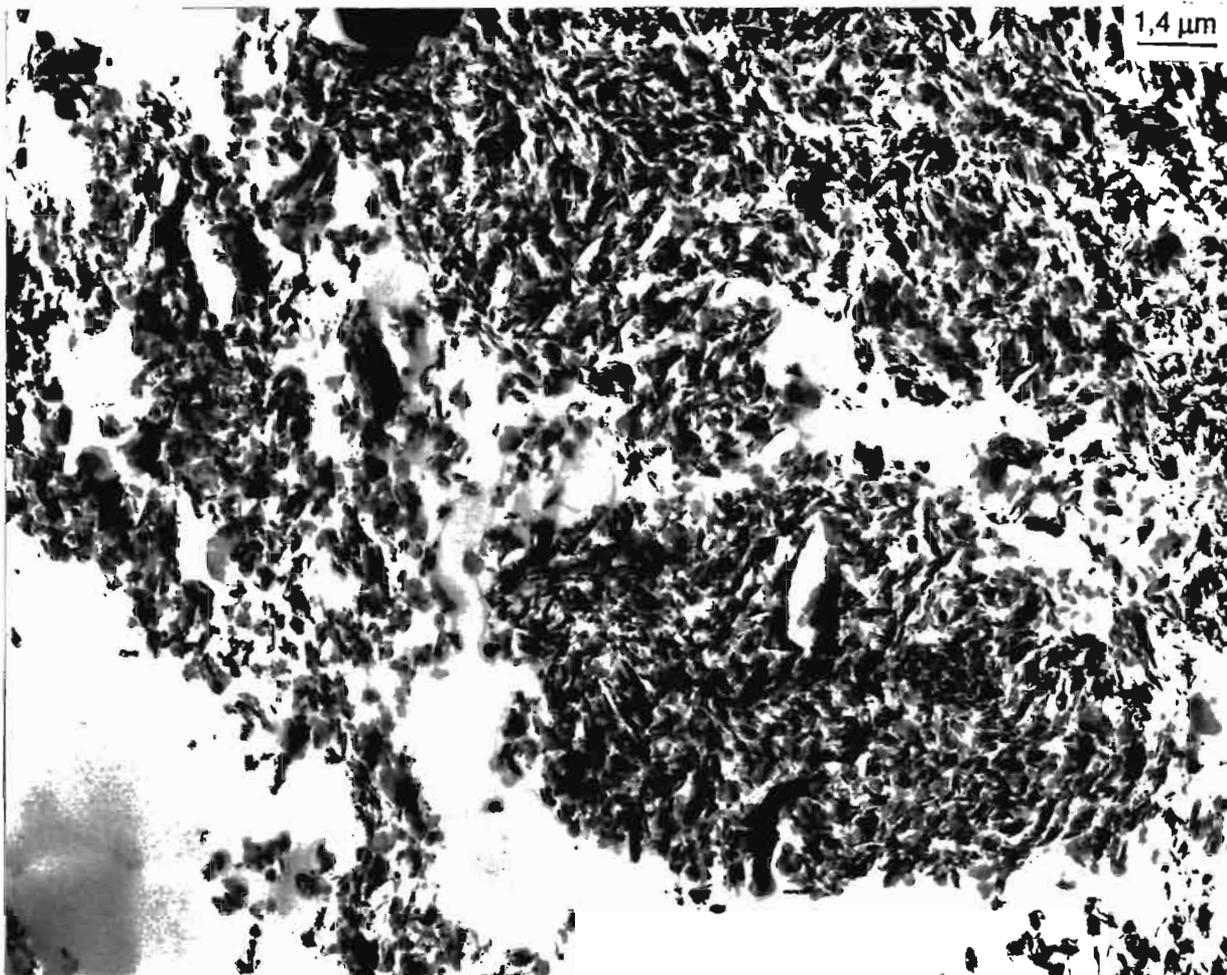
#### **b. DISCUSSION**

Les observations au MET, à basse et haute résolution, nous ont donc permis de suivre l'évolution de l'organisation des argiles à différentes échelles dans le profil du sol de savane et son évolution en sol cultivé avec mécanisation.

Sous savane, on passe d'une structure microagrégée avec des cristallites en assemblage compact en profondeur (horizon B2) à une structure continue et beaucoup plus lâche dans l'horizon AB. Cette structure est plus ou moins nette suivant l'échantillon étudié, mais elle affecte une bonne partie de l'horizon AB.

Une tendance analogue, mais encore accentuée apparaît dans l'horizon Ap sous culture de manioc car, non seulement la structure est continue, mais aussi extrêmement lâche en moyenne.





B2

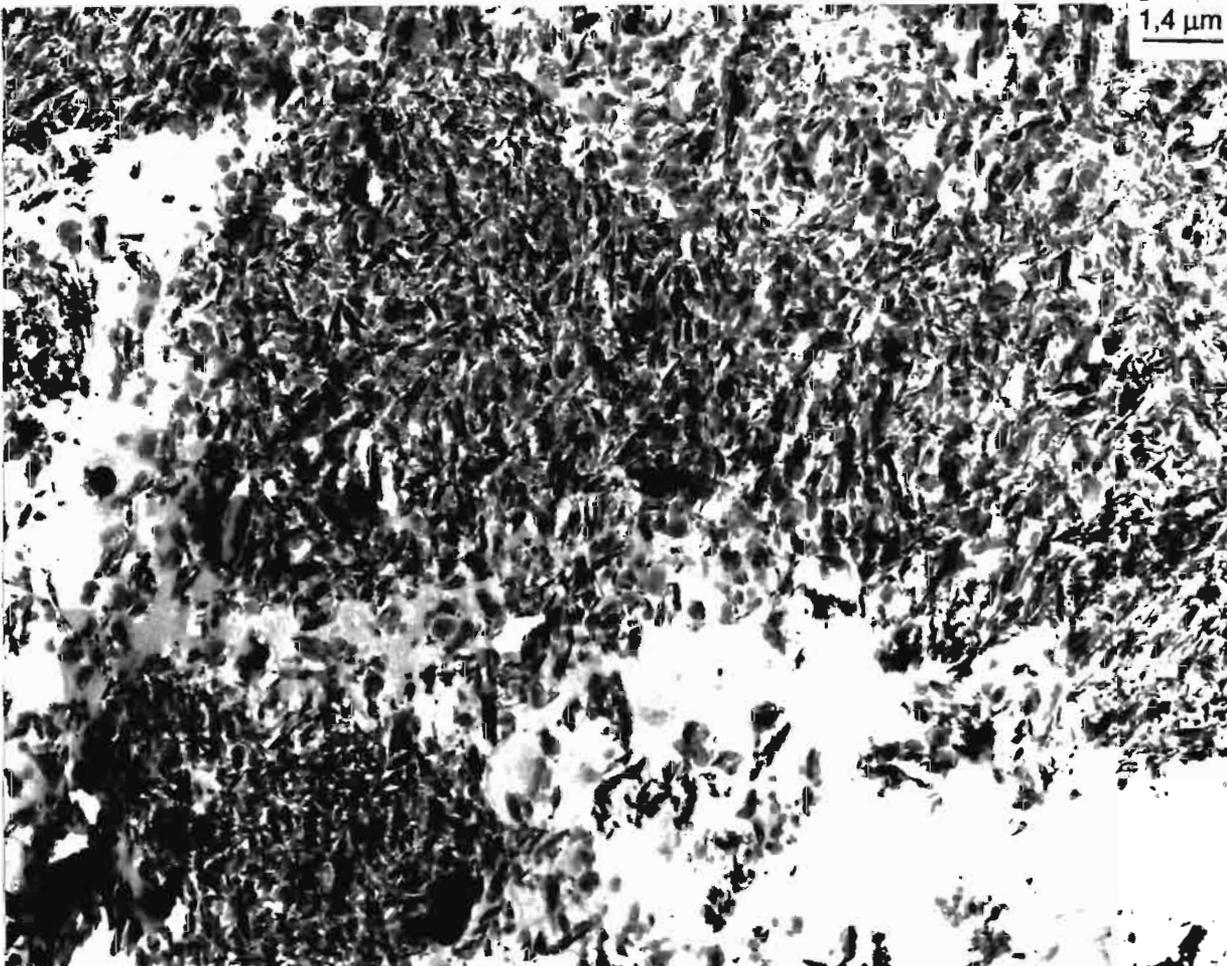
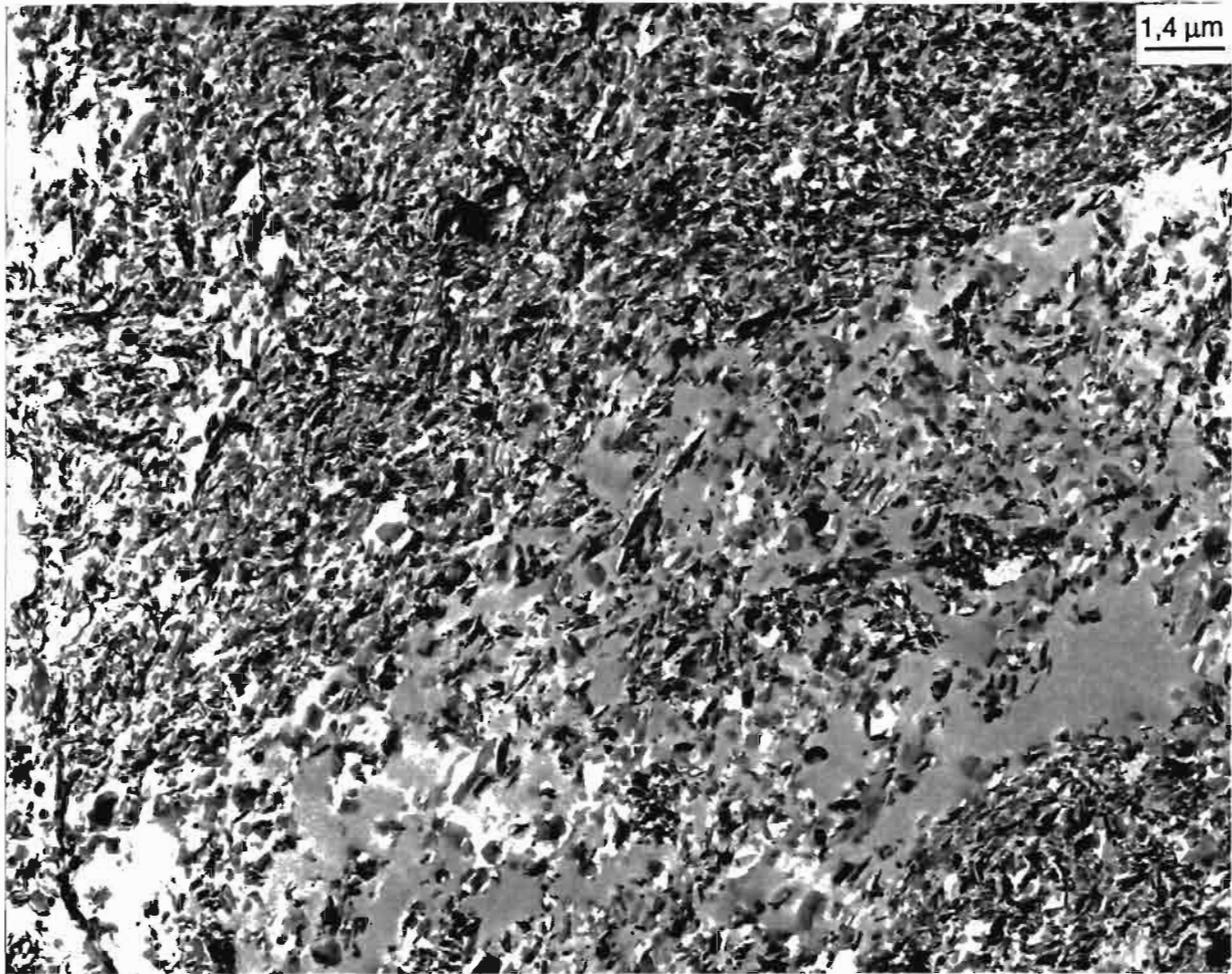
AB  
a

Planche VIII.4 a: Organisation de l'argile: assemblage des cristallites dispersés dans l'horizon AB et dans l'horizon Ap2 (observations MET x 18750)





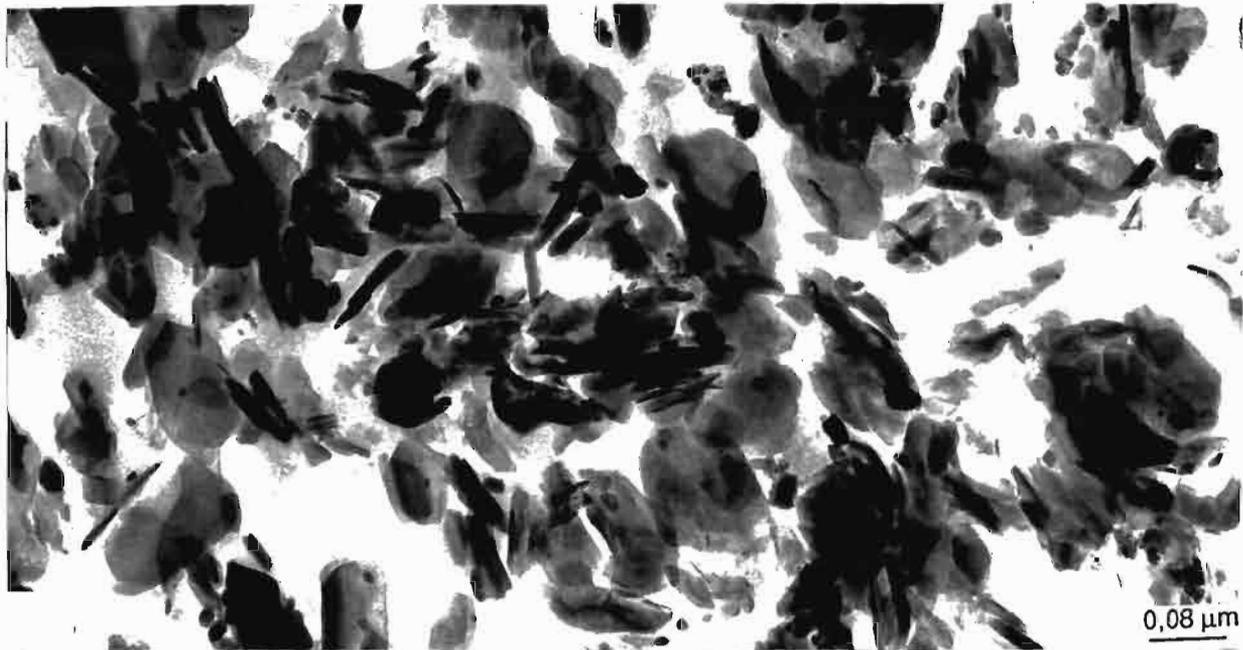
AB  
b



Ap

Planche VIII.4 b: Organisation de l'argile: assemblage des cristallites dispersés dans l'horizon AB et dans l'horizon Ap2 (observations MET x 18750)

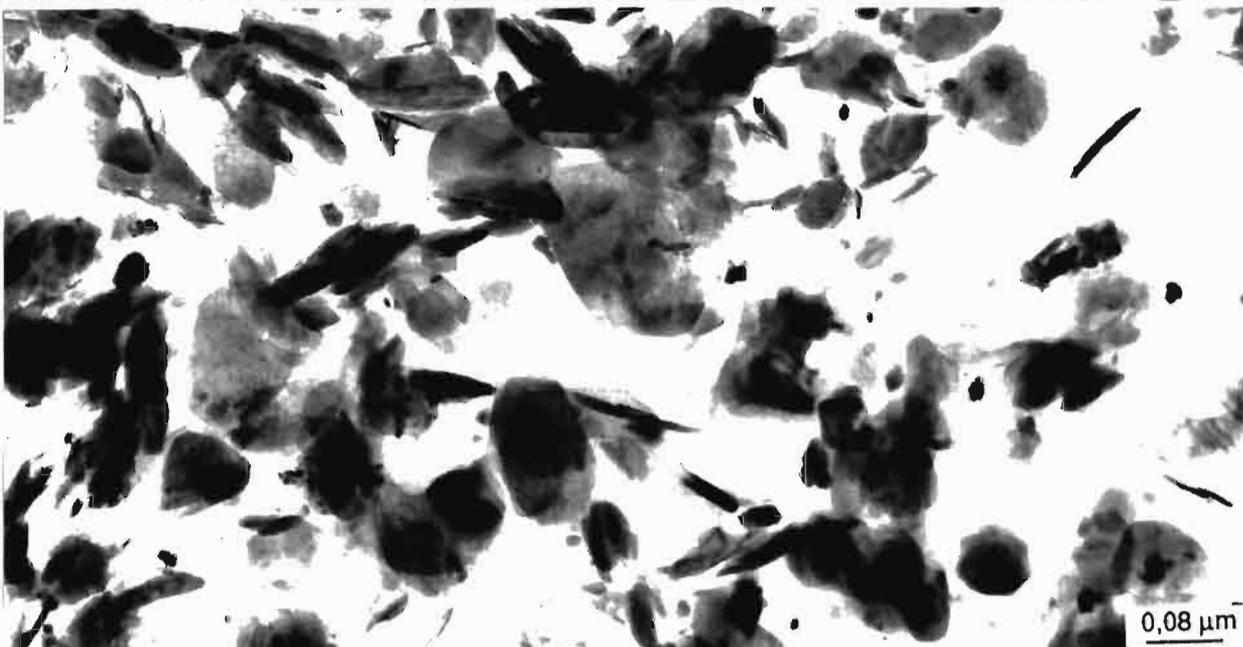




B2



AB



Ap

Planche VIII.4 c: Organisation de l'argile: assemblage des cristallites agrégés en microagrégats dans l'horizon B2 et dans l'horizon AB, ainsi que celui des cristallites dispersés dans l'horizon Ap (observations MET x 127500)



## B. ESPACE PORAL DE L'ARGILE DU SOL: COURBES D'INTRUSION DE MERCURE DANS DES AGREGATS CENTIMETRIQUES

### 1. SPECTRE DE PORES DE $R_{eq}$ COMPRIS ENTRE 4 nm ET 100 $\mu\text{m}$ DU SOL SOUS SAVANE

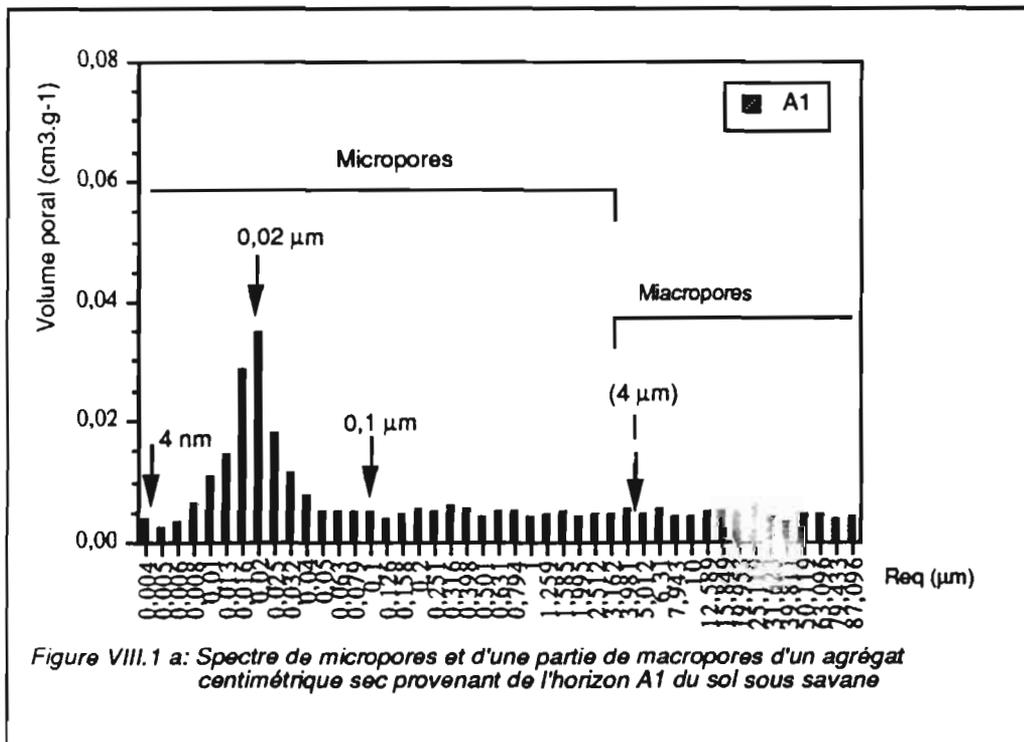
#### a. RESULTATS

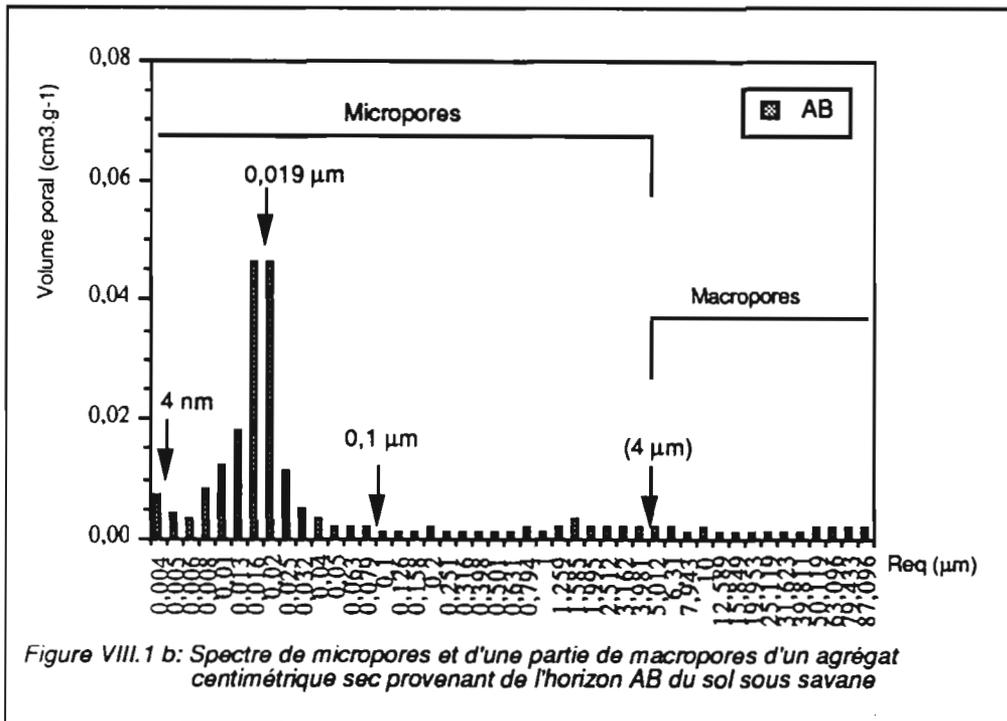
Les résultats sont donnés sous forme d'histogrammes (figures VIII.1 a et b).

Les figures VIII.1 et 2 montrent que le spectre poral des agrégats centimétriques secs de sol, provenant des horizons A1, AB et B2 du sol sous savane, est d'allure pratiquement unimodale et présente un pied de bande, plus net en A1, du côté des grands pores.

Deux classes de pores peuvent être distinguées en fonction du rayon équivalent ( $R_{eq}$ ):

- une première classe des pores nanométriques plus regroupés, qui ont un  $R_{eq}$  compris entre 0,4 nm et 0,05  $\mu\text{m}$  et dont le mode se situe entre 0,016 et 0,02  $\mu\text{m}$ ;
- une deuxième classe, beaucoup plus étalée, de pores micrométriques, qui ont un  $R_{eq} > 0,05 \mu\text{m}$ .





On peut cependant observer une variation du spectre poral en fonction de la profondeur (figure VIII.2):

- le volume des petits pores de taille nanométrique augmente avec la profondeur de 0,035 à 0,065  $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ . Cependant la taille modale de ces petits pores reste stable à 0,016-0,02  $\mu\text{m}$ ;
- le volume des grands pores diminue sensiblement entre 0 et 35 cm puis il reste stable entre AB et B2.

## b. DISCUSSION

En sol sec, le spectre poral entre 4 nm et 100  $\mu\text{m}$ , qui est très peu différent entre les horizons AB et B2, présente, en A1, une nette diminution des plus petits pores au profit des pores moyens ( $R_{\text{eq}}$  compris entre 4 nm et 100  $\mu\text{m}$ )

On peut distinguer donc dans l'organisation d'agrégats millimétriques deux classes porales:

- la première classe de micropores, qui résulte probablement de l'arrangement de cristallites de kaolinite, possède, dans les horizons A1, AB et B2, un  $R_{\text{eq}}$  compris entre 4 nm et 0,05  $\mu\text{m}$ , avec un mode situé entre 0,016 et 0,02  $\mu\text{m}$ ;
- la seconde classe de micropores, qui est plus abondant en A1, regroupe les vides d'assemblage de microagrégats de cristallites, les vides de forme sphérique ou allongée, probablement d'origine biologique (galeries, chenaux,

nids), et les fissures de retrait. Leur taille varie entre 0,05 et 100  $\mu\text{m}$ .

## 2. MODIFICATIONS DU SPECTRE PORAL DE $R_{eq}$ COMPRIS ENTRE 4 nm ET 100 $\mu\text{m}$ DU SOL SOUS CULTURE DE MANIOC

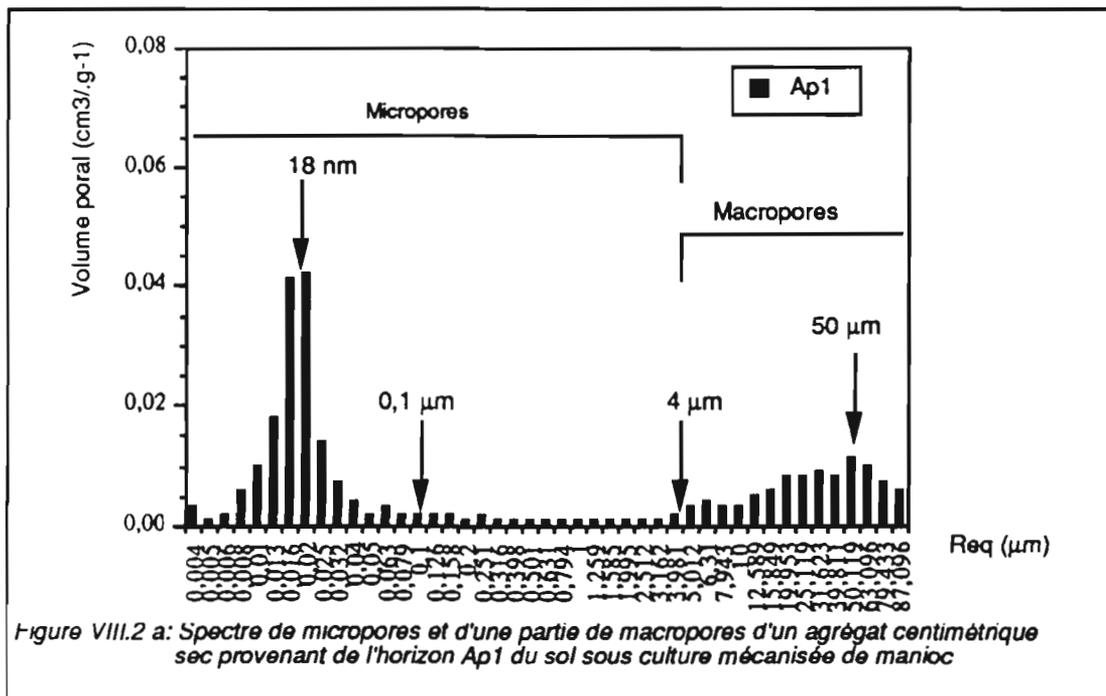
### a. RESULTATS

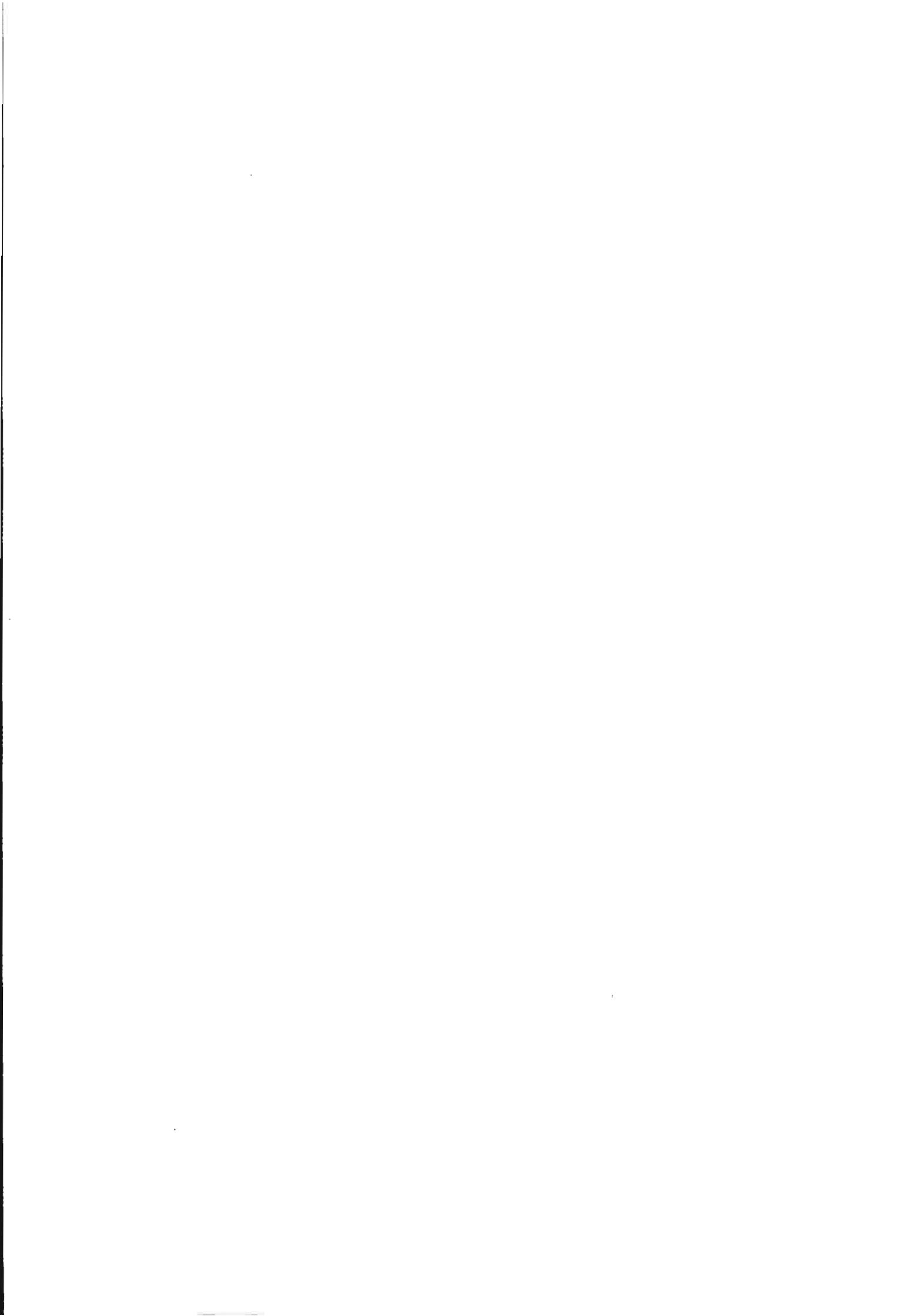
Les figures VIII 3 et 4 montrent, dans les horizons cultivés une légère diminution du volume de micropores ( $0,05 < R_{eq} < 4 \mu\text{m}$ ) de l'horizon Ap1 à l'horizon Ap2.

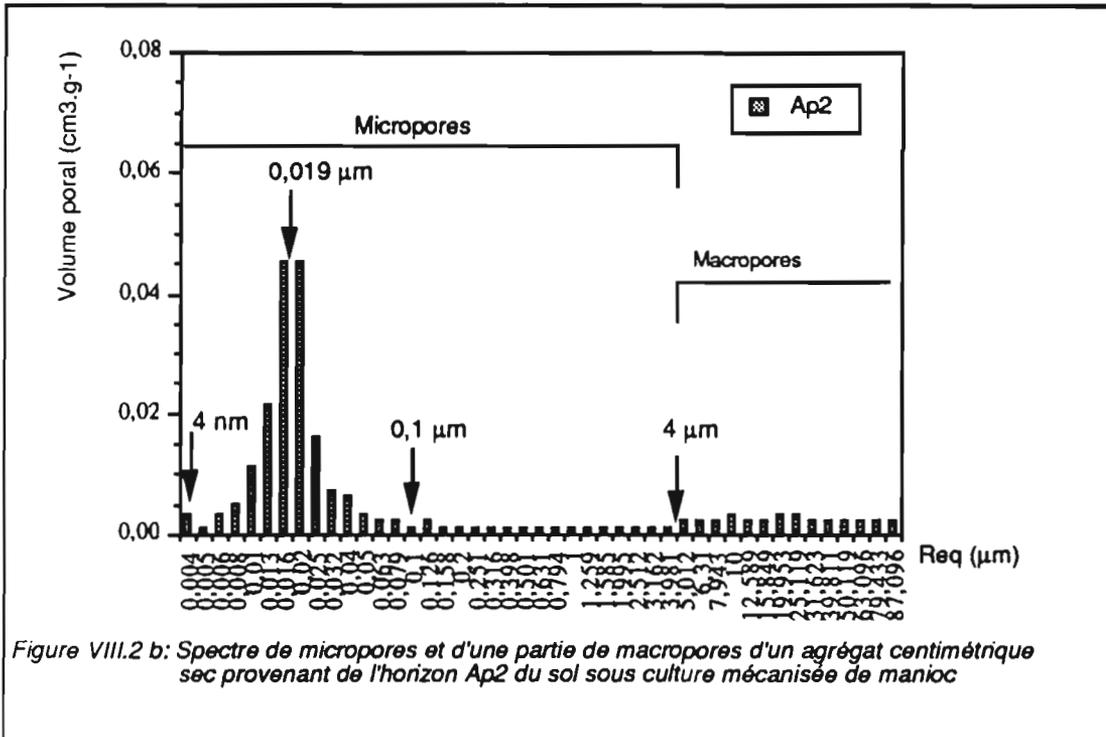
Il faut noter l'apparition, dans le sol cultivé, d'un second mode (plus important dans l'horizon Ap1 qu'en Ap2 au niveau des grands pores ( $R_{eq} > 4 \mu\text{m}$ ).

On peut distinguer dans le sol cultivé trois classes de pores en fonction de leur taille:

- une première classe de pores de taille nanométrique, avec un  $R_{eq}$  compris entre 4 et 50 nm et dont le mode est situé à 20 nm;
- un deuxième classe porale très étalée, qui est composée de quelques pores dont la valeur du  $R_{eq}$  est compris entre 50 nm et 4  $\mu\text{m}$ ;
- et une troisième classe des pores dont la taille mesurée, par intrusion de mercure, varie de 4  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ .







## b. DISCUSSION

Par rapport à l'horizon A1, sous savane, les horizons perturbés montrent une diminution nette du volume des pores interparticulaires de  $0,1 \text{ cm}^3\text{-g}^{-1}$  environ et, en compensation de l'apparition d'un second mode bien défini, une diminution des micropores de taille comprise entre  $0,05$  et  $4 \mu\text{m}$ .

Cependant, en comparaison à l'horizon AB du sol de savane, l'horizon cultivé Ap1 ne présente qu'une très faible diminution du volume des petits pores (avec  $0,2 \text{ cm}^3\text{-g}^{-1}$ ), et l'horizon Ap2 ne présente aucune diminution de ce volume poral, malgré l'apparition d'un second mode.

D'après la figure VII.4, la limite entre les tailles équivalentes des pores intercrystallites peut être considéré égale à  $0,05 \mu\text{m}$ .

Dans les horizons perturbés depuis 15 ans environ, une troisième classe (plus importante en Ap1 qu'en Ap2), apparaît au niveau des macropores ( $R_{eq} > 4 \mu\text{m}$ ) (figures VIII.2a et b). Sur des agrégats de taille centimétrique, la classe de macropores n'a été donc mesurée que partiellement.

### C. CONCLUSION

Exception faite de l'horizon biologique très particulier de surface (A1) qui n'a pas été analysé ici, nous constatons donc une évolution de l'assemblage des cristallites qui devient de moins en moins compact, dans l'ordre suivant:

**B2** —————> **AB** —————> **Ap**

avec une structure de plus en plus continue, en raison de la dispersion des cristallites.

***L'organisation microscopique de l'argile, très différente dans les trois horizons étudiés (Ap, AB et B2) joue probablement un rôle important dans leur comportement physique en fonction de l'état hydrique.***

Du fait que les agrégats étudiés proviennent de matériau kaolinitique déformable et se rétractent au cours de la dessiccation préalable à la mesure, la diminution du volume massique des vides de ces agglomérats, a été déduite du retrait apparent des cylindres de sol. La diminution du volume des pores intraagrégats est donc, de 0,2 à 0,4 cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>, dans les sols sous savane et de 0,3 à 0,5 cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>, dans les horizons culturaux sous manioc.

*En définitive, en sol sec les caractéristiques porales des différents horizons étudiés sont très proches et l'influence de la mécanisation en condition humide se traduit par une réduction des pores inter-agrégats.*

---

## CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

De tout ce qui précède, nous pouvons conclure en quatre points, qui nous apparaissent comme fondamentaux:

- contrairement à la pratique en physique de sol, **seule l'étude en sol humide donc sans dessiccation préalable des échantillons de sol non perturbés, permet d'analyser correctement les modifications de l'organisation d'un sol argileux et de l'espace poral qui en résulte;**
- la dynamique latérale, en dessiccation et/ou en humectation, des principaux constituants du sol permet d'approfondir cette analyse et de mieux comprendre les mécanismes des propriétés physiques macroscopiques et particulièrement ceux du retrait du sol:
- la fissuration non monotone;
- et la reprise en masse croissante.

Dans la quatrième partie, nous allons pouvoir, en comparant les données obtenues par les différentes méthodes, faire la synthèse de tous les résultats, afin d'aboutir à quelques propositions pratiques contribuant à la mise en valeur de ce sol ferrallitique jaune, acide et argileux des plateaux de la Vallée du Niari.

---



## **QUATRIEME PARTIE**

### **SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS**



## INTRODUCTION DE LA QUATRIEME PARTIE

Nous nous étions proposés dans ce mémoire, d'étudier l'organisation et le comportement physique d'un sol ferrallitique argileux, développé au départ sur une savane, dans la Vallée du Niari (Congo). Nous avons été amené d'abord à décrire le cadre écologique puis à étudier le sol en fonction de la mise en culture. Afin d'en préciser l'évolution des sols, nous avons caractérisé les constituants et étudié les propriétés du sol, tant du point de vue chimique que physique.

L'originalité de notre travail a été surtout de décrire conjointement l'organisation, l'espace poral et le comportement à différentes échelles du sol en utilisant des techniques d'observation et de mesures macroscopiques et microscopiques.

Dans cette quatrième partie, nous nous proposons de réaliser une synthèse des résultats obtenus. Il s'agira en fait d'établir un lien entre les comportements macroscopiques et les facteurs qui sont susceptibles d'intervenir sur les propriétés à différents niveaux de l'organisation du sol, en montrant leurs conséquences en fonction des contraintes climatiques et/ou anthropiques.

A cet effet, les aspects suivants seront envisagés successivement:

- Intérêt d'une approche dynamique pour l'étude physique du sol c'est-à-dire une approche prenant en compte différentes échelles de l'organisation. Il s'agit ici particulièrement de l'espace poral des sols, ainsi que le contrôle des états énergétiques de l'eau.
  - Mécanismes d'évolution des propriétés physiques du sol;
  - Conséquences agronomiques de l'évolution du sol.
-



## CHAPITRE IX

### INTERET D'UNE D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE POUR L'ETUDE DE LA STRUCTURE DES SOLS

---

*Notre travail a nécessité la mise en oeuvre d'une approche pour l'étude, à différentes échelles, de l'organisation du sol en fonction des états énergétiques de l'eau, compte tenu des caractéristiques et des propriétés des sols déformables en conditions non saturées.*

## INTRODUCTION

Il est bien connu que le mode d'assemblage des constituants, à différents niveaux d'organisation, régit le comportement physique des sols. Cet assemblage est synthétisé par la structure, concept essentiel pour la caractérisation physique des sols et la connaissance de leur comportement, de leur évolution ou de leur génèse.

Rappelons que les sols ferrallitiques argileux de la Vallée du Niari au Congo se sont développés en climat tropical humide (4° de latitude Sud). Nous avons d'abord remarqué que même sous ce type de climat, les cycles saisonniers de dessiccation-réhumectation entraînent des phénomènes de retrait-gonflement qui ont des conséquences importantes sur les propriétés physiques.

Par ailleurs, dès lors que la culture est mécanisée, les propriétés physiques du sol, en particulier des horizons humifères, sont profondément modifiées.

### A. CADRE METHODOLOGIQUE GENERAL

Pour caractériser ce milieu, notre approche a consisté à aller du plus macroscopique au plus microscopique, c'est à dire du terrain, à l'échelle de la parcelle expérimentale, jusqu'au laboratoire, en allant des échelles décimétrique à nanométrique. Nous avons considéré les aspects physiques, morphologiques, minéralogiques et chimiques.

A partir des **descriptions macroscopiques** de profils de sol, nous avons raisonné le prélèvement des échantillons. Cette approche a permis d'effectuer le transfert d'échelles entre les données de terrain et celles obtenues en laboratoire.

Nous avons étudié, en fonction de l'état hydrique (humidité et/ou état énergétique de l'eau), l'organisation des matériaux de sol et mesuré l'espace poral associé pour analyser le comportement physique du sol.

Sur des échantillons non remaniés, **l'analyse physique quantitative a été** basée sur l'étude des courbes de retrait obtenues de façon continue par rétractométrie (BRAUDEAU, 1988, 1989), sur des mesures de rétention d'eau et sur les courbes d'intrusion de mercure. Les courbes de retrait ont permis de suivre le changement de l'espace poral du sol en fonction de l'état hydrique, au cours d'un chemin entier de déformation du sol.

**L'examen des** lames minces de blocs de sol a été couplée à une analyse morpho-mathématique reposant sur l'analyse d'images. Des observations en microscopie optique et électronique (MET et MEB) ont été faites.

*On peut donc dire, au total, que notre démarche repose sur une caractérisation d'échantillons intacts, à différents potentiels de l'eau et à différentes échelles, ce qui permet d'envisager le sol dans ses aspects dynamiques.*

## **1. DISCUSSION SUR LES NIVEAUX D'ORGANISATION DU SOL ET LEUR ROLE SUR LE COMPORTEMENT**

### **a. CARACTERE EVOLUTIF DE L'ORGANISATION DU SOL**

Il ressort de notre travail que les différents niveaux d'organisation du sol pris en compte sont susceptibles d'évoluer. Citons comme exemple d'organisation le profil, l'élément structural, ou encore l'assemblage des particules argileuses.

Seule la particule argileuse elle-même apparaît l'organisation stable du système sol. Pour tous les autres niveaux d'organisation, y compris l'arrangement des cristallites, l'assemblage est susceptible de changer.

La question qui se pose à ce niveau est de savoir si l'existence de caractères permanents a un sens dans ce type de sol. Autrement dit, y a-t-il des volumes représentatifs, dans un état du sol donné, caractéristiques de chaque sol, avant et après mise en culture?

Sous savane, ces sols argileux présentent une organisation de type micropédique. Cela ne veut pourtant pas dire qu'ils sont rigides puisque les plus fortes variations de volume y sont observées. Des fissures jusqu'à 50 cm environ apparaissent d'ailleurs en saison sèche.

Bien que relativement continue à l'état humide, la structure microagrégée est très nette à l'état sec.

La mise en culture, provoque une modification considérable du milieu. La structure microagrégée décrite auparavant disparaît au profit d'une structure continue à l'état humide et polyédrique grossière à l'état sec. Des fissures fines et nombreuses peuvent être visibles à l'oeil.

### **b. ROLE DES FORCES D'HYDRATATION**

Nos observations en microscopie optique montrent que l'évolution du système fissural au cours du retrait, n'est pas aussi simple que le laissent penser les observations à l'oeil, ni les mesures de retrait. La fissuration et la prise en masse se produisent essentiellement dans des domaines de potentiel de l'eau tout à fait particuliers. Trois domaines peuvent être identifiés:

- Pour les potentiels de l'eau  $> -200$  mbars, les forces capillaires n'apparaissent pas susceptibles de réorganiser le matériau. L'extraction d'eau se fait sans changement de volume. Cela correspond aux plus grands pores du sol ( $> 10 \mu\text{m}$ ).

- Vers  $-200$  mbars ( $-20$  kPa), les forces capillaires peuvent réorganiser le matériau. La réorganisation, dont la conséquence macroscopique est le retrait, se produit lorsque des pores  $<10 \mu\text{m}$  environ sont, selon la loi de Laplace, présents. Ces pores sont de toute évidence beaucoup plus grands que ceux délimités par les particules argileuses elles-mêmes. On peut donc en conclure que ce sont probablement des pores résultant de l'assemblage d'agrégats de particules qui sont alors impliqués dans le retrait.

- A partir d'une valeur du potentiel de l'eau de environ  $-1$  bar ( $-100$  kPa,  $pF = 3$ ), la dessiccation entraîne une prise en masse. Seul l'examen des lames minces rend possible l'observation de ce mécanisme. D'après nos mesures, la prise en masse implique la présence de ménisques dont le rayon de courbure avoisine  $1 \mu\text{m}$ . La traction exercée sur les parois des pores serait alors suffisante pour que de proche en proche des fissures, présentes initialement, se referment. Il est aussi évident que l'assemblage des particules argileuses est alors concerné. La porosimétrie à mercure montre d'ailleurs que les pores entre  $0,1$  et  $4 \mu\text{m}$  ont totalement disparus après complète dessiccation.

Au total, il apparaît qu'il existe un domaine particulier de potentiel de l'eau où les forces capillaires provoquent la fissuration. Mais il existe aussi un domaine de potentiel où des réorganisations internes aux matériaux provoquent le regroupement d'organisations initiales, probablement celles résultants de la fissuration précédente. Ces deux mécanismes ne semblent pas correspondre ici aux mêmes domaines de potentiel de l'eau.

Pour relier les caractéristiques de l'espace poral à des propriétés physiques d'un sol, quelque soit le paquet de méthodes utilisées pour quantifier l'espace poral, certains auteurs postulent l'existence d'un **volume élémentaire représentatif (VER)** des propriétés de la porosité considérée.

### **c. DISCUSSION SUR L'EXISTENCE D'UN VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF (VER)**

On doit à HENIN (1938) la définition de l'agrégat en tant qu'unité élémentaire représentative du sol. A cette notion était déjà associée une taille de l'échantillon puisqu'on considère généralement que l'agrégat de sol présente une taille millimétrique à

centimétrique. D'un autre côté, un volume élémentaire représentatif du sol a été défini par BAVEYE et SPOSITO (1984).

***Le VER est défini comme un volume minimum, assez grand pour permettre des prises de moyennes locales et être ainsi représentatif de la propriété étudiée.*** Pour les auteurs précédents, c'est également le volume minimal à partir duquel les propriétés, à cette échelle, peuvent être considérées comme représentatives du sol.

Le concept de VER est étroitement lié au concept de plus ou moins grande continuité du milieu et il n'est naturellement pas le même suivant le type de sol. De nombreux travaux ont tenté d'établir une relation des comportements macroscopiques et des variables à l'échelle microscopique, en vue de la modélisation du comportement du sol (ANGULO, 1989). La taille du VER peut varier de quelques millimètres à quelques décimètres, selon la taille des particules solides et la structure du sol.

De notre travail il ressort qu'une entité telle qu'un agrégat de taille millimétrique ne peut être considéré comme une entité permanente du sol. En effet, même à cette échelle, l'organisation interne de l'élément structural peut être modifiée par le potentiel de l'eau de sorte que de nouvelles entités apparaissent. En outre, dans le cas de figure qui nous intéresse, un agrégat séparé de son contexte sol n'aura pas du tout les mêmes types de forces s'exerçant à sa périphérie. D'où l'intérêt de caractériser l'organisation du sol dans son ensemble, plutôt que d'en isoler des fractions par leur taille. In fine, l'essentiel des caractéristiques physiques évoquées ici dépend du rôle de l'eau, en particulier de ses interactions avec la phase solide. Toutes choses étant égales par ailleurs, différentes possibilités pour modifier ces interactions sont possibles: composition de la solution (sels ou solvants organiques), caractère plus ou moins hydrophile de la surface du solide, notamment par la matière organique et les oxydes. Ces différents facteurs conduisant à des forces de cohésion d'origine capillaires et à l'échelle moléculaire différentes, dont l'étude devrait permettre de montrer les modalités d'évolution de l'organisation des sols.

Nous n'avons pas pu étudier cette question plus en détail mais en comparant l'organisation du sol sous savane et sous culture de manioc, l'assemblage des cristallites d'argile présente une organisation suffisamment différente pour que les propriétés macroscopiques en soient modifiées.

## **2. LIMITES DES MODELES UTILISES POUR L'ETUDE DU RETRAIT DU SOL**

Deux modèles ont été utilisés dans ce travail pour définir des points singuliers de la courbe de retrait, d'une part, et la courbe de rétention d'eau d'autre part:

- La modélisation de la courbe de retrait telle que proposée par BRAUDEAU, suppose, qu'au cours de la dessiccation, la macroporosité augmente au fur et à mesure du dessèchement (BRAUDEAU, 1988 a et b), c'est-à-dire que la fissuration du sol soit monotone.

D'après nos donnée d'analyse d'image ceci n'est pas aussi simple dans le cas de nos sols.

- Le modèle de retrait, tel que développé par BRAUDEAU, présente néanmoins de nombreux avantages car il a le mérite de donner les points singuliers de la courbe de retrait. Remarquons que l'ajustement de ce modèle est toujours possible sur n'importe quelle courbe de retrait, et ce, quelle que soit l'échelle d'investigation. Le modèle présente donc un caractère général. Remarquons cependant que les points singuliers identifiés sur des échantillons de taille différente, même sur le même sol, seraient évidemment différents.

L'important donc dans l'utilisation de ce modèle est donc de connaître l'échelle à laquelle on fait la mesure.

Enfin, même si dans le détail le modèle ne rend pas compte de tous les changements internes de l'échantillon, l'échelle de caractérisation adoptée donne des mesures très reproductibles, en continu et faciles à réaliser.

### **3. SIGNIFICATION DES POINTS SUR LA COURBE DE RETRAIT**

- Dès lors que le point E de la courbe de retrait apparaît à des potentiels de l'eau avoisinant - 200 à - 300 mbars, il est clair que cela correspond à des valeurs du potentiel hydrique, après ressuyage du sol, très éloignées de la capacité au champ. Beaucoup d'auteurs s'accordent aujourd'hui pour dire, d'après les mesures tensiométriques réalisées in situ, que le potentiel de l'eau est proche de - 50 mbars.

- De nos résultats, la pente de la courbe de retrait K2 nous apparaît comme fondamentale dans le comportement des sols. Là encore, bien entendu, sa valeur doit tenir compte de l'échelle à laquelle on fait la mesure. Mais à taille d'échantillon identique, nous pouvons comparer les courbes de retrait provenant de différents matériaux.

### **4. APPLICATION A L'ETUDE DES SOLS. CARACTERISATION DE LA DEGRADATION PHYSIQUE**

Les résultats de notre étude montrent qu'il existe une relation entre la pente du retrait  $K_2$  et la variation de volume de cylindres de sol ( $\Delta V$  c'est-à-dire l'ampleur du retrait). Il est ainsi possible de tirer les enseignements suivants:

#### **a. SOL TEMOIN SOUS SAVANE (EXEMPLE DE SOL NON DEGRADE)**

Nous prendrons comme exemple de l'horizon A1 résultant de l'aggradation par l'activité biologique et qui possède une structure grumeleuse très nette. La pente  $K_2$  est faible (0,4 environ). La variation du contenu en eau est considérable mais c'est la valeur très élevée du contenu en eau au point E ( $0,43 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , 43%), qui apparaît le paramètre le plus significatif de l'état structural du sol.

#### **b. SOL SOUS CULTURE DE MANIOC (EXEMPLE DE SOL DEGRADE)**

Après 15 ans de culture mécanisée de manioc, la pente  $K_2$  des horizons Ap1 et Ap2 est voisine de 1. La variation de contenu en eau au cours du retrait est très faible. La valeur du contenu en eau au point E est réduite de moitié par rapport au sol de savane ( $w_E = 0,24 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , 24%).

Ces deux indicateurs, pente  $K_2$  et teneur en eau au point E nous apparaissent comme de bons indices de l'état structural des sols. Il est évident que dans d'autres milieux, les vertisols par exemple, on pourrait obtenir de fortes pentes de retrait avec des valeurs de E très élevées.

Pour conclure nous dirons que, même si le sol sous savane non dégradé est plus gonflant que le sol dégradé, sa pente du retrait  $K_2$  est très faible. Au contraire, le sol dégradé est moins gonflant avec une pente  $K_2$  proche de l'unité.

Remarquons enfin que les courbes de retrait des horizons AB et B2 du sol sous savane présentant les mêmes caractéristiques que l'horizon AP2 sous manioc. Ils ne présentent cependant pas les mêmes organisations macroscopiques et microscopiques. Cela montre les limites de l'interprétation des courbes de retrait.

### **5. IMPORTANCE DE L'ESPACE MACROPORAL NON ACCESSIBLE AUX MESURES DE RETENTION D'EAU (PORES de $Req \geq 30 \mu\text{m}$ )**

Dans les sols étudiés il existe toujours une porosité d'origine biologique, même en situation dégradée, de telle sorte que l'engorgement prolongé du sol après de fortes pluies ne se produit pas.

Ceci étant, la question importante est de savoir quel aspect prend la dégradation des sols au plan physique. L'analyse d'image indique que la dégradation est avant tout la prise en masse, précoce, au cours de la dessiccation. Notre interprétation est que, plus le sol est compact au départ, plus les forces capillaires peuvent intervenir de façon efficace sur la réorganisation du sol. Ainsi, quand le sol est au départ compact, les constituants étant statistiquement plus proches les uns des autres, les forces d'hydratation (capillaires) sont en mesure de s'exercer sur une grande partie du matériau. La prise en masse devient maximale et intervient dès des potentiels élevés. (- ~ 300 mbars, bas pF).

Pour expliquer cette évolution de l'organisation, notre conclusion est que des pratiques culturales intensives, la mécanisation associée à des travaux culturaux intervenant en période humide et le changement du statut organique et physico-chimique, concourent à faire évoluer l'espace poral. D'après nos données, tous les niveaux d'organisations sont affectés, y compris l'espace poral interparticules argileuses comme le montre le MET, et l'espace poral à l'échelle de quelques  $\mu\text{m}$ , comme l'indiquent les courbes d'intrusion de mercure.

In fine, la réorganisation de la structure du sol conduit à la formation de blocs compacts, très faiblement poreux, de telle sorte que les pores accessibles aux racines disparaissent rapidement au cours de la dessiccation. La courbe de potentiel de l'eau est déplacée vers les bas potentiels (pF plus élevés), c'est à dire qu'il faut exercer une énergie importante pour extraire l'eau du sol. Simultanément les variations de contenu en eau sont diminuées de moitié entre les points E et A des courbes de retrait. L'évolution des facteurs précédents est l'indice d'une dégradation du sol.

## **B. CONCLUSION**

Le développement d'une approche spécifique, qui prend en compte le rôle, à différentes échelles, de l'organisation du sol sur le comportement physique du sol, s'appuie donc sur deux types de critères:

- physiques; le retrait et les caractéristiques de l'espace poral;
  - morphologiques: l'organisation du sol, à différentes échelles et l'espace macroporal non capillaire.
-

## CHAPITRE X

### CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES DE NOUVELLES RECHERCHES

---

En raison de ses terres de plateau (plus de 15000 ha) et de sa position géographique de région de transit traversée par le chemin de fer et la route national 1, la Vallée du Niari suscita dès la fin de la deuxième guerre mondiale un intérêt économique particulier. Mais l'espoir des premiers exploitants agricoles européens fût très vite déçus. En effet les techniques exogènes introduites dans cette latitude tropicale n'ont pas donné les résultats escomptés. Les travaux des agronomes et pédologues qui suivirent ne pourraient d'ailleurs en limiter les dégâts.

Devant la crise structurelle de l'agriculture paysanne locale et les échecs des projets de développement rural intégré, les recherches agronomiques sont encore peu développées en Afrique tropicale de façon générale et dans la Vallée du Niari en particulier.

Cependant les travaux anciens et récents nous permettent, dans ce chapitre, de présenter les problèmes qui se posent et de faire quelques propositions mêmes très partielles. Notre présent travail constitue de ce fait, une contribution à la compréhension de l'évolution des sols cultivés avec mécanisation.

#### A. ETAT DE DEPART DU SOL SOUS SAVANE

Du point de vue pédologique, rappelons que la Vallée du Niari est définie par la présence d'une couverture pédologique ferrallitique argileuse (70 % d'argile) et épaisse (supérieure à 10 m). La partie supérieure (2 m d'épaisseur) meuble et acide peut être caractérisée par:

- un horizon A1 superficiel, humifère, très peu épais (5-10 cm), grumeleux,

meuble et caractérisé par un chevelu racinaire abondant et une activité faunique importante (termites, arthropodes...).

- un horizon AB subsuperficiel massif, compact et dont la texture tactile apparaît argileuse, pour le même taux d'argile granulométrique qu'en B2;

- un horizon B2 du sol, d'apparence microagrégée et de texture limono-argileuse au toucher;

- une composition minéralogique simple de la terre fine de tous les horizons pédologiques étudiés: kaolinite (60 %), goethite alumineuse (10 %), quartz (18 %) et divers oxydes métalliques (manganèse, titane...);

## B. MISE EN EVIDENCE DE CRITERES DE DEGRADATION DES PROPRIETES PHYSIQUES

Du point de vue agronomique, la mise en culture en mécanisé, avec apport d'amendements calcaïques (calcaires broyé), d'engrais minéraux et verts (enfouissement de *Pueraria javanica* ou de résidus de récoltes) devait limiter au maximum la dégradation.

Cependant la mise en culture entraîne d'abord **la disparition entière de l'horizon biologique superficiel (horizon A1)**. Elle provoque ensuite:

- La modification, par rapport à l'horizon biologique superficiel (A1), de l'état physico-chimique des profils culturaux, qui se traduit, en fonction de la profondeur:

- + soit par une aggradation dans les 10 cm supérieurs (horizon Ap1);

- + soit par une dégradation en profondeur entre 10 et 25 cm (horizon Ap2), qui est accompagnée d'une acidification du sol (pH eau = 4,5, pH KCl = 4,0), malgré une diminution du taux de matière organique. Il s'en suit une apparition du manganèse et de l'aluminium toxiques pour les plantes cultivées.

- Les modifications des propriétés physiques des profils culturaux sous culture mécanisée de manioc, particulièrement la disparition de la structure microagrégée qui devient continue (plus nettement en Ap2), mais avec une porosité importante, probablement d'origine faunique et une fissuration macroscopique lamellaire en sol sec. La masse volumique augmente aussi.

Après quinze ans de mise en culture, le sol reste cependant très perméable car sur le terrain, nous n'observons pas d'engorgement en saison des pluies et la vitesse d'infiltration est toujours supérieure à 10 cm par heure.

Nous pouvons donc dire que, même s'il existe une évolution du sol après mise en culture, nous ne pouvons, à première vue, affirmer qu'il s'agit d'une dégradation.

Cependant, c'est à partir de l'analyse des modifications physiques du sol sous culture de manioc, par rapport au sol sous savane, qu'il est possible de caractériser les modalités de cette évolution au plan physico-chimique et au niveau du statut organique.

## C. ETAT PHYSICO-CHIMIQUE DU SOL CULTIVE

En zone tropicale humide la quasi totalité des minéraux primaires ayant été altérée, les réserves minérales sont accumulées dans les matières organiques. Dans les zones de savane tropicale humide comme le Niari, les brûlis saisonniers détruisent la biomasse aérienne ( $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  environ à Mantsoumba dans le Niari) d'où certaines restitutions minérales. Les autres restitutions se font par minéralisation des racines de graminées (*Hyparrhenia diplandra*) dans les horizons supérieurs du sol et particulièrement dans les 5 cm supérieurs.

La mise en culture entraîne généralement, selon le système de culture, un appauvrissement et une acidification plus ou moins intenses du sol. Pour lutter contre ces deux phénomènes néfastes pour les plantes cultivées, les agronomes conseillent très souvent l'apport d'amendements calciques et d'engrais minéraux ou organiques.

A titre d'exemple, au point d'essai agronomique de Mantsoumba dans la Vallée du Niari, les agronomes ont apporté,  $1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de calcaire broyé,  $250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  d'engrais minéraux (NPK). Ces apports n'ont eu d'effets améliorants que dans les 10 cm supérieurs (en Ap1), par contre entre 10 et 25 cm de profondeur (en Ap2), la dégradation de l'état physico-chimique, par rapport à A1 du sol sous savane ou Ap1 du sol sous culture de manioc, est très nette.

De  $6$  à  $11 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de matière sèche d'engrais vert et/ou de résidus de récolte ont été enfouis avant plantation du manioc, qui n'ont eu aucun effet améliorant. Au contraire le taux de matière organique à même chuté de 2 points en Ap1, par rapport à A1 du sol sous savane.

## D. ETAT PHYSIQUE DU SOL CULTIVE

Elles concernent les paramètres de la fertilité physique du sol, qui créent des conditions favorables au développement des plantes, particulièrement à la pénétration des racines et/ou tubercules des cultures.

A cet effet, nous utiliserons les différentes composantes de la courbe de retrait, qui permettront de donner des informations sur la masse volumique, la réserve en eau, la porosité pour l'eau gravitaire et l'aération du sol.

## 1. FRAGMENTATION ET COHESION DU SOL. MASSE VOLUMIQUE DU SOL

L'une des principales manifestations du travail du sol avec les disques est bien sûr la compaction du sol. Ce phénomène, qui a concerné plusieurs autres régions du monde, n'est pas propre à la Vallée du Niari. Mais cependant il n'a été décrit que récemment (BERTRAND et MAPANGUI, 1980), pour la simple raison que les agronomes n'ont étudié surtout que les 10 cm supérieurs.

Rappelons que les résultats de notre travail confirment que la mécanisation du travail du sol, et particulièrement le pulvérisage dès les premières grosses pluies, c'est-à-dire en conditions d'humidité supérieure à celle de la capacité au champ, entraîne toujours une augmentation de la masse volumique du sol sous culture. Il en résulte ainsi une semelle plutôt de pulvérisage et non de labour comme bien des auteurs l'ont décrit ici.

Cette semelle de disquage (horizon Ap2), occasionnée par le travail en conditions humides, qui est fragile en sol humide, est très cohérente en périodes sèches.

En effet, l'analyse du comportement du sol nous a permis de montrer que les propriétés physiques du sol sont ainsi modifiées:

- la fragmentation du sol en cours de ressuyage, qui assure l'aération et le drainage des précipitations, crée des conditions favorables au développement de l'activité biologique, donc à la croissance végétale. Mais, cette fragmentation est plus importante sous culture de manioc. Elle est à l'origine de l'accélération du dessèchement du sol, surtout quand il est mal couvert ou bien dénudé;
- la prise en masse du sol sec apparaît défavorable à l'activité biologique, surtout à la pénétration des racines. Elle occasionne, lors des labours en période sèche, la formation des grosses mottes cohérentes qui ne seront émiéttées qu'au prix de plusieurs passages de disques et de consommation de beaucoup d'énergie.

Dans certains cas de dégradation sévère, comme sous culture de canne à sucre industrielle, la compaction affecte l'ensemble de la couche labourée (MAPANGUI, 1982).

Cependant, l'augmentation de la masse volumique qui peut être très rapide (selon les conditions pédoclimatiques et les outils utilisés), ne dépasse que rarement  $1,4 \text{ g/cm}^3$ , dans ces sols acides tropicaux, riches en argiles de type kaolinite.

Au total, la compaction du profil cultural a pour conséquences la modification du régime hydrique et des modalités d'aération du sol ainsi que, rarement, la modification du

biotope de la macrofaune. Cette dernière dégradation concerne de très rares cas de compaction sévère de très longue durée (30 ans environs de mécanisation intensive), comme sous canne à sucre industrielle de Kayes, dans la Vallée du Niari.

## 2. RESERVE UTILE EN EAU DU SOL

La notion de réserve utile du sol est utilisée comme un paramètre pour déterminer la quantité d'eau et sa disponibilité par les plantes, en fonction de la profondeur du sol explorée. Ce paramètre est aussi indispensable pour modéliser le bilan hydrique (POSS, 1991), bien que sa détermination pose des problèmes théoriques importants (HILLEL, 1974).

La réserve utile (RU) est souvent définie comme la différence de stock d'eau entre le sol à la "capacité au champ" (quand le drainage cesse après une pluie ou un apport d'eau) et le sol à un état hydrique tel que les plantes ne sont plus capable d'en extraire l'eau (c'est-à-dire au point de flétrissement permanent souvent assimilé au pF 4,2).

Dans notre travail, les courbes de retrait ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- Entre les points E et B de la courbe de retrait on peut définir une capacité de rétention d'eau. Cette dernière n'inclut pas l'eau très faiblement liée, (potentiels de l'eau  $> -200$  mbars environ) pour lesquels la variation du contenu en eau n'entraîne pas de changement de volume apparent. La réserve en eau ainsi calculée sur des blocs de  $100 \text{ cm}^3$  donne néanmoins des informations fort importante sur l'évolution du statut hydrique du sol.
- D'un autre côté, la variation de volume ( $dV$ ) entre les points E et B donne des informations sur l'aptitude du sol à se structurer macroscopiquement, c'est à dire entre des blocs de l'ordre de  $100 \text{ cm}^3$ .

Le tableau X.1 montre clairement que les réserves en eau sont faibles dans tous les horizons du sol étudié.

Dans le sol sous savane, ces résultats indiquent une baisse importante de réserves en eau dans les horizons AB et B2 par rapport à l'horizon A1:  $0,04$  à  $0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  contre  $0,11 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ .

Rapportées à l'argile, les réserves en eau du sol respectivement de  $0,21 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en A1, de  $0,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en AB et de  $0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  en B2.

Par contre, les horizons du sol sous culture de manioc ont des réserves en eau similaires ( $0,04 \text{ cm}^3$  pour  $1 \text{ g}$  de solide ou  $0,06 \text{ cm}^3$  pour  $1 \text{ g}$  d'argile) à celles des horizons AB et B2 du sol de savane.

Par ailleurs, si nous ramenons à l'unité d'épaisseur (cm) les lames d'eau utile de chaque horizon, nous constatons qu'elles baissent nettement avec la profondeur du sol sous savane: 2,15 mm/cm en A1, 0,95 mm/cm en AB et 0,40 mm/cm en B2. Par contre, dans le profil cultural sous manioc, les réserves varient très peu: 0,75 mm/cm en Ap1 et 0,83 mm/cm en Ap2.

Tableau X.1: Réserves en eau des horizons A1, AB et B2 sous savane et des horizons Ap1 et Ap2 sous culture de manioc, sur site mécanisé depuis 15 ans (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

Végétation	Horizon	Epaisseur (cm)	Réserve en eau ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	utile [REU] (mm)	REU/arg % ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	Ecart-type [ $\sigma$ ]
S A V A N E	A1	0-10	0,11	11,2	0,21	0,03
	AB	10-35	0,04	14,5	0,07	0,02
	B2	35-100	0,03	25,9	0,05	0,06
M A N I O C	Ap1	0-10	0,04	5,3	0,06	0,02
	Ap2	10-25	0,04	8,4	0,06	0,01

En définitive, par rapport aux 25 cm supérieurs du sol sous savane, les horizons labourés (Ap1 et Ap2) retiennent moins d'eau utile pour la culture de manioc.

On constate donc, par rapport à l'horizon A1 du sol sous savane, une dégradation du sol sous culture de manioc (horizon Ap) du point de vue de sa réserve en eau utile.

### 3. AERATION DU SOL

Dans notre travail, nous avons pu évaluer le volume de la macroporosité par la mesure du volume d'eau entre le point F et le point E des courbes de retrait. Cette macroporosité ne comprend pas seulement l'eau qui peut s'écouler du fait de la gravité mais aussi de l'eau retenue par capillarité, sans que son extraction entraîne une réduction du volume apparent:

$$EG = W_F - W_E \quad (\text{en cm}^3.\text{g}^{-1})$$

$$PG = W_F - W_E$$

Les résultats présentés dans le tableaux X.2 montrent:

- Dans le sol sous savane, une forte diminution de la macroporosité de haut en bas du profil pédologique: le volume de la macroporosité passe de 0,22 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> dans l'horizon A1 à 0,12 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> en AB et 0,13 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> en B2.
- Dans le sol sous culture de manioc, également une baisse mais plus faible avec la profondeur de la cultivée: de 0,12 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> dans l'horizon Ap1 à 0,09 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> en Ap2.

Tableau X.2: Macroporosité des horizons A1 et AB sous savane et des horizons Ap1 et Ap2 sous culture de manioc, en conditions humides, sur site mécanisé depuis 15 ans (moyennes de 15 mesures dans 4 parcelles)

Végétation	Horizon	Profondeur (cm)	Macroporosité (cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup> )	Ecart-type [σ]
S A V A N E	A1	5	0,22	0,12
	AB	20	0,12	0,05
	B2	100	0,13	0,02
M A N I O C	Ap1	5	0,12	0,07
	Ap2	20	0,09	0,08

En conclusion, est élevée dans l'horizon A1, alors qu'elle est très faible dans les horizons AB et B2 du sol sous savane et Ap1 et Ap2 du sol sous culture de manioc.

#### 4. EXPLORATION DU SOL PAR LE SYSTEME RACINAIRE DES PLANTES

L'enracinement des plantes a été observé et évalué lors du creusement des profils du sol sous savane et du sol sous culture mécanisée de manioc, mais elle n'a pas fait l'objet de mesures.

Sous savane, la végétation herbacée composée essentiellement de *Hyparrhenia diplandra* possède un système racinaire fasciculé concentré sur les 5 - 10 cm supérieurs. Ce chevelu racinaire joue un rôle important dans la restitution minérale et

la structuration de l'horizon A1. Un tel enracinement favorise le dessèchement des plantes herbacées dès les premiers mois de la saison sèche et les feux de brousse.

Sous culture de manioc, nous avons observé que les racelles ne se concentrent que dans des volumes de sol de couleur sombre c'est-à-dire riches en humus. Les racines tubérisantes sont superficielles car elles buttent sur l'horizon Ap2 plus compact que Ap1. Pour la variété Moudouma utilisée dans nos essais, un nombre très limité, deux à trois racines seulement descendent à plus de 40 cm. De ce fait, en saison sèche, cette plante perd un grand nombre de ses feuilles. Nous voyons donc ici la pertinence de données physiques et morphologiques comme celles que nous avons obtenues.

## 5. CONCLUSION

On constate donc que, par rapport au sol sous savane, la dégradation du sol sous culture mécanisée se traduit, avant, par la disparition de l'horizon biologique A1.

Mais, quand on compare les horizons sous culture mécanisée avec cet horizon superficiel, riche en matière organique et structuré en agrégats grumeleux, on observe des modifications divergentes selon la profondeur du profil cultural:

- aggradation de l'état physico-chimique dans les 10 cm supérieurs (en Ap1); mais avec une diminution du taux de matière organique du sol;
- dépréciation physico-chimique entre 10 et 25 cm de profondeur (en Ap2), accompagnée d'une compaction de la structure.

Cependant du point de vue hydrique, la réserve utile diminue fortement dans les horizons culturaux, mais elle diminue plus en Ap1 qu'en Ap2 sous-jacent. L'exploration du sol par les racines est compromise et l'aération fortement affectée. Au total le sol en temps que support biologique est considérablement dégradé.

## E. CONTRIBUTION AU MAINTIEN DE LA FERTILITE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI

Les études anciennes comme récentes menées dans la Vallée du Niari, confirment, malgré l'apparence donnée par une végétation très luxuriante, la grande fragilité des milieux tropicaux humides et particulièrement des sols ferrallitiques qui constituent la quasi totalité des couvertures pédologiques des zones bien drainées.

Notre mémoire concerne l'évolution des propriétés physiques des sols.

Quelques conséquences quant à la mise en valeur agricole et des perspectives de recherches nouvelles, en science du sol, peuvent maintenant être envisagées.

## 1. GESTION DES TERRES

Ce travail nous a permis d'abord de décrire sur le terrain les modifications dues à la mécanisation des travaux de préparation du sol. Nous avons pu observer l'évolution de la compacité de l'horizon Ap2 (10 à 25 cm en moyenne) tandis que l'horizon Ap1 superficiel est plus meuble. Cette différenciation du profil cultural, sous culture mécanisée de manioc est à mettre en relation avec les conditions de préparation du sol avant le bouturage du manioc: labour en sol ressuyé, avec la charrue à disques lourds et pulvérisage aux disques plus légers, et cela en sol humide c'est-à-dire dès les premières grosses pluies de début de cycle de culture.

De ce qui précède nous conseillons que:

- **Le labour** soit réalisé nécessairement **avec des charrues à soc**, et toujours à la fin de la saison des pluies ou **en sol ressuyé**.
- **Le pulvérisage** c'est-à-dire l'émiettement des mottes soit fait **en même temps que le labour**, de préférence **avec des outils à dents**.
- L'épandage d'amendement calcaire et/ou **le hersage** (avec, de préférence, des outils à dents) soient effectués, **dès les premières pluies**.
- **Les rotations culturales** devront comporter une **jachère cultivée** et éventuellement pâturée par les boeufs ou le petit bétail (ovins et/ou caprins).

Au total, une autre forme d'agriculture "sustainable", proposée par le CRA de Loudima mérite d'être testée en grandes parcelles: il s'agit du système de culture continue intégrant l'apport de fertilisants, l'utilisation exclusive des charrues à soc et des outils à dents ainsi que la culture annuelle d'un engrais vert (maïs, Sesbania...) (LEMAIRE, 1988; Projet Congo/IBSRAM, 1989).

## 2. PERSPECTIVES DE NOUVELLES RECHERCHES EN SCIENCE DU SOL

Les modifications du sol analysées ont permis, en utilisant une approche méthodologique en plusieurs étapes, de définir le cadre d'évolution du sol sous culture mécanisée depuis la savane.

La méthodologie que nous avons développée est basée sur l'étude, à différentes échelles, de la relation entre l'organisation et les propriétés physiques du sol, tout en prenant en compte aussi bien l'état physico-chimique et minéralogique (argiles du sol) que l'état énergétique de l'eau dans le sol.

Nous avons ainsi pu confirmer le rôle de l'organisation sur le comportement physique du sol et particulièrement que c'est la microstructure des argiles du sol qui détermine les propriétés physiques macroscopiques du sol.

Cependant, un manque peut être signalé dans ce travail: les effets de l'activité biologique (racines des plantes et faune du sol) sur l'organisation et les propriétés du sol n'ont pas été pris en compte.

Nous pouvons déjà dire que l'orientation de nos recherches futures vise à préciser le rôle de la macrofaune du sol sur la morphologie et le comportement physique des sols, dans le cadre de successions savane-cultures-jachères.

## **F. CONCLUSION**

Il découle de ce qui précède que, dans la Vallée du Niari, les conséquences agronomiques des modifications des sols cultivés sont spécifiques des cultures, particulièrement des technologies (techniques culturales et des outils agricoles) utilisés.

Mais, si la réduction de la réserve en eau utile cause rapidement, en périodes sèches, un stress hydrique pour la plupart des plantes cultivées, la forte augmentation de la cohésion du sol est surtout défavorable aux grossissement des tubercules comme le manioc. Par ailleurs cette forte cohésion du sol sec occasionne, lors des labours en saisons sèches, la formation des grosses mottes très cohérentes.

Enfin, les effets de l'activité biologique, particulièrement de celle de la macrofaune du sol sur la fertilité aussi bien chimique que physique sont encore, dans ces sols, très mal connus. Il est nécessaire désormais d'en tenir compte dans les nouvelles recherches à entreprendre par la suite.

---

## **CONCLUSIONS GENERALES**



L'objectif de notre étude était de décrire l'organisation, à différentes échelles de sol, depuis la parcelle expérimentale jusqu'au laboratoire. Nous avons analysé l'espace poral et l'organisation d'échantillons non remaniés en fonction de l'état d'hydratation. Il s'agissait au total d'obtenir des données de base sur l'état de dégradation des sols de façon à en comprendre et ainsi mieux prévoir leur comportement.

## **CADRE GENERAL DE L'ETUDE**

Le choix et la caractérisation du site de l'expérimentation agronomique ont été réalisés conformément au protocole du Réseau Sols Acides de l'IBSRAM: terrain homogène du point de vue pédologique, mais différencié uniquement par son histoire culturale. Dans notre cas, c'est une zone de sommet de bas plateaux (200 m d'altitude) de la Vallée du Niari au Congo, dont le sol ferrallitique jaune, acide et argileux (oxisol), porte une savane tropicale humide soumise au brûlis annuel. Deux types d'agriculture cohabitent: une agriculture paysanne, ancienne, itinérante, peu productive et économiquement peu viable et une agriculture mécanisée d'introduction récente et non rentable car non adaptée aux conditions écologiques locales. C'est cette dernière qui fait l'objet de notre mémoire.

Des échantillons de sol, de taille décimétrique, ont été prélevés à une humidité proche de la capacité au champ, évitant aussi la dessiccation qui risque toujours d'entraîner des modifications importantes de l'organisation des sols.

Des descriptions de profils de sol, des mesures chimiques, des études minéralogiques et densimétriques ont été réalisées.

L'étude simultanée du comportement physique et de l'organisation, à différentes échelles, a nécessité une préparation particulière des échantillons, équilibrés à un potentiel hydrique donné, et consolidés par une résine additionnée ou non d'un produit fluorescent aux rayonnements UV. Le MEB a permis de décrire l'organisation de l'argile à l'échelle micrométrique. Sur des coupes ultraminces, la microscopie électronique à transmission (MET) à basse et moyenne résolution a été utilisée pour décrire l'arrangement des constituants. Les résultats obtenus avec ces différentes techniques a fait l'objet d'une synthèse, résumée ci-après.

## ROLE DES DIFFERENTS NIVEAUX D'ORGANISATION SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES MACROSCOPIQUES DU SOL

Au total, ce travail montre l'intérêt de mettre en relation **des données physiques** avec **des données** d'observations et de mesures **morphologiques**. Il devient possible de proposer un **schéma de l'évolution structurale des sols ferrallitiques argileux**.

Il ressort de notre étude que la structure macroscopique des sols ne peut être définie avec précision à partir des seules courbes de retrait associées ou non aux courbes de potentiel de l'eau. Seule l'analyse d'images permet de décrire et de quantifier la réorganisation interne des échantillons.

Notre résultats indiquent que la réorganisation du sol se produit en plusieurs étapes. Dans un domaine de potentiel allant de 0 à - 20 KPa environ, le sol est rigide et l'eau est extraite des plus grands pores du sol. A partir de - 20 KPa jusqu'à - 100 KPa environ, **le retrait conduit à une fissuration importante** de l'échantillon. Aux potentiels de l'eau plus bas (< - 100 KPa) le retrait se poursuit mais il est accompagné de la fermeture des fissures initiales, indiquant **une prise en masse** de l'échantillon.

Le mécanisme d'évolution de la structure peut se résumer de la façon suivante:



Ainsi, la dessiccation apparaît, au début, très favorable à la structuration du sol, ce qui par ailleurs est particulièrement intéressant pour le travail du sol (labour en particulier).

Lorsque la dessiccation se poursuit, la reprise en masse du sol est à l'origine de l'augmentation de la cohésion et d'une baisse de la continuité de l'espace poral, rendant ainsi difficile la colonisation du sol par les racines, l'exploitation de la réserve en eau et le travail du sol.

Ce phénomène est particulièrement accentué dans les horizons Ap, après quinze années de culture de manioc. La mise en culture entraîne la disparition complète de l'horizon biologique superficiel (horizon A1 du sol sous savane).

## ROLE DE L'ORGANISATION DU SOL SUR SON COMPORTEMENT. IMPORTANCE DES FORCES D'HYDRATATION

Ce travail montre que dans l'étude du mécanisme d'évolution de la structure du sol il faut prendre en compte tous les niveaux d'organisation.

A l'échelle de l'assemblage des cristallites d'argile, ce sont paradoxalement les argiles les plus dispersées qui donnent des structures macroscopiques continues, alors que les argiles qui sont agrégées donnent des structures discontinues c'est-à-dire microagrégées. Une argile dispersée signifie aussi de faibles forces de cohésion, d'autant plus que la matière organique est alors absente.

Au total, l'ambiance physico-chimique, biologique, des facteurs d'ordre énergétique liés aux contraintes hydriques et mécaniques, par leur synergie ou leur effet complémentaire participent à l'évolution des propriétés des sols.

*Ce travail montre aussi que l'organisation macroscopique du sol est largement dépendante des forces d'hydratation intervenant à des niveaux intermédiaires, en particulier dans des tailles de pores entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ , là où peuvent intervenir les forces capillaires. En définitive, ce travail fait apparaître l'importance des paramètres d'ordre essentiellement énergétique, comme le potentiel de l'eau, et en conséquence l'occupation des différentes organisations sur la dynamique de la structure des sols.*

## CONSEQUENCES AGRONOMIQUES

Les données des courbes de retrait, les courbes de rétention d'eau ainsi que l'étude de l'organisation à différentes échelles du sol nous ont permis de fixer le cadre d'évolution des sols et en particulier d'en préciser les modalités de dégradation. **Il ressort que les courbes de retrait peuvent être utilisées comme outil pour juger de l'évolution des caractéristiques physiques des sols.** Même si l'on peut discuter de la signification des points singuliers de la courbe de retrait, **les variations de volume et de contenu en eau, ainsi que la pente de la droite de retrait apparaissent des indicateurs de l'état de dégradation structural en terme d'eau utile, compactage et structuration potentielle du sol.** Ces indicateurs sont beaucoup plus précis que les seules mesures de densité apparente car elles ont le mérite d'être faites sur des échantillons de sol non remaniés et elles prennent en compte le potentiel de l'eau. **Puisque ces données sont quantitatives elles peuvent être incluses dans des modèles de prévision.**

Notre travail reposant sur un cas d'étude, celui des sols sous culture de manioc après quinze ans, il ne nous a pas été possible de comparer nos résultats à d'autres pratiques culturales, pour en comparer la dégradation. La culture mécanisée de manioc

conduit à une modification considérable du sol par rapport à la savane initiale. Dans l'horizon Ap cultivé la réserve en eau diminue de moitié, une grande partie des pores assurant la pénétration racinaire disparaît.

Seul le changement des certaines des pratiques culturales, telles que l'utilisation d'outils à disques, surtout lorsque ceux-ci sont utilisés en période de ressuyage des sols, devrait limiter le tassement des sols et concourir au maintien de leur fertilité. Tout doit aussi être mis en oeuvre pour limiter l'acidification de ces sols. Une bonne partie de la réponse à la dégradation repose sans doute sur l'activation de la vie biologique. En conséquence un effort doit être fait pour améliorer le statut organique, probablement en veillant à mieux utiliser le stock de matière organique disponible.

Ceci devra faire l'objet d'autres recherches, qui, d'ores et déjà, sont en cours dans le cadre de la deuxième phase du projet IBSRAM.

\*\*\*\*

En conclusion ce travail montre l'intérêt, sur un périmètre bien délimité, dans un cadre spatial bien défini, d'étudier le mécanisme du comportement des sols. En combinant une approche basée sur la connaissance précise du comportement de sol en laboratoire, l'utilisation de méthodes d'observation pour caractériser le système sol à différentes échelles de son organisation, nous avons pu obtenir des éléments de base qui permettent de mieux comprendre et prévoir le fonctionnement des sols. Connaissant les limites et la pertinence d'outils de caractérisation des sols, nous devrions contribuer à mieux caractériser les sols donc à mieux juger de la validité de certaines pratiques anthropiques dans le cadre du développement agricole au Congo.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- ALEXANDER, L.T. and CADY, J.G., 1962.** - Genesis and hardening of laterites in soils. Soils conserv. Ser., USDA, Washington, 1282, DC, 90 p.
- ANGULO, R., 1989.** - Caractérisation hydrodynamique de sols déformables partiellement saturés. Etude expérimentale à l'aide de la spectrométrie gamma double-sources. Thèse Doct. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- AUBERT, G., 1954.** - Les sols latéritiques. V th Intern. Congr. Soil Sci., Léopoldville, 1: 103-118.
- AUBERT, G., et SEGALIN, P., 1966.** - Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IV, 4: 97-112.
- AUBREVILLE, A., 1949.** - Climats, forêts et désertification de l'Afrique.
- AUBREVILLE, A., 1965.** - Savanisation tropicale et glaciations quaternaires. Andansonnia, II, 1, pp. 17-84.
- ARRIVETS, J., 1989.** - Synthèse sur le "Projet Manioc". ORSTOM, Brazzaville.
- Atlas du Congo, 1966.** - Aperçu sur le climat du Congo. ORSTOM et Ministère de la Coopération, Paris.
- AZZAOUI, M.M., 1988.** - Comportement hydrique et organisation des matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation. Thèse Doct. Univ. Paris VI, 225 p.
- BABET, V., 1929.** - Etude géologique de la zone Congo-Océan. Ed. Larose, Paris. 176 p.
- BARTOLI, F., PHILIPPY, R., DOIRISSE, M., NIQUET, S. and DUBUIT, M., 1991.** - Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach. Journal of Soil Science, 42, 167-185.
- BEAUDOU, A.G., FROMAGET, M. et GUICHARD, E., 1987.** - Analyse des organisations micro et macrostructurales de certains sols ferrallitiques centrafricains issus de roches basiques. Micromorphologie des sols - Soil micromorphology - pp. 119-124.
- BERTRAND, R. et MAPANGUI, A., 1980.** - Cartographie morphopédologique du CRAL de Loudima. Vallée du Niari (République Populaire du Congo). IRAT, 18 p. + annexes.
- BIGOTTE, G., 1954.** - Contribution à la géologie du Bassin du Niari. Etude sédimentologique et métallogénique de la région minière. Bull. Direct. Mines Géol. A.E.F., n° 9, Paris et Brazzaville.
- BISDOM, E.B.A. and THIEL, F., 1981.** - Back scattered electron scanning images of porosities in thin sections of soils, weathered rocks and oil-gas reservoir using SEM-EDXRA. p. 191-206. In E.B.A. Bisdorn (ed.) Sub-microscopy of soils and weathered rocks. Pudoc., Wageningen.
- BOCQUIER, G., MULLER, J.P. et BOULAGNÉ, B., 1984.** - Les latérites. Connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES: 1934-1984. Imprimerie MAUGEIN-LACHAISE, Malemort.
- BOISSEZON, P. (de) et GRAS, F., 1970.** - Notice explicative n° 44. Carte pédologique Sibiti-Est. République du Congo Brazzaville à 1/500 000.
- BOIVIN, P., 1990.** - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Thèse Doct. Spéc. Pédol. Univ. Paris VI, 189 p.
- BONIFAS, M., 1959.** - Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Mém. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine, 17, 159 p.
- BOULANGE, B., DELVIGNE, J. et ESCHENBRENNER, V., 1973.** - Descriptions morphologiques, géochimiques et minéralogiques des faciès cuirassés des principaux niveaux géomorphologiques de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Géol., Vol. 1: 59-81.
- BOULANGE, B., 1984.** - Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire. Les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. Trav. et Doc. ORSTOM, 85, 272 p.

- BOUMA, J., JONGERIUS, A. and SCHOONDERBEEK, D., 1979.** - Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 43: 261-264.
- BRAUDEAU, E., 1987.** - Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sci. du Sol*, 1987, vol 25/2, pp. 85-93.
- BRAUDEAU, E., 1988.** - Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structurés. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 307, Série II, pp. 1731-1734.
- BRAUDEAU, E., 1988.** - Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 307, Série II, pp. 1933-1936.
- BRAUDEAU, E., 1988.** - Méthode de caractérisation pédo-hydrigue des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIV, N° 3, pp. 179-189.
- BRESSON, L.M., 1981 b.** - Etude ultramicroscopique d'assemblages plasmiques sur lames ultraminces de sols réalisées par bombardement ionique. In E.B.A. Bisdorf (Ed), *Submicroscopy of Soils and Weathered Rocks*, PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 173-189.
- BRESSON, L.M., 1987.** - Comportement hydrique d'un sol argileux acide. Etude aux différents niveaux d'organisation. in *micromorphologie des Sols* (eds N. FEDDEROFF, L.M. BRESSON et M.A. COURTY), pp. 513-520. AFES Publications, Paris.
- BRESSON, L.M., et GUILLORE, P., 1991** - Problème de périmètre. Maille carrée, maille hexagonale, pixel carré, pixel rectangulaire. *La Lettre du Groupe Thématique Traitement d'Images n° 2*. I.N.A.P.G., multigr., 2 p.
- BREWER, R., 1964.** - *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, Wiley, New York, 970 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 de Doctorat de Spécialité en géologie Appliquée. Université Paris VII.
- BRUAND, A., TESSIER, D. et BAIZE, D., 1988.** - Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux: Importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 307, Série II, pp. 1937-1941.
- BRUGIERE, J.M., 1952-1953.** - Etude pédologique de la Vallée du Niari. 2 tomes; 300 p.
- BUI, E.N., MERMUT, A.R. and SANTOS, M.C.D., 1989.** - Microscopic and Ultramicroscopic Porosity of an Oxisol as determined by image analysis and water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:665, 1989, pp. 661-665.
- CAHEN, L. et LEPERSONNE, J., 1948.** - Notes sur la géomorphologie du Congo Occidental. *Ann. Mus. roy. Congo Belge, Sci. Géol.* vol. 1, 95 p.
- CAHEN, L. and SNELLING, N.J., 1966.** - *The geomorphology of Equatorial Africa*. North-Holland Publishing Company-Amsterdam.
- CAMBIER, P. 1986.** - Organisation des constituants et interactions physicochimiques au sein des microagrégats de sols. Application au système Ferrallitique Kaolinite-Oxyde de Fer. Thèse Doct. Univ. Paris VI.
- CAMPBELL, J.M., 1917.** - Laterite: its origin, structure and minerals. *Min. Mag.*, 17: 67-77, 120-128, 171-179, 220-229.
- CHAN, K.Y., 1982.** - Shrinkage characteristics of soil clods from a grey clay under intensive cultivation. *Aust. J. Soil, Res.* 20, 65-68.
- CHATELIN, Y., 1972.** - Les sols ferrallitiques: Historique, développement des connaissances et formation des concepts actuels. *Init. Doc. Techn., ORSTOM*, Paris, 20, 98 p.
- CHATELIN, Y., 1974.** - Les sols ferrallitiques. L'altération. *Init. Doc. Techn., ORSTOM*, Paris, 24, 144 p.

- CHAUVEL, A., 1977.** - Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges en moyenne Casamance. Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris. 62, 532 p.
- CHAUVEL, A., GRIMALDI, M. and TESSIER, D., 1991.** - Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 38, pp. 259-271.
- CHRETIEN, J., 1986.** - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral sur arènes et sur terrasses fluviales. Thèse de Doc., INRA Paris, 412 p.
- CHRETIEN, J., 1987.** - Analyse et quantification de l'espace poral de trois sols sur granite et micaschistes. Comparaisons méthodologiques. *Micromorphologie des sols. Soil micromorphology*.
- CHRETIEN, J. and BISDOM, E.B.A., 1983.** - The development of soil porosity in experimental sandy soils with clay admixtures as examined by quantimet 720 from BES1 and other techniques. *Geoderma*, pp. 285-302.
- CHRETIEN, J. et PEDRO, G., 1987.** - Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. *Cah. ORSTOM.Sér. Pédol. vol. XXIII n° 1* pp. 43-54.
- CHRETIEN, J. et TESSIER, D., 1988.** - Influence du squelette sur les propriétés physiques des sols: Hydratation, gonflement, aération. *SC. du sol, Vol 26, N° 4*, pp. 255-268.
- CLAIRAC, B., CROS, B. et SENECHAL, J., 1989** - Le climat du Mayombe. In *Revue des connaissances sur le Mayombe. UNESCO, Paris.*
- CRECY, J. (de), CONCARET, J., MUNIER, O. et LAVIELLE, G., 1979.** - Assemblage structural des sols et histoire des matériaux. *C.R. Acad. Agri. France*, pp. 1448-1452.
- COULON, E., 1988.** - Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage. Thèse, Univ. Orléans, 241 p.
- COSSON, J., 1955.** - Notice explicative sur les feuilles Pointe Noire et Brazzaville. *Bull. Dir. Mines et Géologie A.E.F., n° 7.*
- COSTER, M., 1989.** - Précis d'analyse d'images. 2è Ed. Les Presses du CNRS.
- COSTER, M., et CHERMANT, J.L., 1988.** - "Les mesures granulométriques: Axiomes et critères de taille. Influence de la forme." Colloque Granulométrie IFTS, Agen.
- CURMI, P., 1988.** - Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Sc. du sol, Vol 26, N° 3*, pp. 203-214.
- DADET, P., 1969.** - Notice explicative de la carte géologique du Congo à 1/500 000. *Mém. BRGM, n° 70*, 103 p.
- DELAGE, P., 1979.** - Etude du milieu poreux et de la texture d'argiles sensibles du Québec. Thèse Univ. Paris VI et E.N.S.M. Paris, 126 p.
- DEMOLON, A., 1952.** - Dynamique des sols. Principes d'agronomie tome I. Cinquième édition. Paris, Dunlop.
- DENIS, B. et RIEFFEL, J.M., 1975.** - Carte pédologique de Madingou. Notice explicative n° 60, carte pédologique Madingou à 1/200 000. ORSTOM, Paris, 152, 49 réf., 1 carte h.t.
- DENISOFF, I. et NOIRFALISE, H., 1954.** - Géomorphologie, sols et végétation du Parc National de la Garamba. V ème Congr. Intern. Sci. Sol. Léopoldville. Vol.IV, 360-367.
- D'HOORE, J., 1954.** - L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. INEAC, Bruxelles, Bull. 62, 132 p.
- ESCHENBRENNER, V., 1986.** - Contribution des termites à la microagrégation des sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, série Pédol. vol. n° 4*: 397-408.
- FITZPATRICK, E.A. and GUDMUNDSSON, T., 1990.** - The impregnation of wet peat for the production of thin sections. *J.Soil Sci.*, 29: 585-587.

- FRANKEL, J.J. and BAYLISS, P., 1966.** - Ferruginized surface deposits from Natal and Zululand, South Africa. *J. Sedim.*
- FRITSCH, E., 1984.** - Les transformations d'une couverture ferrallitique: Analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane Française. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Paris VII, 188 p.
- GARNIER-SILLAM, E., 1987 a.** - Biologie et rôle des termites dans les processus d'humification des sols forestiers tropicaux du Congo. Thèse d'état, Paris XII, 276 p.
- GARNIER-SILLAM, E., BRAUDEAU, E. et TESSIER, D., 1991.** - Rôle des termites sur le spectre poral des sols forestiers tropicaux. Cas de *Thoracotermes macrothorax* Sjöstedt (Termitinae) et de *Macrotermes mülleri* Sjöstedt (Macrotermitinae). *Ins.Soc.* 38, pp. 397 - 412.
- GAUCHER, G., 1967.** - Agropédologie. Les types de sols dans la Vallée du Niari et leurs aptitudes culturales. UNESCO, 1967.
- GOUDIE, A., 1973.** - Duricrusts in tropical and subtropical landscapes. Oxford Univ. Press., 174 p.
- GRAS, F., 1967.** - Les zones alluviales du Niari entre la Bouénza et la Kibouba. In *Quinze ans de travaux et de recherches dans la Vallée du Niari*, tome 3, pp. 153-188.
- GRAS, F., 1970.** - Surfaces d'aplanissement et remaniement des sols sur la bordure orientale du Mayombe (Congo-Brazzaville). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. VIII, n° 3, pp. 274-294.
- GREENLAND, D.J., 1977.** - Soils and chemistry. In D.J. GREENLAND and M.H.B. HAYES, *The chemistry of soil constituent*. John Wiley and sons Chichester, New York, Bristane-Toronto, 470 p.
- GRIMALDI, M., 1981.** - Contribution à l'étude du tassement des sols. Evolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse Doct. Ing., ENSA, Rennes, 221 p.
- GRIMALDI, M., et TESSIER, D., 1986.** - Changement des propriétés de retrait, de gonflement et rétention d'un matériau soumis à un compactage dynamique. *Sci. Sol*, 24: 319-336.
- GRIMALDI, M. et BOULET, R., 1989 - 1990.** - Relation entre l'espace poral et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique de Guyane française. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV, n° 3, pp. 263-275.
- GUILLORE, P., 1980.** - Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. I.N.A.P.G., multigr., 22 p.
- GUILLORE, P., 1987.** - Analyse photographique à grand champ des lames minces. *Micromorphologie des sols - Soil Micromorphology*, pp. 49- 56.
- HAINES, W.B., 1923.** - The volume changes associated with variation of water content in soil. *J. Agric Sci.*, (13), 296-310.
- HALLAIRE, V., 1988 a.** - La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement I. *Description in situ. Agronomie*, 8 (2), 139-145.
- HALLAIRE, V., 1988 b.** - La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement II. *Modélisation morphologique. Agronomie*. 8 (3), 273-280.
- HALLAIRE, V., 1991.** - Une méthode d'analyse bidimensionnelle du retrait d'échantillons de sol. *Science du sol*. Vol. 29 - n° 2.
- HARRASOWITZ, H., 1926.** - Laterit *Fortschr. Geol. Paleontol.*, 4: 253-266.
- HARRISON, J.B., 1933.** - The katamorphism of igneous rocks under humid tropical conditions. *Imp. Bur. Soil, Sci. Harpenden*, 79 p.
- HARTMANN, C., 1991.** - Evolution et comportement de sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile. Cas de la plantation R. MICHAUX à Dabou (Côte d'Ivoire).

- Thèse Doct. Spéc. Pédologie, Univ. Paris VI. 201 p.
- HARTMANN, C., et al. 1992.** - Change in sandy oxisol organization under oil palm cultivation. Congrès International de micromorphologie des sols, Townville, Australie.
- HEINZELIN, de J., 1965.** - Observations sur la genèse des nappes de gravats dans les sols tropicaux. INEAC, Bruxelles, sér. Sci., 64.
- HENIN, S., 1938.** - Etude physicochimique de la stabilité structurale des terres. Thèse, Paris.
- HENIN, S. et HUTTER, W., 1964.** - Essai sur la gonflement comme mécanisme de la stabilité des sols. Extrait de Science du sol, n° 2.
- HENIN, S., GRAS, R. et MONNIER, G., 1969.** - Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Ed. MASSON, Paris, 2ème Ed., 322 p.
- HILLEL, F., 1974.** - L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander Louvain.
- HOMSHAW, L.G. and CAMBIER, P., 1980.** - Wet and dry pore size distribution in a kaolinitic soil before and after removal of iron and quartz. J. of Soil Sci., 31.
- HUMBEL, F.X., 1974.** - La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun: Une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XII, n° 1, pp.73-101.
- HUMBEL, F.X., 1976.** - L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun: Caractéristiques et comportement en relation avec les régimes hydriques et bioclimats. Thèse Univ. Paris VI, 306 p.
- JAMET, R. et RIEFFEL, J.M., 1976.** - Notice explicative n° 65, carte pédologique du Congo à 1/200 000 ème, feuille Pointe Noire, feuille Loubomo. ORSTOM, Paris, 167, 68 réf.
- JONGERIUS, A., SCHOONDERBEEK, D. and JAGER, A., 1980.** - The Application of the Quantimet 720 in micromorphology. The microscope, 20: 243-254.
- KILASARA, M., 1990.** - Evolution actuelle des sols de la couverture ferrallitique du secteur de MUHEZA (Tanzanie). Origine et conséquences. Thèse Doct. Univ. Paris VI.
- KOECHLIN, J., 1966.** - La végétation des savanes dans les pays du Niari. In "Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari, 1949-1964" (République du Congo). ORSTOM. 108 p.
- KOOISTRA, M.J., 1987.** - The effects of compaction and deep tillage on soil structure in a dutch sandy loam soil. Micromorphologie des sols - Soil micromorphology. pp. 445-450.
- KRISHNA MURTI, G.S.R., SINGH, G. and RENGASAMY, P., 1977.** - The nature of soil clay and the stability of microaggregates. Aust. J. Soil Res., 15, pp. 115-119.
- LACROIX, A., 1913.** - Les latérites de la Guinée et les produits de l'altération qui leur sont associés. Nouv. Arch. Mus. Hist. Nat. Paris, sér. 5, V: 255-356.
- LANFRANCHI, R. et SCHWARTZ, D., 1990.** - Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. Ed. ORSTOM, Paris.
- LAPORTE, G., 1962.** - Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée Comilog. IRSC (ORSTOM), Brazzaville, 246 p.
- LAURITZEN, C.W., 1948.** - Apparent specific volume and shrinkage characteristic soil materials. Soil Sci. 65, 155-179.
- LAWRENCE, G.P., 1977.** - Measurement of pore size in fine textured soils: a review of existing techniques. J. of Soil Sci., 28, pp. 527-540.
- LAWRENCE, G.P., 1978.** - Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. J. Soil Sci., 29, 299-304.
- LENEUF, N., 1959.** - L'altération des granites calco-alcalins et des granidiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse Doct. Sci., Paris, 210 p.
- LEPERSONNE, J., 1956.** - Surfaces d'érosion des hauts plateaux de l'intérieur de l'Afrique

- Centrale. (Analyse critique d'une étude de r.V. Ruhe). Bull. Ac. Roy. Sci. col. N.S II 4. pp. 596-621.
- LEPRUN, J.C., 1979. - Les cuirasses ferrugineuses des Pays cristallins de l'Afrique de l'Ouest sèche. Génèse, transformation, dégradation. Sci. Géol., Mém., Strasbourg, 58, 224 p.
- LUCAS, Y., 1977. - Etude pédologique de la région de Mouyondzi (R.P. Congo). Méthode de représentation cartographique. OSRTOM, Brazzaville.
- MALONGA J., 1958. - Entre l'Enclume et le Marteau. Les aventures de mon cousin Samba, aux prises avec les vicissitudes claniques, publié en feuilleton dans Liaison, à partir du n° 49 - 50.28 p.
- MAPANGUI, A., 1976. - Cartographie et caractérisation des sols du Complexe Agro-Industrielle d'Etat de Mantsoumba dans la Vallée du Niari (Congo). Etude pédologique de la ferme de Ndiba. Master of Agr. Sci. (Ingénieur Agronome). Inst. Sup. Agr., (KCXU), Krasnodar - URSS.
- MAPANGUI, A., 1981. - Carte morpho-pédologique à 1/20.000è entre Nkayi et Maléla. Carte des contraintes pour la culture de l'ananas. ORSTOM, Brazzaville.
- MAPANGUI, A., 1982.- Etude comparative des variations des propriétés physiques et hydriques des sols de grandes cultures industrielles (Vallée du Niari). ORSTOM, Brazzaville. (Mémoire 2è année élève-ORSTOM).
- MAPANGUI, A., 1988. - Mécanisation des cultures et conservation des sols ferrallitiques dans la Vallée du Niari (Congo). 9 ème réunion du comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols, 14 - 23 nov. 1988. Cotonou (BENIN).
- MAPANGUI, A., 1989. - Carte morpho-pédologique à 1/20.000è du bassin moyen de la Loukéné à Les Saras (Mayombe). UNESCO-Projet Mayombe/ORSTOM, Brazzaville.
- MARTIN, D., 1975. - Complexe Agro-Industriel d'Etat de Mantsoumba. Etude de la ferme de Mantsoumba. ORSTOM, Brazzaville. 40 p.
- MARTIN, D., 1975. - Fertilité chimique des sols d'une ferme du Congo. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. vol. XVII, n° 1, pp.44-64.
- MARTIN, D. et BOSSENO, R., 1977. - Etude pédologique de la région de la Dihessé-Makabana ORSTOM Brazzaville, 131, 2 carte 1/200 000 h.t.
- MARTIN, G., 1958. - Bilan de 4 années d'études pédologiques dans la Vallée du Niari. Bureau des sols de l'A.-E.F. Rapport ORSTOM à diffusion restreinte.
- MARTIN, G., 1962. - Etude de quelques facteurs de la structure des sols de la Vallée du Niari. Bull. de l'Institut de Recherches Scientifiques au Congo.
- MARTIN, G., 1970. - Synthèse agro-pédologique des études ORSTOM dans la Vallée du Niari. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol; vol. VIII, 1, pp. 64-79.
- McGARRY, D. and DANIELLS, J.G., 1987. - Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a vertisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1575-1580.
- McGARRY, D. and MALAFANT K.W.J., 1987. - The analysis of volume change in unconfined units of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 290-297.
- McGARRY, D. and SMITH K.J., 1988. - Indices of residual shrinkage to quantify the comparative effects of zero and mechanical tillage on vertisol. Aust. J. Soil Res., 1988, 26, 543-8.
- McNEIL, M., 1974. - Lateritics soils. In Plant Earth. reading Sci. Am., San Francisco, W.H. Freeman, 219-226.
- MICHELLAND-ABBE, S. et COSTER, M., 1991. - Extension des méthodes granulométriques en analyse d'images. Technologie appliquée. IERMT, URA CNRS n° 1317.
- MIEDEMA, R., PAPE, Th. and van De WALL, G.J., 1974. - A method to impregnate wet soil samples, producing high quality thin sections. Neth. Journ. Agric. Sci., 22, 37-39.

- MILLOT, G. et BONIFAS, M., 1955. - Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latérisation et bauxitisation. Bull. Serv. Carte géol. Als.-Lorr., Strasbourg, 8, 1: 585-593.
- MINISTERE DE LA COOPERATION, 1967. - Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari, 12 tomes.
- MOHR, J. and VAN BAREN, F., 1954. - Tropical soils. Interscience Pub., London, 498 p.
- MORAN, C.J. and McBRATNEY, A. B., 1988. - A method for dehydration and impregnation of soil. CSIRO Division of Soils technical memorandum 13/88.
- MULLER, D., BOCQUIER, G., NAHON, D. et PAQUET, H., 1981. - Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XVIII, 2: 87-109.
- MULLER, J.P., 1983. - Microorganization of loose ferrallitic materials in the Cameroun. p. 655-666. In P. Bollock and C.P. Murphy (Ed.) Soil micromorphol. Proc. Work. Meet. on Soil Micromorphology, 6th. London. August 1981. AB Academic Publ., Berkhamsted, U.K.
- MULLINS, C.E. and PANAYIOTOPOULOS K., P., 1984. - Compaction and shrinkage of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. Journal of soil science, 35, pp. 459-468.
- MURPHY, C.P., 1978. - Pore space variability in sub-surface horizon of two soils. J. of Soil Sci., 29: 156-166.
- NAHON D., 1976. - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal Occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs. Géochimie, Structures, Relais et Coexistence. Sci. Géol., Strasbourg, Mém., 44, 232 p.
- NORTON, S.A., 1973. - Laterite and bauxite formation. Econ., Geol., 68, 3: 353-361.
- NOVIKOFF, A., 1974. - L'altération des roches dans le massif du Chaillu (République Populaire du Congo). Formation et évolution des argiles en zones ferrallitiques. Thèse Doct. Sci. Nat., Strasbourg, 300 p.
- NYETE, B., 1991. - Les composantes du rendement du manioc. Projet Congo/IBSRAM. ORSTOM, Brazzaville.
- NZILA, J.D., 1992. - La pratique de l'écobuage dans la Vallée du Niari (Congo). Ses conséquences sur l'évolution d'un sol ferrallitique acide. Thèse de doctorat. Document ORSTOM Montpellier, n°7.
- PEDRO, G. et TESSIER, D., 1985. - Importance de la prise en compte des paramètres texturaux dans la caractérisation des argiles. In 5th Meeting of European Clay groups, Prague, pp. 417-428. Charles University, Prague.
- PETIT, M., 1975. - Les paysages calcaires dans la vallée du Niari et de la Nyanga. Trav. et doc. de géogr. trop. n° 4 pp. 111-143.
- POSS, R., 1987. - La modélisation de la porosité des horizons gravillonnaires à partir de lois d'assemblage. Cah. ORSTOM, sér. pédol., Vol. XX, N° 2, pp. 147-153.
- POSS, R., 1991. - Transfert e l'eau et des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse Doct. Univ. Paris VI. Spéc.Pédol.
- PRESCOTT, J.A. and PENDLETON, R.L., 1952. - Laterite and lateritic soils. Commonwealth Bur. of Soil Sci. techn. comm. 47, London.
- QUIRK, J.P. and PANABOKKE, C.R., 1962. - Pore volume size distribution and swelling of natural soil aggregates. J. of Soil Sci., 13, pp.71-81.
- RAUNET, M., 1982. - Reconnaissance morphopédologique dans la plaine de la Livouba (Vallée du Niari). Recherche d'un périmètre arachidier. IRAT, 54 p. + annexes.
- RICHARDS, L.A., 1941. - A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci. (51) 377-386.
- RIEU, M., et SPOSITO, G., 1991. - Relation pression capillaire-teneur en eau dans les milieux poreux fragmentés et identification du caractère fractal de la structure des sols. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, série II, pp. 1483-1489.

- RINGROSE-VOASE, A.J. et BULLOCK, P., 1984. - The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, 35, pp. 673-684.
- RIQUIER, J., 1969. - Contribution à l'étude des "stone-line" en région tropicale et équatoriale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, 1: 71-111.
- ROBERT, M. et TESSIER, D., 1974. - Méthode de préparation des argiles des sols pour études minéralogiques. *Ann. Agro.* 25 (6) 859-882.
- ROBERT, M., HARDY, M. and ELSASS, F., 1991. - Crystallochemistry, properties and organization of soils clay derived from major sedimentary rocks in France. *Clay Minerals* 26, pp. 409-420.
- ROMERO, R., ROBERT, M., ELSASS, F. and GARCIA, C., 1991. - Evidence by transmission electron microscopy of weathering microsystems in soils developed from crystalline rocks. *Clay Minerals*, 27, pp. 21-23.
- ROSELLO, V., MULLER, J.P., ILDEFONSE, Ph. et BOCQUIER, G., 1982. - Analyse de transformations structurales et minéralogiques, par altération et pédogénèse, d'une migmatite de l'Est du Cameroun. *Ann. Fac. Sci. Yaoundé, Cameroun*, IV, 1, 1: 7-34.
- SALA, G.-H., et TESSIER, D., 1992 - Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. C.R. 2. Noté présentée par Georges PEDRO
- SAMBA-KIMBATA, M.J., 1978. - Le climat du Bas-Congo. Thèse 3ème Cycle, Univ. Dijon, Fac. Lettres.
- SAUTTER, G., 1966. - De l'Atlantique au fleuve Congo. Une géographie du sous-développement. Paris, Mouton, 120 p.
- SERRA, J., 1982. - Image analysis and mathematical morphology. Academic Press.
- SERRA, J., 1989. - Image analysis and mathematical morphology. Theoretical advances. Vol. II. Academic Press.
- SCOLARI, G., 1965. - Etude géologique du bassin du Niari occidental et de ses minéralisations. *Mém. BRGM*, n° 35, 219 p.
- SEGALEN, P., 1969. - Le remaniement des sols et la mise en place de la stone-line en Afrique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, 1: 113-132.
- SHEIN, Ye., BEREZIN, P.N. and GUDIMA, I.I., 1988. - Differential porosity of soils. Translated from: *Pochvovedeniye*, n° 3: 53-65.
- SHIEL, R.S., ADEY, A. and SHANNON, J.B., 1988. - The macroporosity of artificial aggregates of varying texture. *J. of Soil Sci.*, 39, pp.629-638.
- SPOSITO, G., GIRALDEZ, J.V. and REGINATO, R.J., 1976. - The theoretical interpretation of observations of soil swelling through a material coordinate transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 208-211.
- SPURR, A.R., 1969. - A low-viscosity epoxy resin embedding medium for electron microscopy. *Ultrastructure research* (26) 31-43.
- SORET, M., 1965. - Le chemin de fer Congo-Océan. Son importance économique et sociale. Thèse Compl. Doct. es-lettres Univ. de Lyon. Tomes I et II.
- 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, pp.25-51.
- STENGEL, P., 1981. - Influence des variations de teneur en eau sur l'espace poral: Phénomènes de retrait gonflement. *Bull. Gr. Fr. Humidimétrie Neutronique*, 10, 7-9.
- STIRK, G.B., 1954. - Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into soils. *Austr. J. Agricul. Res.*, 5, 279-290.
- STOOPS, G., 1967. - Le profil d'altération au Bas-Congo (Kinshasa). *Pédologie*, XXV, 2: 71-79.

- SYS, C., 1965.** - Tropical soils, their formation, classification, survey and utilization. Intern. Train. Centre Post-Graduate. Soil Scient., Ghent, Belgique, 203 p.
- 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 de Doctorat ès Science Université Paris VII. INRA Versailles.
- TESSIER, D. et BERRIER, J., 1979.** - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations de sols humides soumis à différents pF. Sci. du Sol, n° 1, pp. 67-82.
- TESSIER, D. et PEDRO, G., 1980.** - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. C.R. Acad. Sci., Paris, sér. D, 291 (5), 461-464.
- TESSIER, D., PEDRO, G. et CAMARA, L., 1980.** - Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 290.
- TESSIER, D. et QUIRK, J. P., 1979.** - Sur l'apport de la microscopie électronique dans la connaissance du gonflement des matériaux argileux. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 288 (14 mai 1979) Série D - 1375.
- TESSIER, D., LAJUDIE, A. and PETIT, J.-C., 1992.** - Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. applied Geochemistry, Suppl. Issue n° 1 pp. 151-161.
- TOUTOU-MISSIE, E., 1985.** - Impact de la mécanisation agricole sur les sols de la région de la Bouéza. Cas particulier du CAIEM: Mémoire de fin d'étude de l'Institut du Développement Rural. IDR, Brazzaville, Congo.
- TRICART, J.P., BREVART, O., BARANGER, R. et MARTINEZ, L., 1991.** - Analyse quantitative d'images électroniques et chimiques. Quantitative image analysis for scanning electron microscopy. Soc. Nat. Elf Aquitaine (production), F-31360 bouessens.
- VACHIER, P., CAMBIER, P. et PROST, R., 1979.** - Structure d'un milieu poreux: La craie. Ann. agro., 30 (3), 247-263.
- VANNIER, G., 1987.** - The porosphere as an ecological medium emphasized in Professor Ghilarov's work on soil animal adaptations. Biol. Ferttil. Soils, 3.
- Van OORT, F., 1984.** - Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogénèse. Application à des sols sous prairie et alpage, issus de l'altération des calcschistes sédimentaires en moyenne et haute montagne, Alpes du Nord (Beaufortain). Thèse Doct. Ing., INAPG, 275 p.
- Van OORT, F., TESSIER, D. et ROBERT, M., 1987.** - Méthodes d'observation et de mesure de la structure du sol. Application à la pédogénèse d'un sol développé sur Calcshale. Micromorphologie des sols - soil micromorphology.
- VENNETIER, P., 1966.** - Géographie du Congo-Brazzaville. Gauthier-Villars. Paris.
- VOLTZ, M. et CABIDOUCHE, Y.M., 1988.** - Variation isotropes de volume en sols argileux hétérogènes I. Modélisation.
- WHITE, E.M., 1962.** - Volume changes in some clay soils. Soil Sci., 94: 168-172.
- WILDING, L. and TESSIER, D., 1988.** - Genesis of vertisol: shrink-swell-phenomena. In vertisols: their distribution, properties, classification and management, (eds L. Wilding and R. PUENTES), pp. 55-81. Texas A and M, College Station.
- YOUNG, I.M. and CRAWFORD, J.W., 1991.** - The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. Journal of Soil Science, 42: 187-192.
- ZELIGER, A.M., and VORONIN, A.D., 1988.** - Modeling the structure of the pore space of soils. Translated from: Pochvovedeniye, n° 4: 49-59.



## **TABLES**



# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE III

- TABLEAU III.1 : Valeurs des coefficients K et x dans chaque phase de retrait d'un échantillon décimétrique de sol non perturbé et nature du retrait
- TABLEAU III.2 : Expression de l'état énergétique de l'eau des échantillons secs et taille maximale de pores remplis d'eau (TESSIER, 1984)
- TABLEAU III.3 : Principaux paramètres morphologiques obtenus par analyse d'images sur lames minces de sol en utilisant le logiciel Visilog

## CHAPITRE IV

- TABLEAU IV.1: Répartition des soles de l'essai central, en ouverture de la savane, depuis son implantation en novembre 1987
- TABLEAU IV.2: Répartition des soles de l'essai périphérique, sur site dégradé, depuis son implantation en novembre 1987
- TABLEAU IV.3: Parcelles étudiées dans l'essai central (I) et l'essai périphérique (II) et fumure minérale moyenne (kg.ha-1)
- TABLEAU IV.4: Production de racines fraîches de manioc et de biomasse aérienne sèche des plantes naturelles (à 9 mois), ou cultivées à la récolte (moyennes de 8 mesures dans 4 parcelles)

## CHAPITRE V

- TABLEAU V.1: Caractéristiques physico-chimiques du sol témoin, sous savane (extraction au chlorure de cobaltihexamine) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU V.2: Taux de matière organique, du fer total et acidité du sol témoin, sous savane (extraction au chlorure de cobaltihexamine) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU V.3: Granulométrie du sol sous savane (terre fine après destruction de la matière organique) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU V.4: Volume massique total et masse volumique de cylindres du sol sous savane à Mantsoumba (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU V.5: Volume massique et masse volumique des particules solides du sol sous savane (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU V.6: Volume massique d'eau, en saison de pluies, en saison sèche et à pF 4,2, du sol sous savane (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

## CHAPITRE VI

- TABLEAU VI.1: Caractéristiques physico-chimiques du sol, sous culture de manioc sur site dégradé par quinze ans de mécanisation (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU VI.2: Taux de matière organique, du fer total et acidité du sol sous manioc, sur site dégradé (extraction au chlorure de cobaltihexamine) (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU VI.3: Granulométrie du sol sous culture de manioc en mécanisé depuis près de 15 ans (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU VI.4: Volumes massiques et masses volumiques de cylindres du sol, et des particules solides, sous manioc, du sol dégradé (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)

## CHAPITRE VII

- TABLEAU VII.1: Volume massique de vides ( $v_v$ ) aux points E et A, écart-types et pente de la droite C-B ( $K_2$ ) du sol sous savane (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.2: Volume massique de l'eau ( $w_E$ ) aux points E et A et la pente de la droite FE ( $K_1$ ) pour les échantillons provenant du sol sous savane (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.3: Volume massique de vides ( $v_v$ ) aux points E et A, écart-types et pente de la droite C-B ( $K_2$ ) du sol sous culture de manioc (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.4: Volume massique de l'eau ( $w_E$ ) aux points E et A et la pente de la droite FE ( $K_1$ ) pour les échantillons provenant du sol sous culture de manioc (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.5: Volume et potentiel de l'eau au point E ( $w_E$  et  $H_E$ ) et au

- décrochement du tensiomètre ( $w_{\text{déc}}$  et  $H_{\text{déc}}$ ), pour les échantillons provenant du sol sous savane (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.6: Volume et potentiel de l'eau au point E ( $w_E$  et  $H_E$ ) et au décrochement du tensiomètre ( $w_{\text{déc}}$  et  $H_{\text{déc}}$ ), pour les échantillons provenant du sol sous culture mécanisée de manioc (moyenne de 16 répétitions dans 4 profils)
- TABLEAU VII.7: Valeurs de la dimension fractale (D) et de l'écart-type des échantillons provenant des différents horizons étudiés (moyenne 10 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU VII.8: Evolution, en fonction du potentiel de l'eau, de l'aire porale totale (en  $\text{cm}^2/\text{cm}^2$ ) des échantillons étudiés de l'eau (moyennes de 4 mesures)
- TABLEAU VII.10: Evolution, en fonction du potentiel de l'eau, de l'indice de forme des macropores ( $f$ ) des échantillons étudiés (moyenne de 4 mesures)
- TABLEAU VII.11: Evolution, au cours de la dessiccation, de l'aire, du périmètre et de l'indice de forme des pores des horizons Ap2 (sous manioc), AB et B2 (sous savane), d'un sol ferrallitique argileux

## CHAPITRE X

- TABLEAU X.1: Réserves en eau des horizons A1, AB et B2 sous savane et des horizons Ap1 et Ap2 sous culture de manioc, sur site mécanisé depuis 15 ans (moyennes de 12 mesures dans 4 parcelles)
- TABLEAU X.2: Macroporosité des horizons A1 et AB sous savane et des horizons Ap1 et Ap2 sous culture de manioc, en conditions humides, sur site mécanisé depuis 15 ans (moyennes de 15 mesures dans 4 parcelles)

# LISTE DES FIGURES ET DES PLANCHES

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

- FIGURE I.1 a:** Situation de la zone d'étude par rapport au monde et à l'Afrique  
**FIGURE I.1 a:** Situation de la Vallée du Niari au Bas-Congo
- FIGURE I.2:** Vents dans les basses couches atmosphériques et traces au sol des surfaces de discontinuité: équateur météorologique (ITCZ) et confluence interocéanique (IOC)A: en Juillet; B: en Janvier (Source: CLAIRAC et. al., 1989)
- FIGURE I.3 a:** Pluviométrie annuelle moyenne dans le Bassin du fleuve Niari (Source: CLAIRAC et. al., 1989)
- FIGURE I.3 b:** Histogrammes comparés de l'évolution saisonnière à Pointe-Noire (plaine côtière), à Dimonika (Mayombe) et à Loubomo (Vallée du Niari) (Source: CLAIRAC et. al., 1989)
- FIGURE I.4 a:** Evolution de l'ensoleillement moyen mensuel à Pointe-Noire, Dimonika (Mayombe) et à Loubomo ou Dolisie (Vallée du Niari) (Source: CLAIRAC et. al., 1989)
- FIGURE I.4 b:** Evolution des températures moyennes mensuelles à Pointe-Noire, à Dimonika (Mayombe) et à Loubomo (Vallée du Niari) (Source: CLAIRAC et. al., 1989)
- FIGURE I.5:** Carte géologique schématique du Bassin du fleuve Niari (Sud Congo) (Source: VENNETIER, 1966)
- FIGURE I.6:** Organisation des couvertures ferrallitiques dans le bassin du fleuve Niari (Source De BOISSEZON et al., 1975)
- FIGURE I.7:** Réseau hydrographique du Bassin du fleuve Niari et débits hydrographiques mesurés à différents niveaux du cours de ce fleuve (Source VENNETIER, 1966)
- FIGURE I.8:** Principaux type de végétation au Congo (Source VENNETIER, 1966)
- FIGURE I.9:** Carte pédologique de la Vallée du Niari (entre Loutété et Jacob) et de ses environs(extrait de la carte pédologique de Madingou dressée par DENIS et RIEFFEL, 1975)

### CHAPITRE II

- FIGURE II.1 :** Bloc diagramme de la Vallée du Niari et de ses environs : topographie, hydrographie et substratum géologique
- FIGURE II.2 a :** Distribution spatiale des sols du géosynclinal Schisto-calcaire, entre Loudima et Loutété (Source GUILLEMIN et al., 1959)
- FIGURE II.2 b:** Coupe schématique, N.S., du géosynclinal Schisto-calcaire, entre Loudima et Loutété (Source GUILLEMIN et al., 1959)

### CHAPITRE III

- FIGURE III.1:** Echange eau-acétone-résine, en flux continu, pour la déshydratation et l'imprégnation d'échantillons de sol non perturbés (Source: MORAN et al., 1988)
- FIGURE III.2:** Représentation schématique des relations volumiques et massiques entre les trois phases du sol: particules solides (s), eau (w) et air (a) (ANGULO, 1989)
- FIGURE III.3 a:** Courbe de retrait sigmoïdale (v) et sa dérivée (dV/dw), pour des échantillons décimétriques de sol
- FIGURE III.3 b:** Courbe de retrait sigmoïdale: représentation des différentes phases de retrait d'échantillons décimétriques de sol ferrallitique argileux
- FIGURE III.4:** Courbes de potentiel de l'eau d'un échantillon décimétrique de sol non perturbés
- FIGURE III.5:** Gamme de niveaux de gris compris entre 0 (noir) et 225 (blanc)
- FIGURE III.6:** Mailles carrées (a, b, c, d et e) et hexagonales (f) ainsi que leur rayon équivalent par rapport au cercle
- FIGURE III.7:** Schéma montrant la pénétration du mercure dans un pore de forme quelconque (d'après VACHIER et al., 1979)
- FIGURE III.8:** Cellule de porosimétrie à mercure.  $h_0$  = hauteur initial du mercure au-dessus des échantillons

## CHAPITRE IV

**FIGURE IV.1 a:** Situation du site expérimental dans la Vallée du Niari  
**FIGURE IV.1 b:** Le dispositif de l'essai central à Mantsoumba

## CHAPITRE V

**FIGURE V.1:** Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse de l'horizon B2 du sol témoin sous savane  
**FIGURE V.2:** Courbes thermo-gravimétrique des horizons A1 (a) et B2 (b) du sol sous savane  
**FIGURE V.3:** Principales caractéristiques physico-chimiques (pH, bases échangeables, Aluminium et Manganèse échangeables) et teneur en matière organique du sol sous savane  
**FIGURE V.4:** Granulométrie de la terre fine du sol sous savane  
**FIGURE V.5:** Profils de volume massique de particules solides et de cylindres du sol sous savane  
**FIGURE V.6:** Comparaison de profils hydriques saisonniers et de l'humidité à pF 4

## CHAPITRE VI

**FIGURE VI.1:** Evolution des caractéristiques physico-chimiques (pH, aluminium, calcium et manganèse échangeables) et de la teneur en matière organique du sol sous culture mécanisée de manioc  
**FIGURE VI.2:** Evolution des caractéristiques physico-chimiques (Somme de bases échangeables, azote total et capacité d'échange cationique) et de la teneur en matière organique du sol sous culture mécanisée de manioc  
**FIGURE VI.3:** Granulométrie de la terre fine du sol sous culture de manioc  
**FIGURE VI.4:** Modifications des volumes massiques du sol sous culture mécanisée de manioc par rapport au sol témoin sous savane  
**FIGURE VI.5:** Modifications des masses volumiques du sol sous culture mécanisée de manioc par rapport au sol témoin sous savane

## CHAPITRE VII

**FIGURE VII.1:** Courbes de retrait et courbes de saturation ( $w+vs$ ) des horizons A1, AB et B2 du sol sous savane  
**FIGURE VII.2:** Comparaison du volume poral, à l'état humide (point E) et sec (point A) des horizons A1, AB et B2 du sol sous savane  
**FIGURE VII.3**  
**FIGURE VII.4:** Courbes de retrait et courbes de saturation des horizons Ap1 et Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc  
**FIGURE VII.5 a:** Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon A11 du sol sous savane  
**FIGURE VII.5 b:** Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon A12 du sol sous savane  
**FIGURE VII.5 c:** Ajustement quasi exact, au modèle, de la courbe mesurée de l'horizon A12 du sol témoin sous savane  
**FIGURE VII.5 d:** Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon AB du sol témoin sous savane  
**FIGURE VII.6 a:** Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon Ap1 du sol sous culture mécanisée de manioc  
**FIGURE VII.6 b:** Courbe de potentiel de l'eau dans l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc  
**FIGURE VII.7:** Evolution, en fonction du potentiel, de l'aire totale des macropores de l'horizon Ap2 sous culture de manioc (moyenne de 4 mesures)  
**FIGURE VII.8:** Evolution, en fonction du potentiel, du périmètre des macropores des horizons AB et B2 du sol sous savane (moyenne de 4 mesures)  
**FIGURE VII.9:** Evolution comparée, en fonction du potentiel, du périmètre des macropores des AB du sol sous savane et Ap2 sous culture de manioc (moyenne de 4 mesures)  
**FIGURE VII.10:** Evolution, en fonction du potentiel, de l'indice de forme des macropores des horizons AB et B2 du sol sous savane (moyenne de 4 mesures)  
**FIGURE VII.11:** Evolution comparée, en fonction du potentiel, de l'indice de forme des macropores des AB du sol sous savane et Ap2 sous culture de manioc (moyenne de 4 mesures)  
**FIGURE VII.12 a:** Evolution, au cours de la dessiccation, de l'aire cumulée des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon AB du sol témoin sous savane  
**FIGURE VII.12 b:** Evolution, au cours de la dessiccation, du spectre des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon AB du sol témoin sous savane  
**FIGURE VII.12 c:** Evolution, entre pF  $\sim 0$  et pF 6, du volume des macropores ( $3 \mu m \leq R_{eq} \leq 1000 \mu m$ ) de l'horizon AB du sol témoin sous savane. Taille critique de pores ( $R_{eq} = 300 - 500 \mu m$ )  
**FIGURE VII.13 a:** Evolution, au cours de la dessiccation, de l'aire cumulée des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon B2 du sol témoin sous savane

**FIGURE VII.13 b:** Evolution, au cours de la dessiccation, du spectre des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon B2 du sol témoin sous savane

**FIGURE VII.14 a:** Evolution, au cours de la dessiccation, de l'aire cumulée des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

**FIGURE VII.14 b:** Evolution, au cours de la dessiccation, du spectre des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) de l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

**FIGURE VII.15 a:** Comparaison, à l'état humide (pF 0), du spectre des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) entre les horizons sub-superficiels AB du sol sous savane et Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

**FIGURE VII.15 b:** Comparaison, à l'état sec (pF 6), du spectre des macropores ( $R_{eq} \geq 30 \mu m$ ) entre les horizons sub-superficiels AB du sol sous savane et Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

## CHAPITRE VIII

**FIGURE VIII.1 a:** Spectre de micropores et d'une partie de macropores d'un agrégat millimétrique sec provenant de l'horizon A1 du sol témoin sous savane

**FIGURE VIII.1 b:** Spectre de micropores et d'une partie de macropores d'un agrégat millimétrique sec provenant de l'horizon AB du sol témoin sous savane

**FIGURE VIII.1 c:** Spectre de micropores et d'une partie de macropores d'un agrégat millimétrique sec provenant de l'horizon B2 du sol témoin sous savane

**FIGURE VIII.2 a:** Spectre de micropores et d'une partie de macropores d'un agrégat millimétrique sec provenant de l'horizon Ap1 du sol sous culture mécanisée de manioc

**FIGURE VIII.2 b:** Spectre de micropores et d'une partie de macropores d'un agrégat millimétrique sec provenant de l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc

## LISTE DES PLANCHES

### CHAPITRE I

**PLANCHE I.1:** Plateaux et savane de la Vallée du Niari

a: Vue générale d'une partie des plateaux de la Vallée du Niari et des reliefs périphériques

b: Vue détaillée de la savane à *Hyparrhenia diplandra* dans le Niari

c: Brûlis annuel de la savane en saison sèche (mois de juillet)

### CHAPITRE III

**PLANCHE III.1:** Equipement de prélèvement d'échantillons non perturbés (photo 1) et échantillons humides en cours d'humectation jusqu'à saturation (photo 2). Source BRAUDEAU (1989)

**PLANCHE III.2:** Détail du dispositif de mesure du retrait

### CHAPITRE IV

**PLANCHE IV.1:** Travaux culturels pratiqués dans les parcelles sous culture de manioc à Mantsoumba (Vallée du Niari)

a: Désherbage manuel (à 1 an de la plantation)

b: Gyrobroyage du manioc envahi par le *Mimosa pudica* (à 2 ans)

c: Récolte du manioc par dessouchage des tubercules à l'aide d'une pioche (à 2 ans)

d: Labour de la parcelle de grande culture quelques jours après la récolte

### CHAPITRE V

**PLANCHE V.1:** Profil du sol ferrallitique jaune argileux (sous savane) de la Vallée du Niari (Congo)

a: prélèvement pour densité apparente

A1: Horizon humifère superficiel

AB: Horizon subsuperficiel de transition

B2: Horizon B2 profond (matériau ferrallitique)

**PLANCHE V.2:** Organisation du sol de savane: plasma abondant (p); vides nombreux (v); quelques traits pédologiques tels que concentrations plasmiques (c) en A1, intercalations (i) en AB et argillanes (a) en B2;

squelette essentiellement quartzeux (q)

## CHAPITRE VI

**PLANCHE VI.1:** Profils culturaux sous culture de manioc mécanisée depuis 15 ans (à Mantsoumba dans la Vallée du Niari)

- a: Labour aux disques
- b: passage de la roue de tracteur
- c: Labour à la charrue à soc
- t: Tubercule de manioc
- r: trace de roue de tracteur

## CHAPITRE VII

**PLANCHE VII.1:** Comparaison, à pF 0 (humidité à saturation), de l'organisation macroscopique des horizons A1, AB et B2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous savane v: vide a: agrégat

**PLANCHE VII.2:** Comparaison, à pF 4 (c'est-à-dire en sol sec), de l'organisation macroscopique des horizons A1, AB et B2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous savane: fissure de retrait a: agrégat

**PLANCHE VII.3:** Comparaison, à pF 4 (c'est-à-dire en sol sec), de l'organisation macroscopique des horizons Ap1, et Ap2 d'un sol ferrallitique jaune, argileux sous culture de manioc a: Horizon Ap1 (0-5 cm) c: Horizon Ap2 (10-15 cm) b: Horizon Ap1 (5-10 cm) d: Horizon Ap2 (15-20 cm)

## CHAPITRE VIII

**PLANCHE VIII.1 a:** Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon A1 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores cylindriques (Req = 3 - 6  $\mu\text{m}$ )

**PLANCHE VIII.1 b:** Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon AB (observations MEB en rétrodiffusion): peu de pores résiduels polyconvexes (Req = 3 - 6  $\mu\text{m}$ ) et rares fissures

**PLANCHE VIII.1 c:** Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon B2 (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores résiduels polyconvexes (Req = 6 - 12  $\mu\text{m}$ ) parfois anastomosés

**PLANCHE VIII.1 d:** Organisation de l'argile, à l'état humide, dans l'horizon Ap2 du sol sous culture de manioc (observations MEB en rétrodiffusion): nombreux pores (Req = 3 - 6  $\mu\text{m}$ ) et rares fissures

**PLANCHE VIII.1:** Organisation de l'argile: assemblage des cristallites dispersés dans l'horizon AB et dans l'horizon b2 (observations MET x 2900 x 2,5)

**PLANCHE VIII.2:** Organisation de l'argile: assemblage des cristallites dispersés dans l'horizon AB et dans l'horizon Ap (observations MET x 2900 x 2,5)

**PLANCHE VIII.3:** Organisation de l'argile: assemblage des cristallites agrégés en microagrégats dans l'horizon B2 et dans l'horizon AB, ainsi que celui des cristallites dispersés dans l'horizon Ap (observations MET x 51000 x 2,5)

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION GENERALE

### PREMIERE PARTIE:

## APPROCHE SPATIALE DES COUVERTURES PEDOLOGIQUES DANS LE BASSIN DU NIARI

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	1 5
CHAPITRE I: MILIEU PHYSIQUE: LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE NIARI	
A. CLIMAT	18
1. CARACTERISATION DU CLIMAT	18
a. Généralités	18
b. Saisons	18
1). <i>Températures</i>	20
2). <i>Humidité et tension atmosphériques</i>	20
3). <i>Précipitations</i>	20
4). <i>Nébulosité. Insolation</i>	22
2. CONCLUSION	22
B. GEOLOGIE	24
1. SUBSTRATUM GEOLOGIQUE	24
a. Schistes et quartzites du Mayombe	24
b. Calcaires, marnes, tillites et grès du Synclinal du Niari	24
c. Grès et argillites du schisto-gréseux	25
d. Granites du Chaillu	25
2. ALLUVIONS QUATERNAIRES	27
3. MATERIAUX ORIGINELS DES SOLS	27
a. Mise en place des matériaux ferrallitiques	27
b. Transformations minéralogiques et structurales des matériaux ferrallitiques	28
c. Organisation des couvertures ferrallitiques	29
4. CONCLUSION	31
C. CADRE PHYSIQUE	31
1. GEOMORPHOLOGIE	31
a. Hauts reliefs résiduels	32

1). <i>Massif du Mayombe et la plaine côtière</i>	32
2). <i>Massif du Chaillu</i>	33
3). <i>Plateau des Cataractes et ses avancées dans la Vallée du Niari</i>	33
b. Synclinal schisto-calcaire du Niari	33
1). <i>Collines et "hauts" plateaux schisto-calcaires</i>	34
2). <i>"Vallée" et "Boucle" du Niari</i>	34
a). <i>Bas plateaux et dépressions karstiques associées</i>	34
b). <i>Terrasses alluviales du Niari</i>	35
2. HYDROLOGIE	35
D. FORMATIONS VEGETALES	37
1. FORETS TROPICALES HUMIDES	38
a. Massifs forestiers	38
b. Forêts galeries	38
2. SAVANES TROPICALES HUMIDES	40
E. COUVERTURES PEDOLOGIQUES	42
1. SOLS FERRALLITIQUES	42
a. Sols ferrallitiques du Mayombe et de la Plaine côtière	42
b. Sols ferrallitiques du Synclinal schisto-calcaire du Niari	42
c. Sols ferrallitiques du Plateau schisto-gréseux	43
d. Sols ferrallitiques du massif du Chaillu	43
2. SOLS HYDROMORPHES	43
a. Sols hydromorphes de la région schisto-calcaire	43
b. Sols hydromorphes du Mayombe, du Chaillu et du Plateau des cataractes	44
3. SOLS ALLUVIAUX	44
F. CONCLUSION	46
<b>CHAPITRE II: VALLEE DU NIARI: UNITE DE PAYSAGE MORPHO-PEDOLOGIQUE</b>	
A. MORPHOGENESE DE LA VALLEE DU NIARI	48
B. TYPE DE SOLS DE LA VALLEE DU NIARI	51
1. CLASSIFICATION DES SOLS	51
2. ORGANISATION SPATIALE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI	51
C. MISE EN VALEUR DE LA VALLEE DU NIARI	54
1. UTILISATION AGRICOLE DES SOLS FERRALLITIQUES DE LA VALLEE DU NIARI	54

a. Activités de recherches	54
b. Unités agro-industrielles et "paysannats"	55
c. Agriculture paysanne: défriche-brûlis itinérante	57
D. CONCLUSION	59
<b>CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE</b>	61
<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
<b>MATERIEL, METHODES ET CARACTERISATION DE L'EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE</b>	
<b>INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE</b>	64
<b>CHAPITRE III: METHODES D'ETUDE PHYSIQUE D'ECHANTILLONS DE SOL NON PERTURBES</b>	
A. APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE	66
B. ECHANTILLONS DECIMETRIQUES DE SOL NON PERTURBES	66
1. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS NON PERTURBES	66
2. CONSERVATION DES ECHANTILLONS NON PERTURBES	67
C. DESHYDRATATION, IMPREGNATION DE CYLINDRES DE SOL NON PERTURBES	67
1. RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE ET LIMITES DE LA METHODE	67
2. MODE OPERATOIRE	68
D. APPROCHE MASSIQUE: CHOIX D'UN SYSTEME DE REFERENCE	70
1. OBJECTIF DE L'APPROCHE MASSIQUE	70
2. PRESENTATION DU SYSTEME DE REFERENCE UTILISE	70
3. NOTATIONS UTILISEES	71
E. ORGANISATION DU SOL ET DE L'ARGILE DU SOL	73
1. ORGANISATION DES MOTTES DE SOL, EN MICROSCOPIE OPTIQUE	73
2. ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL	73
a. A l'échelle microstructurale, en microscopie électronique à balayage, en rétrodiffusion	73
b. A l'échelle ultrastructurale, en microscopie électronique à transmission, à basse et à moyenne résolution	74
F. VARIATION DE VOLUME DU SOL EN FONCTION DE SA TENEUR EN EAU: COURBES DE RETRAIT DE MOTTES PAR "RETRACTOMETRIE"	74

1. RAPPEL DE LA MODELISATION DE COURBE DE RETRAIT, "MODELE CONTINU"	75
2. MATERIEL DE MESURE	78
3. PROCEDURE DE MESURE	78
4. TRAITEMENT DES DONNEES OBTENUES	80
5. PRECISION DES DONNEES OBTENUES	80
<b>G. SPECTRE MACROPORAL PARTIEL DE CYLINDRES DE SOL: COURBES DE POTENTIEL DE L'EAU</b>	<b>81</b>
1. RAPPEL DE LA MODELISATION DE LA RELATION PRESSION CAPILLAIRE- TENEUR EN EAU [H(W)]	81
2. PROCEDURE DE MESURE	82
3. PRESENTATION DES RESULTATS	82
<b>H. ESPACE MACROPORAL TOTAL PAR ANALYSE D'IMAGES DE LAMES MINCES ET MESURES MORPHO-MATHEMATIQUES</b>	<b>83</b>
1. ACQUISITION D'IMAGES BINAIRES	84
2. TRAITEMENT D'IMAGES	85
a. Notion de champ-image et "limite de résolution" de l'image	85
b. Sélection de pores	86
1). <i>A faible grossissement, en chambre noire</i>	86
2). <i>A moyen grossissement, au microscope polarisant</i>	86
3. ANALYSE MORPHO-MATHEMATIQUE D'IMAGES BINAIRES	86
a. Paramètres moyens	87
1). <i>Aire porale</i>	87
2). <i>Périmètre poral</i>	87
3). <i>Indice de forme des pores</i>	88
b. Analyse "granulométrique" binaire de l'espace poral	88
<b>I. ESPACE MICROPORAL, PAR INTRUSION DE MERCURE DANS DES AGREGATS MILLIMETRIQUES</b>	<b>90</b>
1. PRINCIPE DE LA METHODE	90
2. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE	91
3. PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS	93
<b>J. CONCLUSION</b>	<b>93</b>
<b>CHAPITRE IV: DISPOSITIF DE L'ESSAI AGRONOMIQUE</b>	
<b>A. GENERALITES</b>	<b>97</b>
<b>B. PARCELLES EXPERIMENTALES</b>	<b>97</b>
1. PARCELLES DE L'ESSAI CENTRAL SUR SAVANE, EN SITE NON DEGRADE	97

2. PARCELLES DE L'ESSAI PERIPHERIQUE, SUR SITE DEGRADE PAR QUINZE ANS DE CULTURE MECANISEE DE MANIOC	99
C. CHOIX DES PARCELLES POUR L'ÉTUDE PHYSIQUE SOL	100
D. TRAVAUX CULTURAUX PRATIQUES DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES	101
1). <i>Rabattage</i>	101
2). <i>Labour</i>	101
3). <i>Pulvérisage</i>	101
4). <i>Rayonnage</i>	101
5). <i>Plantation et entretien du manioc</i>	103
E. CHOIX DE LA VARIETE DE MANIOC TESTEE DANS LES ESSAIS	103
F. CONCLUSION	103

## **CHAPITRE V: CARACTERISATION DU SOL TEMOIN SOUS SAVANE**

A. DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL SOUS SAVANE	105
B. CARACTERISTIQUES MICROMORPHOLOGIQUES DU SOL SOUS SAVANE	107
1. MATERIEL ET METHODE	107
2. DIFFERENCIATION DE L'ORGANISATION A L'ECHELLE DES CONSTITUANTS DANS LE PROFIL DU SOL DE SAVANE	107
a. Résultats	107
b. Discussion	110
C. MINERALOGIE DU SOL SOUS SAVANE	110
1. DIFFRACTION AUX RAYONS X DE LA PHASE ARGILEUSE	110
a. Matériel et méthode	110
b. Résultats et discussion	112
2. ANALYSE THERMO-GRAVIMETRIQUE	112
a. Matériel et méthode	112
b. Résultats et discussion	112
D. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL SOUS SAVANE	114
1. MATERIEL ET METHODES	114
2. RESULTATS ET DISCUSSION	114
E. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL SOUS SAVANE	117
1. GRANULOMETRIE DE LA TERRE FINE	117
a. Matériel et méthode	117



**TROISIEME PARTIE**  
**ORGANISATION, ESPACE PORAL ET PROPRIETES**  
**PHYSIQUES DU SOL EN FONCTION DE SON ETAT**  
**HYDRIQUE**

<b>INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE</b>	<b>139</b>
<b>CHAPITRE VII: ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PROPRIETES</b> <b>PHYSIQUES MACROSCOPIQUES DU SOL</b>	
<b>A. ORGANISATION DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL EN</b> <b>MICROSCOPIE OPTIQUE</b>	<b>141</b>
1. EVOLUTION DE L'ORGANISATION DU SOL SOUS SAVANE	141
a. Résultats	141
b. Discussion	143
2. MODIFICATION DU SOL CONSECUTIVE A LA CULTURE MECANISEE	
DE MANIOC	145
a. Résultats	145
b. Discussion	145
3. CONCLUSION	145
<b>B. DYNAMIQUE, EN DESSICCATION, DE L'ESPACE PORAL DE CYLINDRES</b> <b>DECIMETRIQUES DE SOL</b>	<b>147</b>
1. VARIATION DE VOLUME DE SOL EN FONCTION DE SA TENEUR EN EAU:	
COURBES DE RETRAIT DU SOL	147
a. Variation de volume du sol de savane en fonction sa teneur en eau	147
1). <i>Résultats</i>	147
2). <i>Discussion</i>	149
b. Modifications du sol sous culture de manioc	150
1). <i>Résultats</i>	150
2). <i>Discussion</i>	150
3). <i>Comparaison avec le sol sous savane</i>	151
2. RELATION ENTRE LA PRESSION CAPILLAIRE ET LA TENEUR EN EAU AU SEIN	
DE CYLINDRES DECIMETRIQUES DE SOL	152
a. Caractéristiques de l'espace macroporal du sol sous savane	152
1). <i>Résultats</i>	152
2). <i>Discussion</i>	154
b. Modifications du sol sous culture de manioc	155
1). <i>Résultats</i>	155
2). <i>Discussion</i>	156

c. Caractère fractal de l'espace poral du sol	157
1) <i>Résultats</i>	157
2) <i>Discussion et interprétation</i>	158
d. Conclusion	159
<b>C. EXAMEN DES MACROPORES DU SOL EN ANALYSE D'IMAGES DE LAMES MINCES</b>	159
1. CARACTERISTIQUES GLOBALES: AIRE, PERIMETRE ET INDICE DE FORME DES MACROPORES DU SOL	159
a. Aire totale des macropores de cylindres décimétriques de sol	159
1). <i>Résultats</i>	159
a). <i>Caractéristiques du sol sous savane</i>	159
b). <i>Evolution du sol sous culture de manioc (Ap2)e</i>	161
2). <i>Discussion</i>	161
b. Périmètre total des macropores de cylindres décimétriques	162
1). <i>Résultats</i>	162
a). <i>Caractéristiques du sol sous savane (horizons AB et B2)</i>	162
b). <i>Modifications du sol sous culture de manioc (Ap2)</i>	163
c. Indice de forme de l'aire macroporale totale ( $I_f$ )	164
1). <i>Résultats</i>	164
2). <i>Discussion</i>	166
2. GRANULOMETRIE DE MACROPORES AU SEIN DE MOTTES: AIRE EN FONCTION DU RAYON DE PORE EQUIVALENT	167
a. Dynamique, en fonction de l'état d'hydratation, de l'espace macroporal de l'horizon AB du sol sous savane	167
1). <i>Etude de la réorganisation du sol au cours de sa dessiccation. Cas de l'horizon AB</i>	168
2). <i>Permanence d'un spectreporal entre 300 et 500 <math>\mu\text{m}</math></i>	170
3). <i>Discussion et interprétation</i>	170
b. Evolution dans le profil du sol sous savane: comparaison entre les horizons AB et B2	171
1). <i>Résultats</i>	171
2). <i>Discussion</i>	173
c. Evolution dans les horizons sub-superficiels Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc	174
1). <i>Résultats</i>	174
2). <i>Discussion</i>	175
<b>D. CONCLUSION</b>	177

**CHAPITRE VIII: ANALYSE DE L'ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL**

A. ORGANISATION DE L'ARGILE DU SOL	179
1. ASSEMBLAGE DE MICROAGREGATS ET ESPACE PORAL INTER-MICROAGREGATS	179
a. Résultats	179
1). <i>Différenciation de l'organisation micrométrique de l'argile dans le profil du sol sous savane</i>	179
2). <i>Modifications de l'organisation micrométrique de l'argile du sol sous culture de manioc</i>	182
b. Discussion et interpretation	182
2. ARRANGEMENT DES CRISTALLITES ET ESPACE PORAL NANOMETRIQUE OU INTER-CRISTALLITES	182
a. Résultats	182
1). <i>Différenciation de l'organisation nanométrique de l'argile dans le profil du sol sous savane</i>	184
2). <i>Modifications de l'organisation nanométrique de l'argile dans l'horizon Ap2 du sol sous culture mécanisée de manioc</i>	184
b. Discussion	184
B. ESPACE PORAL D'AGREGATS MILLIMETRIQUES: COURBES D'INTRUSION DE MERCURE	188
1. SPECTRE PORAL DE Req <b>COMPRIS</b> ENTRE 4 nm ET 100 $\mu$ m DU SOL SOUS SAVANE	188
a. Résultats	188
b. Discussion	189
2. MODIFICATIONS DE Req <b>COMPRIS</b> ENTRE 4 nm ET 100 $\mu$ m DU SOL SOUS CULTURE DE MANIOC	190
a. Résultats	190
b. Discussion	191
C. CONCLUSION	192
<b>CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE</b>	193
<b>QUATRIEME PARTIE</b>	
<b>SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS</b>	
<b>INTRODUCTION QUATRIEME PARTIE</b>	195
<b>CHAPITRE IX: INTERET D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE POUR</b>	

## L'ETUDE DE LA STRUCTURE DES SOLS

INTRODUCTION	197
A. CADRE METHODOLOGIQUE GENERAL	197
1. DISCUSSION SUR LES NIVEAUX D'ORGANISATION DU SOL ET LEUR RÔLE SUR LE COMPORTEMENT	198
a. Caractère évolutif de l'organisation du sol	198
b. Rôle des forces d'hydratation	198
c. Discussion sur l'existence d'un volume élémentaire représentatif (VER)	199
2. LIMITES DES MODELES UTILISES POUR L'ETUDE DU RETRAIT DU SOL	200
3. SIGNIFICATION DES POINTS SUR LA COURBE DE RETRAIT	201
4. APPLICATION A L'ETUDE DES SOLS. CARACTERISATION DE LA DEGRADATION PHYSIQUE	201
a. Sol témoin sous savane (exemple de sol non dégradé)	202
a. Sol témoin sous culture de manioc (exemple de sol dégradé)	202
5. IMPORTANCE DE L'ESPACE MACROPORAL NON ACCESSIBLE AUX MESURES DE RETENTION D'EAU (PORES DE $R_{eq} \geq 30 \mu m$ )	202
B. CONCLUSION	203
<b>CHAPITRE X: CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES DE NOUVELLES RECHERCHES</b>	
A. ETAT DE DEPART DU SOL SOUS SAVANE	204
B. MISE EN EVIDENCE DE CRITERES DE DEGRADATION DES PROPRIETES PHYSIQUES	205
C. ETAT PHYSICO-CHIMIQUE DU SOL CULTIVE	206
D. ETAT PHYSIQUE DU SOL CULTIVE	206
1. FRAGMENTATION ET COHESION DU SOL. MASSE VOLUMIQUE DU SOL	207
2. RESERVE UTILE DU SOL	208
3. AERATION DU SOL	209
4. EXPLORATION PAR LE SYSTEME RACINAIRE DES PLANTES	210
5. CONCLUSION	211
E. CONTRIBUTIONS AU MAINTIEN DE LA FERTILITE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI	211
1. GESTION DES TERRES	212
2. PERSPECTIVES DE NOUVELLES RECHERCHES EN SCIENCE DU SOL	212

F. CONCLUSION	213
<b>CONCLUSIONS GENERALES</b>	214
CADRE GENERAL DE L'ETUDE	215
ROLE DES DIFFERENTS NIVEAUX D'ORGANISATION SUR LES	216
ROLE DEL'ORGANISATION DU SOL SUR SON COMPORTEMENT.	
IMPORTANCE DES FORCES D'HYDRATATION	216
CONSEQUENCES AGRONOMIQUES	217
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>TABLES</b>	
LISTE DES TABLEAUX	230
LISTE DES FIGURES ET DES PLANCHES	232