

# ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DE SOLS ARGILEUX SOU MIS A L'IRRIGATION DANS LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

Distribution d'agrégats et courbe de retrait

**ZANTE Patrick**

*Orstom, Laboratoire d'hydrophysique  
70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex*

## RESUME

Le développement important de l'irrigation pour la riziculture inondée dans les moyenne et basse vallées du fleuve Sénégal entraîne, à moyen et long terme, des risques de salinisation et d'alcalisation des sols lourds, vertiques ou hydromorphes, d'origine marine. Ces risques sont connus et continuent à faire l'objet de nombreuses études.

Le financement de la mise en place de la riziculture, dans un contexte de désengagement de l'État, est en partie assuré par le développement, sur ces périmètres rizicoles, de cultures commerciales cultivées en billons.

L'implantation durable de cultures diversifiées dans les casiers rizicoles exige alors l'étude des transformations physiques liées aux nouvelles techniques de mise en culture de ces sols. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher des méthodes de mesure adaptées.

Après un bref rappel des conditions climatiques et des caractéristiques des sols utilisés pour l'irrigation, une description schématique des grands types d'aménagements est présentée dans la première partie. La deuxième partie est consacrée aux effets de la culture irriguée de sols argileux sur la structure.

Le sol non cultivé est décrit par son profil pédologique, le sol cultivé est décrit par la méthode du profil cultural adaptée au sol billonné. Les méthodes du fractionnement en agrégats et de la courbe de retrait sont appliquées sur sol non cultivé et sur sol cultivé en billons. Les deux méthodes sont sensibles aux transformations physiques dues au travail du sol qui provoque un accroissement des teneurs en gros agrégats et qui se traduit par une augmentation de l'amplitude de la phase principale du retrait.

**Mots-clés:** culture irriguée - vertisol - profil cultural - structure - courbe de retrait - fractionnement en agrégats - fleuve Sénégal.

## INTRODUCTION

La vallée du fleuve Sénégal (fig. 1) est située en zone climatique sahélienne, caractérisée par une faible pluviosité annuelle et une forte évaporation. Ces conditions climatiques ne sont pas favorables à la production des cultures pluviales. L'intensification de l'agriculture et la sécurisation de la production agricole passent par la création de périmètres irrigués. Celle-ci est facilitée depuis la construction de deux barrages: Maka-Diama à l'aval, qui bloque la remontée de la langue salée en saison sèche, et Manantali à l'amont qui écrête les crues et assure le maintien d'un niveau d'eau moyen toute l'année. Le premier objectif de ces périmètres irrigués est d'assurer la production du riz par submersion, le second est de dégager un revenu par installation de cultures commerciales, la tomate et l'oignon, ce qui oblige au billonnage.

La culture irriguée des sols lourds de cuvette, par les pratiques culturales nouvelles qu'elle exige (labour et billonnage mécanisés), induit des changements physiques, et par la remontée des nappes, provoque des transformations chimiques dans ces sols autrefois plantés d'*Acacia* et cultivés en décrue. Dans ce contexte, l'étude de ces modifications sous l'effet des nouvelles conditions de culture prend une place importante nécessitant, pour la caractérisation physique de l'évolution du sol, la recherche d'outils analytiques adaptés.

Notre objectif est de vérifier si deux méthodes d'appréciation de l'état structural du sol, la distribution dimensionnelle des agrégats issus du fractionnement du sol et la courbe de retrait, mettent en évidence des changements entre un sol cultivé et un sol non cultivé.

## LES CONDITIONS DE L'IRRIGATION

### Le Climat

La vallée du fleuve Sénégal est située dans la zone climatique sahélienne caractérisée par une seule saison des pluies, centrée sur le mois d'août, et qui s'étend de juin à octobre (fig. 2).

La pluviosité (période de 1968 à 1990) augmente du nord au sud, passant de 195 mm en 13 jours à Podor à 473 mm en 29 jours à Bakel. Cette variation dans l'espace est assortie d'une variation dans le temps qui est à Podor de 374 mm entre le maximum et le minimum enregistrés sur la période. La probabilité de dépasser une hauteur de 100 mm est de 9 années sur 10 à Podor; mais si 15% des pluies sont supérieures à 20 mm, une pluie sur deux est inférieure à 5 mm donc inefficace pour l'agriculture. La température de l'air variant de 20 à 40°C et l'évapotranspiration Penman de 5,5 à 8,5 mm/j (SAED, 1993), on comprendra que les besoins en eau des cultures soient loin d'être satisfaits et que l'irrigation est un facteur indispensable à la production agricole de la région de Podor.

Une première conséquence de ce climat est positive, puisqu'une ETP élevée et l'abondance d'énergie lumineuse permettent un fort potentiel de production.

La seconde conséquence est négative: l'existence d'un bilan évaporatoire fortement positif provoque une concentration des sels en surface (salinisation).

### Les sols

L'histoire géologique de la vallée du fleuve Sénégal, succession de transgressions et de régressions marines, laisse apparaître un ensemble de dépôts sédimentaires formant une mosaïque de cuvettes de décantation et de "levées" (MICHEL, 1973; FAO-SEDAGRI, 1973) (fig. 3).

Dans la région de Podor les cuvettes de décantation sont occupées par des sols vertiques et les sols de levée, considérés généralement comme légers, sont en réalité souvent argileux (petites levées) ou présentent des perméabilités très faibles (BOIVIN *et al.*, 1993). La variabilité des caractères pédologiques de ces sols est faible. Ils sont constitués d'au moins 55% d'argiles, mélange de smectites, illites et kaolinite. L'argile, présente sur une épaisseur de 0,4 à 2 m, repose sur un sable blanc fin du Nouakchottien. A l'interface on peut rencontrer les traces d'enracinement d'une mangrove à *Rhizophora*.

Du point de vue analytique, la capacité d'échange cationique varie de 0,35 à 0,65 méq/g d'argile et le complexe est saturé à 80-90% par des ions calcium et magnésium à parts égales (BOIVIN *et al.*, 1993).

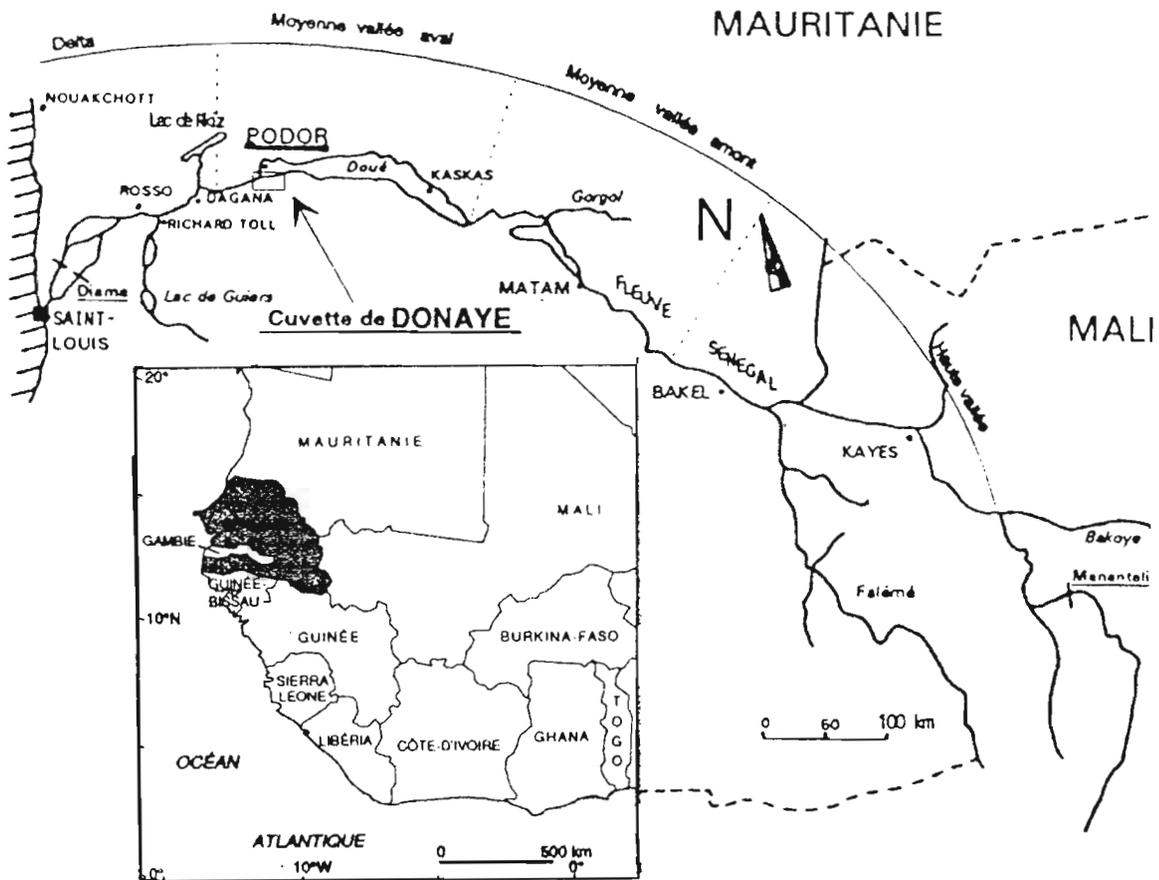


Figure 1 : Cartes de situation

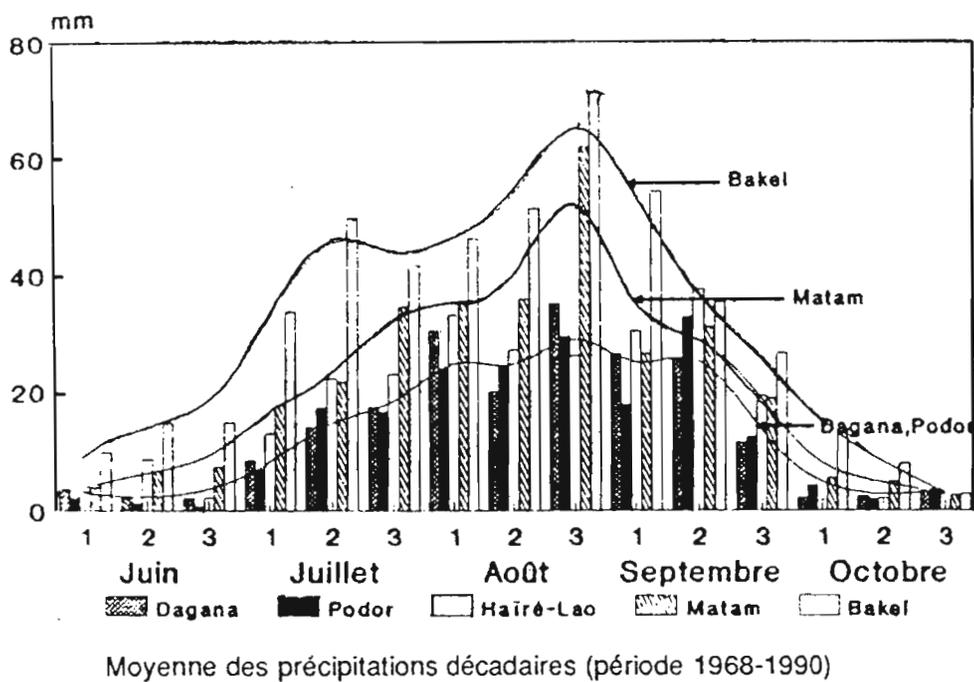
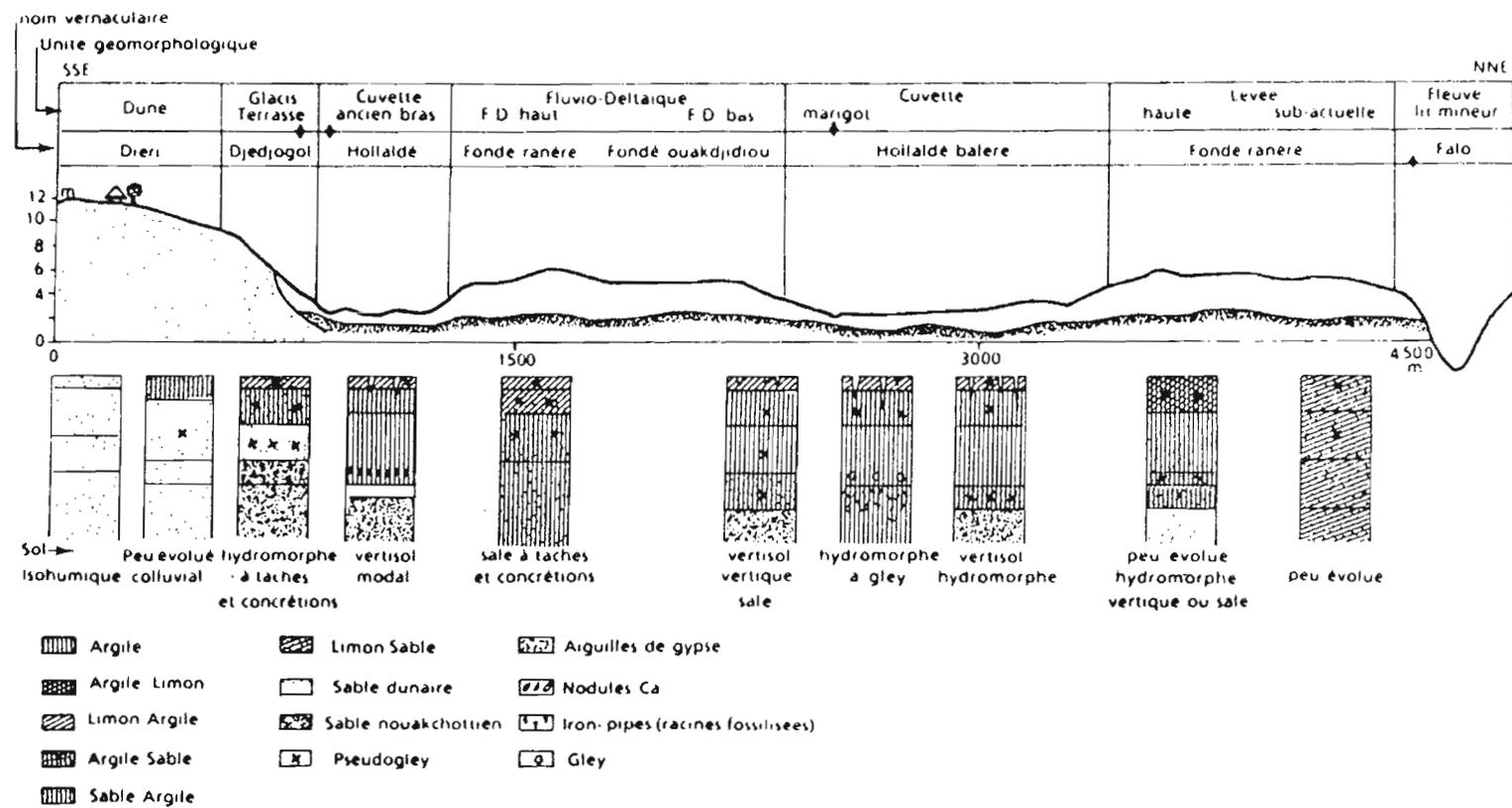


Figure 2 : Pluviosité (in SAED, 1993).

Figure 3 : Toposéquence à travers la plaine alluviale (in MTIMET, 1979).



## Les aménagements

Le barrage de Maka-Diama, qui bloque la remontée de la langue salée, et celui de Manantali qui écrête les crues et assure le maintien d'un niveau d'eau moyen toute l'année avec 30 à 50 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en étiage, permettent de créer des crues contrôlées et offrent un potentiel théorique de 375 000 ha de cultures irriguées (SEGUIS, 1992). Cette disponibilité permanente de l'eau permet la création de périmètres irrigués qui offrent la possibilité de pratiquer plusieurs cycles de culture par an.

P.D. DIOUF et C.Z. GUILMOTO, (1994) distinguent trois grands groupes de ménages dans la région de Podor: les éleveurs (12%), les petits paysans (50%) et les paysans moyens ou aisés (25%), le reste de la population étant constitué de ménages ni éleveurs ni paysans. La culture irriguée est un secteur d'activité très important puisque 70% des ménages disposent de parcelles irriguées; cependant les cultures traditionnelles sont encore largement présentes, surtout chez les petits paysans, qui, à côté de leur parcelle de riz, continuent les cultures de décrue, les cultures de berge et l'entretien du jardin pour minimiser les risques.

La culture du riz est la plus importante des cultures irriguées, la récolte est autoconsommée par les trois quarts des cultivateurs. Le degré d'intensification est proportionnel à la surface irriguée et correspond à un recul très net des cultures de décrue dès que les surfaces irriguées atteignent 50 ares. Le développement des cultures spéculatives (tomate et oignon) correspond à une étape ultérieure de l'intensification qui permet un premier enrichissement et semble freiner l'exode rural.

Les cultures se pratiquent sur trois grands types d'aménagements:

- les Périmètres Irrigués Villageois (PIV), d'une superficie moyenne d'environ 20 ha où chaque attributaire dispose d'environ 0,14 ha. Ils se caractérisent par une faible mise en valeur et une spécialisation dans la polyculture en contre saison froide (novembre à février)
- les périmètres intermédiaires (IT), sont des aménagements de 50 ha divisés en parcelles d'un ha dont 84 ares sont cultivés en riz et 16 en cultures spéculatives. Leur mise en valeur est nettement supérieure à celle des PIV, les attributaires faisant souvent deux campagnes rizicoles et une campagne de tomate-oignon
- les périmètres privés, favorisés par le développement des Groupements d'Intérêts Économiques (GIE) qui donnent accès au crédit, sont surtout créés pour sécuriser le patrimoine foncier des familles. La culture principale y est le riz d'hivernage mais en 1992 49% des attributaires n'ont fait qu'une seule campagne.

Dans un contexte de désengagement de l'État et de non compétitivité des produits (avant dévaluation du Franc CFA), les aménagements sont construits de façon sommaire et au moindre coût (sans drainage). L'irrigation se fait pour l'essentiel sur des petits aménagements anciens dans un état d'entretien médiocre (DIOUF, GUILMOTO, 1994).

## LES EFFETS DE LA CULTURE IRRIGUEE DE SOLS ARGILEUX

Pour répondre au premier objectif de satisfaction des besoins alimentaires, tous les périmètres ont été conçus pour la culture du riz inondé, avec maintien d'une lame d'eau de 10 à 20 cm dans le fond des casiers. Ils sont donc principalement installés dans les sols lourds des cuvettes de décantation. Dans la région de Podor, 80% des périmètres sont implantés dans les cuvettes de décantation dont 75% sur vertisols (*Hollalde*). La culture du riz inondé par la présence d'une semelle de labour limitant la zone d'exploitation racinaire aux 15 premiers centimètres de sol, et la gestion collective de l'eau qui privilégie les tours d'eau de 2 à 3 semaines pour le riz, créent des conditions défavorables aux cultures de diversification.

Les risques de dégradation de ces sols sont essentiellement dus à la pratique de la riziculture inondée sans drainage (LOYER, 1989) qui provoque la remontée des nappes jusqu'à affleurement et permet aux sels d'origine marine, piégés dans les sédiments lors de leur mise en place, de remonter en surface (salinisation).

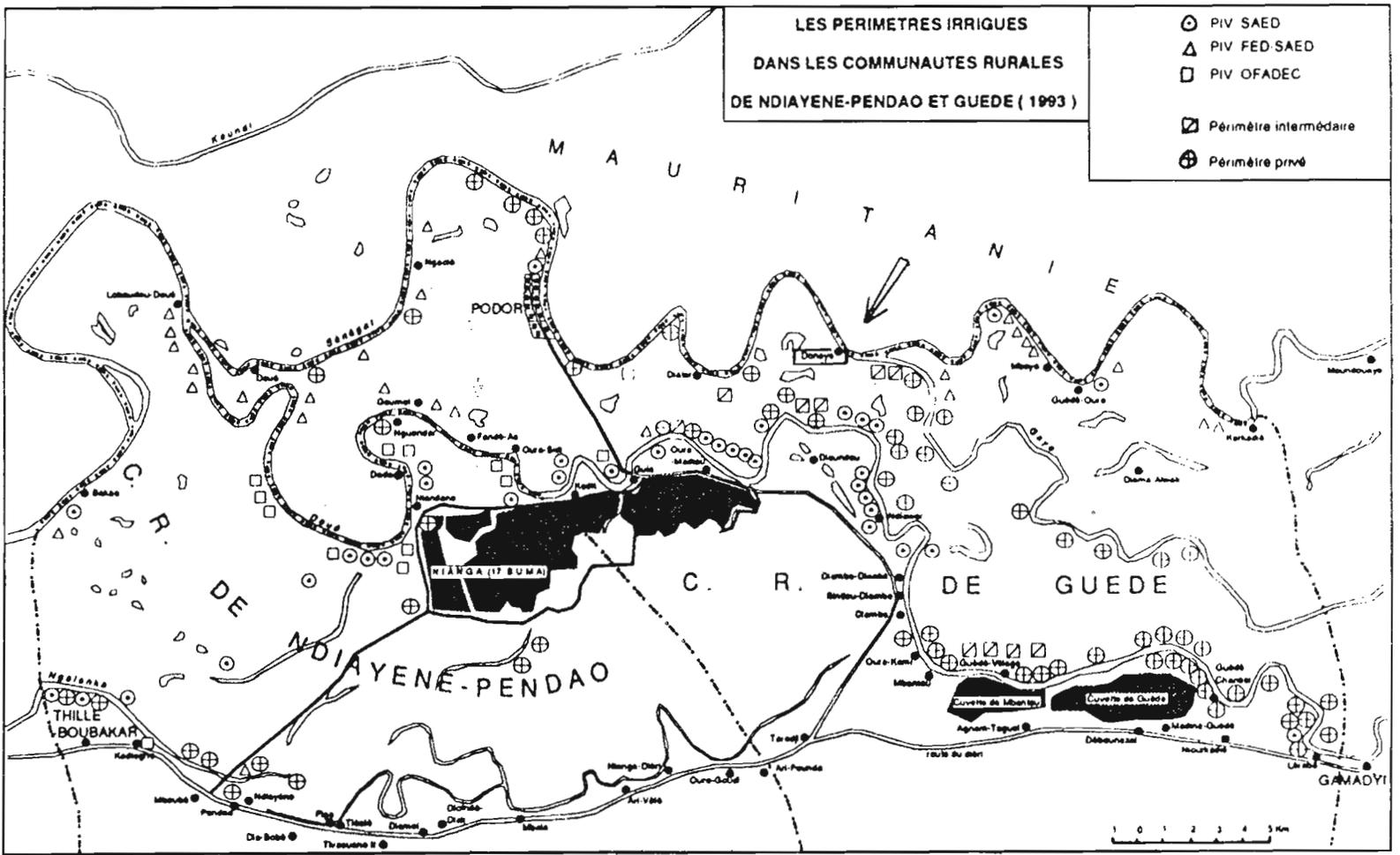


Figure 4 : Carte de localisation des périmètres irrigués près de Podor (in LERICOLLAIS, 1993).

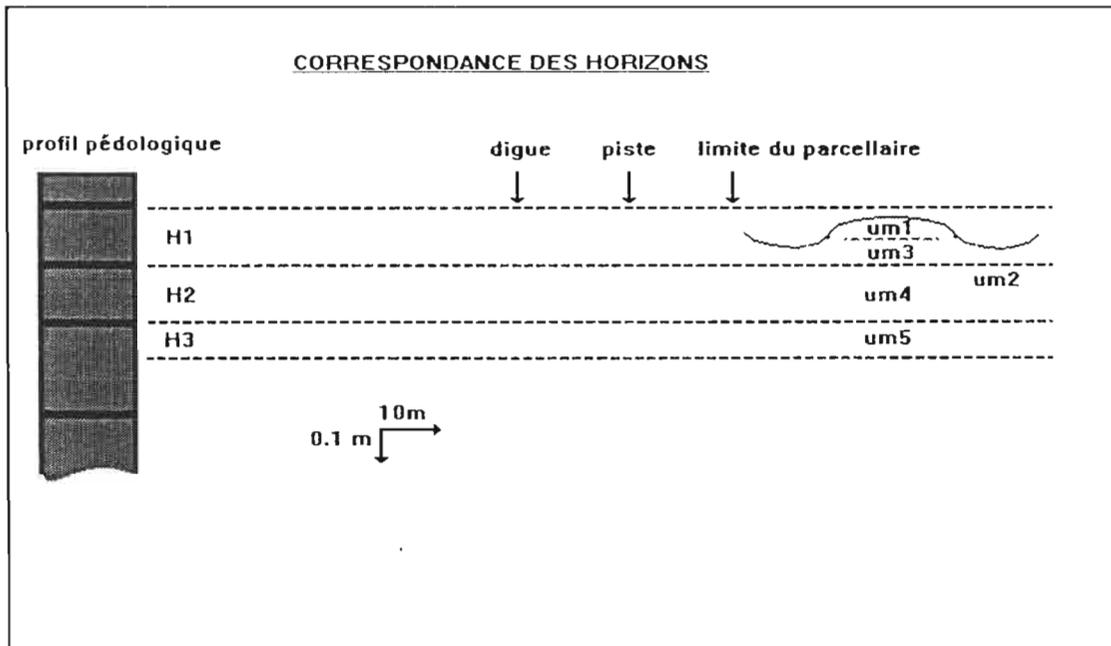
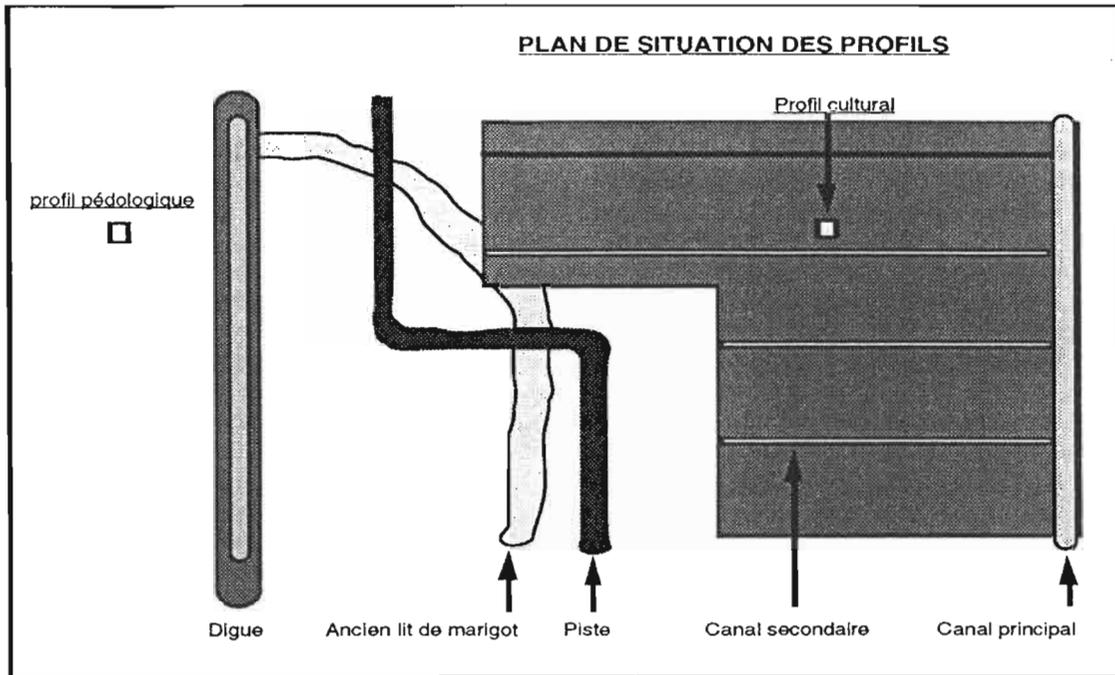


Figure 5 : Carte de localisation des sites.

La concentration en ions sodium qui se manifeste déjà dans certains sols (sodisation), et l'irrigation avec l'eau du fleuve à l'alcalinité résiduelle positive, peut aboutir à une hausse du pH du sol (alcalisation). Cette dynamique d'alcalinisation entraîne un effondrement de la structure du sol qui le rend impropre à la culture et difficilement récupérable.

Cette exigence de mise en place de deux systèmes de culture antagonistes du point de vue du travail du sol que sont la riziculture inondée et les cultures de diversification sur billons provoque des modifications importantes du sol. Ces modifications sont, à moyen et long termes, liées aux risques de salinisation, de sodisation et d'alcalisation et, à court terme, liées aux modifications physiques dues au travail du sol.

Le programme de recherche conjoint ORSTOM-ISRA "*Développement de l'agriculture irriguée et systèmes de production dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*" étudie les problèmes de salinisation et d'alcalisation liés à l'irrigation mais n'a pas encore abordé les problèmes physiques de la mise en culture de ces sols.

## **Méthodes d'étude**

Les facteurs pouvant modifier le comportement d'un sol sous l'effet de la mise en culture sont nombreux et d'interactions mal connues, d'autant plus qu'au travail du sol vient s'ajouter ici l'irrigation.

Parmi ces facteurs, composition du sol, structure, humidité, type de travail effectué ... etc., on sait que:

- l'état structural du sol conditionne son comportement mécanique (GUERIF, 1990) par la résistance mécanique qu'il lui confère et par la transmission des contraintes qu'il assure.

- l'état structural initial du sol est un facteur déterminant pour l'état final (COULOMB, 1991). Il est donc important de le décrire et de le mesurer. Ceci implique le choix de deux sites, l'un non cultivé et l'autre cultivé.

Il a, d'autre part, été montré (MAYMARD *et al.*, 1960) que la submersion des sols verticaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal provoquait effectivement des changements au niveau de la structure et que ces changements se traduisaient par une diminution de la stabilité structurale mesurée par le test de Hénin.

Ces considérations nous ont amené à choisir deux méthodes, déjà anciennes mais qui ont connu des développements récents, pour mesurer les effets de la mise en culture sur la structure:

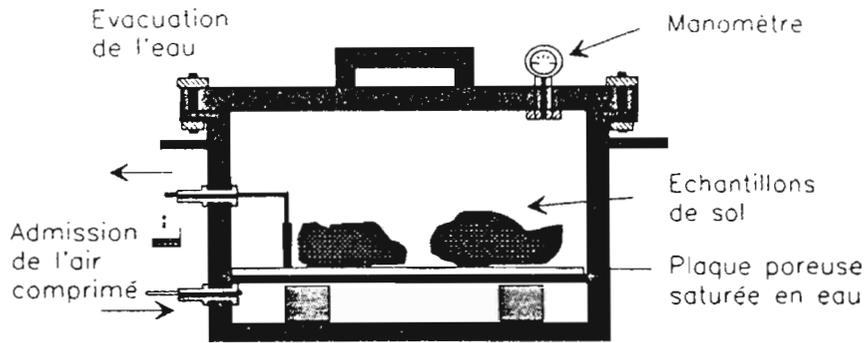
- la première est la fragmentation en agrégats,
- la seconde est l'obtention des courbes de retrait d'échantillons de sol.

Nous avons appliqué ces méthodes à un sol non cultivé et un sol cultivé. Afin d'éviter les interactions sels-structure le choix s'est porté sur un périmètre établi sur un sol vertical non salé, dans une cuvette de décantation située à proximité du village de Donaye. Le périmètre IT3 retenu est cultivé en polyculture riz-tomate-oignon et offre les conditions de proximité requises pour le choix d'un site hors périmètre (sol non cultivé) et d'une parcelle billonnée cultivée en tomate (sol cultivé) (fig. 4 et 5).

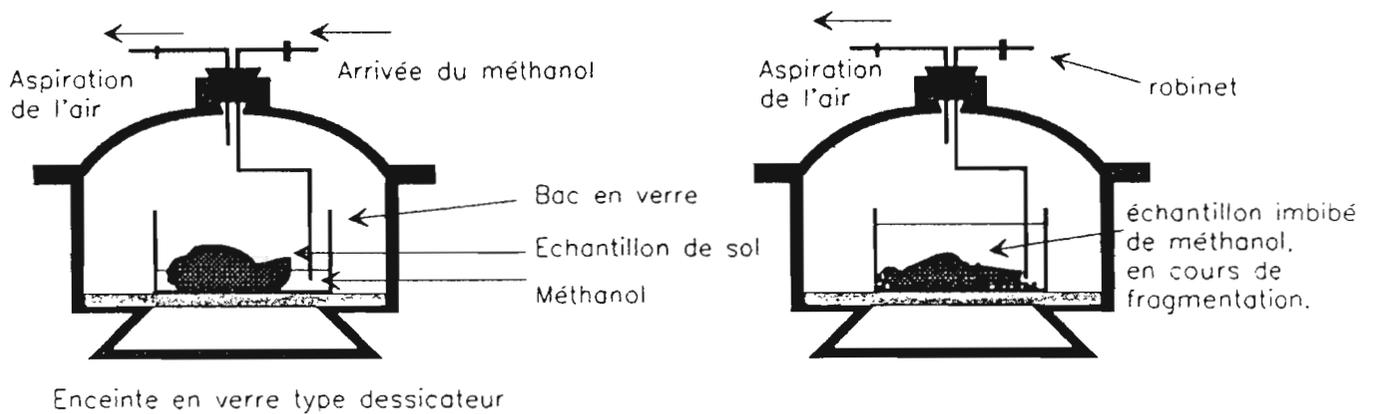
La description pédologique classique permet d'identifier les volumes qui seront prélevés dans le sol non cultivé alors que nous avons utilisé la méthode du profil cultural de MANICHON pour mettre en évidence les Unités Morphologiques du sol cultivé (ZANTE, 1994). Dans le sol non cultivé, les échantillons ont été prélevés dans trois horizons, supérieur (H1, 15-35 cm) médian (H2, 35-50 cm) et profond (H3, 80-90 cm). Dans le profil cultural, les échantillons représentent les différentes unités morphologiques, sauf celle de surface du billon souvent peu épaisse et très hétérogène. Dans les deux cas les échantillons sont prélevés sous forme de cylindres de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, à l'aide d'un carottier adapté.

### **Méthode de description du profil cultural**

Les principes énoncés par MANICHON (1982) mis en pratique dans la méthode de description du profil cultural (GAUTHRONNEAU, MANICHON, 1987) sont appliqués en simplifiant la description et en l'adaptant au sol billonné.

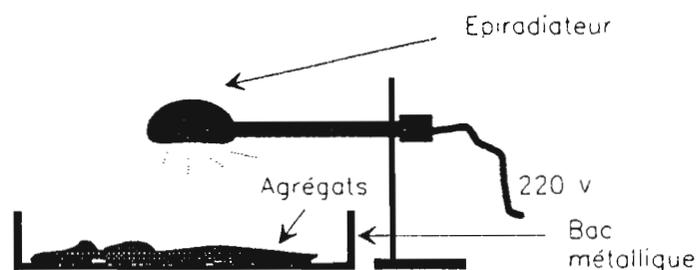


**a** Mise en équilibre de l'échantillon de sol à l'état hydrique désiré



**b** Imbibition lente de l'échantillon par le méthanol

**c** Immersion complète de l'échantillon dans le méthanol



**d** Séchage des agrégats sous lampe infra-rouge

Figure 6 : Méthode de fractionnement en agrégats (in COLLEUILLE, 1993)

On utilise une grille de description morphologique reposant sur deux paramètres:

- *l'état interne des éléments structuraux d'origine anthropique*, défini par les morphologies suivantes:

- D : cohésion élevée, faces de rupture lisses, de forme conchoïdale, sans porosité visible, résulte d'un compactage anthropique
- F : proche de D mais contient des amorces de fissures
- G : agrégats discernables dans les mottes, cohésion plus faible, faces de rupture rugueuses, porosité visible.

- *l'assemblage de ces éléments structuraux*, défini par les modes

- M : Massif: le volume observé ne comporte qu'une seule motte
- S : Soudé: le volume observé comporte plusieurs mottes soudées
- F : Fragmentaire: le volume comporte des mottes parfaitement individualisées, sans liaisons entre elles.

L'état interne des mottes et leur mode d'assemblage permet d'identifier les Unités Morphologiques (UM).

La partition latérale du profil est déterminée par l'emplacement des interbillons qui correspondent aussi à la position des roues du tracteur lors du billonnage.

### **Méthode de fractionnement en agrégats**

Le principe du fractionnement est basé sur les propriétés de friabilité du sol (débit en agrégats cohérents) et de dualité porale (porosité texturale et structurale de STENGEL, 1979).

La méthode doit permettre de rompre les forces de liaison inter-agrégats (porosité structurale) sans dénaturer leur cohésion interne (porosité texturale). S'inspirant de la méthode du "critical drying point" (NEWMANN et THOMASSON, 1979; MURRAY et QUIRK, 1980) BRAUDEAU (1982) propose l'utilisation du méthanol pour séparer les agrégats de sols humides. Suite aux travaux de COLLEUILLE (1993), nous avons adopté le protocole suivant (fig. 6):

- *Mise en équilibre de l'échantillon à pF 3,0* : Les échantillons sont humectés lentement par capillarité jusqu'à saturation. Ils sont ensuite placés sur la plaque poreuse de l'appareil de RICHARDS et soumis à une pression de 100 kPa (pF 3,0) jusqu'à équilibre (72 heures). Ce potentiel de l'eau du sol (pF 2,5 à 3,0) est le plus favorable à son tassement (SALA, TESSIER, 1993).

- *Imbibition par le méthanol* : La méthode consiste à humecter la base de l'échantillon placé dans un bécher par du méthanol, puis l'échantillon est amené à immersion complète. Cette opération se fait sous vide dans un dessiccateur relié à une trompe à vide électrique.

- *Séchage et tamisage* : Après avoir éliminé le méthanol par décantation, les agrégats sont mis à sécher sous épiradiateur en silice. Ils sont ensuite tamisés (tamiseuse électromagnétique à vibrations verticales) pendant 10 mn sur une batterie de tamis de 10 à 0,050 mm

### **Méthode de la courbe de retrait**

La courbe de retrait d'un échantillon de sol représente la variation du volume massique ( $V_m$ ) de l'échantillon en fonction de sa teneur en eau pondérale. L'intérêt de ces courbes est de fournir des renseignements sur les processus hydrodynamiques dans le sol et sur les propriétés structurales du sol. Le processus de retrait reflète le fonctionnement structural d'ensemble du sol en relation avec les volumes d'eau et d'air qui l'occupent.

Le volume massique est exprimé par la formule suivante:

$$V_m = (1/d_a) \times (d_i/d_f)^3$$

où

- $d_a$  est la densité apparente
- $d_i$  est le diamètre de l'échantillon à l'instant  $i$
- $d_f$  est le diamètre de l'échantillon en fin de retrait

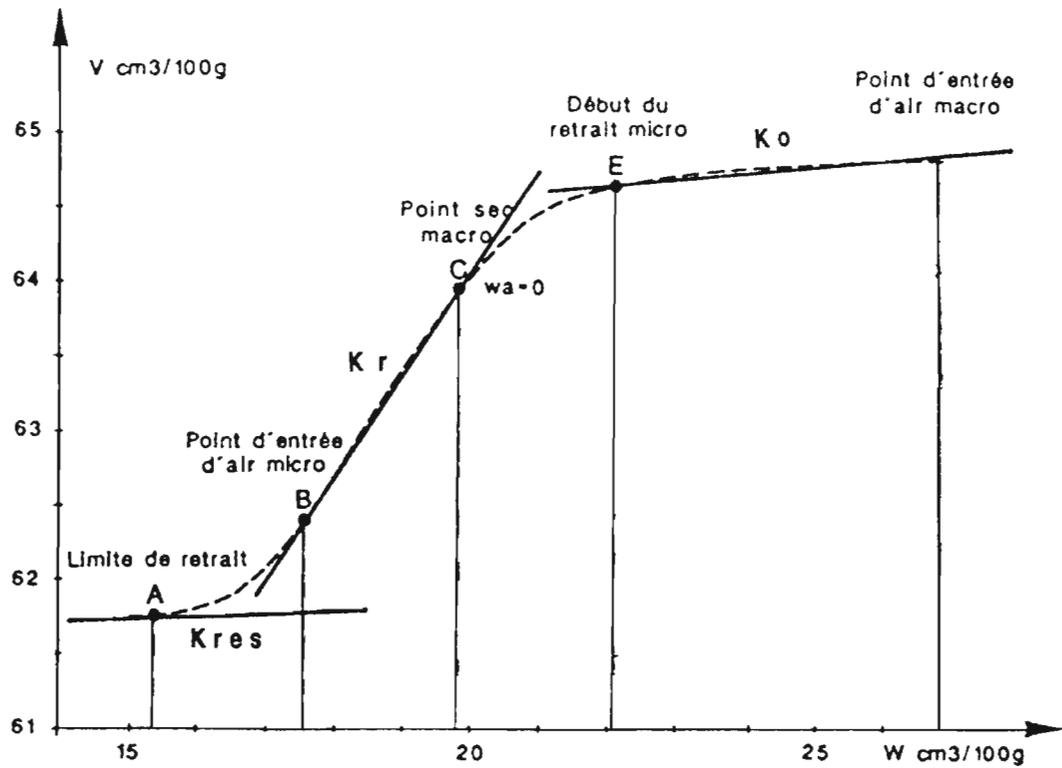


Fig. 7 a

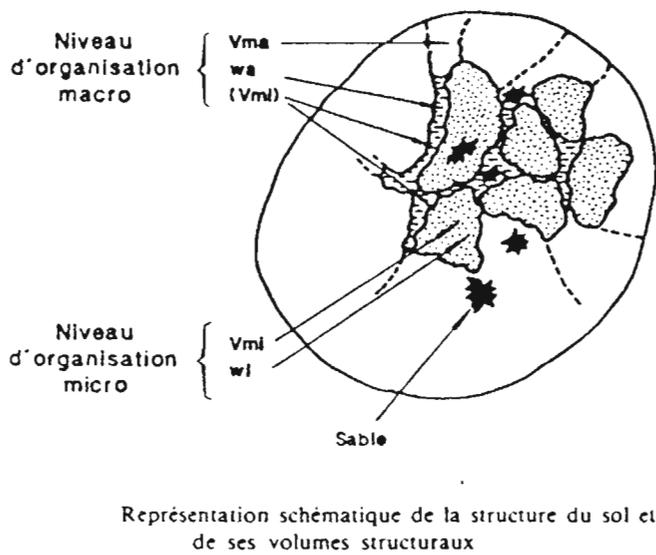


Fig. 7 b

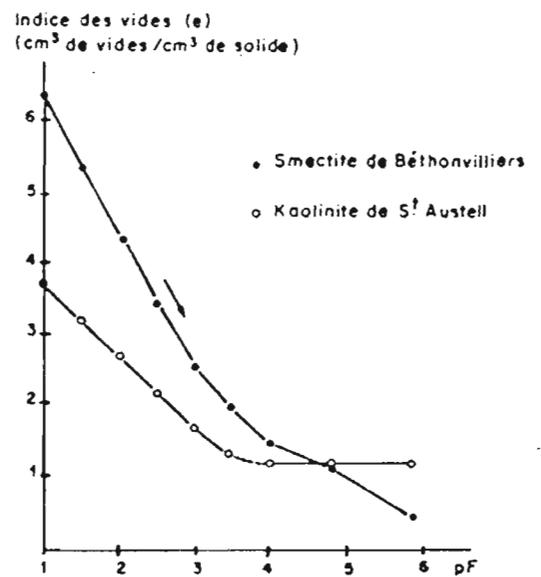
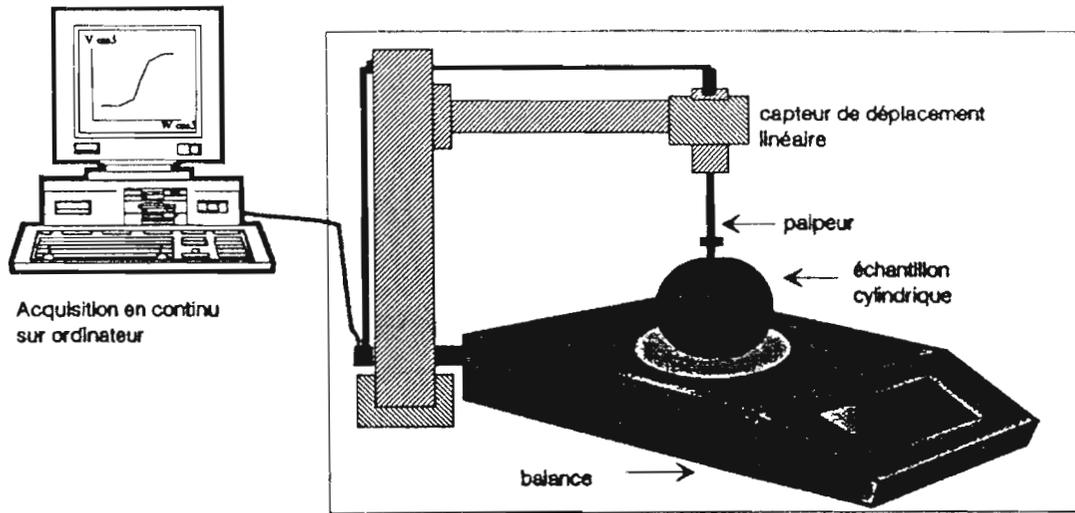
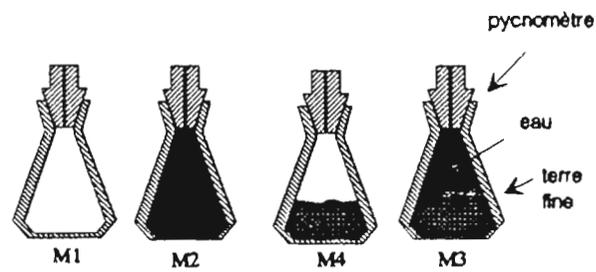


Fig. 7 c

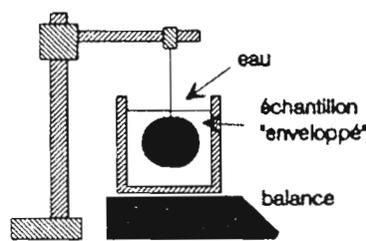
Figure 7 : Points caractéristiques de la courbe de retrait théorique (a), niveaux d'organisation de la structure (b) (in BRAUDEAU, 1988) et courbes de retrait d'argiles pures (c) (in TESSIER, 1980).



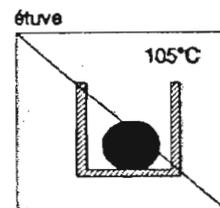
a Enceinte régulée en température et humidité



b Mesure de la masse volumique réelle



c Mesure de la masse volumique apparente



d Mesure de la masse sèche.

Figure 8 : Méthode de mesure du retrait et des éléments de calcul de la courbe de retrait (in COLLEUILLE, 1993).

La mise au point d'une méthode de mesure en continu permet à BRAUDEAU (1987, 1988), d'obtenir l'intégralité de la courbe de retrait (fig. 7a) et d'en déduire les principaux paramètres pédo-hydriques des sols ferrallitiques.

Les points caractéristiques de sa courbe sont:

- le point A: limite de retrait (SL, Shrinkage Limit)
- le point B: point d'entrée d'air dans la microporosité (AE, Air Entry)
- le point C: point sec de la macroporosité (LM, Limit of Macoporosity)
- le point E: début du retrait de la phase microporeuse (MS, Maximum Swelling ou capacité de rétention).

Si l'on décrit cette courbe expérimentale depuis la saturation de l'échantillon, elle s'interprète de la façon suivante (BOIVIN, 1991):

- de la saturation à E, l'échantillon se dessèche sans que la teneur en eau des agrégats ne varie. Seule l'eau contenue dans les macropores s'évapore
- de E à C, l'eau contenue dans les agrégats commence à participer au dessèchement de l'échantillon, tandis qu'il reste de l'eau dans la macroporosité jusqu'au point C. Au point C la teneur en eau de la phase macroporale est nulle tandis que la phase microporale se rétracte en restant saturée. La partie de la courbe située entre la saturation et le point C est la phase structurale du retrait, elle est représentée par la pente  $K_0$
- de C à B, le retrait se fait en phase saturée, toute réduction de teneur en eau s'accompagne d'une réduction de volume. La pente de la phase de retrait principal C-B est la constante de retrait ( $K_r$ ). L'entrée d'air dans la phase microporale ne se fait qu'au point B.  $K_r$  permet de quantifier l'évolution de la structure du sol au cours du dessèchement
- de B à A, il y a entrée d'air dans la phase microporale, le retrait tend à devenir nul. C'est la phase de retrait résiduel exprimée par la pente  $K_{res}$ .

Cependant ce type d'ajustement de courbe de retrait pose de sérieux problèmes dans le cas des sols vertiques, au moins pour toute la phase macroporale, de la saturation au point C. Un problème d'ajustement peut aussi survenir pour la phase de retrait résiduel dont la pente peut être sensiblement différente de zéro. Les travaux de TESSIER (1980) et TESSIER et PEDRO (1980) peuvent donner une explication: contrairement aux sols riches en kaolinite (ferrallitiques), les sols riches en smectites (vertisols), peuvent ne pas atteindre leur limite de retrait lors d'un séchage à l'air (fig. 7c).

En pratique, la méthode de mesure consiste à amener à saturation lente un échantillon cylindrique de sol prélevé *in situ* à l'aide d'un carottier adapté. L'échantillon saturé est ensuite posé sur le plateau d'une balance qui permet d'enregistrer la perte de masse d'eau au cours du dessèchement. Un capteur de déplacement disposé au dessus de l'échantillon mesure le retrait (fig. 8). L'ensemble du dispositif, placé en enceinte maintenue à 30°C, est relié à un micro-ordinateur pour l'enregistrement en continu des données: temps, masse et diamètre de l'échantillon, qui après calcul, permettront de tracer les courbes de retrait.

## Descriptions du sol

### Sol non cultivé

Le profil est situé dans une forme plate sans végétation. La surface est constituée d'une croûte pelliculaire fragile et de petits agrégats. Il n'y a pas de fentes larges et profondes.

0 - 15 cm : horizon sec, brun-gris, à structure de forme polyédrique subanguleuse de 2 à 10 cm de longueur et 0,5 à 5 cm de hauteur avec une sous-structure d'agrégats plus fins, aspect lité, ensemble friable, racines fines. A la base, lentilles de 1 à 2 cm de long et 0,5 cm d'épaisseur, à surface à reflets bleutés par plages alternant avec des plages sableuses.

15 - 35 cm (H1): sec, brun, très compact, argilo-sableux, agrégats à faces rugueuses en litage peu net fortement soudés les uns aux autres, localement tendance à la formation de lentilles centimétriques, quelques racines fines.

35 - 50 cm (H2): horizon sec, brun, très compact, massif, présence de fentes obliques avec des dépôts de gypse et de halite en tête d'épingle. Pas de racines, peu poreux.

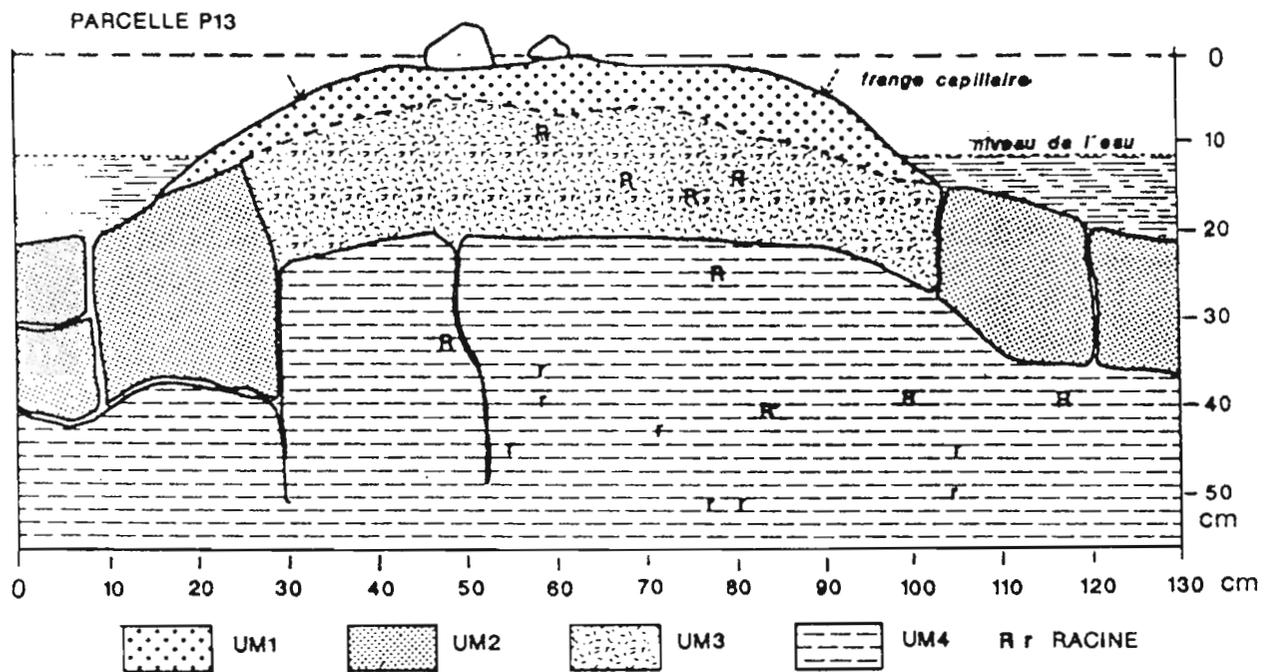
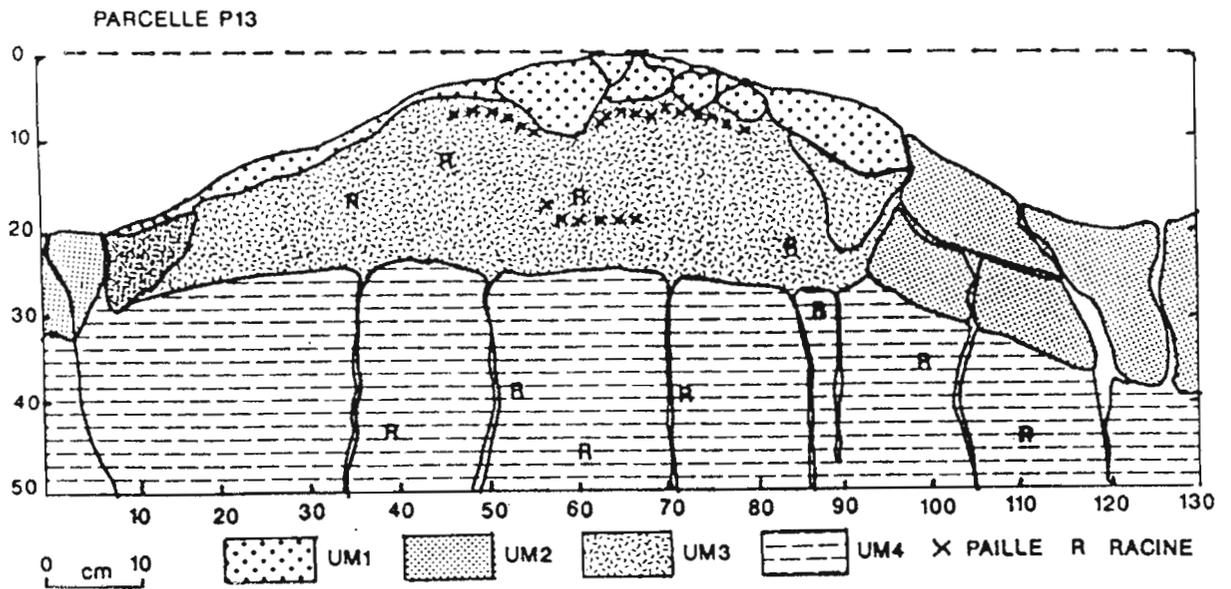


Figure 9 : Profils culturaux, parcelle IT3 P13.

50 - 90 cm (H3): sec, brun foncé, très compact, massif, argileux, tendance à la formation de lentilles de 10 à 15 cm, tâches noires d'oxydes de manganèse de 1 à 2 mm de diamètre, faces lisses et plages sableuses aux interfaces, très peu poreux, pas de racines.

> 90 cm: sec à frais, brun-gris, très argileux à nombreuses taches rouilles très fines, traces d'un ancien enracinement de mangrove, très peu poreux.

Les résultats des analyses effectuées dans chacun de ces horizons montrent une granulométrie très homogène sur tout le profil avec une teneur en argile de 53%. La fraction argileuse, analysée à l'Institut de Géologie de Strasbourg, est constituée de 60% de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés), 30% de kaolinite, 5% de chlorite et 5% d'illite. La capacité d'échange est de 0,30 méq/g d'argile; le pH eau sur extrait 1/5 de 5,3 et la conductivité électrique de 0,7 mS cm<sup>-1</sup>.

### **Sol cultivé**

Suite à l'examen d'une dizaine de profils culturaux répartis dans différentes parcelles localisées dans trois périmètres, en situation salée ou non salée, nous avons identifié cinq grandes unités morphologiques (UM) qui permettent de rendre compte de l'état d'un profil cultural dans ce système de culture. Deux profils relevés dans la parcelle P13 sont présentés à titre d'exemple (fig. 9):

- **UM1: (F G)** située en sommet de billon, d'une épaisseur de 5 à 15 cm, la première unité est constituée de mottes à surface rugueuse de 2 à 5 cm de diamètre comprenant des agrégats poreux, fissurés. Les mottes sont individualisées.

- **UM2: (M D)** située en interbillon, celle-ci est constituée de prismes massifs de 5 à 15 cm de largeur et de 2 à 10 cm d'épaisseur. Ces prismes sont séparés par des fentes de retrait pouvant atteindre plus de 1 cm de largeur. Ces fentes se prolongent parfois dans la partie sous-jacente. Cette description correspond à l'état sec ou frais; en saturé l'ensemble prend une consistance pâteuse ou boueuse alors qu'à l'état humide on obtient une morphologie proche de celui de l'UM4.

- **UM3: (S G)** cette unité est située au coeur du billon, au dessus de la zone non travaillée. Les mottes, rarement sèches, sont formées d'agrégats plus ou moins poreux, elles peuvent former des massifs soudés non compacts ou laisser des espaces vides. C'est la zone de prédilection pour l'enracinement.

- **UM4: (SF F)** zone non labourée, compacte, à l'aspect souvent finement lité ou lamellaire, parfois lenticulaire. Toujours fraîche ou humide (19% d'humidité massique après 15 jours sans irrigation), elle est cependant pénétrée par les racines.

- **UM5: (SD F)** zone située sous l'UM4 correspondant à l'horizon H3 du vertisol. Elle n'est pas pénétrée par les racines.

Lors de la description morphologique du profil cultural, nous avons tout de suite été confronté à la description du système racinaire, qui peut être un élément révélateur de la structure et de la compacité du sol mais n'est pas l'objet de l'étude. Nous avons donc opté pour un simple report cartographique des racines sur le seul plan vertical de description du profil cultural en distinguant si possible les racines principales de diamètre supérieur à 1,5 mm (R) des racines secondaires (r).

Dans tous les profils culturaux observés l'enracinement ne semble pas traduire de contrainte physique ou chimique particulière, même en sol visiblement salé. Le seul obstacle est la proximité de l'UM4, qui peut provoquer l'étalement des racines à sa surface. En général les racines prospectent bien le coeur du billon et peuvent même passer sous l'interbillon pour prospecter le billon voisin.

Des prélèvements ont été effectués dans chacune des unités morphologiques: les teneurs en argile varient de 55 à 58% en passant de l'UM1 à l'UM4. La capacité d'échange cationique des argiles est de 0,42 méq/g. Le pH eau mesuré sur extrait 1/5 est de 5,8 à 6,5 et la conductivité électrique de 0,05 mS cm<sup>-1</sup>.

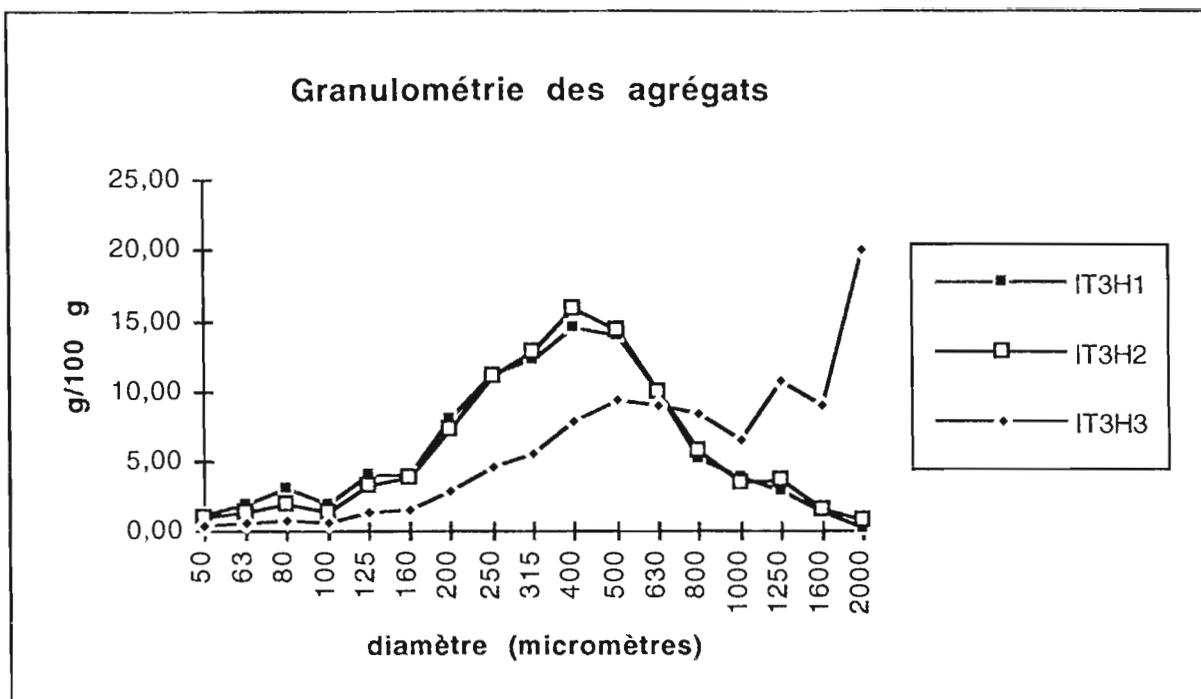


Figure 10 a

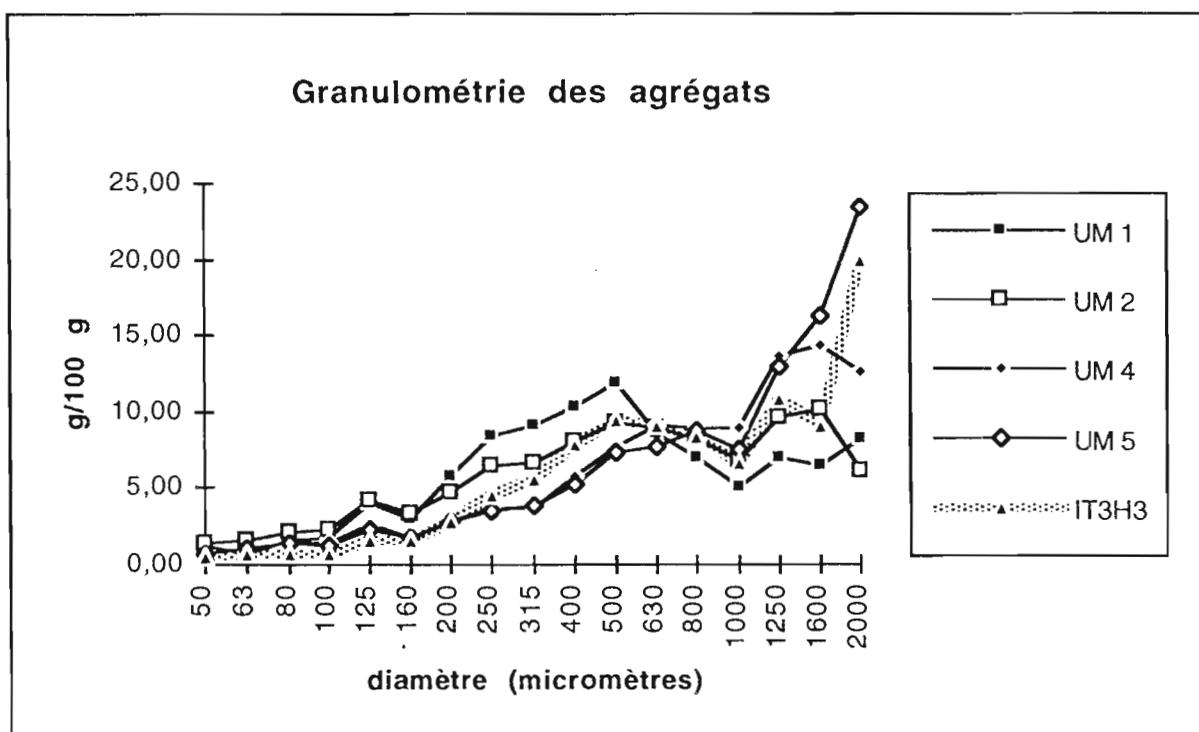


Figure 10 b

Figures 10 : Granulométrie des agrégats en sol non cultivé (a) et en sol cultivé (b).

## Discussion

La mise en culture par billonnage et irrigation modifie profondément la morphologie de la surface du sol. Les deux méthodes de description employées sont bien adaptées pour traduire ces changements. Lors de nos examens de profils culturaux nous n'avons pas observé de traces de roues, conséquences du passage des engins. En fait, le billonnage se fait entre les roues du tracteur qui sont donc positionnées dans les interbillons. Le choix de l'interbillon comme critère de partition latérale est donc justifié. Les travaux du sol antérieurs, labour et offsetage, marquent l'ensemble des périmètres au niveau de l'UM4, continue, alors que les UM1, 2 et 3 ont une extension latérale discontinue liée à la pratique du billonnage.

Les résultats des mesures chimiques traduisent le passage du sol en place au sol cultivé par augmentation des teneurs en cations échangeables, de la Capacité d'Échange Cationique (CEC) et du pH. La granulométrie indique essentiellement une diminution de la fraction limons grossiers au profit de la fraction sables fins dans le sol cultivé.

Il s'agit maintenant d'apprécier s'il existe des indicateurs de ces changements morphologiques au niveau de la structure par des mesures physiques comme le fractionnement en agrégats et la courbe de retrait.

## Le fractionnement en agrégats

### Distribution des agrégats du sol non cultivé

Trois niveaux de la fosse pédologique IT3 ont fait l'objet de l'étude de distribution des agrégats (fig. 10), correspondant aux horizons supérieur (H1, 15-35 cm), médian (H2, 35-50 cm) et profond (H3, 80-90 cm). Les horizons supérieur et médian présentent le même type de distribution des agrégats avec un mode proche de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre. L'horizon de profondeur, sur une distribution des classes de 0-2000  $\mu\text{m}$ , ne présente pas de mode nettement marqué. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par COLLEUILLE (1993).

### Distribution des agrégats sous culture

Chacune des unités morphologiques (UM) définies lors de la description du profil cultural a fait l'objet d'une étude de la distribution des masses d'agrégats par classe de diamètres de 50 à 2000  $\mu\text{m}$ . Deux essais, effectués dans deux laboratoires différents, n'ont pas permis de désagréger les échantillons de l'UM3. Les agrégats sont parfaitement visibles mais semblent retenus par un chevelu racinaire important.

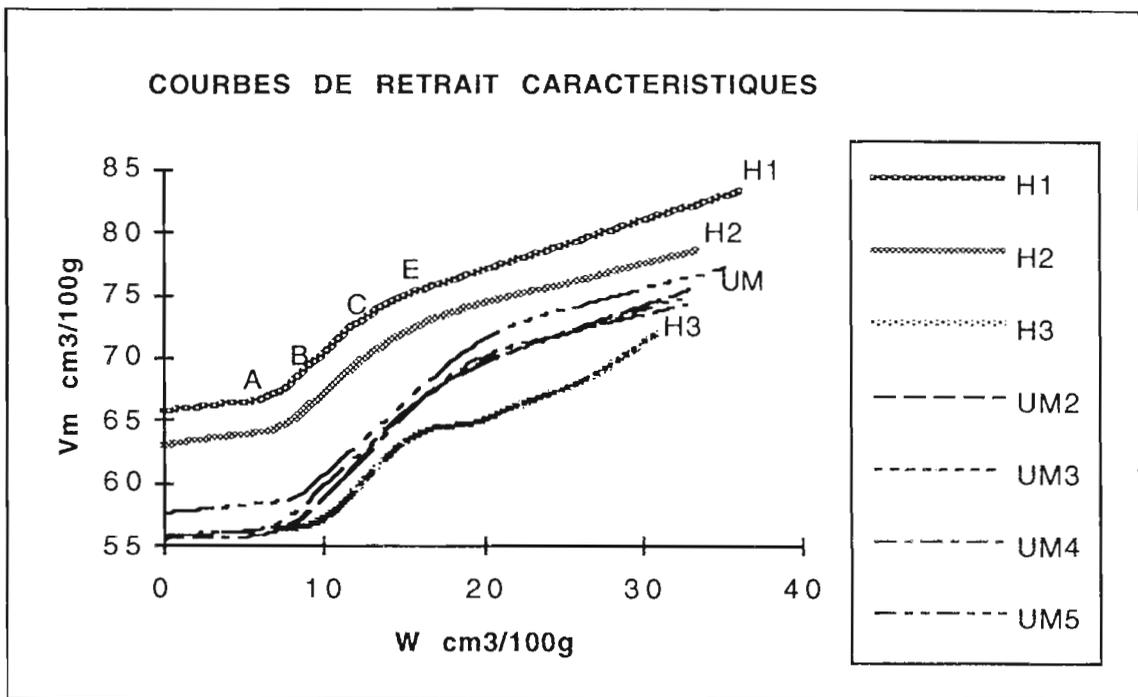
Les résultats obtenus sur les autres échantillons montrent la conservation d'un mode vers 500  $\mu\text{m}$  pour les UM1 et UM2 mais avec diminution progressive des effectifs des classes 200 à 500  $\mu\text{m}$  et augmentation corrélative des effectifs des classes supérieures à 630  $\mu\text{m}$ ; la classe 630  $\mu\text{m}$  servant de pivot. Quant aux UM 4 et 5 leur type de distribution est proche de celui de l'horizon de profondeur du sol non cultivé caractérisé par des effectifs plus importants dans les classes supérieures à 630  $\mu\text{m}$ . Le passage de l'UM1 en surface de billon à l'UM5 en profondeur indique une tendance à l'évolution vers le type non modal à effectifs croissants avec la taille. L'unité morphologique d'interbillon (UM2) présente un profil de distribution du même type que celui de l'UM4, sommet de la partie non labourée du profil cultural. Dans l'ensemble le profil cultural présente cependant des courbes de distribution d'allure semblable à celle de l'horizon de profondeur de la fosse pédologique (IT3H3).

## Discussion

Un nivellement topographique effectué entre la fosse pédologique et l'interbillon du profil cultural révèle une dénivelée d'environ -30 cm de celui-ci ce qui permet la correspondance suivante entre les unités morphologiques du profil cultural et les horizons du profil pédologique (fig. 5):

- UM1 et UM3 correspondent à H1
- UM2 et UM4 correspondent à H2
- UM5 correspond à H3

La courbe de répartition des agrégats, de même type pour H3 et UM5, montre bien l'identité de structuration et l'identité d'origine de ces deux échantillons. Le travail du sol n'affectant pas cette UM de profondeur, elle a conservé son identité par rapport au profil non travaillé.



Pentes du retrait principal (Kr):

H1: 1,209	H2: 1,174	H3: 1,355	
UM2: 1,385	UM3: 1,153	UM4: 1,317	UM5: 1,201

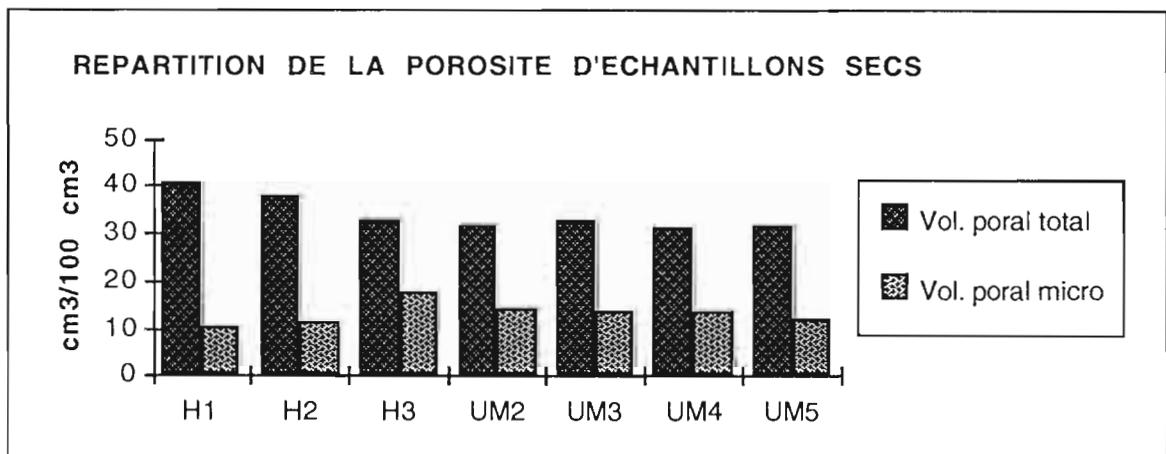


Figure 11 : courbes de retrait caractéristiques du sol non cultivé (H1, H2, H3) et du sol cultivé (UM2, UM3, UM4, UM5).

La mise en culture a, par contre, sensiblement modifié la répartition granulométrique des agrégats des horizons H1 et H2. Ceux-ci présentent, en sol irrigué, une répartition d'autant plus proche de celle de H3 que l'on descend sous le billon. Ce transfert d'agrégats des classes moyennes vers les classes les plus élevées (>630  $\mu\text{m}$ ) ne semble pas être dû aux ions sodium puisque les teneurs moyennes en ions sodium échangeables sont de 0,44 méq pour 100g de terre fine en sol cultivé et de 3,26 méq pour 100g en sol non cultivé. La distribution dimensionnelle des agrégats semble donc bien traduire la contrainte physique exercée par le travail du sol qui se module selon les unités morphologiques du profil cultural.

## La courbe de retrait

### Analyse des courbes obtenues

Chaque courbe de retrait (sauf H3 ne représentant qu'un échantillon) présentée figure 11 est obtenue en calculant les coordonnées moyennes des points caractéristiques de trois courbes puis en leur appliquant le modèle d'ajustement. Les courbes s'ordonnent parallèlement, des volumes massiques les plus élevés aux plus faibles, respectivement de l'horizon supérieur du vertisol aux horizons profonds. Selon que l'on considère l'amplitude du retrait ou le volume massique il apparaît que:

- l'amplitude du retrait identifie le sol non cultivé: ses courbes ont un retrait global plus faible que celles du sol cultivé

- le volume massique sépare les horizons de surface (H1 et H2) du sol non cultivé de son horizon de profondeur H3 et des UM du sol cultivé.

Il est à remarquer que l'UM3, qui est le coeur du billon, là où se trouvent les racines, présente des volumes massiques légèrement supérieurs à ceux des autres UM, situées en marge du billon. Cependant elle présente un retrait global de même amplitude que les autres unités morphologiques.

Les points A et B sont dans tous les cas atteints pour des teneurs en eau sensiblement identiques, ce qui s'explique par le fait que les échantillons ont des teneurs en argile peu différentes (55 à 58 %). Les phases de retrait résiduel et les points d'entrée d'air dans la microporosité (B) sont donc obtenus aux mêmes teneurs en eau.

Cependant, pour une même teneur en eau au point d'entrée d'air, les volumes massiques sont nettement plus importants pour les échantillons des horizons supérieur et médian (H1 et H2) du sol non cultivé que pour ceux du sol cultivé. Les différences de comportement au retrait des échantillons se manifestent aussi par des teneurs en eau et des volumes massiques différents aux points E et C. Le retrait durant la phase C-B est nettement plus important pour les échantillons de sol cultivé que pour ceux du sol non cultivé.

### Discussion

Les courbes de retrait établissent que le retrait global de ces échantillons de sol verticale, travaillé ou non, n'est pas directement lié à la capacité de gonflement-retrait de la phase argileuse.

Le rapprochement de ces résultats de rétractométrie avec ceux obtenus par l'étude des distributions dimensionnelles d'agrégats issus du fractionnement (fig. 10) peut apporter une explication. Le fractionnement en agrégats des horizons H1 et H2 du sol non cultivé présente une courbe de répartition unimodale avec de faibles masses de gros agrégats alors que les unités morphologiques du sol cultivé (UM) ont toutes des effectifs massiques élevés dans les classes de gros agrégats. La répartition des agrégats selon leur taille joue sur le retrait global des échantillons: lorsque la quantité des agrégats les plus gros augmente, le retrait global de l'échantillon s'accroît, ici essentiellement par augmentation du retrait principal (C-B).

Le travail du sol provoque donc un accroissement des teneurs en gros agrégats qui se traduit par une augmentation de l'amplitude de la phase principale du retrait global.

COLLEUILLE (1993) constate que les profils légèrement salés à complexe sodique des vertisols de la cuvette de Diawara située près de Podor, ont des teneurs plus fortes en gros agrégats et un retrait global plus important. Dans notre cas le pourcentage de retrait global le plus élevé est observé dans les échantillons qui ont les plus gros agrégats mais les plus faibles teneurs en ions sodium (0,54 méq pour 100g) tandis que les échantillons à plus forte teneur en ions sodium (3,26 méq pour 100g) ont le retrait global le plus faible. Les teneurs en ions sodium sont ici insuffisantes (8,5 à 19% des cations échangeables contre 37% à Diawara) pour provoquer la création des gros agrégats et expliquer ce retrait global plus important.

Par contre l'hypothèse d'une dessiccation plus importante du sol cultivé, en période de non irrigation, n'est pas à exclure. Elle peut être en partie à l'origine de ce retrait global plus important si on considère que plus on dessèche une argile de type smectite, plus elle est susceptible de gonfler (TESSIER, PEDRO, 1980).

## Conclusion

La répartition granulométrique des agrégats issus du fractionnement des échantillons de sol non cultivé et cultivé montre que le travail du sol provoque un accroissement des teneurs massiques en gros agrégats.

Ces échantillons plus riches en gros agrégats ont une capacité de retrait global plus importante et des volumes massiques au point d'entrée d'air plus faibles. La mise en culture semble bien avoir augmenté la compacité ce qui est vérifié ici par la mesure de la densité apparente : elle est en moyenne sur trois répétitions de 1,51 en H1, de 1,57 en H2 et de 1,76 pour des mottes prélevées en UM1.

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette région à très faible pluviosité, traversée par un cours d'eau pérenne marqué par des crues importantes et une longue période d'étiage, il s'était développé un écosystème où la vie était réglée par le régime du fleuve. Confrontés à des sécheresses persistantes et à des besoins alimentaires croissants, les états riverains du fleuve Sénégal ont cherché à régulariser son débit par la construction de deux grands barrages qui permettent de développer la culture irriguée.

Ces changements importants ne sont pas sans effets sur l'environnement et les structures sociales. Les conséquences sur l'environnement se manifestent entre autres par des risques de salinisation et de dégradation de la structure des sols. Le développement important de l'irrigation, même si les paysans ne cultivent pas toujours la totalité de la surface qui leur est attribuée, n'est donc pas sans conséquence sur la gestion durable des sols.

Les études menées dans la vallée du fleuve Sénégal ont montré que la culture irriguée des sols vertiques a deux conséquences majeures: la première est un apport d'eau important qui provoque à court, moyen et long terme une salinisation et une alcalisation par irrigation avec de l'eau à alcalinité résiduelle positive, la seconde est le travail du sol, d'une part pour créer les périmètres rizicoles, d'autre part pour billonner les rizières et implanter les cultures commerciales de tomate et d'oignon.

En se limitant ici à l'étude de l'effet du travail du sol, il apparaît que la comparaison *in situ* des états non cultivé et cultivé d'un sol non salé met en évidence la transformation d'une part, de la répartition des agrégats par augmentation des masses dans les classes supérieures à 630  $\mu\text{m}$ , et d'autre part de l'amplitude du retrait, plus importante en sol cultivé. Ces changements ne sont, ici, pas dus aux ions sodium mais probablement au travail du sol.

Le fractionnement en agrégats par la méthode au méthanol semble donc être un bon outil pour mettre en évidence l'évolution structurale du sol. Cette méthode pourrait être utilisée pour la détermination des seuils de sensibilité aux contraintes à la fois chimique et physique.

Les courbes de retrait permettent de discriminer les deux traitements mais il est difficile de les interpréter en terme de fonctionnement et de quantification des paramètres pédo-hydriques sans support théorique pour ce type de sol. L'application de cette technique aux sols vertiques laisse supposer le développement des recherches en terme de modélisation pour franchir le pas de l'interprétation fonctionnelle.

La confrontation du chercheur avec la réalité quotidienne vécue par les paysans et les hommes en charge du développement laisse apparaître l'importance des problèmes physiques pour le devenir des sols à moyen et long terme, afin d'assurer une exploitation durable du milieu. Il faut cependant constater qu'à court terme la réussite des cultures irriguées de diversification par rapport au riz passe d'abord par une meilleure programmation de la campagne de culture et de son calendrier à l'échelle de l'unité de production, ce qui sous-entend pour le paysan la possibilité d'appliquer correctement les pratiques culturales préconisées, de lutter efficacement contre les prédateurs (criquets) et d'effectuer ses récoltes dans les meilleures conditions.

## BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN P., (1991) - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse, collection Études et Thèses, ORSTOM Paris, 226 p.
- BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL C., ZANTE P., NDIAYE J. P., (1993) - Les sols lourds de la vallée alluviale, région de Podor: répartition, caractéristiques, aptitudes et risques liés à leur mise en valeur. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 9 p. .
- BRAUDEAU E., (1982) - Fractionnement physique du sol. Mode de séparation et étude du comportement d'agrégats de 0,050 à 2 mm. Cah. ORSTOM sér. Pédologie., vol XIX, n°4, 353-367.
- BRAUDEAU E., (1988) - Méthode de caractérisation pédo-hydrigue des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. XXIV, n°3, 179-189.
- BRAUDEAU E., (1987) - Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. Science du Sol, vol. 25/2, 85-93.
- COLLEUILLE H., (1993) - Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales. Thèse Univ. Paris VI, 353 p. .
- COULOMB I., (1991) - Analyse quantitative du sol au labour: rôle de l'état structural initial. Thèse, 1 tome 230 p., 1 annexe 73 p., INA-PG, Paris.
- DIOUF P. D., GUILMOTO C. Z., (1994) - Démographie et développement dans la moyenne vallée du Sénégal. Présentation des enquêtes de 1992-1993, premiers résultats et analyse typologique des ménages. Direction de la Prévision et de la Statistique, ORSTOM, Dakar, 80 p. .
- F.A.O - S.E.D.A.G.R.I., (1969) - Cartes pédologiques et géomorphologiques de la vallée et du delta du Sénégal au 1/50 000. Feuille 3a Podor.
- GAUTRONNEAU Y., MANICHON H., (1978) - Guide méthodique du profil cultural. CEREF GEARA, 69 p.
- GUERIF J., (1990) - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In " la structure du sol et son évolution", Laon, 9/1/1990, les colloques de l'INRA n° 53, Ed. INRA Paris, 71-89.
- LOYER J. Y., (1989) - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Collection Études et Thèses, Ed. ORSTOM, Paris, 137p.
- MANICHON H., (1982) - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doc. Ing. INA-PG, 214 p + annexes.
- MAYMARD J., COMBEAU A., (1960) - Effet résiduel de la submersion sur la structure du sol (mise en évidence à l'aide de l'indice d'instabilité structurale de S. Hénin). Sols Africains, vol. V, n°2, 123-148.
- MICHEL P., (1973) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Mémoires ORSTOM n°63, 3 tomes, 752 p. .
- MURRAY R.S., QUIRK J.P., (1980) - Comments on recent work critical point dried soil. Replies by Newmann A.C.D. and Lawrence G.P., Payne D., Greenland D.J. . J. Soil Sci., 32, 161-163.

- NEWMANN A.C.D., THOMASSON A.J., (1979) - Rothamsted studies of soil structure. III Pore size distributions and shrinkage processus. *J. Soil Sci.*, 30: 415-440.
- SAED, (1993) - Détermination des besoins en eau. Zone de la vallée du fleuve Sénégal. Projet gestion de l'eau, coopération KULeuven-SAED, bulletin technique n° 7, SAED ST Louis, 41 p. .
- SALA G.H., TESSIER D., (1993) - Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. *C.R. Acad. Sci., Paris t. 316, Série II*, 231-236.
- SEGUIS L., (1992) - Cultures de décrue et périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal. 6èmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, 12-13 sept. 1990, Montpellier. *in "Usages agricoles de l'eau" collection Colloques et Séminaires, Ed. ORSTOM, Paris, 338p.* .
- TESSIER D., (1980) - Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. Note à l'Académie des Sciences, *C.R. Acad. Sci.*, t. 291, Série D, 377-380, Paris.
- TESSIER D., PEDRO G., (1980) - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. Note à l'Académie des Sciences, *C.R. Acad. Sci.*, t. 291, Série D, 461-464, Paris.
- ZANTE P., (1994) - Culture irriguée et évolution de sols argileux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de caractérisation physique. Mémoire de DESS "Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales", Univ. Paris XII Val de Marne, Créteil, 86 p. .
- ZANTE P., (1994) - Les techniques d'étude du profil cultural. Étude bibliographique. DESS "Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales". Univ. Paris XII Val de Marne, Créteil, 68 p. .