

UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
(PARIS VI)

UNIVERSITE NANCY I

UNIVERSITE DE FRANCHE - COMTE

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
AGRONOMIQUE DE RENNES

D.E.A. DE PEDOLOGIE

HERVE COLLEUILLE.

SEPTEMBRE 1989.

Relation entre la structure et le comportement hydrodynamique
d'une couverture de sol sulfaté acide de BASSE-CASAMANCE
(SENEGAL)

Approche naturaliste
Apport de la rétractométrie

O.R.S.T.O.M. BONDY.
Laboratoire des Formations Superficielles.
Unité d'hydrophysique.

O.R.S.T.O.M. DAKAR.
Centre de HANN.
Laboratoire de Pédologie.

SOMMAIRE

Avant-propos

Introduction

1. **Le site, contexte et généralités.** 1

2. **Objets et méthodes** 3

**I° Partie Rappel sur les résultats du bilan hydrique "in situ".
Discussion.**

I.1. **Les données:** a) Méthodologie. b) Analyses et résultats. 6

I.2. **Discussion:** a) Relevé descriptif de l'appareillage in situ. 8
b) Discussion sur les conditions d'expérimentation. 10

**II° Partie Analyse par les méthodes morphologiques,
structurales et pédo-hydriques.**

II.1. **Observation de terrain et étude micromorphologique:** 14
a) Protocole d'approche - b) Descriptions - c) Etudes microstratigraphiques
d) Visualisation des pores et indurations - e) Observations micromorphologiques.

II.2. **Rétractométrie:** 31
a) Présentation: principe, théorie, appareillage et manipulation.
b) Résultats et constructions de profils pédo-hydriques.

III° Partie Synthèse. Discussion.

III.1. **Caractérisation quantitative:** 39
Discussion sur les données de la rétractométrie, du bilan hydrique, et des
études physico-chimiques.

III.2. **Caractérisation qualitative:** 48
Discussion sur les données descriptives, de la micromorphologie :
espace poral et indurations.

Conclusions. 51

Bibliographie 55

Annexe 61

Avant propos

Le déficit pluviométrique des deux dernières décennies, enregistré dans la région casamançaise, et les modifications irréversibles du milieu qu'il entraîne, sont des phénomènes déjà largement décrits dans la littérature (BARRY B. et al., 1988 ; BOIVIN P. et al., 1988 ; LOYER J.Y. et al., 1986 ; MARIUS C., 1985).

En résumé, **cette modification climatique se traduit par une véritable catastrophe écologique, économique et sociale.**

Dans ce contexte, un ensemble de recherches scientifiques pluridisciplinaires a été élaboré et, notamment conjointement par l'I.S.R.A. (Institut Sénégalais de Recherche Agricole) et l'O.R.S.T.O.M. (Institut Français de recherche scientifique pour le développement en coopération.).

Assurer l'optimisation des aménagements hydro-agricoles, par la connaissance de la dynamique des transferts hydriques est un des buts de la recherche actuelle. En effet, ce type d'étude, sur des sols de rizière de bas fonds, est à la base de la compréhension des phénomènes physicochimiques qui régissent les transformations du milieu (LE BRUSQ et al., 1987).

Le présent travail , qui fait l'objet d'un mémoire de D.E.A. de PEDOLOGIE, s'insère dans le cadre de ces études. Il s'est déroulé en sept mois, dont deux sur le terrain en **Basse Casamance.**

Je me permets ici, de remercier les équipes de recherche des laboratoires O.R.S.T.O.M. de Dakar (*Laboratoire de pédologie*) et Bondy (*Laboratoires des formations superficielles et d'hydrophysique*) pour leurs chaleureux accueils, leurs soutiens scientifiques et techniques.

Introduction

1) Le site, contexte et généralités.

Représentative du milieu, une parcelle d'un bas fond équipé d'un barrage anti-sel a été sélectionnée pour le déroulement d'une série d'études à plusieurs échelles, sur les transferts hydriques et les solutés associés : réseau piézométrique ; mesures d'infiltrabilités ; caractérisations hydrodynamiques du sol (BARRY B et al., 1988 ; BOIVIN P. et al., 1987 ; DIAWARA B., 1988).

Cartes en main, jetons brièvement le cadre de notre étude : Le site étudié se situe dans la vallée de **KATOURE** à une dizaine de kilomètres au Sud Ouest de **ZIGUINCHOR** en **Basse Casamance** (Sud Sénégal). Longitude $16^{\circ}18'$, latitude $12^{\circ}30'$, d'altitude très faible proche du niveau de la mer, le bas fond de **KATOURE** fait partie du bolong du **KAMOBÉUL**, principal affluent de la rive gauche de la **CASAMANCE**.

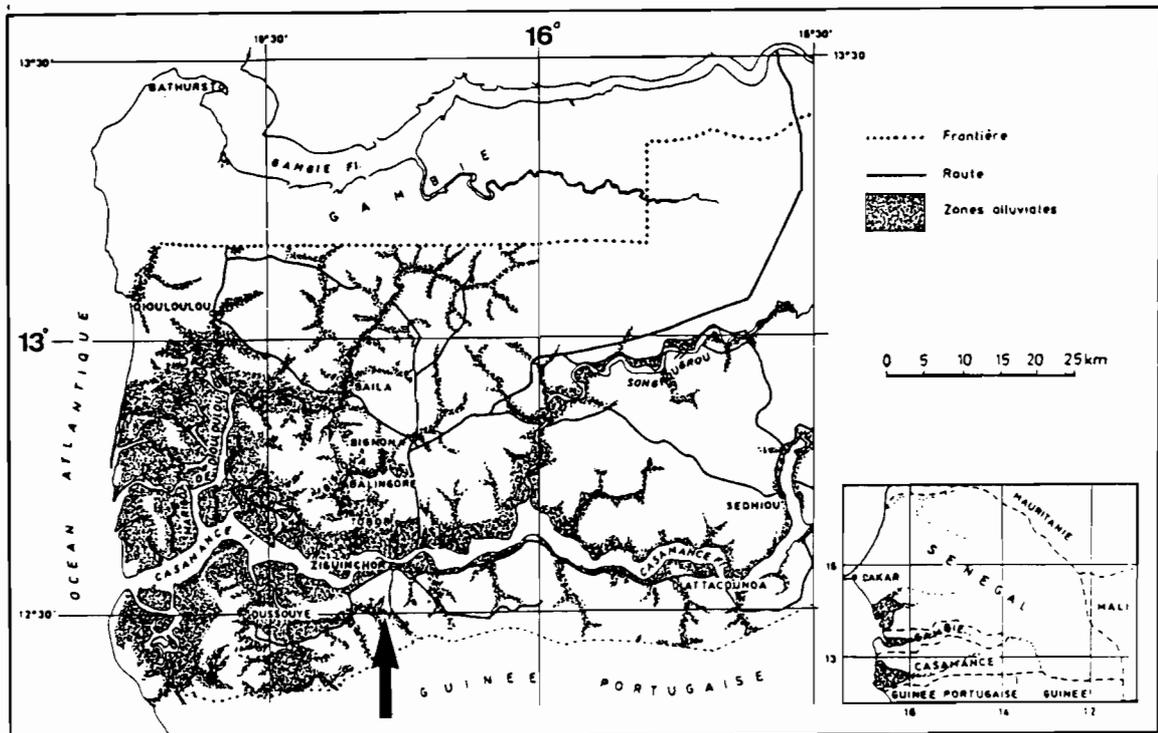
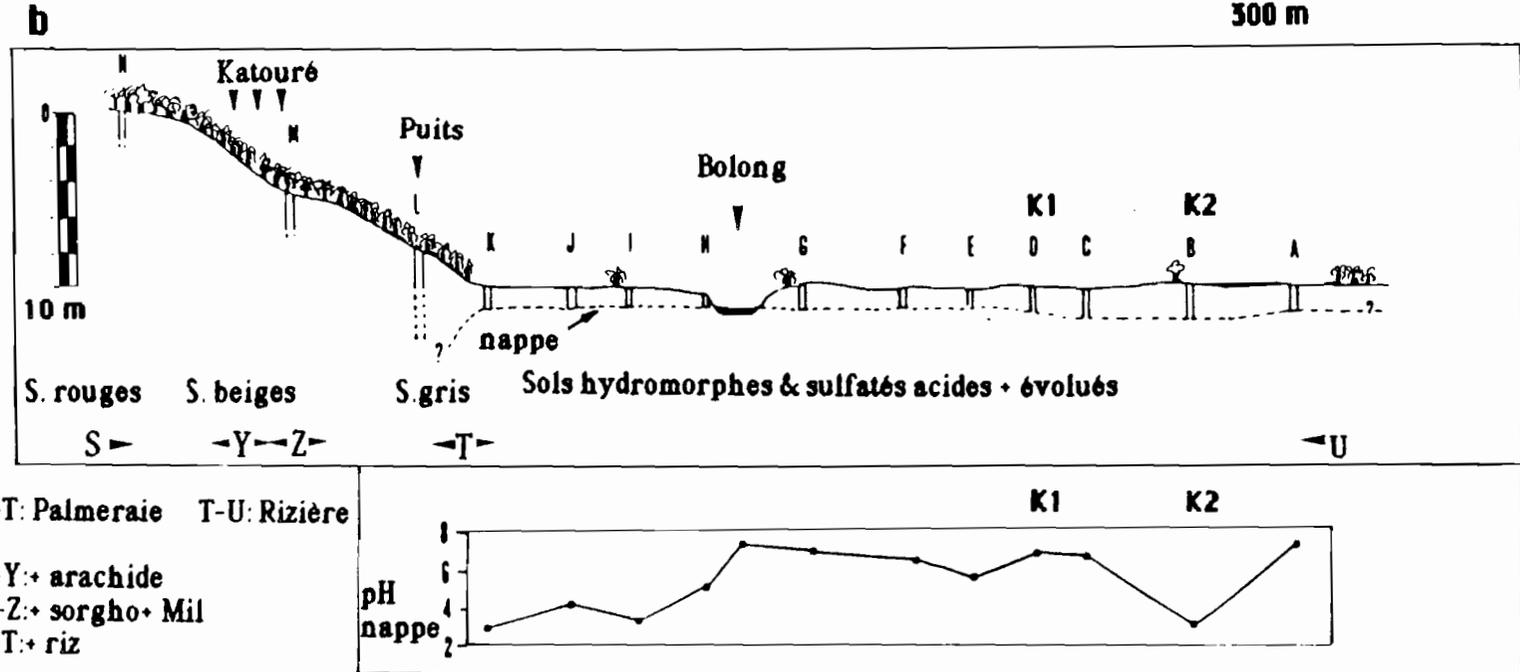
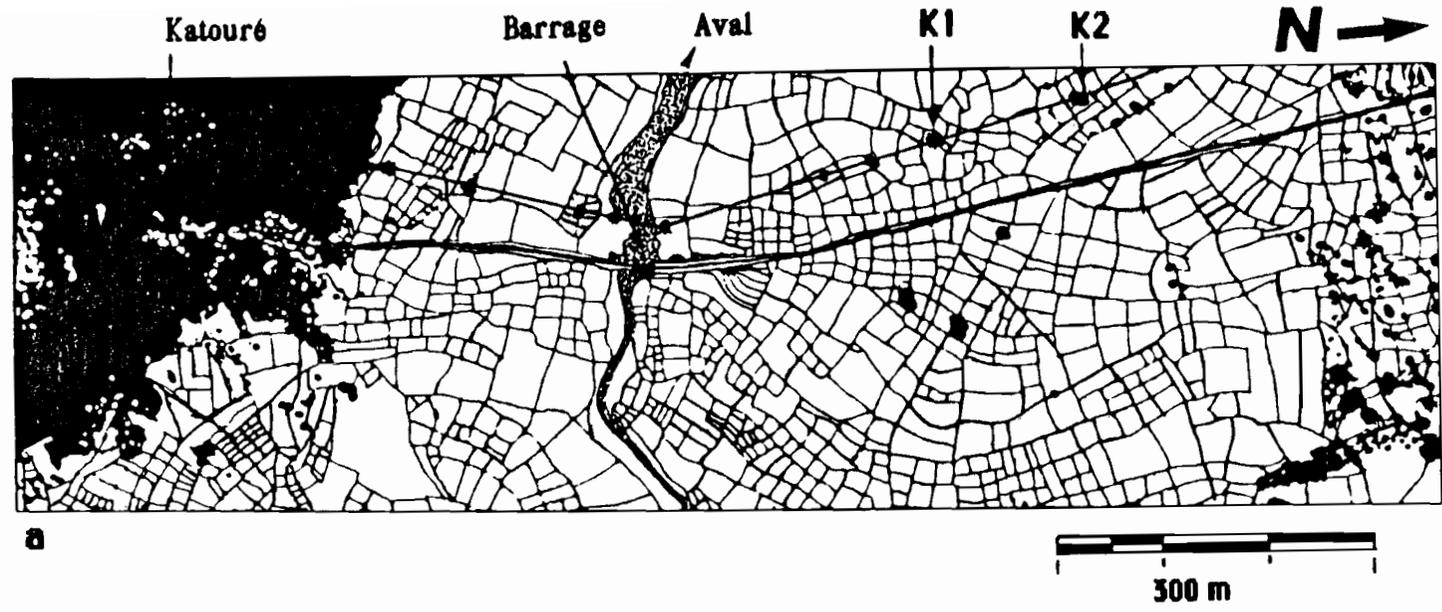


Fig. I : Cartes de situation (d'après KALCK J, 1978).
Situation maps.

Fig. II :

a) Situation des profils étudiés (K1, K2) dans la vallée de Katouré.
Profiles location in the Katouré valley.

b) Toposéquence schématique transversale à la vallée. Disposition des fosses observées (cf. annexe). Répartition et type de culture. pH de la nappe in situ.
Schematic toposequence across the valley. Studies profiles position. Distribution and type of culture. Water table pH.



Vallée fluvio-marine, entaillée dans le "Continental Terminal", les dépôts quaternaires qui la constituent, forment **une plaine de remblaiement colluvio-alluvial**. Celle-ci est à l'origine d'une sédimentation sableuse, colonisée par la mangrove, et transformée, aujourd'hui, en sols sulfatés acides plus ou moins évolués.

Dominé par un climat de type tropical "atténué", ces vingt dernières années se sont caractérisées par un déficit pluviométrique de l'ordre de 25 % correspondant à la réduction et l'irrégularité de la saison des pluies (LE BORGNE J., 1988).

La population locale, les **DIOLAS** du terroir villageois de **KATOURE** ont mis à profit ce bas fond par un **aménagement traditionnel en casiers rizicoles** (PELISSIER P., 1966 ; MARIUS C., 1985)

Remarque : Morphologiquement et pédologiquement la vallée de KATOURE est caractérisée par une dissymétrie nette. mise en évidence par un petit transect réalisé transversalement au bolong (cf. fig. II et annexe).

2) Objets et méthodes.

Ce sujet est bâti sur les résultats d'une étude hydrodynamique et sur les interrogations qu'elle suscite (MONTOROI J.P. et al., 1989):

L'étude du bilan hydrique in situ a permis de mettre en évidence, verticalement et horizontalement, la présence de comportements hydrodynamiques différents. Et ceci, dans un sol estimé homogène du point de vue textural.

Nous prendrons donc l'analyse de ces résultats à la fois comme base, point de départ de ce travail, et, comme objet critique.

Pour comprendre les variations de comportements hydrodynamiques, deux démarches parallèles sont mises en oeuvre:

D'une part, il est nécessaire d'analyser l'étude tensio-neutronique sur ses résultats, mais aussi sur sa conception méthodologique.

D'autre part, un protocole de caractérisation structurale est mis en place, ceci à plusieurs échelles d'investigations et par des moyens différents et complémentaires.

Nous nous proposons, donc, dans une première partie de, rappeler les résultats de la caractérisation hydrodynamique "in situ" :

-Les conditions d'expérimentation seront exposées et discutées.

-En regard avec la situation de l'appareillage dans le sol, des interrogations seront dégagées sur la signification physique des résultats.

Dans une deuxième partie, nous nous efforcerons, de mettre en évidence :

-Les hétérogénéités morphologiques et structurales du sol

(approche naturaliste à l'échelle du profil et de la lame mince).

-La variabilité des caractères pédo-hydriques sur des échantillons de sols non remaniés (retractorétrie)

Cette deuxième partie présente, donc, les faits.pédologiques.

Dans une troisième partie, nous tenterons de caractériser ces variabilités et hétérogénéités de façon quantitative et qualitative. Les résultats obtenus par les différentes démarches seront ensuite discutés.

L'exploitation synthétique et critique de l'ensemble de ces données nous permettra d'établir des relations entre la structure et le comportement hydrodynamique de la couverture de ces sols sulfatés acides évolués.

Enfin, en guise de conclusion, ces résultats nous amèneront à dégager quelques perspectives pour une méthodologie de caractérisation hydrodynamique et structurale adaptée à de tels sols.

I° Partie **Rappel sur les résultats du bilan hydrique "in situ". Discussion.**

I.1. **Les données.**

a) *Théorie et méthodologie:*

La caractérisation hydrodynamique repose essentiellement sur la mesure, avec une sonde à neutrons, de la **teneur en eau volumique** (θ cm³/cm³), et des relations de celle-ci avec la **pression en eau**, mesurée par des tensiomètres, (h cm d'eau) et la **conductivité hydraulique** (K mm/j).

L'espace poral du sol, siège des circulations de flux, est un milieu très complexe, où la vitesse de l'eau varie sans cesse le long de son parcours (constrictions, absorptions...).

La **loi de Darcy** est utilisée pour quantifier cet écoulement, mais elle ignore la configuration détaillée de l'écoulement, le sol est traité comme un milieu uniforme, inerte et rigide, où la vitesse des mouvements est considérée comme lente (Ecoulement non turbulent), et le potentiel osmotique des solutés négligé..

En condition isotherme, les **quantités d'eau s'écoulant sous l'effet d'une différence de charge hydraulique** (Energie potentielle) **entre deux points, peuvent être obtenues par la loi de Darcy généralisée.** En supposant que les transferts ont essentiellement lieu dans la direction verticale, cette loi s'écrit :

$$\vec{q} = -K(\theta) * \vec{\text{grad}} H \quad \text{où } q \text{ représente un flux hydrique en m/s et } H \text{ une charge hydraulique.}$$

Le principe et l'aspect théorique étant largement abordés dans de nombreuses publications, nous ne nous y attarderons pas (DAUDET F.A. et al.,1977 ; HENIN S., 1976 ; LESSARD L. et al., 1981 ; VACHAUD G. et al.,1978).

Les modèles de simulation des transferts hydriques n'exigent que la connaissance de deux paramètres hydrodynamiques, à savoir les **relations teneur en eau-potentiel matriciel et teneur en eau-conductivité hydraulique** (VOLTZ M., 1986). La méthodologie consiste à **suivre sur un dispositif expérimental, la cinétique de ressuyage après infiltration artificielle d'une lame d'eau sous charge constante.** L'ensemble de la méthodologie et du dispositif expérimental est décrit dans le rapport de campagne de J.P. MONTOROI (1989).

Cependant rappelons brièvement quelques données :

Techniquement la méthode dite du bilan hydrique "in situ" a nécessité la mise en place, dans un dispositif initial de double anneau de type "Muntz", d'un tube d'accès pour **humidimètre neutronique** d'une longueur de 1,5 m, et de **dix tensiomètres** à bougies céramiques, **couplés à un manomètre à mercure**. Placés circulairement, à 20 cm du tube d'accès neutronique et deux à 50 cm dans l'anneau externe (contrôle des transferts hydriques latéraux), les tensiomètres sont installés tous les dix centimètres en profondeur (cf. fig. III).

De la même manière que les études d'infiltration de type Muntz, le profil est mis en humectation jusqu'à l'annulation totale de la succion dans tous les tensiomètres, **puis à partir d'un protocole déterminé** (MONTOROI J.P. et al, 1989), débutant dès la disparition de la lame d'eau, **l'analyse de la redistribution de l'eau est pratiquée**. Cette expérience est effectuée en condition naturelle, ainsi que sans la composante évaporatoire, afin d'imposer une condition de flux nul en surface - méthode dite du "drainage interne" - (utilisation de système protecteur: film plastique, copeaux de polystyrènes expansés et mottes de terre).

b) Analyses et résultats:

Succinctement, le traitement et l'analyse des résultats a permis la **mise en évidence d'un profil d'humidité initial non uniforme** dû à la présence d'une nappe, **l'estimation de la vitesse d'infiltration** et de la **conductivité hydraulique à saturation** (cf. résultats MONTOROI J.P. et al., 1989).

L'analyse du ressuyage, permet la détermination :

- de courbes de rétention $h(\emptyset)$.
- de relation $K(\emptyset)$.

La première permet de définir l'énergie interne de pression dans un volume de sol, tandis que la deuxième permet de connaître avec quelle facilité l'eau s'écoulera à la suite d'une différence de charge hydraulique entre deux tranches de sol.

En pratique, la mesure des variations de teneur en eau et conductivité permet de déterminer la grandeur des volumes écoulés et la facilité de l'écoulement. Alors que la mesure des pressions donne une information fondamentale sur la direction des écoulements.

Les résultats obtenus, et notamment les courbes $h(\emptyset)$ et $K(\emptyset)$ définissent des comportements distincts du point de vue hydrodynamique.

Seul les six premiers tensiomètres, qui ne se trouvent pas sous l'influence de la nappe, apportent des enseignements. Quatre comportements hydrodynamiques différents sont admis : un premier spécifique à 10 cm, un deuxième à 20 cm, un troisième à 30 et 40 cm, enfin un quatrième à 40 et 60 cm (le tensiomètre T5 étant en réalité situé à 40 cm).

I.2. Discussion.

a) Relevé descriptif de l'appareillage in situ:

L'expérimentation terminée, nous avons effectué un démontage méticuleux de l'appareillage. Nous avons abordé les tensiomètres par une fouille verticale depuis l'horizon réduit jusqu'à la surface, par avancées successives. La position de chaque tensiomètre a été vérifiée, sa situation dans le sol décrite, l'observation de son état effectuée (cf. fig. IV et planche. I).

Il ressort de cette description l'existence d'une correspondance entre chaque type de comportement et la situation particulière des tensiomètres :

Type T1	dans la structure lamellaire de surface.
Type T2	à la transition des deux premiers horizons.
Type T3-T4	dans une zone sableuse blanche.
Type T5-T6	dans une zone sableuse rouille et indurée.

Il est à remarquer la présence de longues racines courant le long du tube de certain tensiomètre, depuis la surface vers la bougie céramique, accompagnée d'une "gaine de boue organique" (cf. fig. IV).

En résumé, cette technique a permis de rendre compte de l'existence d'une variabilité de comportement hydrodynamique, qui semble-t-il, est à mettre en relation avec la présence de caractères structuraux spécifiques.

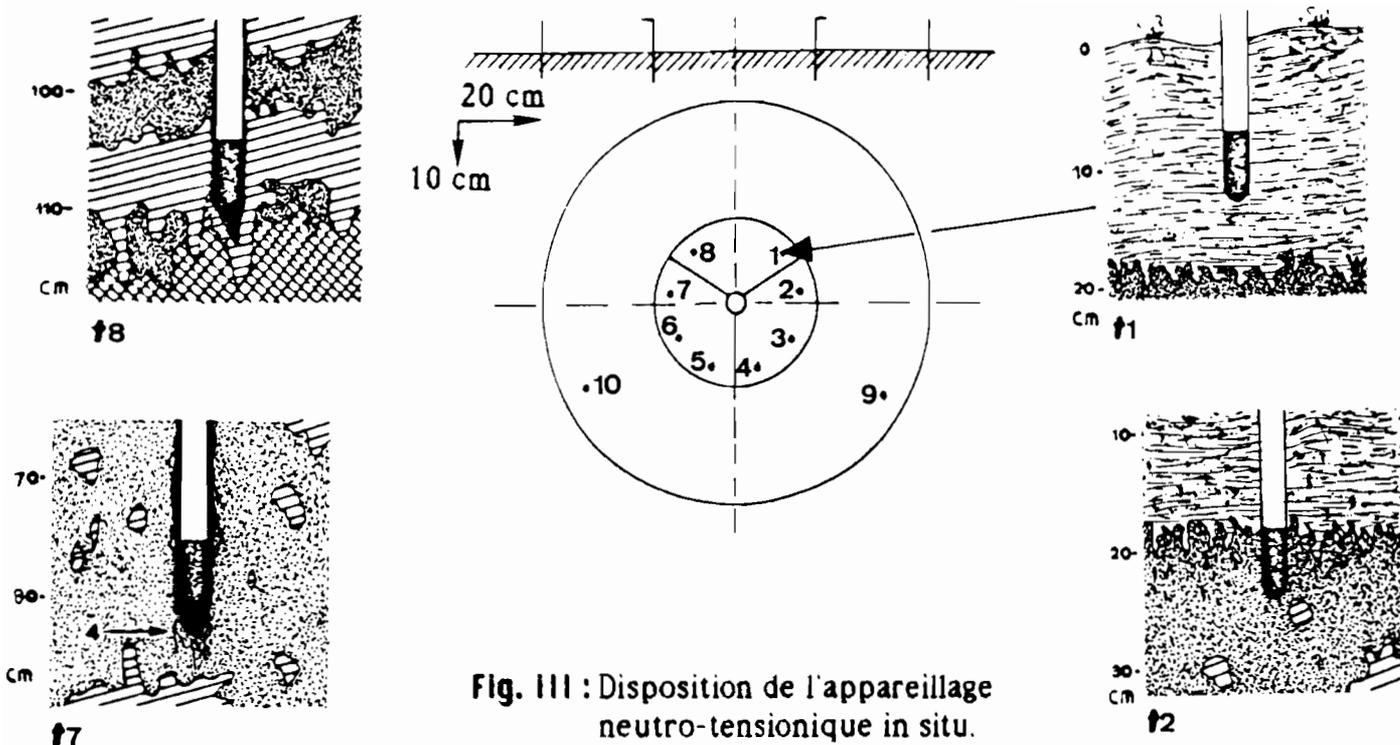


Fig. III : Disposition de l'appareillage neutro-tensionique in situ.
 (d'après MONTOROI J.P. et al, 1989)
Tension-neutron rig disposition.

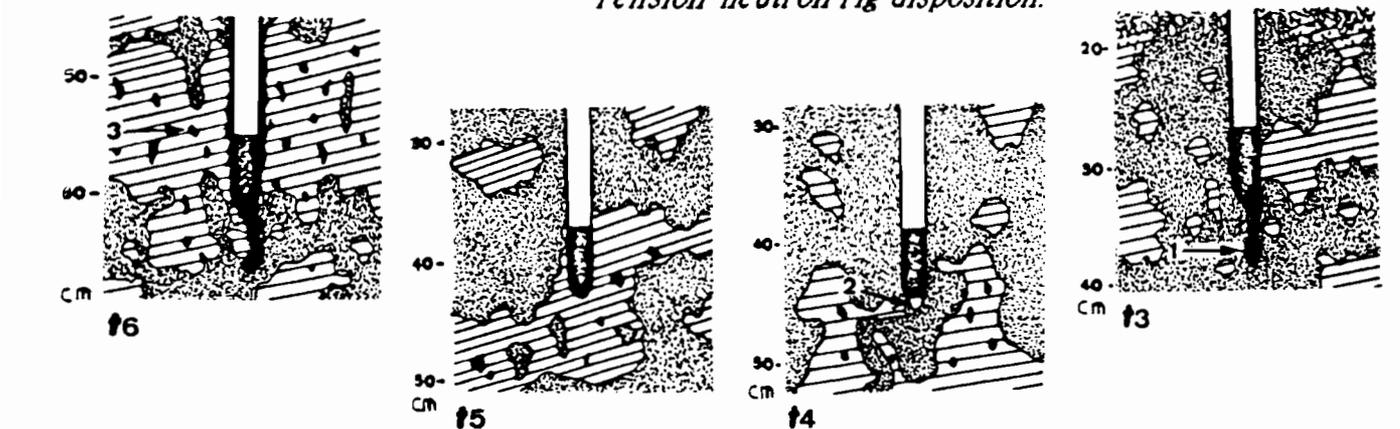
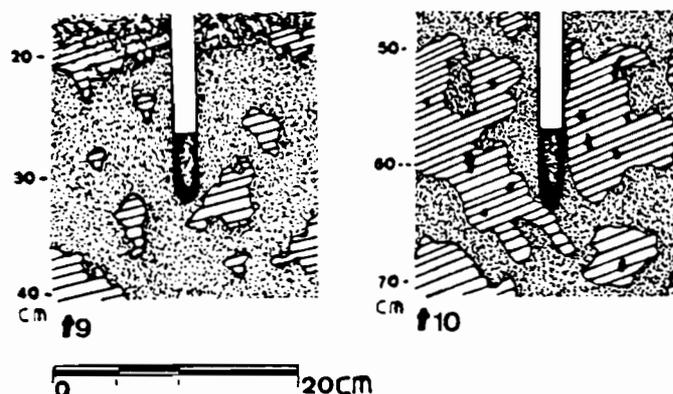


Fig. IV : Situation des tensièmes in situ.
Tensiometers situation.

- N. lamellaire
- Sables blancs
- Sables rouillés
- N. réduit
- 1 "Boue" + mat. orga.
- 2 Nide
- 3 Iron-pipes
- 4 Resines



b) Discussion sur les conditions d'expérimentation et d'analyse.

La méthode tensio-neutronique, qui a été utilisée, repose entièrement sur des développements théoriques comportant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. A ces hypothèses de départ s'ajoute la connaissance de certains paramètres introduits au cours des calculs.

La méthodologie se base essentiellement sur la loi de Darcy généralisée, représentative de la physique des transferts hydriques, si un certain nombre de conditions sont respectées.

Quatre hypothèses contraignantes sont à examiner:

1-La première condition stipule que l'air contenu dans les pores soit à la pression atmosphérique (VACHAUD G. et al., 1978).

2-La deuxième condition repose entièrement sur l'hypothèse que les transferts hydriques ont lieu dans une même direction verticale.

3-La troisième condition concerne l'uniformité et la rigidité du milieu (Homogénéité relative du sol sans fort gradient textural et structure).

4-La quatrième condition correspond à une limite supérieure de la loi de Darcy. L'hydrodynamique nous apprend que cette loi n'est valable qu'au dessous de certaines vitesses définies par le nombre de Reynolds correspondant à un écoulement laminaire (HENIN S., 1976).

1: La première hypothèse peut être remplie en évitant une submersion trop importante du sol.

2: La deuxième hypothèse pose ,en pratique, de nombreuses difficultés: d'une part, la prise en compte dans les sols étudiés de la présence d'une nappe phréatique à faible profondeur est primordiale. Il est évident que toute sursaturation provoquerait des écoulements latéraux. Le contrôle de l'apport initial de l'eau dans l'infiltration semble donc à surveiller.

D'autre part, il semble clair qu'une partie de l'eau infiltrée diffuse latéralement venant humidifier la zone externe à la zone de mesure, et créant ainsi des transferts hydriques non verticaux. L'emploi d'un anneau de garde limite ce phénomène. Cette hypothèse reste donc difficile à vérifier.

3: La non uniformité du sol, reflétée par l'existence de nombreuses disparités structurales, rend la vérification de certaines hypothèses délicates. Ces hétérogénéités de toutes sortes influenceront sur la représentativité des mesures.

Cette troisième hypothèse, qui exige l'uniformité du milieu, malgré le faible gradient textural rencontré et la bonne rigidité du milieu (-sable, pas de phénomène important de retrait-gonflement-), ne semble pas être respectée. Les hétérogénéités du sol déterminent, alors, des zones où l'écoulement de l'eau est plus ou moins facilité ou freiné (Indurations).

A ces hétérogénéités du milieu physique, s'ajoutent celles du milieu biologique, le système racinaire des plantes modifiant considérablement les mouvements de l'eau.

4: La valeur du nombre de Reynolds, définie par la vitesse de l'eau, le diamètre moyen des capillaires, la viscosité et la densité de l'eau, pour laquelle on passe de l'écoulement laminaire, limite de la loi de Darcy, à des écoulements turbulents; dépend de la rugosité des zones de contact solide-liquide. D'après CASTET et SANGLERAT (1969) in HENIN S. (1976), le changement de régime se produit pour des capillaires ayant un diamètre de 0,1 cm. La présence de macropores biologiques dont la taille est supérieure à un millimètre pose donc problème.

Outre ces hypothèses, la méthode tensio-neutronique présente certaines particularités à prendre en compte :

Cette méthode est basée sur l'utilisation conjointe de deux types d'appareillages: Le premier la sonde à neutron, ou humidimètre à ralentissement de neutrons, mesure la teneur en eau volumique du sol ; Le deuxième, les tensiomètres servent à mesurer les potentiels matriciels du sol. Mais il est à noter que ces deux appareils possèdent des sphères ou domaines d'influence tout à fait différentes.

Tandis que le tensiomètre donne une mesure très locale de la succion de l'eau, la sonde à neutron admet une sphère d'influence d'une vingtaine à une quarantaine de centimètres de diamètre, variant avec l'humidité ambiante (VACHAUD G. et al., 1978). Il est cependant à noter que le volume de sol situé à proximité immédiate du tube d'accès de l'humidimètre détermine la plus grande part de la mesure.

Ces faits reflètent donc le délicat problème posé par la présence d'hétérogénéités au sein du sol, la sonde à neutron donnant une mesure "moyenne" et les tensiomètres des mesures localisées.

La sphère d'influence de la sonde à neutron pose un second problème, lors de la présence d'un front d'humectation, et à proximité de la surface. Cette technique nécessite donc un protocole de mesure adéquat, des corrections de surface, et des étalonnages initiaux.(VACHAUD G et al., 1978).

L'utilisation de ces méthodes inclue une double erreur de mesure, d'une part une teneur en eau sous estimée du fait de l'existence d'un gradient dans la sphère d'influence, d'autre part un retard de réponse des tensiomètres dû à la lenteur d'établissement des équilibres.

A ces quelques erreurs, s'ajoutent les incertitudes de mesure, la nécessité de lissage des courbes $K(\emptyset)$ et $h(\emptyset)$ (LESSARD L. et al., 1981).

De plus, il est important de constater l'état de l'appareillage, et de rappeler sa présence "in situ" durant plus d'un an. Le descriptif de l'appareillage in situ, nous a permis de noter la présence de longues racines le long des tubes de certains tensiomètres. Cette constatation est primordiale, la présence conjointe de ces racines et de la "boue organique" peut, semble t-il, mettre en évidence l'existence de transferts hydriques le long des tensiomètres qui perturbent la réalité des mesures.

Enfin, le descriptif a permis de relever une erreur d'installation (T5 à 40 cm au lieu de 50 cm) .

L'estimation du bilan hydrique "in situ" par cette méthode semble être entachée de plusieurs erreurs, mais malgré cela, elle reste le seul outil dont on dispose actuellement.

Le relevé descriptif de l'appareillage dans le sol laisse présumer un rôle important des hétérogénéités du sol dans la différenciation des comportements hydrodynamiques.

Une étude détaillée de l'organisation structurale du sol est une voie possible pour tenter d'évaluer un tel phénomène.

II° Partie Analyse par les méthodes morphologiques, structurales et pédo-hydriques.

1) Observation de terrain et étude micromorphologique

a) Protocole d'approche.

L'observation méthodique du sol étant requise, nous avons opté pour quatre techniques d'investigation complémentaires :

La première technique, classique, consiste en une observation, suivie d'**un relevé géométrique et d'une description de profils de sol.**

La seconde technique, aborde **l'observation dans l'espace.** Inspirée des méthodes fines archéologiques; un pédon de sol quadrangulaire de 50*50 cm, coordonné par un réseau de mailles horizontales de 5 cm², sur une profondeur avoisinant les 140 cm, a été découpé couche par couche, d'abord naturelles, puis arbitraires dès le deuxième décimètre. **Un relevé précis de la totalité des caractères structuraux et morphologiques** (macropores, indurations, fissures ...) a été effectué systématiquement à chaque niveau.

La troisième technique est une approche axée sur des **essais expérimentaux de visualisation, simples** : nécessaire, d'une part, à **la mise en évidence des macropores et fissures fonctionnels** (infiltration d'un traceur coloré), d'autre part au dégagement, à **la mise en relief des "indurations"** (arrosage sous pression). Quelques photographies témoignent des résultats obtenus.

La dernière technique est **une investigation descriptive à grande échelle sur lame mince**, confirmant et précisant les premières données.

Cette méthodologie a nécessité un **choix des sites d'études** raisonné et un protocole de prélèvement d'échantillons adapté aux analyses préconisées en laboratoire (échantillons non remaniés, prélevés à des points coordonnés, et décrits : micromorphologie et retractométrie ; remaniés et prélevés à des points coordonnés : analyses physico-chimiques).

Le site **K1** a été sélectionné pour sa proximité au site de caractérisation hydrodynamique, qui lui est distant d'un peu moins de six mètres. Cette distance minimale étant nécessaire pour ne pas perturber l'expérimentation en cours.

La fosse d'une superficie voisine de 3m², sur une profondeur limitée par la nappe à 1m30, sera le siège des descriptions de deux faces perpendiculaires l'une à l'autre, du relevé microstratigraphique d'un pédon 50*50 cm, ainsi que des prélèvements à des points coordonnés (cf. fig. V)

Il est à noter qu'un deuxième site d'étude a été sélectionné par ses caractères morphologiques et chimiques "extrêmes" par rapport à K1 (cf. fig. II). Ce site **K2** est situé à environ 150 m au Nord Ouest du premier et a fait l'objet, lui aussi, de descriptions fines et de prélèvements d'échantillons.

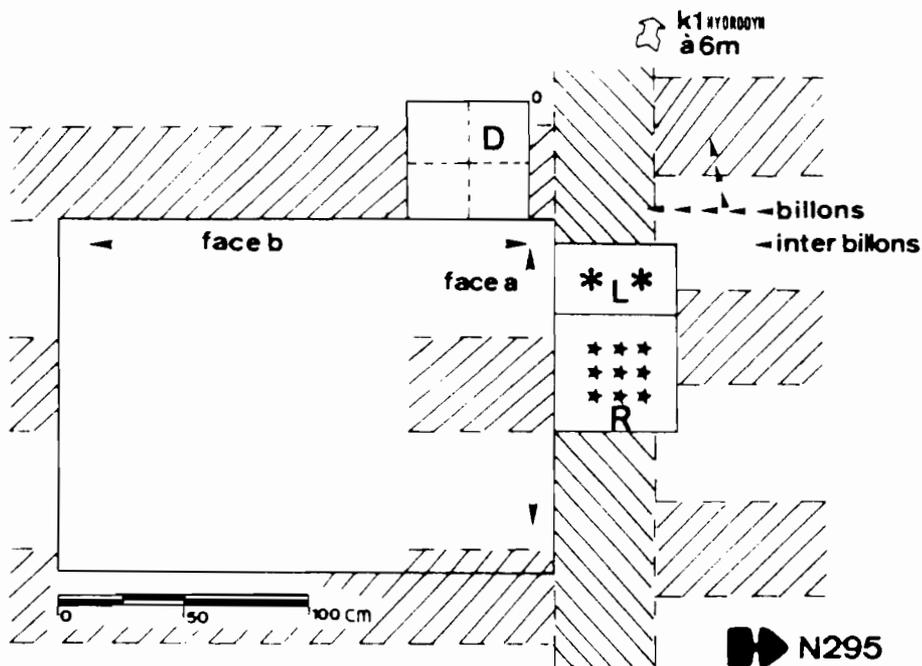


Fig. V : Fosse K1

Protocole d'observation et de prélèvement
Hole K1. Observation and taking protocol.

- R: Prélèvement pour la rétractométrie.
- L: Prélèvement pour la micromorphologie
et analyses physico-chimiques.
- D: Pédon coordonné par un maillage de 50*50 cm.

b) *Observations et descriptions morphologiques.*

La fosse **K1** est localisée dans une zone de culture aménagée en rizière. Le dénivelé de surface est nul, modelé par la succession de billons et d'interbillons, larges d'une cinquantaine de centimètres et hauts d'une vingtaine de centimètres (cf. fig.V et photo. ci-dessous).

Remarque: ces billons en bandes parallèles sont édifiés selon la tradition DIOLA par découpage d'une couche de terre et retournement de celle-ci sur son coté , à l'aide du **kaiendo** - *pelle oblongue légèrement concave munie d'un fer tranchant en forme de fer à cheval* - (STAIMESSE J.P., 1967).

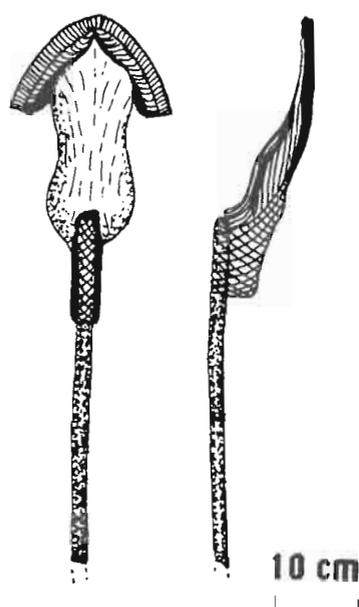


Fig. VI : Dessin schématique du Kaiendo. **Photo :** Rizière: Billons et inter-billons
Schématical plan of Kaiendo.

La surface mamelonnée du sol est recouverte d'une strate herbacée prostrée (quelques touffes de riz desséchées et herbeuses verdâtres).

Elle présente par endroit une fissuration légère en polygones hexagonaux centimétriques.

On remarque la cristallisation de petits cristaux blanchâtres ternes irréguliers, très légèrement acides, disparaissant avec la rosée du matin (Sulfates d'aluminium, de magnésium, ou de fer : LE BRUSQ J.Y et al., 1987).

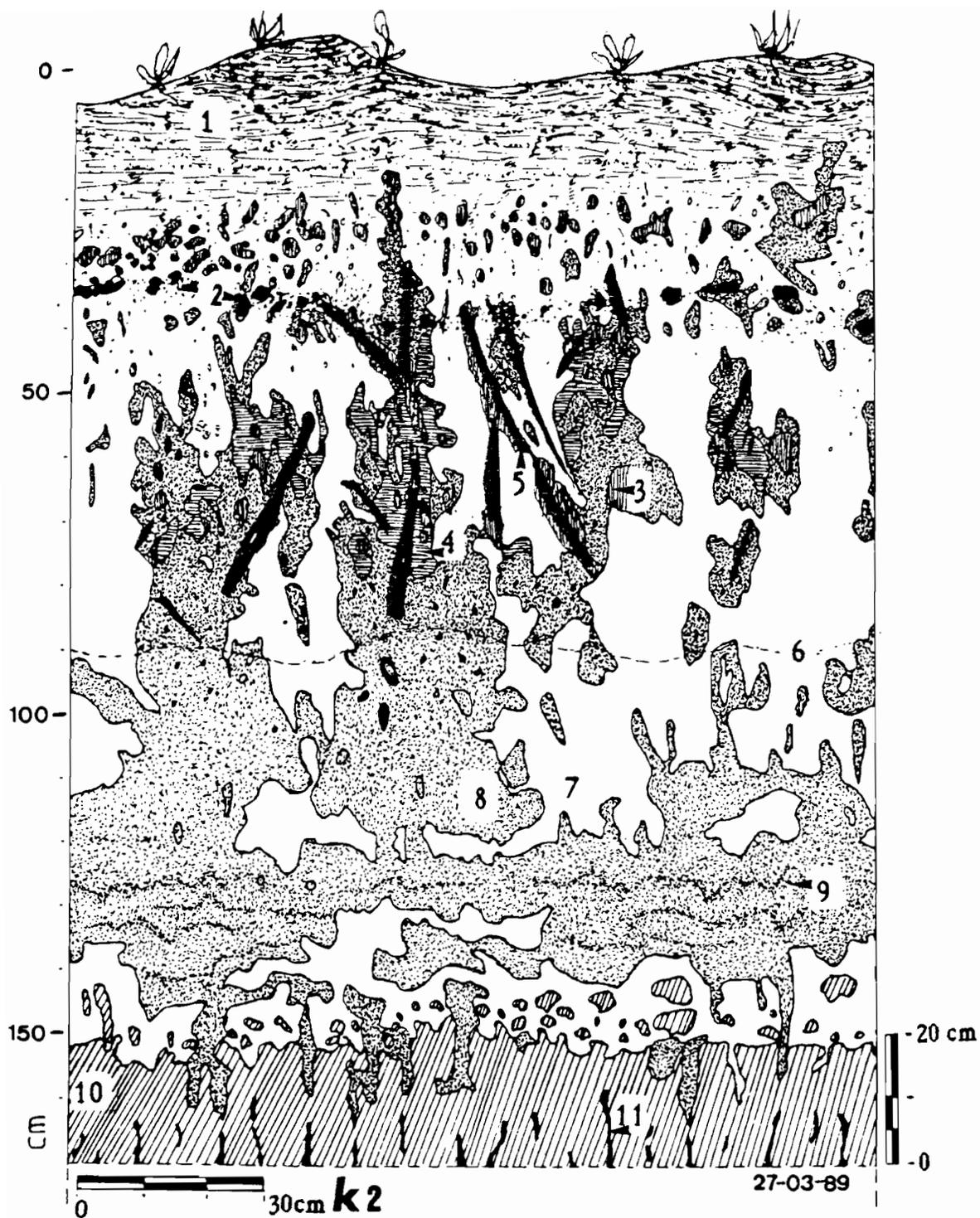


Fig. VIII : Profil K2

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1 structure lamellaire | 7 Sables blancs |
| 2 Charbon de rhizophora | 8 Sables rouilles indurées |
| 3 taches de jarosite | 9 Raies d'illuviation |
| 4 Taches lie-de-vin | 10 H. réduit |
| 5 Iron-pipes + jarosite. | 11 Racine de rhizophora |
| 6 Limite sec au toucher | |

Brèves descriptions pédologiques :

0 - 15/20 cm :

Horizon organique sec (10 YR 5/1 à 3/2).
Texture sablo-argileuse.
Structure lamellaire centimétrique à millimétrique, formant des couches mamelonnées concaves à convexes (cf. fig. IX)
Impression de micro-sédimentations.
Structure locale grumeleuse.
Chevelu racinaire extrêmement développé.
Activité termitique :
macroporosité horizontale tubulaires en surface...
Transition irrégulière et progressive.

15/20 à 110/120 cm :

Horizon blanc à Beige sec jusqu'à 60 cm.(5Y 8/1 à 10YR 4/3).
Texture sabo-argileuse, légèrement plus argileuse vers le bas.
Structure massive à débit polyédrique anguleux décimétrique à sous structure centimétrique.
Réseau polygonal net de fentes refermées ou comblées, puis disparition progressive de celui-ci dans le niveau humide.
A partir de 23 cm, individualisation des premiers iron-pipes entourés de "langues" centimétriques,rouilles plus ou moins indurées., à allongement sub-vertical.
Ces zones rouilles retiennent l'humidité (cf. limite sec au toucher).
Orientations majoritairement verticales et obliques des iron-pipes (10 YR 7/8 - Diamètre de 0,2 à 2 cm, longueur maxi. de 10 cm).
Transition ondulée net.
Continuité des "gainnes racinaires oxydées" avec l'horizon suivant.

110/120 à 130 cm :

Horizon réduit bleu gris (N 5/0).
Texture sablo-argileuse, plus argileuse que précédemment
Structure massive.
Fantômes d'iron-pipes et racines fibreuses de rhizophora plus ou moins en connexion. Taches d'oxydations le long des racines.
Toit de la nappe phréatique (ph de l'eau in situ de 7,35).

En résumé les traits structuraux principaux à retenir sont la présence dans le premier horizon d'une structure lamellaire à composante horizontale, dans le second d'une structure massive à composante isotrope, mais présentant, des zones indurées , d'allongement sub-vertical, centrées autour d'iron-pipes et un débit polyédrique anguleux décimétrique dans la zone sèche. Influence de la nappe au dessous de soixante centimètres.

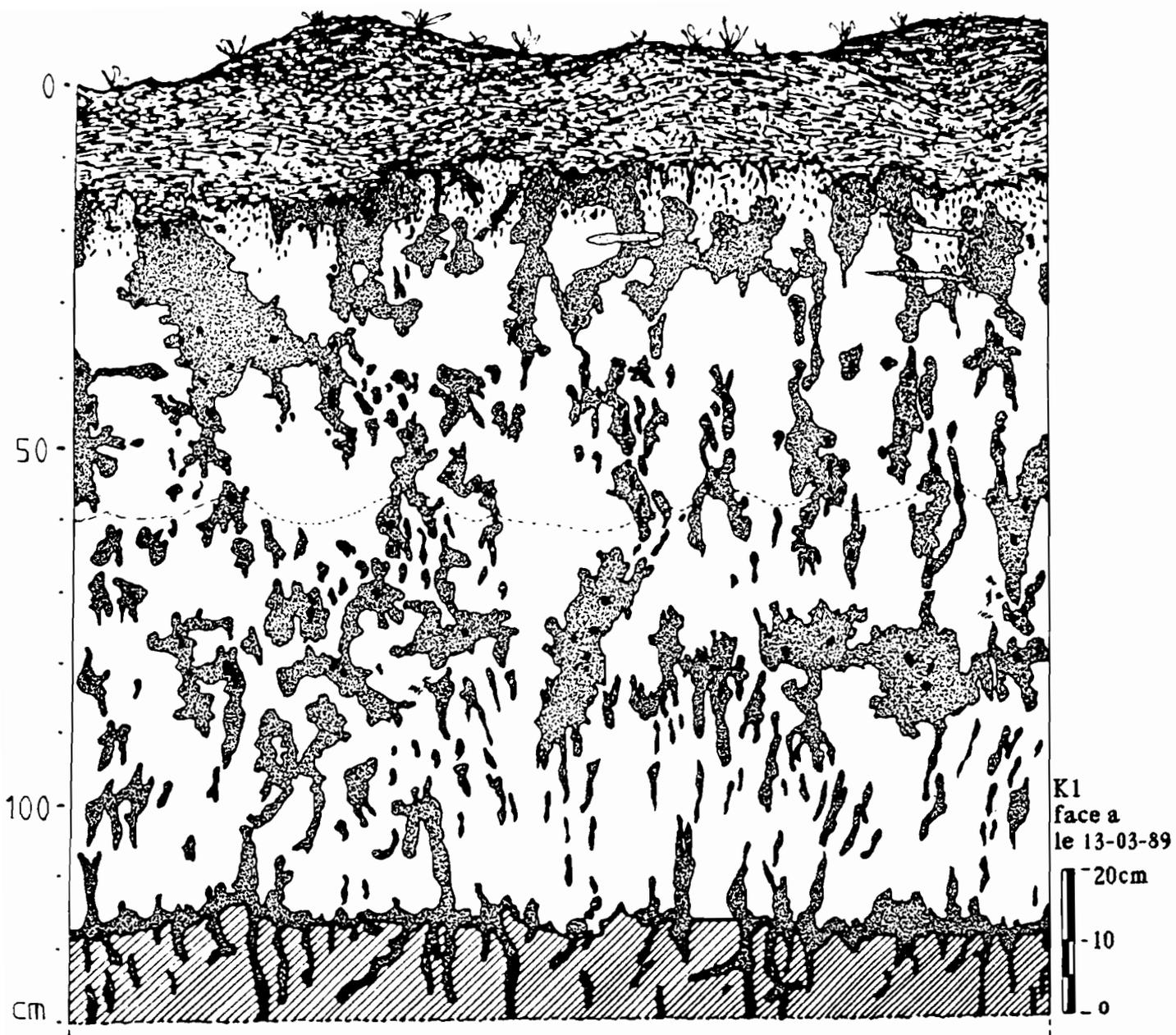


Fig. VIII: Profil K1 : Dessin de la face a.
Profile K1 : a face plan.

--- Limite sec au toucher
 7) Racines de rhizophora
 ■ Iron-pipes

- M. LAMELLAIRE
- SABLE BLANC
- SABLE ROUILLE
- M. REDUIT

Le site K2 (cf.fig. VIII) présente les mêmes caractéristiques globales, mais celles-ci sont beaucoup plus accentuées; Ainsi la description laisse apparaître de véritables "glosses" indurées décimétriques, la présence, à la fois, d'iron-pipes et de racines charbonneuses indurées, de taches, lie de vin, et jaunes (jarosite), et de raies d'illuviations ocres dans la zone humide non réduite.

Cette fosse K2 , par ces caractéristiques "extrêmes" chimiques (jarosite) et morphologiques, présente un aspect juvénile, pédogénétiquement parlant, par rapport à la fosse K1 (AUBRUN A., 1988 ; LE BRUSQ J.Y. et al., 1987; MARIUS C., 1985 ; VIEILLEFON J., 1976).

c) Relevé microstratigraphique

Un relevé **microtopographique** est effectué sur quelques unes des couches naturelles décapées dans les premiers décimètres du sol (Situation cf. fig. III). L'ensemble des points coordonnés, **traités sur logiciel SURFER** permet de dresser une carte topographique et un dessin en trois dimensions de ces couches. Ces figures (cf. figs. IX) nous localisent nettement la présence de "canaux micro-hydrographique", concaves, tapissés par un enchevêtrement de pailles de riz.

Ces "micro-canaux" souterrains **sembleraient entraîner une redistribution des écoulements, préférentiellement sur un axe horizontal et retarderaient ainsi l'infiltration verticale.** La géométrie interne lamellaire des billons nous permet d'imaginer son rôle capital dans la canalisation de l'eau par micro-écoulement horizontal, tandis qu'en surface le billonage a pour effet à la fois de favoriser le stockage en eau du sol (Inter-billon) et l'oxygénation du riz (Billon)

Le décapage des couches, arbitraires, suivantes a permis un relevé précis des tâches, indurations, fissurations et macropores. L'étude de la superficie de ces phases **morphologiques**, par des mesures au planimètre, a apporté une **estimation de leur importance** (cf. fig. XIX).

Ces différents traits structuraux pourraient correspondre à des zones d'infiltration préférentielle ou de réorientation des flux internes.

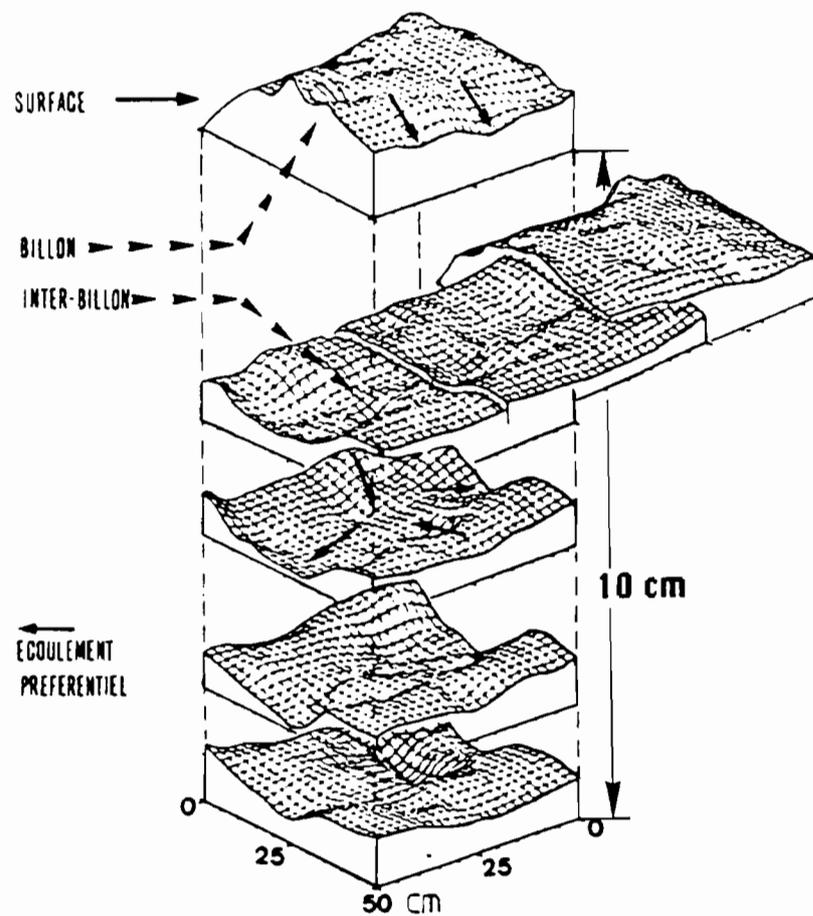
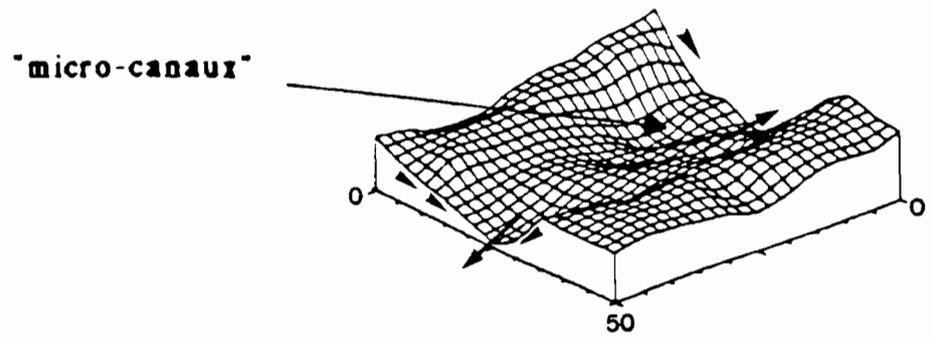


Fig. 1H : Relevé microtopographique de quelques couches (lamelles) de l'horizon de surface.
Microtopographic reading of some stratum of the surface horizon.

d) Visualisation des pores et indurations.

Les premiers essais de visualisation ont pour but de mettre en évidence "la fonction" des macropores et fissures.

Les pores du sol sont irréguliers, tortueux, inter-connectés. L'écoulement de l'eau dans un tel milieu est conditionné par de nombreuses constriction, voire même de véritables "culs de sac".

Un pore sera considéré comme "fonctionnel" s'il est en connection avec la surface d'infiltration, et s'il est capable de drainer l'eau et ses solutés sans pertes importantes. Un macropore actif se remplit dès le début de l'infiltration, alors qu'un macropore isolé de la surface d'infiltration (non fonctionnel) ne peut se remplir que si la pression de l'eau atteint une certaine valeur critique (TOUMA J. et BOIVIN P., 1988).

Ces tests reposent sur l'utilisation d'un colorant : solution de bleu de méthylène diluée à quelques pour cent. Théoriquement, dans les pores fonctionnels où la conductivité est élevée, le bleu de méthylène a tendance à se fixer fortement et colorer ainsi les faces des pores, lors du ressuyage (BOUMA J et al, 1977 - 1979 - 1987 ; CURMI P., 1988).

Cette méthode a été employée plusieurs fois d'abord en surface, selon la technique classique d'infiltration Muntz. (anneau central de 50 cm, filtration jusqu'à saturation d'une lame d'eau constante de 3 cm) et ponctuellement à plusieurs niveaux de profondeur sur "micro-Muntz" (utilisation de tube P.V.C. de 7 cm de diamètre, de 5,5 cm de longueur). Des essais ont été effectués à l'emplacements de points particuliers (fissures, racines, iron-pipes) et ceci à plusieurs profondeurs (cf. planche II.).

Nous avons pu mettre en évidence sur les premiers centimètres du sol, la présence de lits discontinus horizontaux colorés par le bleu de méthylène, alimentés par quelques pores biologiques tubulaires millimétriques sub-verticaux. En profondeur aucune coloration ne s'est effectuée : le bleu de méthylène se fixant seulement à la surface des micro-Muntz sur plusieurs millimètres. Ces faits semblent donc montrer l'inexistence de macropores ou fissures fonctionnelles au delà des premiers décimètres.

Remarque : Cette méthode peu décrite dans la littérature peut comporter certains biais qu'il est nécessaire de prendre en compte. Ainsi nous ne connaissons pas le diamètre minimal des pores requis pour la mise en évidence de macropores jugés fonctionnels à l'aide de ce colorant; quelle est l'importance de la nature granulométrique et minéralogique du sol, dans le comportement du colorant; importance de la température, de la dilution préalable du colorant

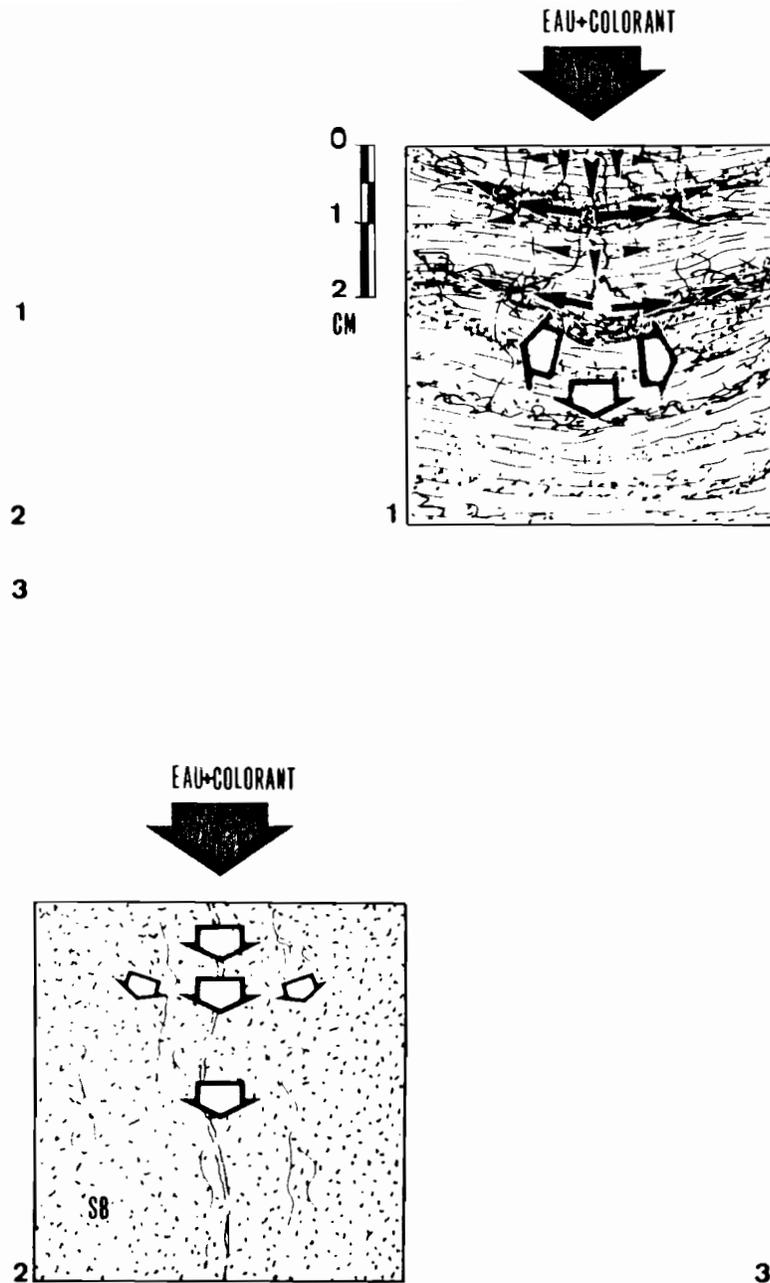
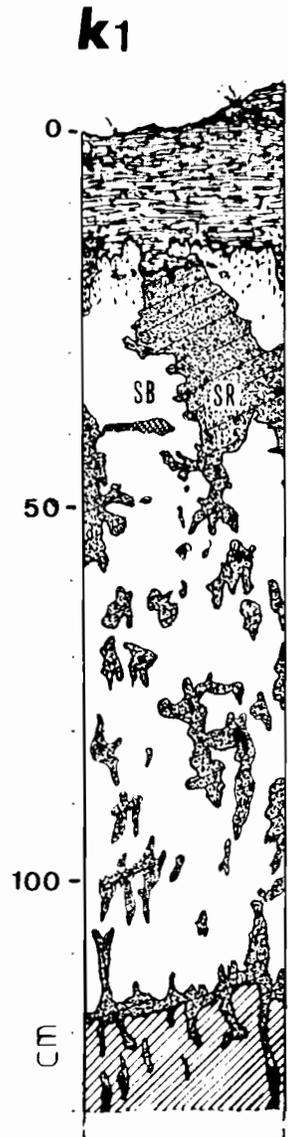


Fig. H : Visualisation schématique des transferts hydriques.
Schematical visualisation of hydraulic flows.

- 1 Dans l'horizon lamellaire
- 2 Sables blancs (SB)
- 3 Sables rouilles indurés (SR)

sens des écoulements

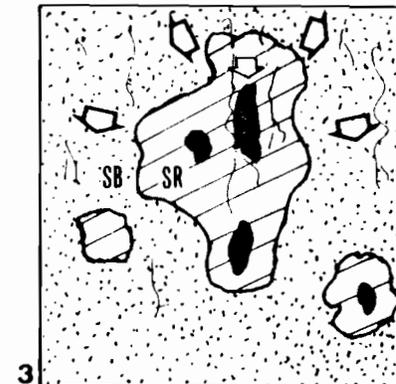
↓ ↓ COLORATION BLEU DE METHYLENE

◁ ▷ TRANSFERTS SANS COLORATION

h 3 2 RACINES

∥ ∥ FISSURES

EAU+COLORANT



Les deuxièmes essais de visualisation consistent simplement en la mise en évidence des espaces indurés par arrosage sous pression d'eau. Quelques photographies (cf. planche III) témoignent des résultats. La mise en relief des indurations est nette, notamment dans le site K2, avec le dégagement de véritables colonnes indurées décimétriques, ainsi que d'iron-pipes seuls.

Ces expériences, utilisation de colorant, dégagement d'espaces indurés, permettent d'envisager la présence de circulations privilégiées de flux en surface, sur des plans horizontaux, puis l'existence de cheminements préférentiels dirigés par l'hétérogénéité du sol (cf. fig. X).

e) Descriptions micromorphologiques.

Les différents traits structuraux reconnus morphologiquement vont être étudiés à plus grandes échelles.

Une vingtaine de blocs non perturbés, orientés, ont été prélevés de façon sélective sur les profils K1 et K2. L'induration, que nous avons réalisée au laboratoire de pétrologie de l'O.R.S.T.O.M. Bondy, a consisté en une imprégnation, sous vide, par une résine polyester. Les lames minces ont été préparées sur des blocs indurés sélectionnés, au laboratoire de Pédologie de l'I.N.A.P.G. à Grignon, dirigé par Mr.P. GUILLORE.

L'ensemble des traits pédologiques sera reconnu successivement :

- A l'échelle sub-macroscopique : à l'oeil nu sur des plaquettes de sol induré ; à la loupe binoculaire ou en rétroprojection sur lame mince.

Cette observation convient parfaitement à la description de l'organisation structurale des échantillons de sol et permet de faire le lien entre le terrain et la microscopie.

Ces techniques nous ont permis de visualiser les différentes phases et nous renseignent sur les couleurs naturelles des matériaux de sols (Lumière réfléchie). La retroprojection donne la possibilité d'individualiser et de dessiner, à l'échelle, les traits pédologiques présents dans les lames minces.

- A l'échelle microscopique : au microscope polarisant.

Cette outil est indispensable à la description de l'arrangement des constituants du sol, au sein des unités structurales.

Le passage en lumière réfléchi permet la mise en évidence et la caractérisation de certains minéraux opaques.

La microorganisation du sol, sera décrite de façon succincte, à quatre niveaux d'organisation différents (pédique, matriciel, textural, et plasmique), correspondant à des échelles de caractérisation de plus en plus fine (BRESSON L.M., 1987).

□ L'horizon de surface présente une microorganisation pédique lamellaire nette (fig.XI a.1.), à tendance grumeleuse (fig.XI b.1.) : la micromasse forme des microlittages millimétriques irréguliers à allongement oblique ou sub-horizontale, se densifiant localement et s'individualisant en agrégats millimétriques sub-arrondies.

La granomasse (abondance de l'ordre de 40 %) est constituée de sable exclusivement quartzeux, sub-arrondies et très hétérométriques. La fig.XI b.2. permet d'observer l'existence de granoclasses locaux en bandes parallèles à la microorganisation lamellaire. Des racines épousent cette orientation.

La microorganisation matricielle distingue une porosité inter-granulaire très abondante (d'une dizaine à une centaine de microns), et une porosité constituée de chambres millimétriques (fig.XI b.3.) et de chenaux racinaires sub-verticaux d'inter-connection faible traversant la microorganisation lamellaire. Certains chenaux sont entourés d'une gaine rouille d'oxyde de fer. On note quelques vides planaires intra-agrégatifs (fig.XI b.4.).

Au niveau textural, le type d'assemblage des grains de quartz est composé à la fois de grains revêtus (chitoniques - cf. fig.XII a) et de grains pontés (géfuriques - cf. fig.XII b). L'entassement de la granomasse est libre, rarement compact. Les grains de quartz sont fracturés (inclusion et revêtement d'oxydes de fer - cf. fig.XII).

La micromasse est composée d'un plasma amorphe jaunâtre à opaque formé d'argile et d'oxyhydroxydes de fer. L'observation en lumière réfléchi à permis la mise en évidence de cristaux micrométriques prismatiques d'oxyhydroxydes de fer (couleur abricot: goethite $\text{FeO}(\text{OH})$). On remarque dans le plasma quelques cristaux polyédriques jaune métallique terne (perte de soufre) de pyrite résiduelle (FeS_2) altéré et épigénisé semble-t-il en goethite.



Fig. II : Observation en rétroprojection de lames minces verticales (H. de surface).
Observation by retroprojection of vertical thin sections.

- a1: microorganisation lamellaire.
- a2: granoclasement orienté.
- a3: racines de riz.
- b1: microorganisation grumeleuse.
- b2: granoclasement.
- b3: porosité : chambre.
- b4: vides planaires.
- Q: quartz ; V: vides ; P: plasma

Fig. III : Type d'assemblage.
Related distribution.
a: Chitonique ; b: Géfurique.

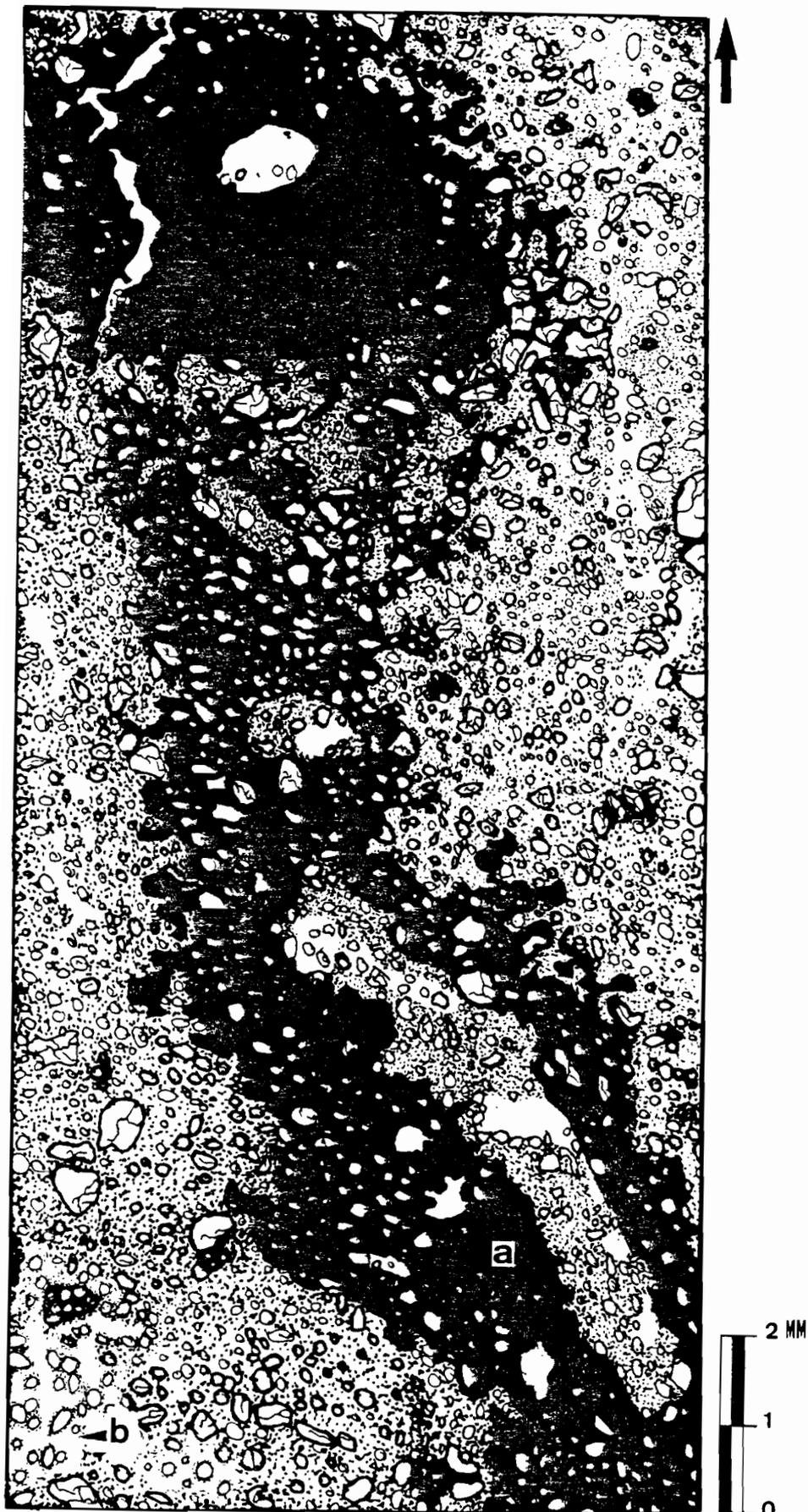


Fig. III : Lame mince montrant un iron-pipe (sables rouilles indurées)
Exhibition of iron-pipe.
a: assemblage porphyrique par des oxyhydroxydes de fer.
b: assemblage chitonique à géfurique.

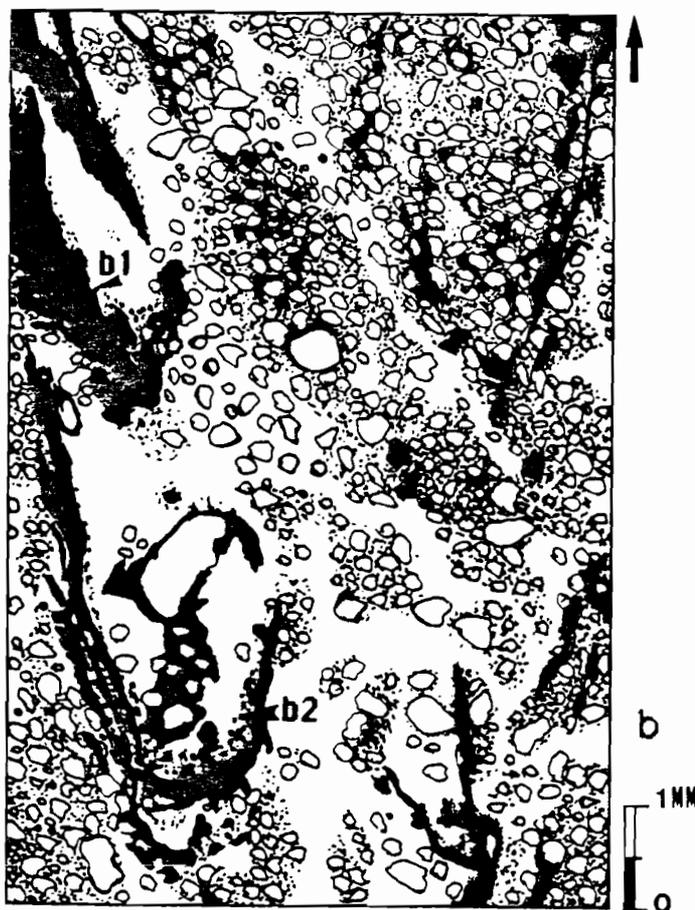
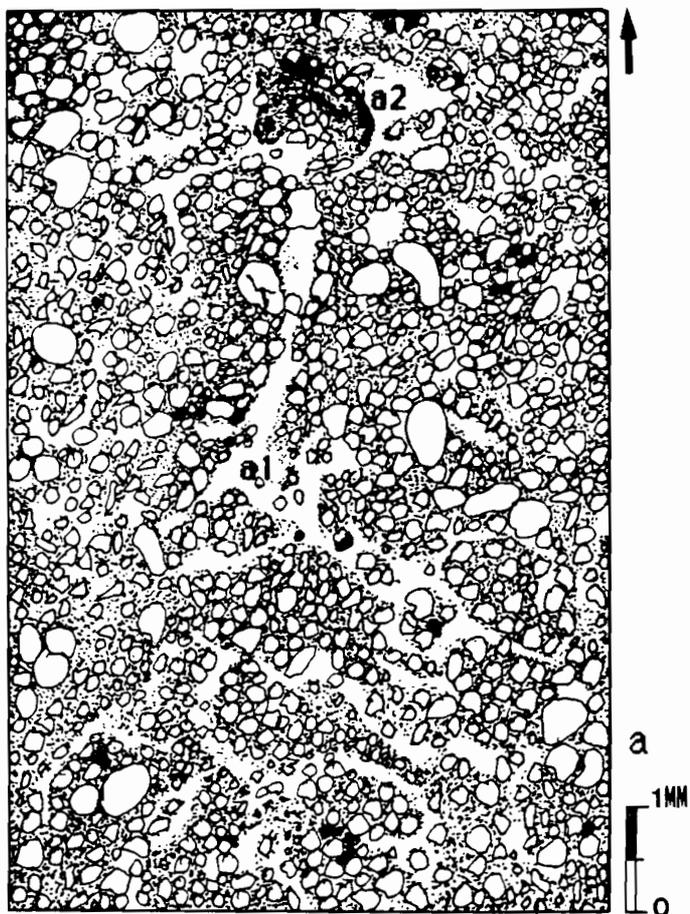


Fig. H1U :

Observation en retroprojection
de lames minces verticales de
transition entre deux horizons.

*Observation by retroprojection of
vertical thin sections of two
horizons transition.*

a: de surface et médian
b: médian et réduit

a1: chenaux racinaires sub-verticaux.
a2: oxyhydroxydes de fer.
b1: fibres de rhizophora.
b2: pyrites framboïdes.

□ La microorganisation de l'horizon suivant se distingue par :

-L'absence de microorganisation pédique nette. L'existence d'une organisation prismatique semble échapper à l'échelle de nos lames minces. Toutefois, sur certaines lames, quelques fissures de plusieurs centaines de microns sont visibles. Leurs interconnexions sont très faibles.

-La porosité intergranulaire contrôlée par l'hétérométrie et la granulométrie des quartz est toujours élevée, mais légèrement moins abondante (plus de sable grossier et d'argile).

-La porosité constituée par les chenaux est forte (zone de transition entre les deux premiers horizons cf. fig.XIV a.) et devient légèrement plus faible vers le bas de l'horizon. Ces chenaux millimétriques sont d'allongement sub-vertical et sont très mal interconnectés.

-Le type d'assemblage des grains de quartz est toujours à la fois composé de grains revêtus et pontés, mais présente localement (iron-pipe) un assemblage porphyrique (fig.XII et planche IV).

-Individualisation dans le plasma amorphe d'une distribution lamellaire de deux type d'oxyhydroxydes de fer imprégnant, sans doute, un peu d'argile: Organisation centripède de l'iron-pipe en couches millimétriques parallèles mais irrégulières, successives de goethite, hématite (grano et poro-rubannement), puis de goethite (cf. planche IV).

Remarque : ce plasma colmate à la fois les vides intergranulaires et les chenaux.

-Le profil K2 se distingue par la présence de taches jaunes et lie-de-vin.

.Les premières forment des nodules et plamas microgranulaires jaune terne (jarosite: $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$). Localement (cf. planche IV) la jarosite pseudomorphose partiellement les tissus des charbons de palétuvier (Rhizophora). Autour des nodules s'organise en auréole un plasma porphyrosquelique d'hématite puis de goethite.

.Les secondes, mal individualisées en microscopie, sont formées par une microorganisation géfurique et porphyrique avec un plasma à la fois composé d'hématite , goethite, et d'argile.

□ Le passage à l'horizon réduit se marque par l'augmentation, locale, forte de la porosité en chenaux organisée autour des fibres de rhizophora, ainsi que par la présence de nombreux grains framboids millimétriques de pyrite (fig.XIV et planche IV).

Les résultats de cette étude micromorphologique rejoignent les descriptions classiques des sols sulfatés acides (MARIUS C., 1985),, seul l'absence de gypse est à constater.

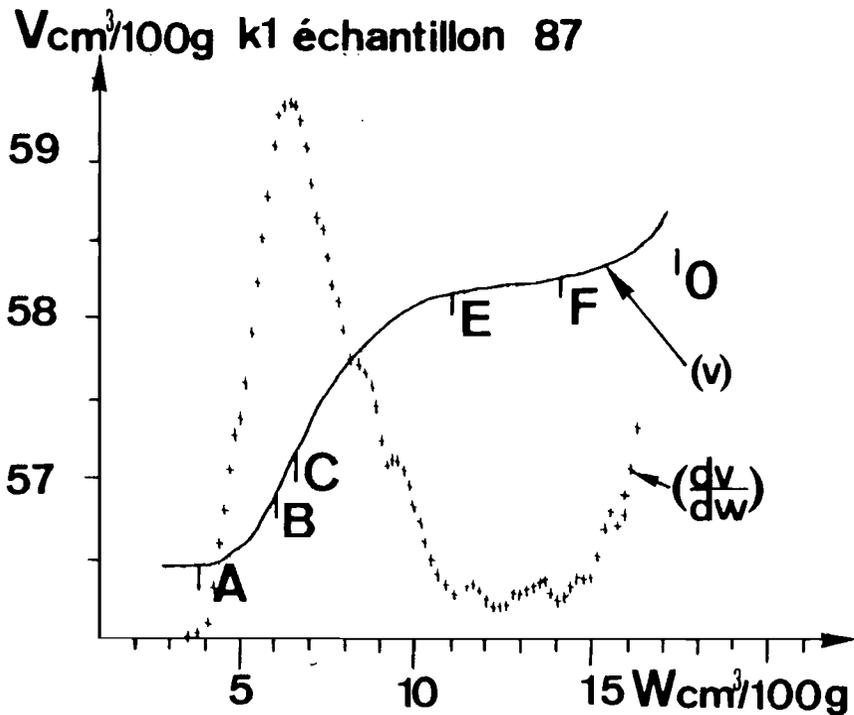
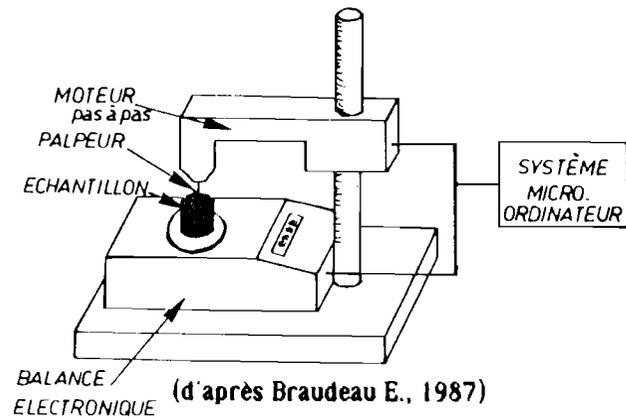


Fig. HD: Courbe de retrait (v) d'un échantillon de sol non remanié. Les points caractéristiques A, B, C... sont déterminés graphiquement d'après la courbe dérivée (dv/dw). W = teneur en eau. *Shrinkage curve (v) of an undisturbed soil sample. The characteristic points A, B, C... are graphically determined from the derived curve. W = water content.*



Appareillage de mesure de la rétraction d'un échantillon de sol en cours de séchage. *Apparatus to measure the retraction of a soil sample during drying.*

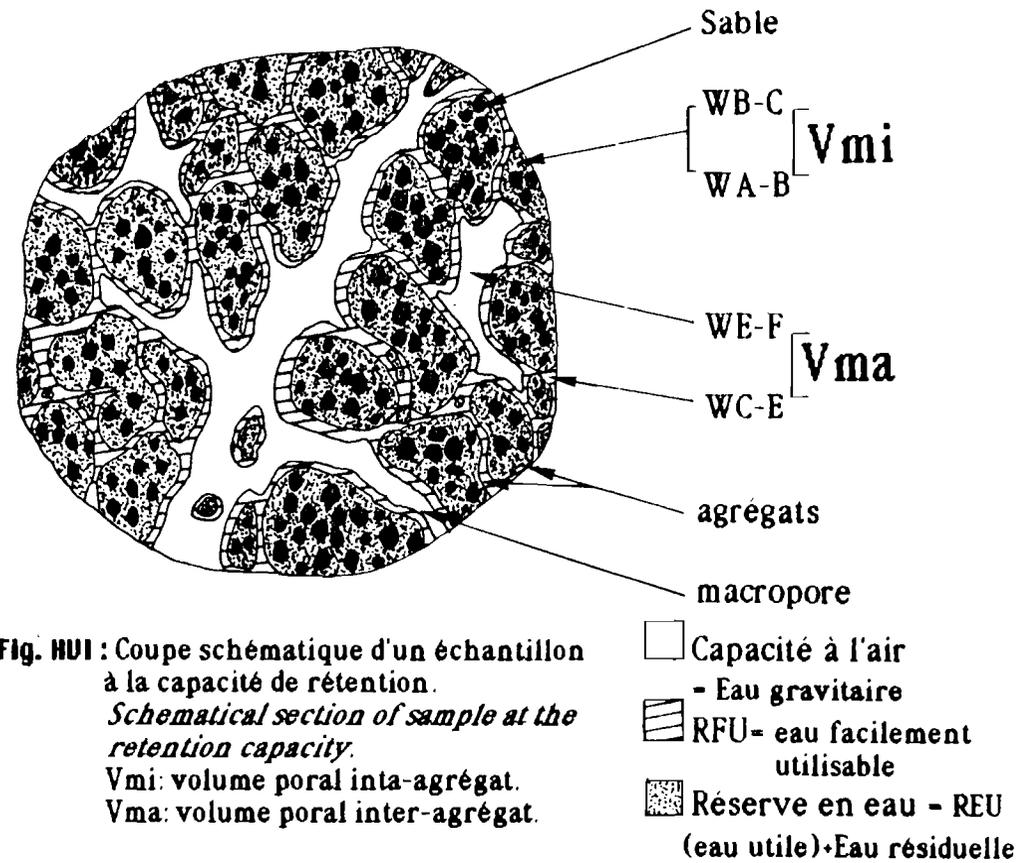


Fig. HDI : Coupe schématique d'un échantillon à la capacité de rétention. *Schematical section of sample at the retention capacity. Vmi: volume poral intra-agrégat. Vma: volume poral inter-agrégat.*

II.2. Retractométrie:

a) Présentation:

La retractométrie est une méthode de caractérisation physique du sol, basée sur l'analyse de la rétraction d'échantillons non remaniés de sol.

Cette méthode a été élaborée et développée récemment par le laboratoire d'Hydro-physique de l'O.R.S.T.O.M. Bondy (BRAUDEAU E., 1987-1988).

Principe et théorie:

L'analyse structurale d'un échantillon de sol, nécessite la détermination quantitative des différentes phases solide-liquide-gaz, et la caractérisation de l'espace poral . Cette description doit tenir compte de la dynamique de la géométrie de cet espace poral, lors des variations de l'état hydrique.

La méthode consiste à mesurer en continu la rétraction d'un échantillon, lors de son dessèchement par évaporation dans une enceinte régulée en température et humidité. Ces résultats permettent d'établir la courbe de retrait, qui représente la variation du volume massique d'un échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau (fig. XV).

Le sol est considéré comme une structure dynamique composée de deux organisations associées :

Une phase active, le plasma argileux, micro-organisée en agrégat ; Elle possède une porosité interne dite intra-agrégat correspondant à la microporosité ou porosité texturale.

Une phase passive, macro-organisée formant l'ensemble agrégé de l'échantillon dont la porosité dite inter-agrégat correspond à la macroporosité ou porosité structurale.

L'étude retractométrique repose sur l'établissement d'une équation paramétrique modélisant la dynamique structurale d'un échantillon de sol avec la variation de la teneur en eau. Cette équation est basée sur plusieurs hypothèses définissant notamment les volumes structuraux du sol. Les conditions expérimentales sont réglées de manière à ce que le départ d'eau dans l'échantillon se fasse par ordre de taille de pores décroissante et supposent l'isotropie du retrait.

$T=0$	WO	LIMITE DE SATURATION	$W = W_{ma} + W_{mi}$	
		EAU MACRO "LIBRE" entrée d'air 	TRES HUMIDE	Egr
	WE	CAPACITE DE RETENTION		
		EAU MACRO "LIEE" sortie d'eau 	HUMIDE	
	WC	POINT DE FRIABILITE	$W_{ma}=0$	RE = RFU + REU
		EAU MICRO "LIEE" 	FRAIS	
	WB	POINT DE FLETRISSEMENT	$W = W_{mi}$	
		EAU MICRO RESIDUELLE AIR MICRO 	SEC	
	WA	LIMITE DE RETRAIT		Eré
			$W_{mi}=0$	

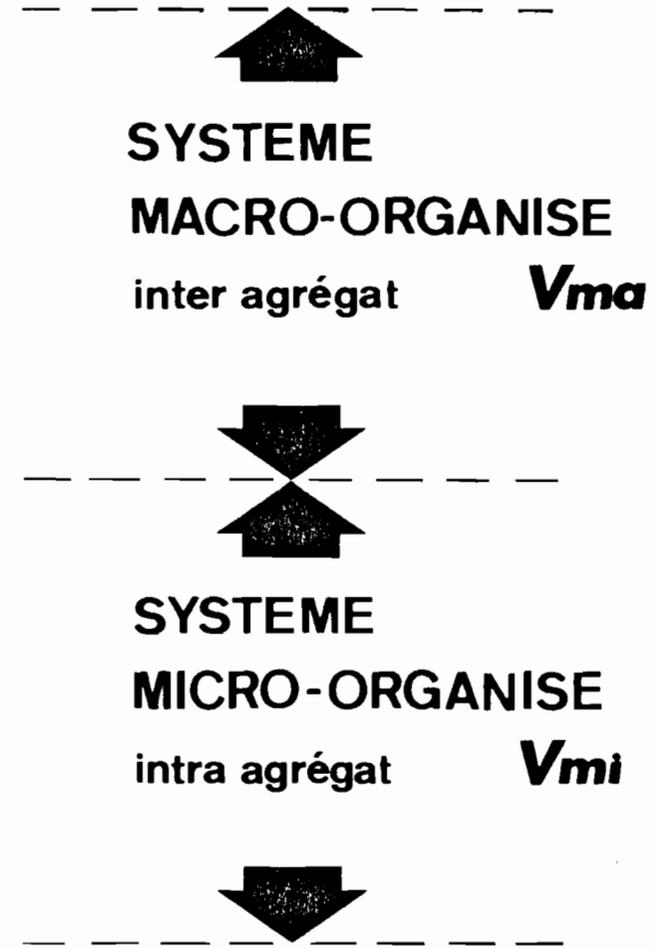


Tableau I :

Définition de deux systèmes de microorganisation de l'espace poral et des phases dont ils sont composées.

La lecture du tableau de haut ($t=0$) en bas ($t=X$) permet d'appréhender la rétraction d'un échantillon de sol non remanié.

Définition of two systems of porosity microorganisation. The reading of the table top to bottom authorize to apprehend the shrinkage of an undisturbed sample.

*Le point E sépare l'état physique du sol où l'eau est libre dans la macroporosité, de l'état physique du sol où l'eau est associée à la microporosité déformable.

*Le point C est le point exact où la couche d'eau entourant les agrégats à complètement disparu (Teneur en eau dans la macroporosité $W_{ma}=0$).

*Au point B l'air pénètre dans V_{mi} (volume poral intra-agrégat). L'eau n'est plus mécaniquement en contact avec les racines.

*Le point A est la limite de retrait. Egr- Eau gravitaire RE- Reserve en eau Eré- Eau résiduelle
*d'après BRAUDEAU E.,1988.

Nous ne reviendrons pas sur les détails théoriques qui ont été exposés lors de récentes publications (BRAUDEAU E., 1988).

La modélisation du retrait, dérivée de l'équation paramétrique, permet la caractérisation quantitative de la structure du sol et de ses volumes fonctionnels. Les paramètres de l'équation sont au nombre de huit choisis parmi les coordonnées des points particuliers limitant les phases de retraits et caractérisant ces phases. Ces points sont appelés **PARAMETRES PEDO-HYDRIQUES**. Une combinaison linéaire de ces paramètres permet de définir un aspect de la structure du sol (par exemple la réserves en eau ...).

Les figures XV et XVI associées au tableau I rendent compte de façon simple et schématique de la définition des caractères pédo-hydriques, ainsi que la relation avec des termes traditionnels (RFU, REU...).

Appareillage et manipulation :

L'appareillage est constitué d'une **balance électronique** reliée à un **micro-ordinateur**. Au dessus du plateau de la balance est installé un bras mobile terminé par un **palpeur** qui est mis en contact avec l'échantillon. Ce dispositif repose dans une **enceinte fermée thermostatée à 28°C**.

Une mesure du poids de l'échantillon et de son diamètre est effectuée à intervalle régulier par le **micro-ordinateur**. Cette expérimentation nécessite une protection de l'échantillon (cylindre de 7 cm de diamètre et de 5,5 cm de longueur, de sol non remanié), par une **couche de colle néoprène** sur la partie cylindrique de ses faces, et sa **saturation en eau** (mise en contact avec l'eau sur une plaque poreuse durant deux à trois jours). Après l'expérimentation, pour l'établissement de l'équation paramétrique, il est nécessaire de **mesurer**: le poids de néoprène, la masse solide sèche, le volume sec (principe de la poussée d'Archimède), ainsi que la **densité réelle de l'échantillon**.

En fin d'étude, l'analyse **granulométrique** et la mesure du **pF 4,2** ont été systématiquement effectuées sur chaque échantillon.

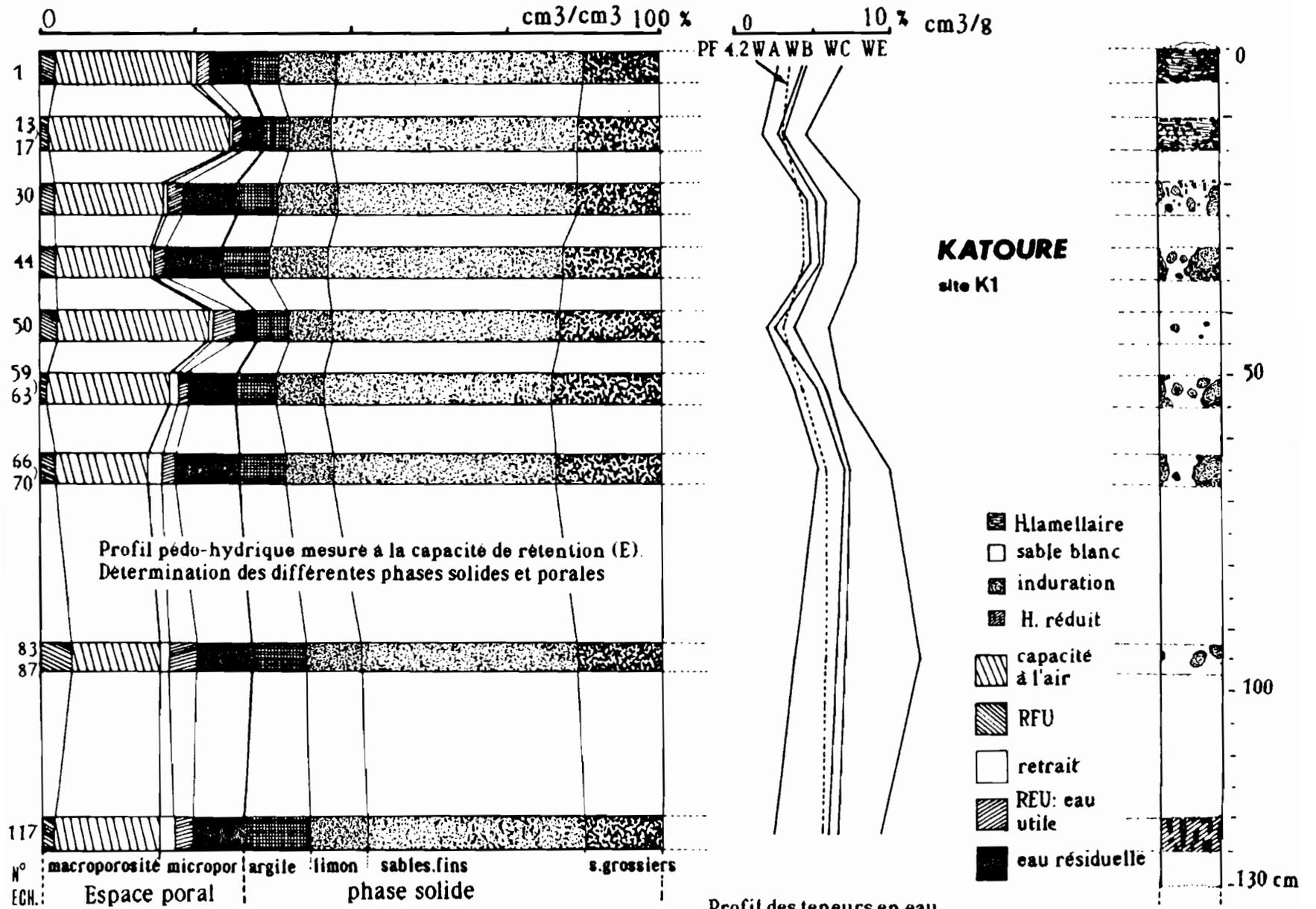


Fig. HUII : Profil pedo-hydrigue en K1. (Au point E)
Pedo-hydrigue profile in K1.

b) Résultats et construction de profils pédo-hydriques:

En vue de cette étude 127 échantillons non remaniés ont été prélevés, conservés humides sous emballage clos, protégés et expédiés au laboratoire de l'ORSTOM Bondy : 117 échantillons sur le site K1, prélevés systématiquement par 9 sur 13 niveaux différents, coordonnés et décrits ; 10 échantillons sur le site K2 localisés dans des zones précises.

En raison d'un programme d'utilisation très intensif de l'appareil seul une vingtaine d'échantillons (14 en K1 et 7 en K2), ont pu être étudiés. Ils ont été sélectionnés sur des critères morphologiques, afin de tenter de mettre en évidence d'éventuelles différences entre les échantillons, ceci, à la fois, sur un même niveau et le long d'un profil de bas en haut.

Le traitement des données et les résultats obtenus ont montré que nous étions en limite d'utilisation de l'appareil, le retrait étant toujours très faible. Néanmoins la courbe de retrait, sur échantillons très sableux possède un assez bon ajustement et la validité des résultats n'est pas à mettre en question. Le pourcentage d'erreur sur les résultats finaux semble être faible de l'ordre du pour cent cm^3/cm^3 , mais cette estimation d'erreur nécessiterait un protocole approprié d'étude, qui n'a pas été encore entièrement réalisé pour l'instant.

Les variations très faibles, inférieures au pour cent (cm^3/cm^3), des paramètres pédo-hydriques entre deux échantillons d'un même niveau et de morphologie proche, permettent de confirmer la validité des résultats obtenus. Les échantillons, par exemple 13 et 17, ont été prélevés à un même niveau (à 10 cm de profondeur) et ils possèdent des caractéristiques morphologiques semblables (structure lamellaire). L'étude en rétractométrie donne des résultats proches, les différences enregistrées étant au maximum de un point.

Pour chaque échantillon un "diagramme rectangulaire" représentant le volume de l'échantillon total a été construit. Ce volume est composé de sa phase solide (précisé par les données granulométriques), et de son espace poral où l'importance de chaque caractère pédo-hydrique est exprimée.

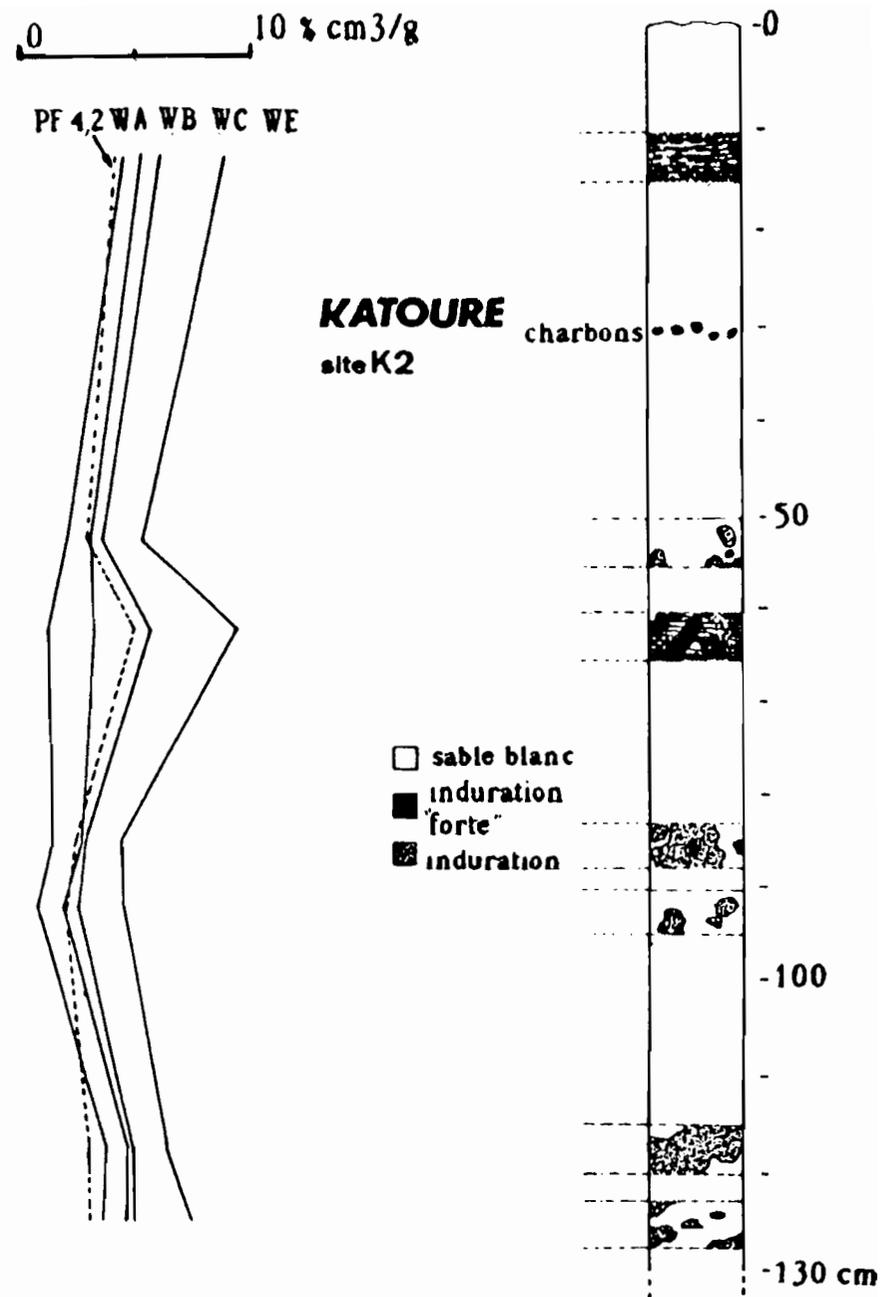
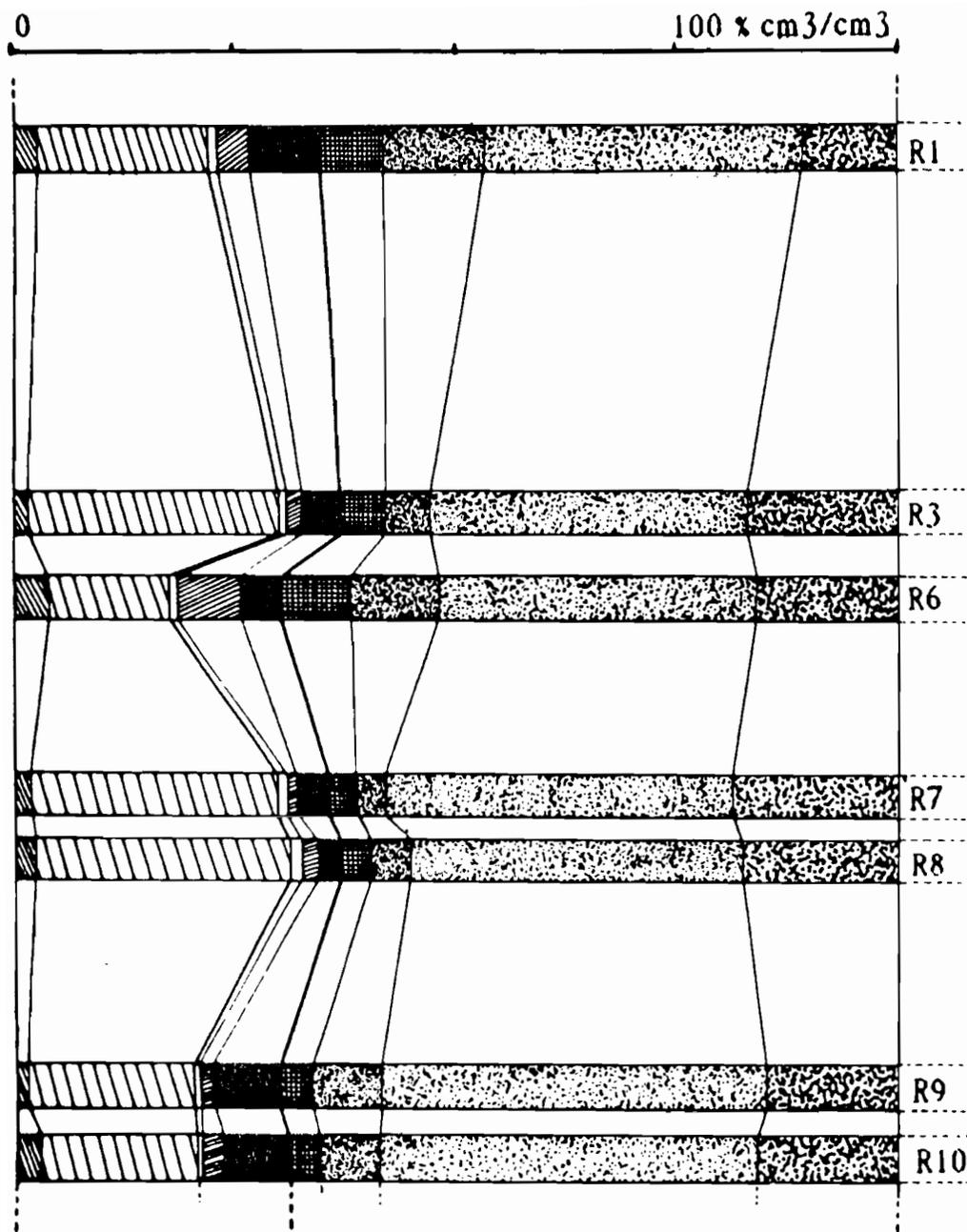


Fig. HVIII: Profil pédo-hyfrique en K2.
(cf légende Fig. XVII.)

Ce diagramme représente, donc, une véritable "radiographie" du volume de l'échantillon, dévoilant l'organisation de son espace poral à un état hydrique donné (à la capacité de rétention). Cette "radiographie" n'est pas figée, puisqu'elle permet d'évaluer l'évolution de la porosité de retrait en fonction des contraintes hydriques.

Sur un site l'ensemble de ces "radiographies" mises en regard avec la stratigraphie, permet de dresser ce que l'on appellera un "profil pédo-hydrique" (cf. figs. XVII et XVIII).

Ces profils pédo-hydriques, que se soit en K1 ou K2, mettent en évidence la présence d'une variabilité de caractères, que l'on peut, semble t-il, dans tout les cas, associer à une variation d'ordre structural.

Les différenciations réalisées sur de critères morphologiques et par la rétractométrie semblent concordantes et de sensibilités voisines. Ainsi le critère "induration", exprimé morphologiquement par une couleur rouille (et lie-de vin en K2) est systématiquement exprimé par la rétractométrie, par la variation dans un même sens de certain des caractères pédo-hydriques. Ceci s'effectue de façon proportionnelle avec l'intensité de l'induration, qui est toute fois difficilement estimable morphologiquement.

Des distinctions de comportement sont à noter, entre deux niveaux lamellaires de la surface (1 et 13,17), entre ces niveaux et ceux du deuxième horizon (cf. description du profil), et dans ce deuxième horizon : entre des échantillons présentant des tâches rouilles plus ou moins indurées et d'autres formés essentiellement de sable blanc (par exemple 44 et 50).

En résumé, les trois démarches bilan hydrique "in situ", description morphologique et rétractométrie mettent en évidence l'existence d'un sol présentant des caractères non uniformes.

Les facteurs d'hétérogénéité, relevés à plusieurs échelles et par des méthodes complémentaires, ont pour origine la variation de la micro-organisation plasma-squelette (structure lamellaire, grumeleuse, massive - Importance du plasma géfuriques et porphyrosquelique d'oxydes de fer - Distribution de la porosité: abondance des chenaux racinaires, granulométrie, hétérométrie et granoclassement des quartz).

III* Partie Synthèse. Discussion.

Les vides occupés par les phases liquides et gazeuses constituent le système poral du sol, et c'est à travers son étude quantitative (Rétractométrie) et qualitative (Micromorphologie) que nous tenterons de caractériser le rôle des variations de structures, notamment au niveau des indurations, dans les modifications de comportement hydrodynamique du sol (Bilan hydrique "in situ").

La recherche des relations existant entre les caractéristiques structurales, pédo-hydriques, hydrodynamiques, associées aux données de la physico-chimie représente donc l'essentiel de la démarche adoptée dans cette troisième partie.

III.1. Caractérisation quantitative :

Cette étape sera essentiellement abordée, par un regard porté à l'ensemble des graphiques synthétiques (figs. XVII à XXII).

L'examen du profil pédo-hydrique K1, associé aux autres données, nous donne l'image d'un échantillon, que nous qualifierons de "témoin" (-ce terme étant plus approprié que "moyen"-), caractérisé par:

Une phase porale d'une trentaine de pour cents, composé en grande partie par la macroporosité. Cet échantillon est très sableux (80% de sable), possédant des teneurs en matières organiques et fer variables, respectivement de 0,5 à 5% et de 0,3 à 1,6%..

En plus de "ce bruit de fond", il est possible d'entrevoir quatre grandes tendances, reflétant les propriétés de certains types d'échantillons:

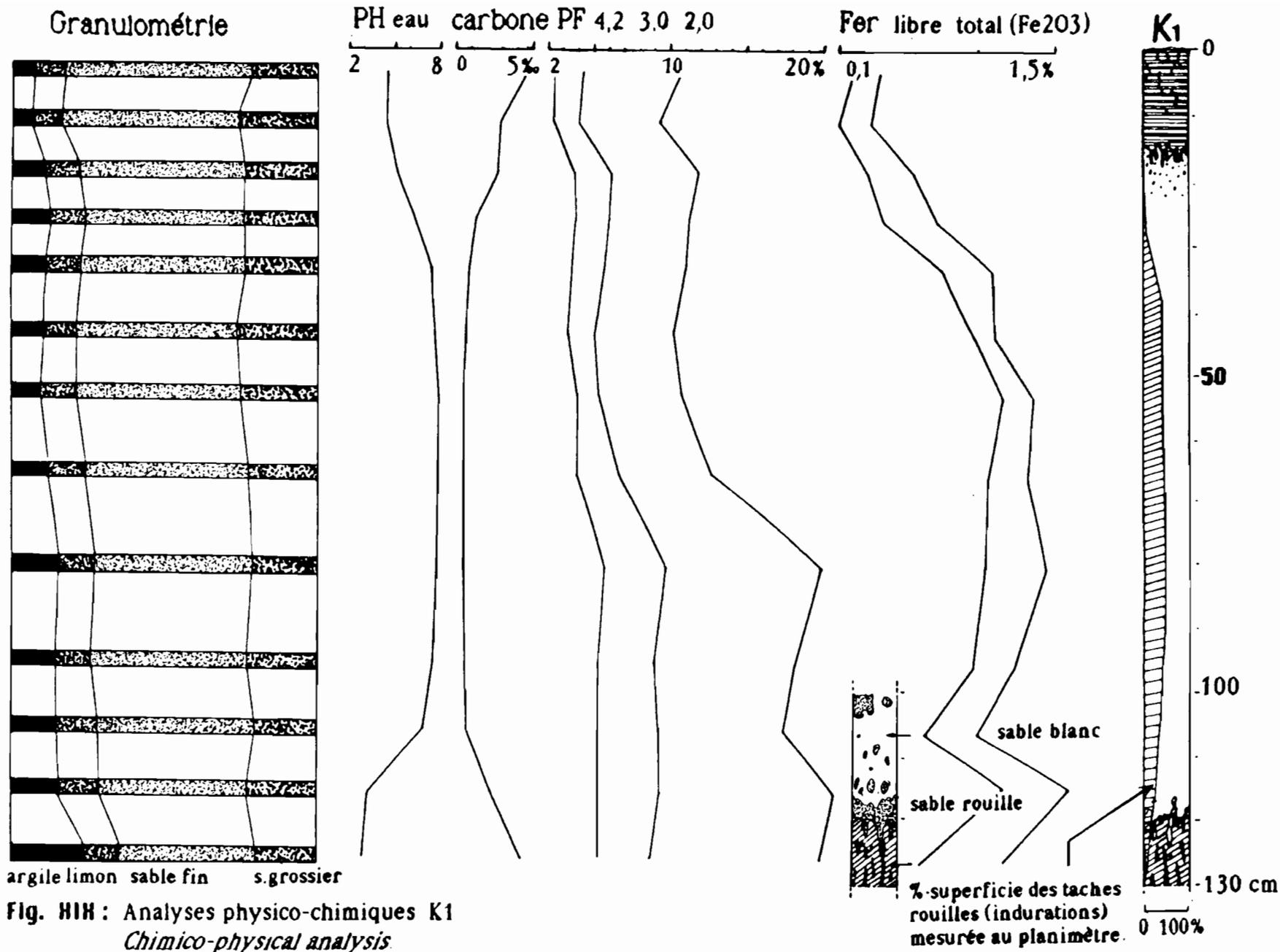


Fig. H1H : Analyses physico-chimiques K1
Chimico-physical analysis

Le premier correspond aux **échantillons de l'horizon de surface** qui se caractérisent par un plus grand espace poral, principalement occupé par la macroporosité, et dont la microporosité restreinte possède une faible faculté de rétraction. La granulométrie toujours sableuse présente de faibles teneurs en argile. Tandis que la teneur en carbone est très élevée de l'ordre de trois à cinq pour mille, la teneur en fer est, elle, très faible, mais non négligeable (0,3 %). La teneur en eau au point de flétrissement est également basse (de 2 à 3%).

Dans ce type, deux sous catégories sont à noter, représentées par les échantillons 1 et 13,17. La différence réside dans l'importance de la phase argileuse et de la microporosité associée.

Le deuxième type de différenciation correspond aux échantillons dont la morphologie se rapproche des "**sables blancs**" (cf. échantillon 50). Il est caractérisé par un grand espace poral essentiellement occupé par la macroporosité et l'eau gravitaire ou capacité à l'air. On note de faibles teneurs en argile, en fer, et l'inexistence de matières organiques. La teneur en eau au point de flétrissement est faible (3 %).

Le troisième type de différenciation correspond, à l'opposé du précédent, aux échantillons ayant une morphologie de "**sables rouilles indurés**". Les caractères vont très exactement à l'inverse de ceux précédemment cités, à l'exception du taux de carbone qui reste inexistant.

Les caractéristiques de l'**horizon réduit** sont plus difficiles à mettre en évidence, un seul échantillon ayant été analysé (117). Un quatrième type, peut néanmoins être identifié : Espace poral moyen où la microporosité est légèrement plus faible que la macroporosité; importante teneur en argile (14 %) et en carbone (5 % - racines de rhizophoras) par rapport aux précédents types, et la teneur en eau au point de flétrissement restant élevée (5 %). La teneur en fer reste du même ordre que dans les horizons précédents (1,5 % Fe₂O₃).

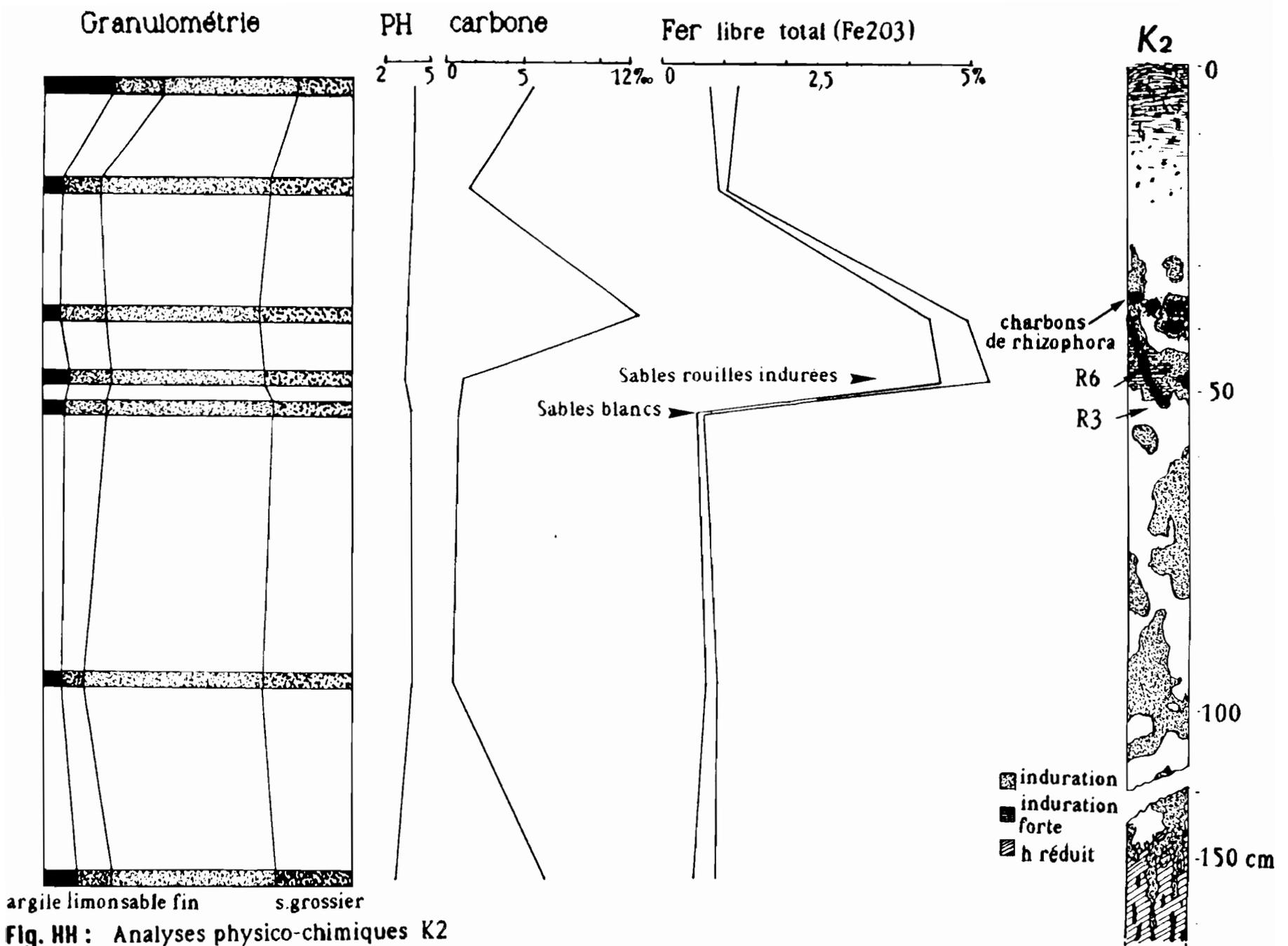


Fig. HH : Analyses physico-chimiques K2
Chimico-physical analysis.

L'examen du site K2 donne les enseignements suivants:

Un horizon de surface différent plus argileux, dont l'espace poral est toujours élevé, mais où la microporosité acquiert une certaine importance.

La distinction entre les volumes de "sables blancs" et "sables rouilles indurés" est nette, avec les mêmes variations de caractéristiques pédo-hydriques, et ceci de façon plus accentuée, notamment très visible sur la teneur en fer et sur la caractérisation de l'espace poral.

Ne possédant pas d'échantillon de la zone réduite, étudié par la retractométrie, nous ne pouvons que constater la présence de valeurs voisines dans les analyses classiques par rapport à K1.

Ces résultats mettent en valeur et caractérisent les hétérogénéités déjà décrites dans la première partie.

Toutes ces analyses reposent sur l'étude d'un très petit nombre de résultats, ils ne sont donc pas exploitables statistiquement. De plus, la caractérisation morphologique de chaque échantillon par l'observation de ces faces reste délicate, puisque les échantillons ne peuvent pas être considérés comme isotropes.

Cependant, reprenons, de façon succincte, la caractérisation des indurations:

La fig. XXI montre l'importance des variations pédohydriques entre des échantillons indurés et non indurés.

Une droite relie les échantillons non et peu indurés, et une autre les échantillons qualitativement décrits comme plus indurés. La surface qui sépare ces courbes correspond donc à une estimation de l'intensité des variations de chaque caractère dans l'induration.

L'observation de ces graphiques, couplée à un calcul (différence entre les caractères structuraux quantifiés d'échantillons, de même niveau, faiblement et fortement indurés - cf tableau II -), rend compte des grandes tendances structurales caractérisant cette différenciation.

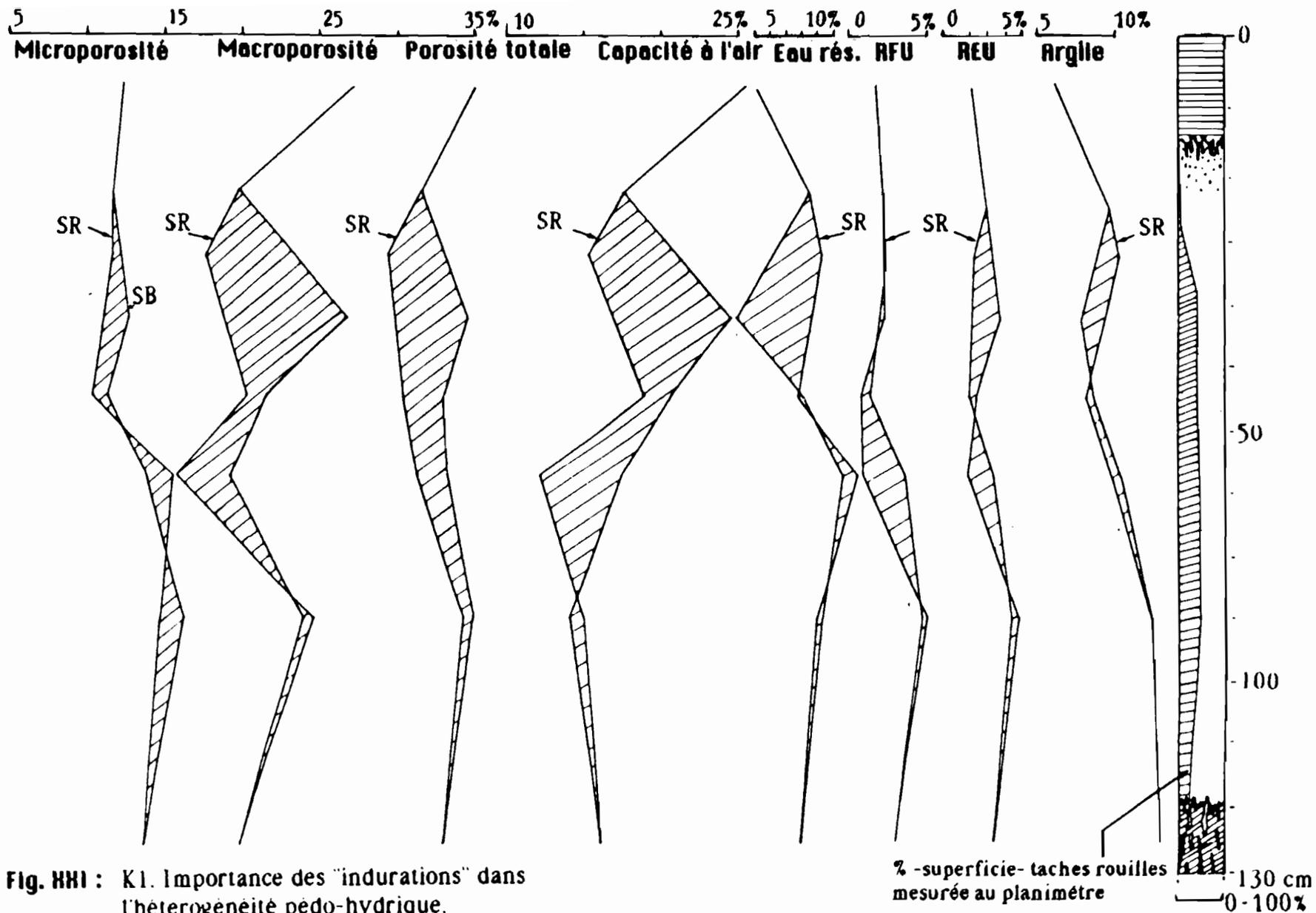


Fig. HHI : K1. Importance des "indurations" dans l'hétérogénéité pédo-hydrrique.

Indurations importance in the pedo-hydrrique heterogeneity K1.

SR : Courbe reliant les échantillons de sables rouilles indurées.
Curve between rust sand samples.

SB : Courbe reliant les échantillons de sables blancs.
Curve between white sand samples.

Tableau II : Différence entre des échantillons faiblement à fortement indurés

--> passage à l'induration.

N°Ech.	P.Total	Macro.	Micro..	E. gr..	RFU	REU	E.rés..	Argile
50->49	-5,2	-9,0	+3,9	-3,1	+0,1	-1,6	+5,5	+3,4
59->63	-2,5	-1,3	-1,3	-1,9	+0,6	-0,4	-0,2	+0,5
66->70	-1,8	-3,7	+1,8	+5,3	+1,7	+1,5	+0,8	-0,5
Moy	-3,2	-4,6	+1,5	-5,4	+0,8	-0,4	+2,0	+1,1
R3->R6	-6,5	-12,5	+6,0	-14,8	+2,3	+5,0	+0,0	+2,6
R8->R7	-1,4	-1,7	+0,3	-1,4	-0,3	-1,1	+1,3	+0,3
R10->R9	-1,0	-0,3	-0,2	+0,8	-1,0	-1,3	+0,2	+0,0
Moy.	-3,0	-4,8	+1,8	-5,1	+0,3	+0,9	+0,5	+1,0

Entre des échantillons morphologiquement extrêmes, comme en K2, (R3: sable blanc; R6: sable rouille et lie-de-vin), le passage à l'induration s'exprime par une chute de la porosité totale de 6 points, avec une baisse de la macroporosité de 12 points, induisant une augmentation de la microporosité de 6 points. L'eau gravitaire ou capacité à l'air est la plus marquée, avec une chute de près de 15 points. Les réserves en eau augmentent légèrement, de 2 points pour R.F.U., et de 5 points pour REU. L'eau résiduelle reste stable. En parallèle l'argile augmente de 3 points.

A cet exemple didactique s'ajoutent un certain nombre d'autres cas, qui nous montrent les mêmes tendances (En moyenne : chute de la porosité totale de 3 points, de la macroporosité et de la capacité à l'air de 5 points chacun. Augmentation de la microporosité de 2 points et argile de 1 point.). Toute-fois il semble impossible de caractériser la variabilité des réserves en eau, celle-ci étant aléatoire sur nos quelques résultats.

Après ce premier aperçu, comparons les caractéristiques pédo-hydriques obtenues par rétractométrie et les caractéristiques de comportement hydrodynamique mesurées par le bilan hydrique "in situ" (fig.XXII).

Les premières remarques sur la relation entre descriptif - situation des tensiomètres - et comportement, nous permet de mettre, cette fois ci, face à face, à des proches niveaux stratigraphiques, les échantillons de rétractométrie avec les groupes hydrodynamiques précédemment décrits.

Relations de la conductivité hydraulique (K) et de la capacité de rétention (H) avec les différentes teneurs en eau (1, 2, 3...).

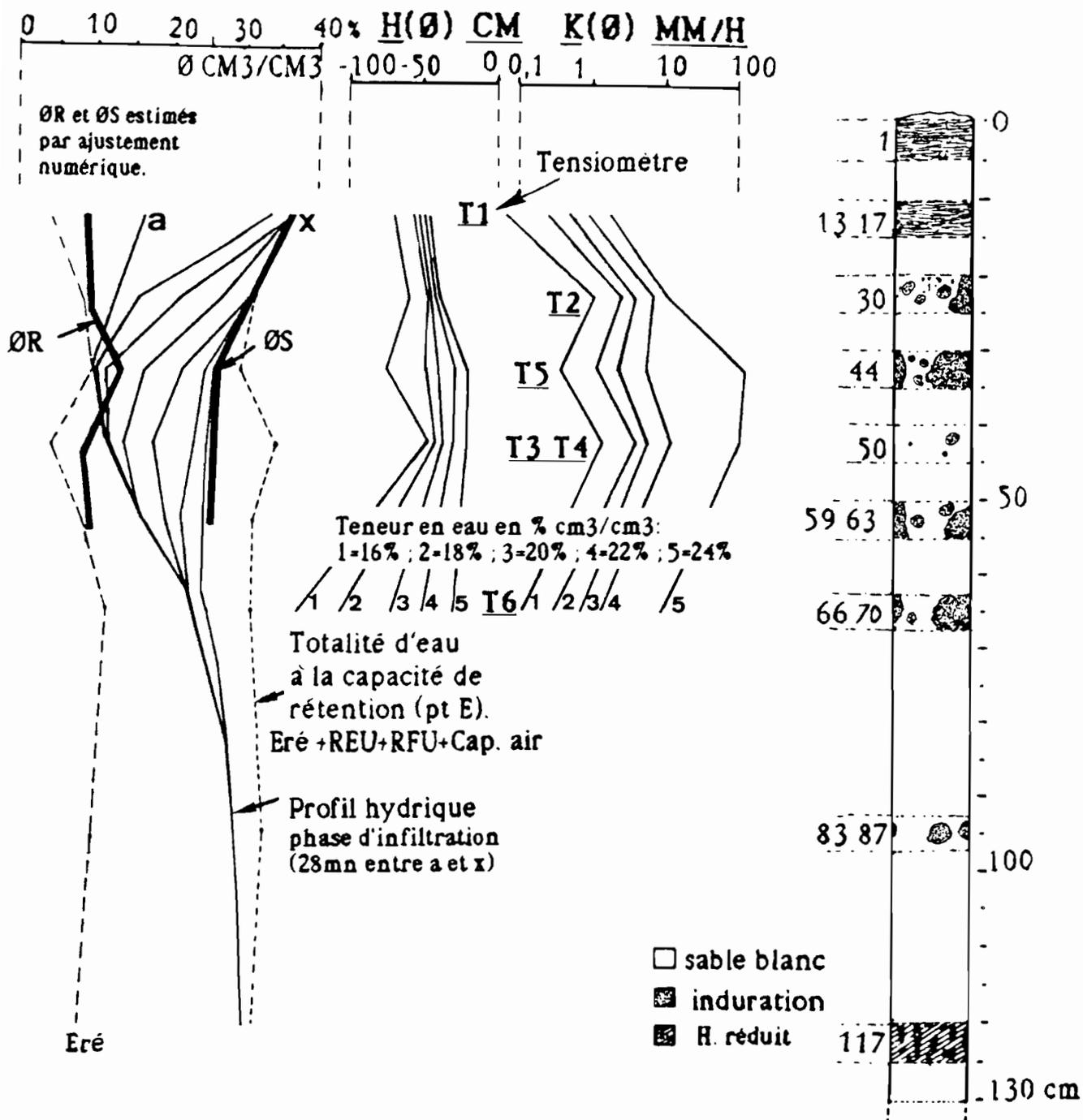


Fig. HHII : Relation entre les données du bilan hydrique (courbes en trait plein) et de la rétractométrie (en pointillé).
Relation between the hydric balance data and retractometric data.

La comparaison s'effectue entre des échantillons non remaniés et tensiomètres de situation stratigraphique et morphologique voisin

Relation avec le profil hydrique lors d'une infiltration:

Ce profil, établi par mesures neutroniques, met assez bien en évidence la discontinuité hydrique reflétée sur la description par la limite sec au toucher et la présence de la nappe vers les 130 cm.

La teneur en eau à saturation (θ_S) est sous estimée par rapport à la teneur en eau calculée à la capacité de rétention par la rétractométrie.

La teneur en eau résiduelle (θ_R), évaluée par le bilan hydrique est sur estimée par rapport à la teneur en eau résiduelle mesurée par la rétractométrie.

Relation avec les relations $h(\theta)$ et $K(\theta)$:

Trois comportements sont à distinguer :

-Horizon lamellaire de surface: faible conductivité

et forte rétention de l'eau.

-Niveau de "sable blanc": forte conductivité et faible rétention.

-Niveau de "sable rouille induré": moins forte conductivité et plus forte rétention.

Il est à remarquer que la variation de comportement entre les niveaux indurés et non indurés disparaît quand la teneur en eau s'approche de la saturation.

Une étude des relations entre les diverses réserves en eau (espace poral), et les comportements hydrodynamiques a été tentée mais le nombre trop faible d'échantillons étudiés, interdit pour le moment toute hypothèse.

En résumé, nous retiendrons :

La faible conductivité des horizons supérieurs, paradoxale à leur grande capacité de rétention (macroporosité développée).

L'existence d'une disparité flagrante entre les échantillons "non indurés" et "indurés".

Cette différenciation s'exprime synthétiquement dans le passage à l'induration par quantitativement :

-Une augmentation de la teneur en fer total.

-Une chute de la porosité totale, de la macroporosité et de la capacité à l'air.

-Une augmentation de la microporosité et de la teneur en argile.

-Une baisse de la conductivité hydraulique.

-Une augmentation de la rétention de l'eau.

III.2. Caractérisation qualitative.

Précédemment (II^o partie), les hétérogénéités ont été mises en évidence. Récapitulons succinctement ces données avec leur caractérisation, et discutons de relation avec le comportement hydrodynamique, la caractérisation pédo-hydrique et physico-chimique.

La première hétérogénéité concerne la structure du premier horizon :

La microorganisation est lamellaire (micro-couches concaves tapissées localement de pailles de riz). Les grains de quartz sont par endroit, pontés par de la goethite imprégnant un peu d'argile. Ces faits semblent pouvoir expliquer la faible conductivité de cet horizon, malgré la forte macroporosité mesurée par rétractométrie, la perméabilité du sol étant contrôlée par les rares macropores biologiques sub-verticaux inter-lamellaires fonctionnels.

L'origine de la différence entre les échantillons 1 et 13,17 sur l'arrangement de leur espace poral détectée en rétractométrie peut être affectée à l'irrégularité de la microorganisation lamellaire (tendance à la structure grumeleuse) et de la porosité (chenaux, chambres, microcanaux...).

La deuxième hétérogénéité est formée par les "indurations". Elle se caractérise quantitativement et qualitativement par une fermeture de la macroporosité, imputable au passage d'une microorganisation chitonique et gélurique à porphyrique. Le colmatage de la porosité intergranulaire et des chenaux, par de la goethite et hématite, contribue à la chute de la macroporosité, de la capacité à l'air, et l'augmentation parallèle de la microporosité (importance du plasma argilo-ferrique). La conductivité hydraulique se trouve donc diminuée.

L'espace poral est d'abord déterminé par l'origine colluvio-alluviale du sédiment (tailles, formes et étalements granulométriques des particules).

Son évolution dans le sol s'effectue consécutivement aux transformations pédogénétiques, telles que l'illuviation, les réorganisations d'origine anthropiques (riziculture) et biologiques (terriers, racines, fissures ...).

L'évolution géochimique de ces sols sulfatés acides contribue à son hétérogénéité :

Celle-ci a été décrite par plusieurs auteurs, en résumé, on assiste à partir de l'oxydation, par voie biochimique, de la pyrite (cf.fig.XIV), à la précipitation d'oxyhydroxydes ferriques sous forme d'iron-pipes (cf.fig.XIII) et de jarosite (cf. planche IV) à l'emplacement des voies de pénétration de l'oxygène : canaux racinaires des anciens palétuviers (LE BRUSQ J.Y. et al., 1987 ; MARIUS C., 1985).

Conclusions

Ce mémoire avait pour but de mettre en relation la structure et le comportement hydrodynamique d'une couverture de sol.

A partir d'une démarche naturaliste, impliquant des observations à des échelles différentes et faisant appel à des techniques complémentaires, associée à une démarche expérimentale basée sur l'étude des courbes de retrait d'échantillons non remaniés (rétractométrie) conduisant à l'élaboration de profils pédo-hydriques, nous avons pu montrer l'existence de discontinuités structurales correspondant aux variations de comportement hydrodynamique de ce sol.

Les facteurs d'hétérogénéités, relevés à plusieurs échelles de façon qualitative et quantitative, ont pour origine la variation de la micro-organisation plasma-squelette : modification de l'espace poral, structuration, colmatage de la porosité et sans doute rigidification du plasma par des oxyhydroxydes de fer.

L'échelle d'instrumentation du bilan hydrique "in situ" n'est donc pas appropriée à la caractérisation de tels sols.

De ce travail, se dégagent deux perspectives pour une méthodologie de caractérisation hydrodynamique et structurale adaptée à de tels sols :

□ Pour pouvoir modéliser le fonctionnement de ces milieux hétérogènes deux options semblent possibles :

- Soit l'étude de modèles à petite échelle (parcelle de plusieurs Ha) intégrant l'ensemble des hétérogénéités. Cette option basée sur l'étude de la variabilité spatiale de paramètre hydrodynamique (TOUMA J. et al., 1988 ; VAUCLIN M., 1982 ; VOLTZ M, 1986) fait en partie l'objet du DEA de pédologie de EISENLOHR L. (1989) en ce qui concerne le site de Katouré.

Cette démarche suppose toutefois de disposer d'une méthode d'évaluation de la teneur en eau et du potentiel hydrique plus globale que celle utilisée actuellement. Ce serait le cas, notamment, de la méthode employée sur des vertisols par VOLTZ M. et CABIDOCHÉ Y.M. (1987), qui utilise la relation existant entre le volume spécifique du sol et sa teneur en eau "in situ". On pourrait proposer une généralisation de son emploi à d'autres types de sol moins gonflants.

- Soit l'établissement de modèles locaux à l'échelle des hétérogénéités. Par exemple sur le site K1, horizontalement 40% (sur 50 cm²) de la superficie est occupée par les taches rouilles indurées. Celles-ci sont irrégulières globulaires à vermiformes centimétriques d'allongement sub-vertical décimétrique.

Leurs caractérisations nécessitent l'emploi d'un nombre important de tensiomètres et ceci dans un faible espace.

L'implantation de micro-tensiomètres, par exemple d'un diamètre d'environ 5mm disposés dans un maillage horizontal de l'ordre de 5 cm² et vertical de 10 cm², le tout sur une surface inférieur au m², permettrait semble t-il une meilleure caractérisation.

Cependant plusieurs problèmes subsistent :

- La sonde à neutron, quant à elle, possède toujours une sphère d'influence beaucoup plus élevée englobant l'ensemble des hétérogénéités. On ne dispose pas pour l'instant de dispositif permettant d'évaluer la teneur en eau de façon ponctuelle.

- Cette technique nécessiterait l'emploi de modèles appropriés simulant les transferts hydriques en deux, voire trois, dimensions, ce qui pour le moment n'est pas encore maîtrisé.

Le choix entre ces deux options est un problème de choix d'échelle d'observation. Il dépend donc de l'objectif que l'on s'est fixé.

□ L'apport de la rétractométrie s'est avéré important et fiable.

Nous avons pu obtenir :

- Une grande précision sur les résultats.
- Une bonne sensibilité (capable de caractériser nettement les hétérogénéités

et constater

- L'existence d'un parallèle frappant entre les résultats de la rétractométrie et du bilan hydrique, ces méthodes correspondant à des échelles d'observation voisines.
- La possibilité d'utiliser cette méthode dans des milieux très sableux et hétérogènes. Cette technique n'ayant pour l'instant fait l'objet d'analyses que sur des sols argileux ferrallitiques (BRAUDEAU E., 1987, 1988).

La rétractométrie semble donc être un outil d'avenir à la caractérisation quantitative des propriétés physiques du sol.

Nous proposons donc, après une première reconnaissance de l'organisation pédologique, la caractérisation systématique d'un profil de sol par cette méthode comme préalable à l'installation d'un dispositif de caractérisation hydrodynamique.

BIBLIOGRAPHIE

AUBRUN A. ,1988

Mangrove ancienne de Basse Casamance. Caractérisation - Pédologie - Sédimentologie.
Thèse . Université Louis Pasteur . Inst. Géol. de Strasbourg. 165 p.

BARRY B; BOIVIN B.; BRUNET D.; MONTOROI J.P.; MOUGENOT B.; TOUMA J.; ZANTE P., 1988

Tentative d'évaluation des transferts hydriques et salins dans un bas fond aménagé.
Deuxièmes journées de l'eau au Sénégal. "Eau et développement".
Publication O.R.S.T.O.M. - I.S.R.A. 14p.

BOIVIN P.; LOYER J.Y.; MOUGENOT B; ZANTE P., 1986

Sécheresse et évolution de sédiments fluvio-marins au Sénégal.
Cas de la Basse Casamance.
Symposium INQUA - DAKAR.

BOIVIN P ; TOUMA J. ; ZANTE P., 1987

Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau.
1. Résultats expérimentaux.
Cah. O.R.S.T.O.M., série Pédol., Vol. XXIV, N°1, p.17-25.

BOUMA J.; JONGERIUS A.; JUGER A.; SCHOONDERBEEK D., 1977

The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons.
Soil. Sci. Am. J. Vol.41 : p.945-950.

BOUMA. J.; JONGERIUS A.; SCHOONDERBEEKK D., 1979

Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data.
Soil Sci. Am. J. 43, p.261-264.

BOUMA J.; BELMANS C.F.M.; DEKKER L.W.,1982

Water infiltration and redistribution in a silt toam subsoil with vertical worm channels.
Soil. Sci. Am. J. Vol.46 : p.917-921

BOUMA J.; KOOISTRA M.J.,1987

Soil morphology and soil water movement.
Micromorphologie des sols. Edité par N. FEDOROFF, L.M. BRESSON, M.A. COURTY.p 507 - 511.

BRAUDEAU E., 1987

Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés.
Science du sol. Vol 25 , N°2, p 85-95. 4 figs.

BRAUDEAU E., 1988

Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structuré.
C.R. ACAD. SCI. PARIS, t. 307, série II, p 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, p 1933-1936.

BRESSON L.M., 1987

Comportement hydrique d'un sol argileux acide.

Etude aux différents niveaux d'organisation.

Micromorphologie des sols. Edité par N FEDOROFF, L.M. BRESSON, M.A. COURTY. p 513-520.

BRUAND A., 1986

Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral, utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau.

Science du sol , Vol. 24, N°4, p 351 - 363.

BRUCKLER L., 1984

Utilisation de la tensiométrie en situation non-isotherme.

Science du sol, N°1. p.5-23.

BULLOCK P.; FEDOROFF N.; JONGERIUS A.; STOOPS G.; TURSIMA T., 1985

Handbook for soil thin section description.

Prepared under the auspices of the international society of soil science.

Waine research publications 150 p.

CHRETIEN J., 1986

Etude expérimentale de la porosité de mélanges sables-argiles. Aspects micromorphologiques.

Science du sol, N°4, p.333-355.

CHRETIEN J. , 1986

Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales.

Thèse Université de Dijon.

Publ. I.N.R.A. 412p.

CHRETIEN J.; PEDRO G., 1987

Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Saône.

Cah. O.R.S.T.O.M. Ser. Pedol, Vol. XXIII, N°1, p. 43-55.

CHRETIEN J., 1987

Analyse et quantification de l'espace poral de trois sols sur granite et micaschistes.

Comparaisons méthodologiques.

Micromorphologie des sols. Edité par N. FEDOROFF, L.M. BRESSON, M.A. COURTY. p.529-535.

CHRETIEN J.; TESSIER D., 1988

Influence du squelette sur les propriétés physiques des sols : Hydratation, gonflement et aération.

Science du sol, Vol. 26, N°4, p.255-268.

CURMI P., 1985

Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets.

Sciences du sol, Vol.26, N°3, p.203-214. 6 figs.

DAUDET F.A.; VACHAUD G., 1977

La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique.

Ann. Agron., 28(5), p.503-519.

DIAWARA B., 1988

Contribution à l'étude hydro-géologique de la nappe des formations fluvio-marines du bolong de Katouré.
D.E.A. de Géologie appliquée. Université de Cheik Anta Diop Sénégal.

EISENLOHR L., 1989

Détermination de la conductivité hydraulique à saturation (Ks) de sols sulfatés acides de Basse-Casamance (Sénégal) par la méthode du double anneau ou principe Muntz.
D.E.A. de pédologie O.R.S.T.O.M. PARIS VI. 50p.

FIES J.C.; STENGEL P., 1984

Relation entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols.
A.F.E.S.. Livre jubilaire. p.235-240. 4 figs.

HENIN S., 1976

Cours de physique du sol.
Vol. I et II. O.R.S.T.O.M. Edition.

KALCK Y., 1978

Evolution des zones a mangroves du Sénégal au quaternaire récent. Etudes géologiques et géochimiques.
Thèse de géologie . Université Louis Pasteur. 112p.

LE BORGNE J., 1988

La pluviométrie au Sénégal et en Gambie.
Université de Cheikh Anta Diop. O.R.S.T.O.M. Edition. 95p.

LESSARD L., 1981

Caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé et évolution structurale.
Science du sol, N°1, p.55-73.

LOYER J.Y.; BOIVIN P.; LE BRUSQ J.Y., ZANTE P., 1986

Les sols du domaine fluviomarín de casamance (Sénégal) : évolution récente et réévaluation des contraintes majeures pour leur mise en valeur.
In selected papers of the Dakar symposium on Acid Sulphate Soils.
Dakar, January 1986. Edited by H.DORST. p.16-24.

LE BRUSQ J.Y.; LOYER J.Y.; MOUGENOT B.; CARN M., 1987

Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer, et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal.
Science du sol, Vol.25, N°3, P.173-184.

MACKIE L.A., 1987

Production of three-dimensonal representations of soil macropores with a microcomputer.
Geoderma 40, p.275-280.

MARIUS C., 1979

Effets de la sécheresse sur l'évolution phytogéographique et pédologique de la mangrove en Basse Casamance.
Bull. Institut Fondamental d'Afrique Noire. Tome XXXXI, Série A, N°4, p.669-692.
3 Figs.

MARIUS C., 1985

Mangroves du Sénégal et de la Gambie.
Ecologie, pédologie, géochimie. Mise en valeur et aménagement.
O.R.S.T.O.M. Edition.358p.

MICHEL P., 1969

Les grandes étapes de la morphogénèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie pendant le quaternaire.
Bull. Institut Fondamental d'Afrique Noire. Tome XXXI, Série A, N°2, p.293-323.

MONTOROI J.P.; TOUMA J.; ZANTE P., 1989

Caractérisation hydrodynamique "in situ" des sols alluviaux de la vallée de Katouré (Basse Casamance). I sols sableux.
O.R.S.T.O.M. 49p.

MURPHY C.P., 1978

Pore space variability in a sub-surface horizon of two soils.
Journal of Soil Science, 29, p.156-166.

PELISSIER P., 1966

Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance.
Imp. Fabrègue, St Yrieux.

POSS R.; SARAGONI H., 1987

Quelques problèmes posés par l'estimation du bilan hydrique en plein champ.
Dans: Milieu poreux et transferts hydriques. Nov 87. Bull. G.F.H.N., N°22.

PROTZ R.; SHIPITALO M.J.; MERMUT A.R.; FOX C.A., 1987

Image analysis of soils . Present and Future.
Geoderma 40, p.115-125.

REEVE M.J.; HALL D.G.M., 1978

Shrinkage in clayed subsoils of constrasting structure.
Journal of Soil Science, 29, p.315-323.

STAIMESSE J.P., 1967

Contribution à l'étude des sols jaunes de Basse-Casamance. Rapport de stage.
O.R.S.T.O.M.. Dakar Hann. 112p.

STENGEL P., 1979

Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ.
Ann. Agron., 30(1), p.27-51.

TOUMA J et BOIVIN P., 1988

Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. 2. Résultats numériques.
Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., Vol. XXIV, N°1, P.27-37

VACHAUD G.; DANCETTE C.; SONKO S.; THONY J.L., 1978

Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé.
Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique.
Ann.Agron., 29(1), p.1-36.

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 calcshistes
sédimentaires en moyenne et haute montagne (Alpes du Nord, Beaufortain).
Thèse I.N.A. Géologie appliquées. Paris-Grignon. 281p.

VAN OORT F., 1987

Methodes d'observation et de mesure de la structure du sol.
Micromorphologie des sols. Edité par N. FEDOROFF, L.M. BRESSON, M.A. COURTY. p.521-
528.

VAUCLIN M, 1982

Méthodes d'études de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol.
Colloque S.H.F. - I.N.R.A. ; AVIGNON juin 82, p.9-45.

VIEILLEFON J , 1974

Contribution à l'étude de la pédogenèse dans le domaine fluvio-marin en climat tropical
d'Afrique de l'Ouest. Importance du comportement géochimique du soufre dans
l'acquisition et le développement des caractères pédologiques.
Thèse de doctorat d'état. O.R.S.T.O.M. Paris . 361 p.

VIEILLEFON J., 1974

Quelques conséquences des transformations du soufre sur la pédogénèse dans une séquence
de sols du domaine fluvio-marin tropical.
Cahier O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., Vol.XII, N°1, p.47-69.

VIEILLEFON J., 1977

Les sols des mangoves et des tannes de Basse Casamance.
Mémoire O.R.S.T.O.M. N°83, 291 p.

VIZIER J.F., 1978

Etude de la dynamique du fer dans les sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau.
Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar.
Cah. O.R.S.T.O.M. , sér. Pédol., Vol. XVI, N°1, p.23-41.

VIZIER J.F., 1988

Le Fer indicateur de l'hydromorphie. Etude de sa dynamique dans les sols subissant un
excès d'eau.
Dans : Milieux poreux et transferts hydriques. Buletin du G.F.H.N., N°23.

VOLTZ M., 1986

Variabilité spatiale des propriétés physiques d'un sol en milieu alluvial.
Thèse ENSA Montpellier. 196 p.

VOLTZ M. ; CABIDOCHÉ Y.M., 1987

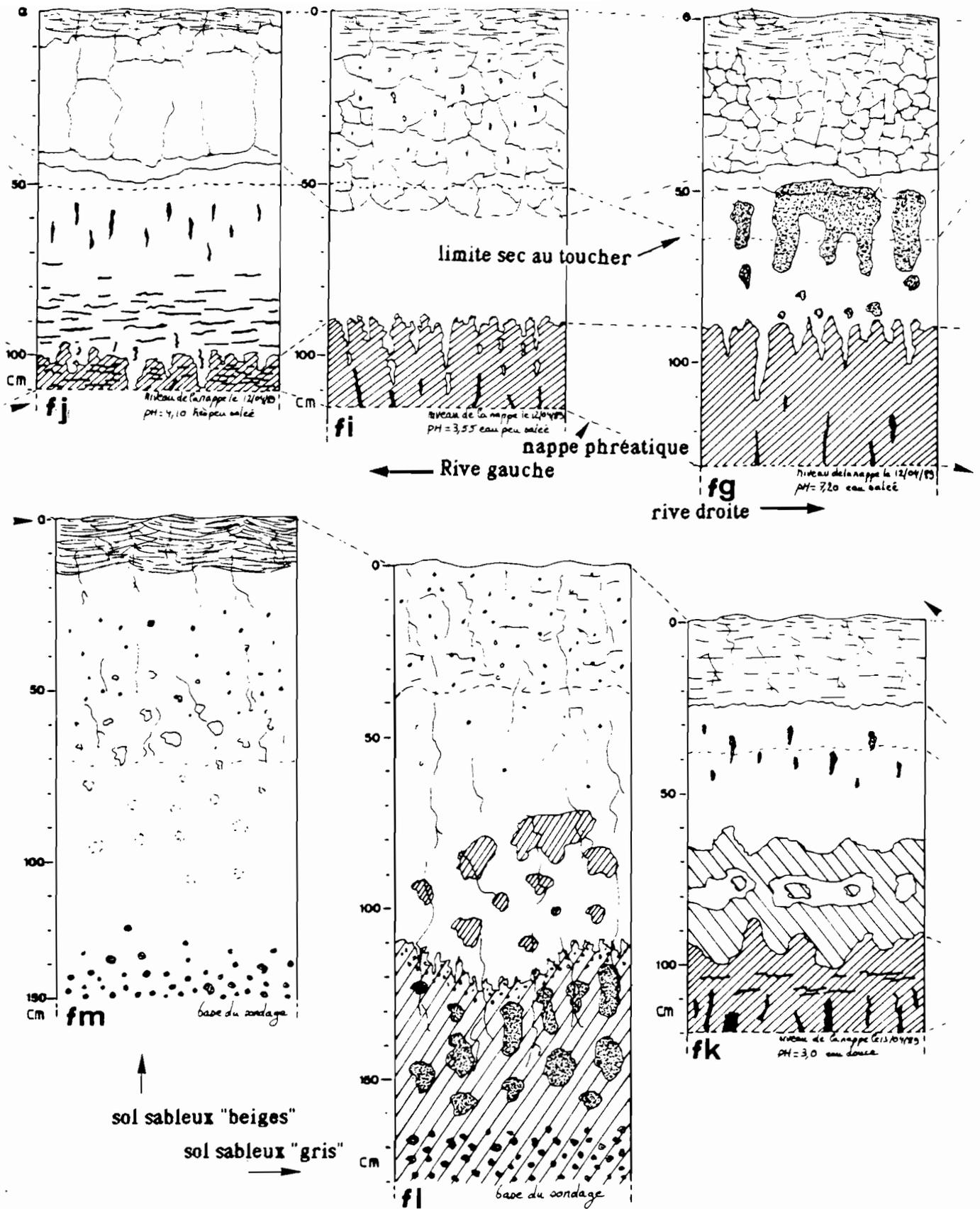
Sur le retrait macroscopique d'un sol argileux gonflant. Modèle de relation entre le
retrait vertical et les variations de teneurs en eau. Vérification expérimentale du modèle.
C.R. Acad. Paris t.305, série II, p.511-516.

ANNEXE :

1. TRANSECT

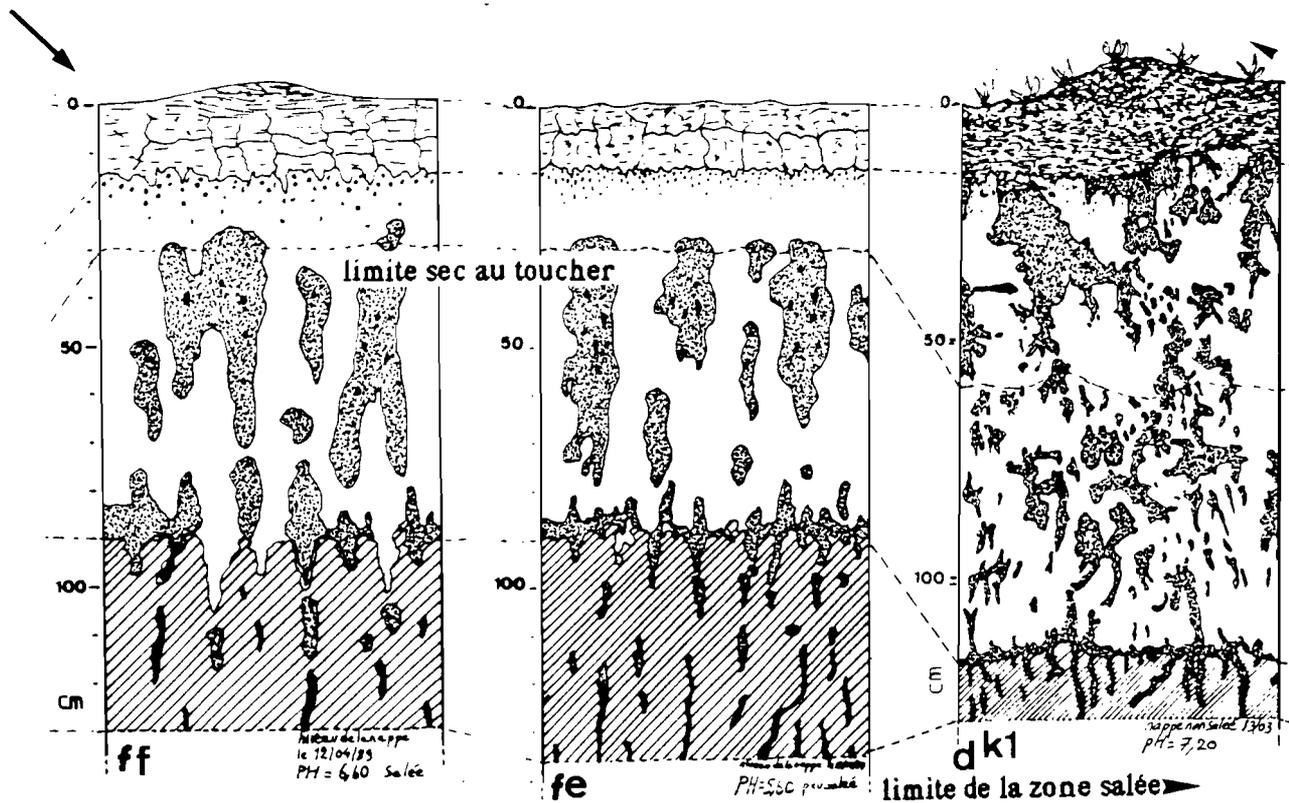
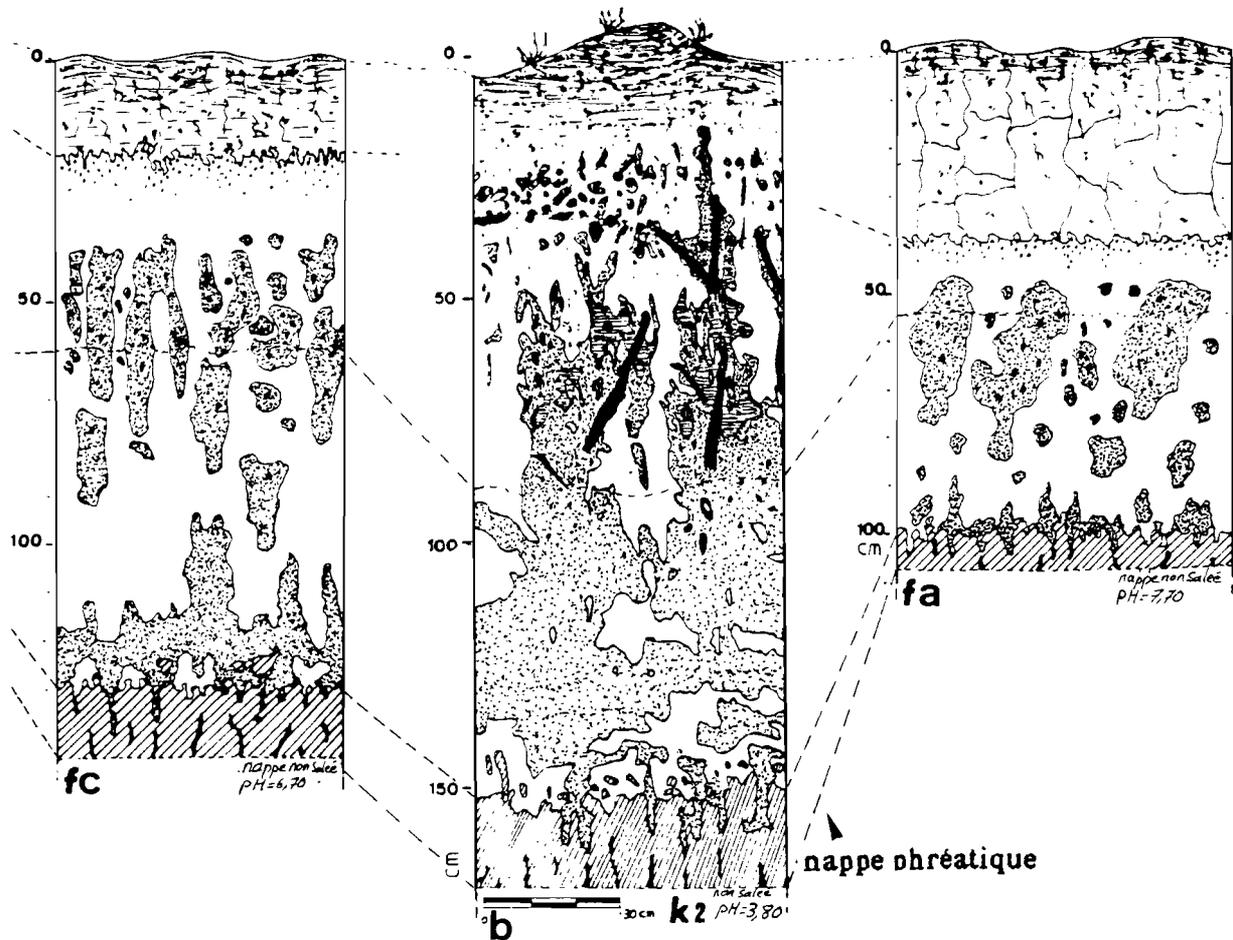
**2. PLANCHES
PHOTO.**





Annexe : Fosses du transect

- | | |
|---|---|
|  H. "purée de maron" |  structure lamellaire |
|  sables blancs |  structure prismatique |
|  zone réduite |  sables rouilles |



- | | |
|---|---|
|  sables blancs |  structure lamellaire |
|  sables lie-de-vin |  structure prismatique |
|  zone réduite |  sables rouilles |



1



3



2

Planche I :

Le site de Katoure.
Contexte

1: Vue aval du
barrage anti-sel.

2: Dispositif de mesure
du bilan hydrique "in situ".

3: Visualisation de l'appareillage
"in situ".

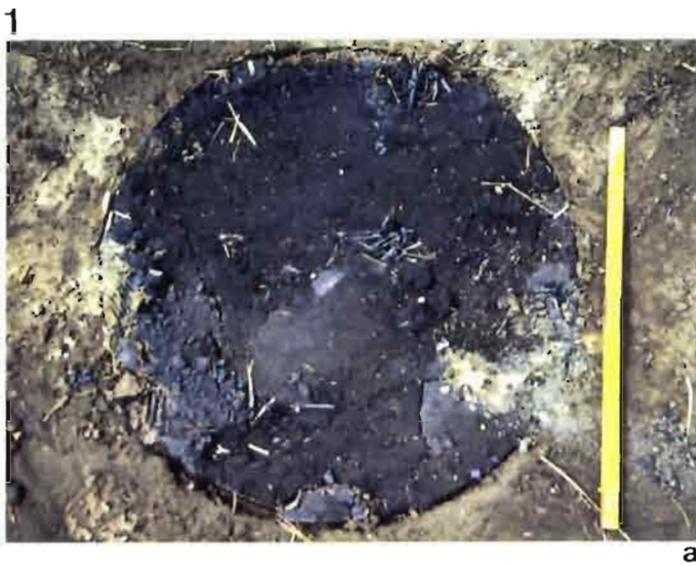


Planche II :

Visualisation des pores fonctionnels

Utilisation de bleu de méthylène selon la méthode d'infiltration Muntz.

1. Sur "Muntz" décimétrique
(en surface du profil).
a. surface d'infiltration.
b. lits discontinus horizontaux.
c : pore biologique tubulaire
sub-vertical fonctionnel.

2. sur "micro-Muntz" centimétrique
(à différentes profondeurs)
d: surface d'infiltration.
e: aucune coloration (Fissures).
f: aucune coloration (Iron-pipe).



1



2

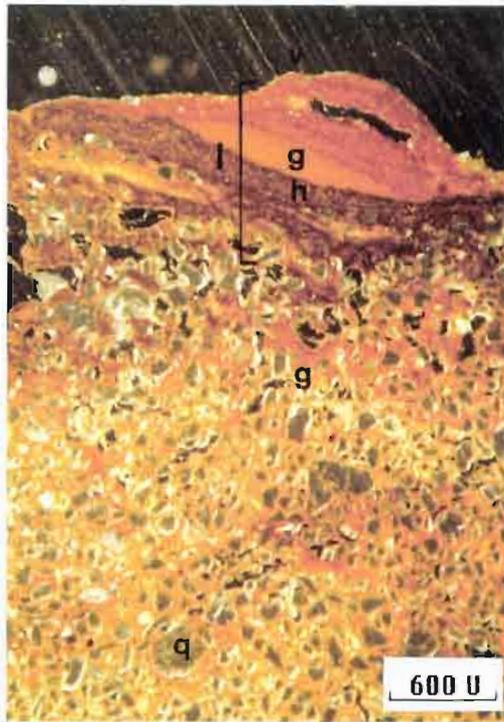


3

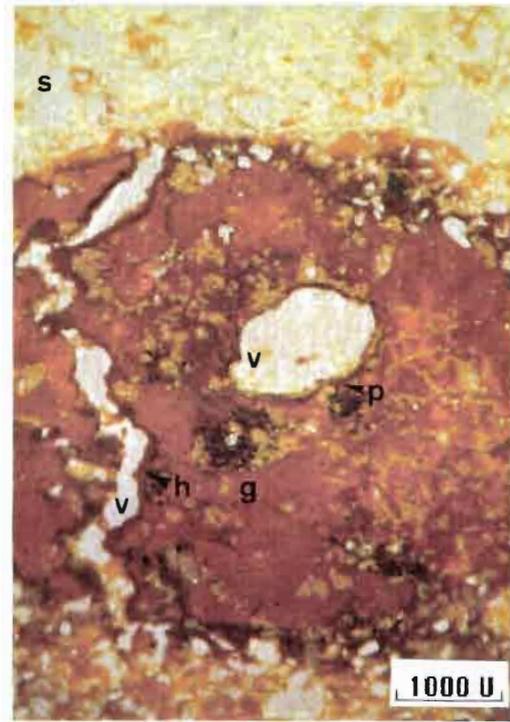


4

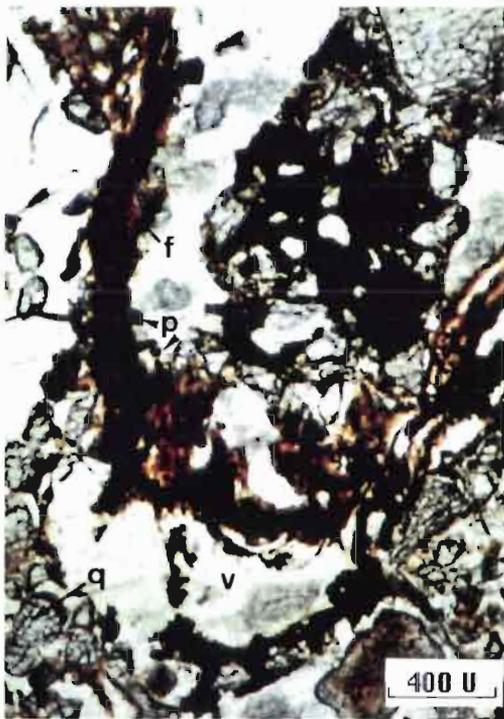
Planche III : Visualisation des indurations.
 1: Langues décimétriques en K2.
 2: Langues centimétriques en K1.
 3: Iron-pipe vertical.
 4: Transition avec l'horizon réduit:
 Fantômes d'iron-pipes en connexion
 avec des racines de Rhizophora.



1



2



3



4

Planche IV : Micromorphologie.

1: Coupe transversale d'un iron-pipe (I) (lumière réfléchie)
Distribution lamellaire de deux types d'oxyhydroxydes de fer. plasma porphyrosquelique
g=goethite h=hematite, v=vide, q=quartz

2: Vue en coupe d'un Iron-pipe (lumière réfléchie).
Colmatage de la porosité par un plasma porphyrosquelique d'oxyhydroxydes de fer. s= assemblage chitonique a gefurique des quartzs, g=goethite, h=hematite, p="poro-rubannement", v=vide.

3: Coupe transversale verticale de fibres de Rhizophora
H réduit. (lumière polarisée). f=fibres de Rhizophora,
p=pyrites framboïdes, q=quartz, v=vide

4: Coupe transversale de charbons de Rhizophora
(K2, prof 35cm) (lumière réfléchie) Plasma
microgranulaire de jarosite pseudomorphosant
partiellement les tissus des charbons et colmatant
la porosité j=jarosite, c=charbon

Résumé :

Ce travail est basé sur les résultats d'une étude hydrodynamique d'une couverture de sol sulfaté acide de Basse Casamance (Sénégal).

L'étude du bilan hydrique "in situ" a permis de mettre en évidence verticalement et horizontalement la présence de comportements hydrodynamiques différents et ceci dans un sol estimé homogène du point de vue textural. L'étude critique de ces résultats est réalisée par différentes méthodes.

A partir d'une démarche naturaliste impliquant des observations à des échelles différentes et faisant appel à des techniques complémentaires telles que: étude microstratigraphique, étude micromorphologique, visualisation des macropores fonctionnels par coloration, associée à une démarche expérimentale basée sur l'étude des courbes de retrait d'échantillons non remaniés (rétractométrie) conduisant à l'élaboration de profils pédo-hydriques, l'existence de discontinuités structurales correspondant aux variations du comportement hydrodynamique de ce sol a été montrée.

Les facteurs d'hétérogénéités, relevés à plusieurs échelles de façon qualitative et quantitative, ont pour origine la variation de la micro-organisation plasma-squelette : modification de l'espace poral, structuration, colmatage de la porosité et, sans doute, rigidification du plasma par des oxyhydroxydes de fer.

Mots clés : Caractérisation hydrodynamique - Structure - Porosité - Retractométrie - Sol sulfaté acide-Casamance .

Abstract :

This study is based on the results of a hydrodynamic investigation of an acid sulfate soil cover of Lower Casamance (Sénégal).

The study of the hydric balance "in situ" revealed the vertical and horizontal presence of different hydrodynamic movements and this in a soil considered to be texturally homogeneous. The critical study of these results is realizing by differents methods.

The procedure we followed was a naturalist approach implying different scales of observation and complementary techniques as: microstratigraphic and micromorphological study, visualisation of functioning macropores, together with an experimental procedure utilising the study of shrinkage curves of undisturbed samples conducting at the elaboration of pedo-hydric profiles, to show the existence of structural discontinuities corresponding at variation of the hydrodynamic behaviour of this soil at the instrumentation scale.

The heterogenous factors which were found at several scales, in both a qualitative and quantitative manner, are due to the variation of the micromass-granomass microorganisation : modification of the poral space, structuration, clogging of the porosity by ferric oxyhydroxydes.

Key words : Hydrodynamic characterisation - Structure - Porosity - Shrinkage soil study - Acid sulfate soil - Casamance.