Université Paris XII Val de Marne

UFR de Sciences

D.E.S.S.
"Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones Tropicales"

Promotion n° 4

Mémoire de stage

CULTURE IRRIGUEE ET EVOLUTION DE SOLS ARGILEUX DE LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

Essai de caractérisation physique

Patrick ZANTE

Année 1993-1994

Superviseur: G. BELLIER

Maître de stage: P. BOIVIN

Directeur du D.E.S.S. : Pr. E. GARNIER-ZARLI

IRD
CENTRE DOCUMENTATION
Montpellier

SOMMAIRE

RESUME 3

AVANT-PROPOS 4

INTRODUCTION 6

I - LE PAYSAGE ET LES ACTEURS DANS LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL 9

1.1 Les conditions physiques de la production agricole 9

1.1.1 Le climat et ses conséquences pour l'irrigation
1.1.2 Les sols et l'irrigation
1.1.3 Conclusion

1.2 Les conditions sociales de la production agricole dans la région de Podor 15

1.2.1 Agriculture irriguée et élevage
1.2.2 Agriculture irriguée et cultures traditionnelles
1.2.3 Organisation villageoise et périmètres irrigués
1.2.4 Conclusion

II - LES EFFETS DE LA CULTURE IRRIGUEE DES SOLS ARGILEUX 27

2.1 Matériel et méthode 27

2.1.1 Méthode de fractionnement en agrégats
2.1.2 La courbe de retrait

2.2 Les travaux culturaux 35

2.3 La description des sols 37

2.3.1 Sol non cultivé
2.3.2 Sol cultivé
2.3.3 Discussion

2.4 Le fractionnement en agrégats 45

2.4.1 Distribution des agrégats du sol non cultivé
2.4.2 Distribution des agrégats sous culture
2.4.3 Discussion

2.5 La courbe de retrait 46

2.5.1 Analyse des courbes
2.5.2 Discussion

2.6 Conclusion 51

III - L'INFLUENCE DE CONTRAINTES CHIMIQUES ET PHYSIQUES SUR L'AGREGATION 52

3.1 Le choix des contraintes 52

3.1.1 Contrainte chimique
3.1.2 Contrainte physique

3.2 Matériel et méthode 55

3.2.1 Préparation des échantillons non remaniés
3.2.2 Préparation des échantillons remaniés

3.3 L'effet des contraintes sur la distribution des agrégats 59

3.3.1 Sol non remanié
3.3.2 Sol remanié
3.3.3 Conclusion

3.4 L'effet des contraintes sur la courbe de retrait 66

3.4.1 Sol non remanié
3.4.2 Sol remanié
3.4.3 Conclusion

3.5 Conclusion 68

IV - CONCLUSION GENERALE 72

BIBLIOGRAPHIE 75

LISTE DES FIGURES 80

LISTE DES PHOTOGRAPHIES 82

LISTE DES TABLEAUX 82

LEXIQUE DES SIGLES ET ABREVIATIONS 83

ANNEXES 84

CULTURE IRRIGUEE ET EVOLUTION DE SOLS ARGILEUX DE LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

Essai de caractérisation physique

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.

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

La diversification durable des cultures dans les casiers rizicoles exige l'étude des problèmes liés à la salinisation et aux transformations physiques liées à la mise en culture de ces sols. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher des méthodes de mesure adaptées.

Dans la première partie, après avoir analysé dans les grandes lignes les relations culture irriguée-élevage et culture irriguée-culture traditionnelle, nous indiquons les principaux modes de gestion des périmètres.

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 la phase normale du retrait global.

La troisième partie applique ces méthodes d'évaluation de la structure à des échantillons remaniés ou non soumis à des contraintes chimiques (saturation du complexe par les ions calcium ou sodium) et physiques (compactage). L'effet déstructurant du sodium est mis en évidence par la fragmentation en agrégats et par les courbes de retrait.

Mots-clefs: irrigation, vertisol, profil cultural, structure, contrainte,fractionnement en agrégats, courbe de retrait, fleuve Sénégal, Sénégal

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est l'aboutissement d'une année consacrée à la formation dans le cadre de mes activités professionnelles au sein de l'ORSTOM.

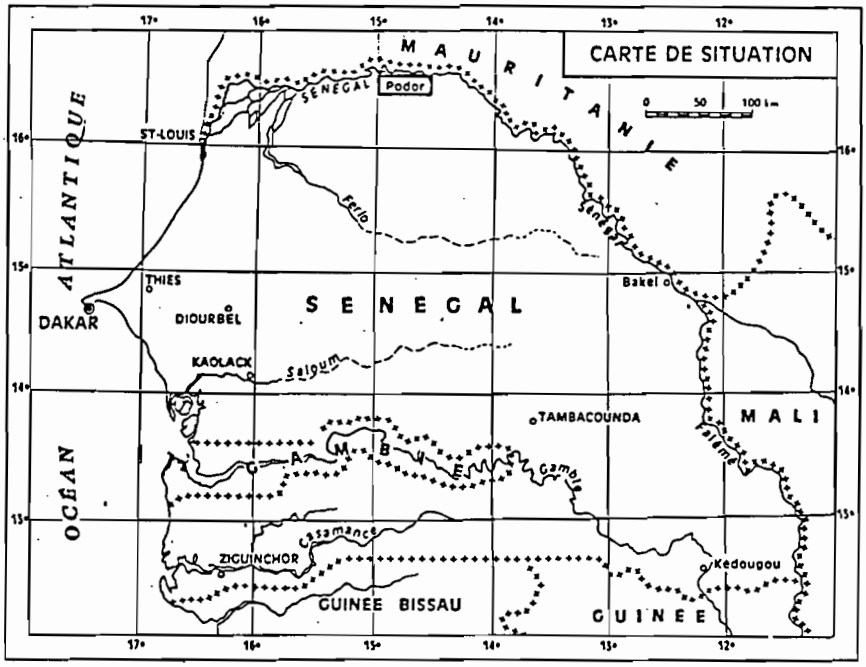
C'est grâce à la confiance qu'ont bien voulu m'accorder le Chef de Département Eaux Continentales B. POUYAUD, son adjoint pour la Pédologie, M. RIEU, le Président de la sous-commission de Pédologie, A. HERBILLON, le Directeur du Centre ORSTOM - Ile de France, J.F. TURENNE et le Responsable du Laboratoire d'Hydrophysique, G. BELLIER, que j'ai pu suivre à l'Université Paris XII, dans le Laboratoire de Biologie des Sols et des Eaux du Professeur E. GARNIER-ZARLI, les cours du DESS "Gestion des systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones Tropicales".

Mon stage s'est déroulé en deux étapes, l'une au Sénégal, sous la responsabilité de P. BOIVIN, initiateur du thème de ce travail, qui a bien voulu m'accueillir un mois dans le cadre du programme "*Développement de l'agriculture irriguée et systèmes de production dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*", l'autre au laboratoire d'hydrophysique de l'ORSTOM - Ile de France où je suis affecté.

Mes travaux sur le terrain ont pu être réalisés à Donaye grâce aux facilités que m'ont accordés Mr. Najirou SALL, Président de l'U.J.A.K., les Présidents et Chefs de section des périmètres IT3, IT4 et Donaye 8 en particulier MM. M.S. DIOP, I. SALL et B. BA. La grande connaissance de la région et de ses paysans, alliée à une disponibilité sans faille que possède J.L. MAEGHT, m'ont permis d'effectuer ce travail en un temps aussi limité. Les techniciens du laboratoire de Pédologie de L'ORSTOM-Dakar, M. BADIANE sur le terrain et D. FAYE au laboratoire, en réalisant une partie des analyses, m'ont beaucoup aidé par leur compétence et leur ardeur au travail. Mr. J. PAGES, chercheur du CIRAD affecté au centre ISRA de St Louis du Sénégal, a bien voulu me consacrer de son temps pour me transmettre les connaissances de base sur la culture de la tomate dans la vallée du fleuve.

Enfin mes collègues D. BRUNET pour la logistique sans faille qu'il a assuré au Sénégal et J.C. BRION pour ses relectures, corrections et conseils ont contribué à ce travail.

A tous et à tous ceux que j'aurais pu oublier, j'exprime mes remerciements les plus chaleureux.



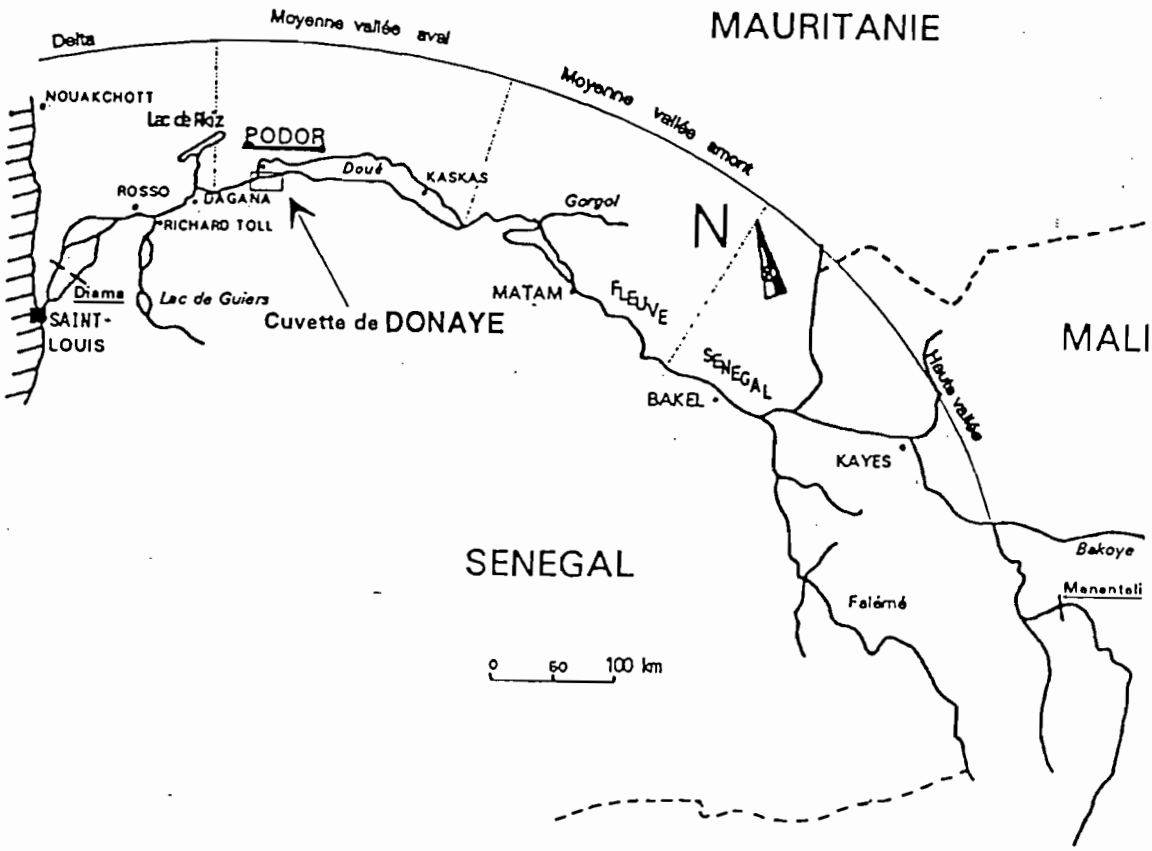


Figure 1 : Cartes de situation.

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.

Les matériaux de la vallée se sont mis en place lors des alternances de transgressions et de régressions marines du quaternaire ancien et moyen puis par dépôts subactuels et actuels lors des crues du fleuve. Les dépôts laissés lors des phases d'intrusion, chargés en sels solubles, sont le support de la majorité des sols de cette vallée constituée, dans ses parties moyenne et basse, d'une succession de cuvettes.

La source du fleuve, située en zone climatique guinéenne, lui procure un débit de crue important qui entraînait son débordement et fut à l'origine des formes morphologiques (cuvettes et levées) et des sols de la vallée (sols hydromorphes et vertiques). L'existence des crues provoquait l'ennoyage de surfaces importantes qui étaient cultivées au fur et à mesure du retrait des eaux (cultures de décrues). Ce système de production agricole, dépendant entièrement du climat, est aléatoire et depuis la période de sécheresse de la fin des années 60 il ne permet plus d'assurer la survie d'une population toujours plus nombreuse à se rassembler sur les bords du fleuve.

L'intensification de l'agriculture et la sécurisation de la production passant par l'irrigation, celle-ci est rendue possible par la création du barrage de Maka-Diama, qui bloque la remontée de la langue salée, et de Manantali qui écrête les crues et assure le maintien d'un niveau d'eau moyen toute l'année (30 à 50 m3/s en étiage). Ces barrages permettraient l'irrigation le long du fleuve de 375 000 ha de cultures (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.

Le premier objectif de ces périmètres 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.

Ces changements importants des conditions de la production agricole ont nécessité la mise en place de nouvelles structures, les périmètres irrigués, et de nouvelles relations agriculture-élevage. Dans un contexte de désengagement de l'Etat et de non compétitivité des produits, les aménagements sont construits de façon sommaire et au moindre coût (sans drainage). Ces nouvelles structures de production seront évoquées dans la première partie de ce mémoire.

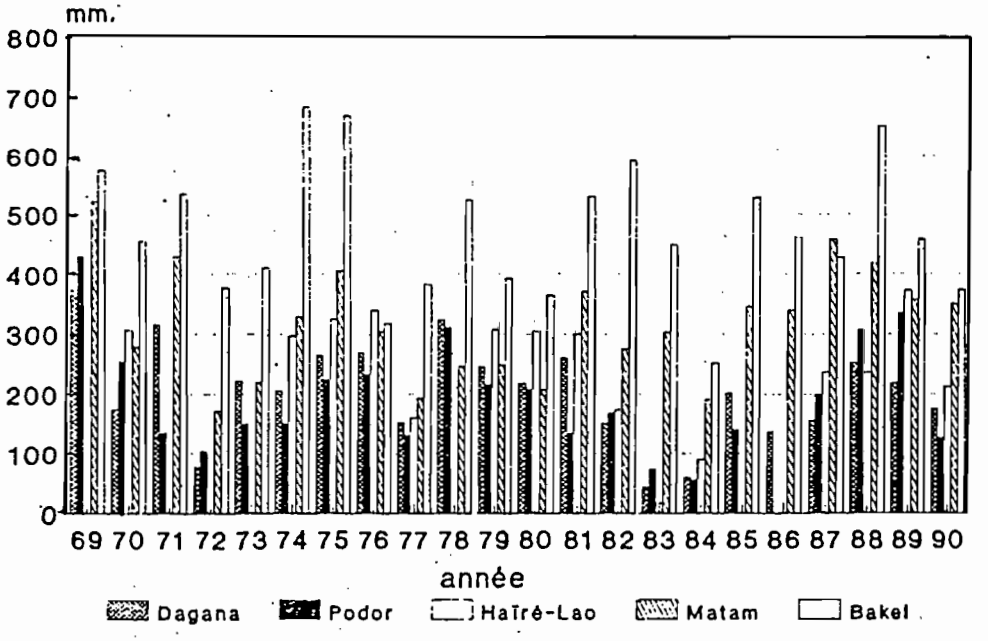
La culture irriguée des sols lourds de cuvette, par les pratiques culturales nouvelles qu'elle exige (labour et billonnage mécanisés), induit des changements physiques, et par la remontée des nappes provoque des transformations chimiques dans ces sols autrefois plantés d'*Acacia* et cultivés en décrue.

Le programme de recherche conjoint ORSTOM-ISRA "*Développement de l'agriculture irriguée et systèmes de production dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*" a comme objectif l'étude des transformations écologiques, économiques et sociales, en particulier au niveau des systèmes de production, et de définir les conditions d'évolution vers une agriculture irriguée durable. Les recherches d'impact sur l'environnement de ces transformations déjà menées dans le cadre de ce programme ont mis en évidence les risques à court, moyen et long terme, de salinisation et d'alcalisation des sols dus à l'irrigation prolongée, sans drainage, par l'eau alcalinisante du fleuve. Dans ce contexte, l'étude de la modification physique du sol sous l'effet de ces nouvelles conditions de culture prend une place importante, nécessitant une caractérisation physique de l'évolution du sol qui demande la recherche d'outils adaptés. Les contraintes de réalisation du stage (un mois de terrain) nous ont amené à envisager deux types d'approche: la caractérisation de terrain et les expériences de laboratoire. Ceci est l'objet des deuxième et troisième parties de ce mémoire.

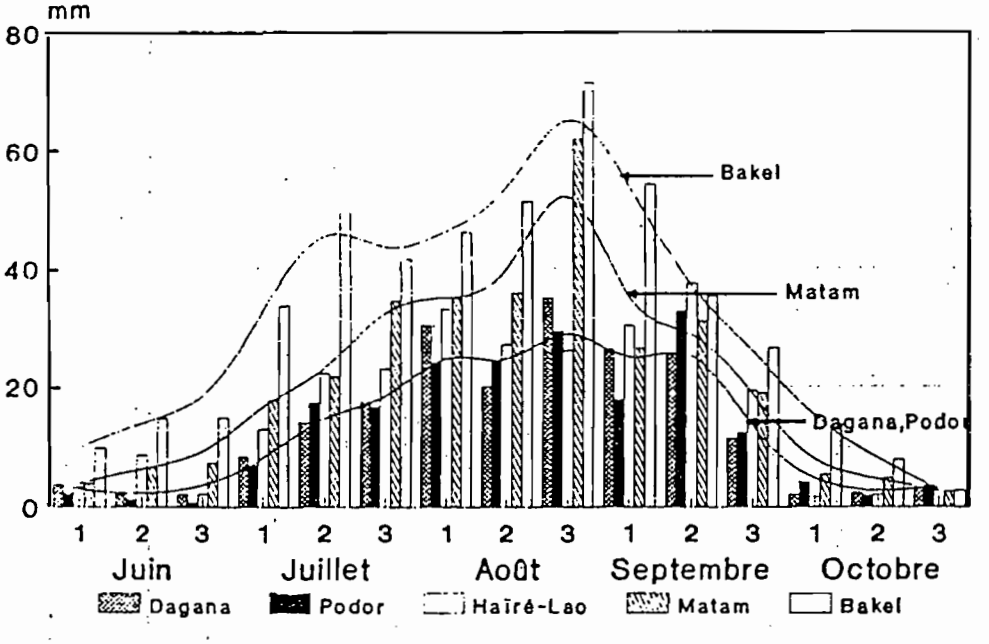
Dans cette deuxième partie, notre objectif est de vérifier si deux méthodes d'appréciation de l'état structural du sol, la distribution dimensionnelle des agrégats issus du fractionnement du sol et la courbe de retrait, mettent en évidence des changements entre un sol cultivé et un sol non cultivé.

La troisième partie est consacrée à l'étude des conséquences de l'application au laboratoire d'une contrainte physique, le compactage et d'une contrainte chimique, la saturation du complexe d'échange du sol par les ions sodium ou calcium.

Les premiers résultats du programme de recherche ORSTOM-ISRA nous ont permis de choisir un site d'étude représentatif au plan social et environnemental, le périmètre irrigué IT3 du village de Donaye, près de Podor.



Hauteurs des précipitations



Moyenne des précipitations décadaires.
(période : 1968-1990).

Figure 2 : La pluviosité (d'après Bull. Tech. n°7, SAED, 1993).

I - LE PAYSAGE ET LES ACTEURS DANS LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

1.1 Les conditions physiques de la production agricole

1.1.1 Le climat et ses conséquences pour l'irrigation

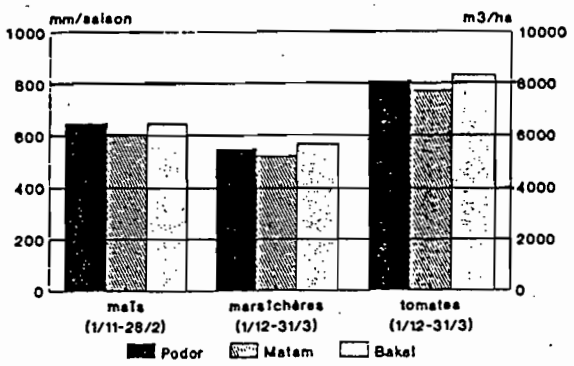
La vallée du fleuve Sénégal est située dans la zone climatique sahélienne caractérisée par une seule saison des pluies centrée sur le mois d'août et qui s'étend de juin à octobre (fig. 2). Les données produites ci-après proviennent du Projet Gestion de l'Eau (SAED, 1993) et concernent la période 1968-1990.

La pluviosité 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 enregistré 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 à Podor, on comprendra que les besoins en eau des cultures soient loin d'être satisfaits et que l'irrigation est un facteur indispensable de la production agricole de la région.

Ces caractéristiques climatiques génèrent des besoins en eau considérables dont nous donnons deux exemples pour les cultures maraîchères et le riz (fig. 3). Les besoins nets en eau expriment la quantité d'eau qui devra être apportée à la plante pendant son cycle végétatif (I net = Pertes - Gains). Les pertes sont constituées par l'évapotranspiration potentielle de la culture et les pré-irrigations, les pluies constituent les gains. En riziculture il est aussi tenu compte de l'apport nécessaire à l'établissement de la lame d'eau. Les besoins bruts intègrent en plus les pertes dans le réseau et le contrôle éventuel de la salinité. Selon sa date de semis, le riz utilise 15 à 20 000 m3/ha et la tomate est la plus exigeante des cultures de contre-saison froide avec une demande de 10 à 15 000 m3/ha.

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

Besoins nets en eau



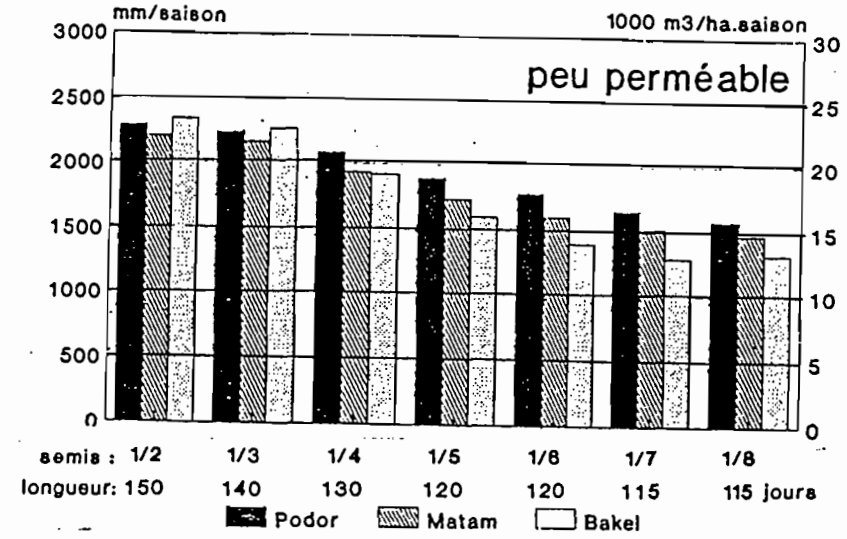
Besoins bruts en eau

= Besoins nets en eau

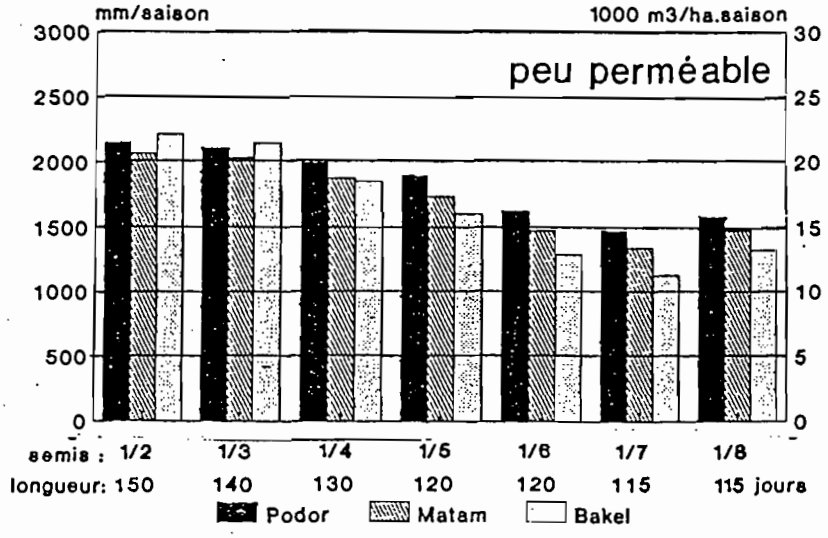
+ 160 à 360 mm pour la culture de maïs (1,600 à 3,600 m3/ha)

+ 150 à 325 mm pour les cultures maraîchères (1,500 à 3,250 m3/ha)

+ 190 à 475 mm pour la culture des tomates (1,900 à 4,750 m3/ha)



- Besoins bruts en eau d'irrigation pour une variété du riz à cycle moyen en fonction de la date de semis et d'une perméabilité du terrain



Besoins bruts en eau d'irrigation pour une variété du riz à cycle court en fonction de la date de semis et d'une perméabilité du terrain

Figure 3 : Besoins en eau des cultures (d'après Bull. Tech. n°7, SAED,1993).

La seconde conséquence est négative: l'existence d'un bilan évaporatoire très fort amène une concentration des sels dans des périmètres sans drainage ou à drainage défectueux (salinisation).

1.1.2 Les sols et l'irrigation

L'histoire géologique de la vallée du fleuve Sénégal, succession de transgressions et de régressions marines, fait apparaître un ensemble de dépôts sédimentaires formant une mosaïque de cuvettes de décantation et de "levées" (MICHEL, 1973; FAO-SEDAGRI, 1973) (fig. 4).

Dans la région de Podor les cuvettes de décantation sont occupées par des sols vertiques et une bonne partie des sols de levée, considérés généralement comme légers, sont en réalité souvent argileux (petites levées) ou présentent des perméabilités très faibles (BOIVIN *et al.*, 1993). Les sols vertiques sont des sols à argiles gonflantes. Ils présentent des caractéristiques morphologiques particulières s'exprimant par l'apparition de fentes de retrait en phase de dessèchement et de faces de glissement/cisaillement dues aux propriétés de gonflement-retrait. 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 des traces d'enracinement d'une mangrove à *Rhizophora*.

Les profils de sol comportent tous deux niveaux très nets:

- un premier niveau plus ou moins fissuré à lentilles d'argile de dimension centimétrique souvent incluses dans une structure décimétrique de forme prismatique ou polyédrique
- un second niveau qui reste frais, d'aspect massif et cohérent, se débitant en larges lentilles à faces striées de taille décimétrique.

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).

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). La concentration en 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.

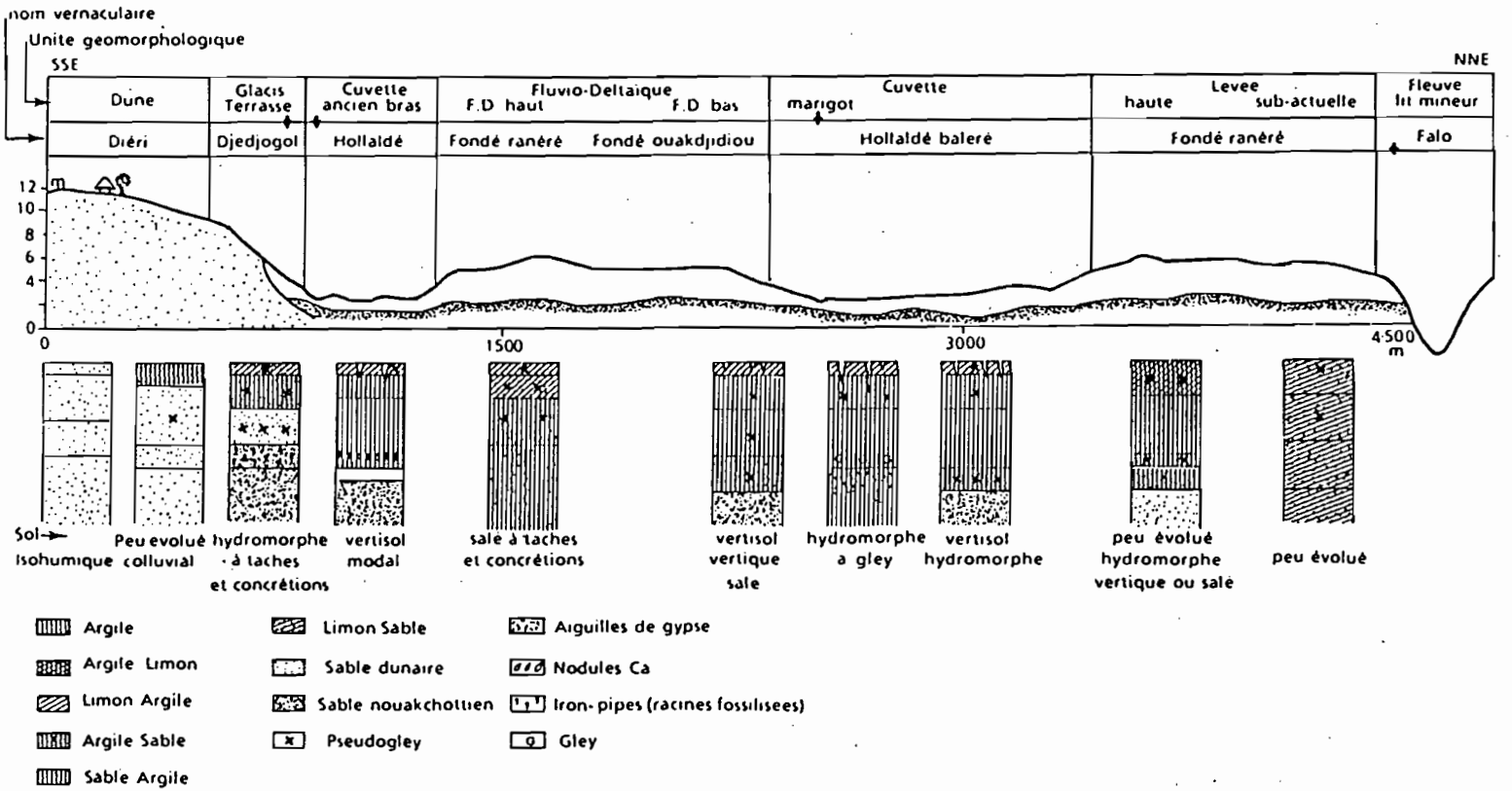


Figure 4 : Toposéquence à travers la plaine alluviale (d'après MTIMET, 1979).

En milieu sahélien l'agriculture irriguée est entreprise avec comme premier objectif de réduire le déficit céréalier et de sécuriser les revenus. La première priorité du paysan est de produire le riz dont il a besoin. La seconde, conséquence de la première, est de financer la mise en place de sa culture de riz. Il obtient ce financement en vendant du riz, mais il le fait peu, en faisant appel à des activités ou revenus extérieurs, mais ils sont insuffisants, ou en consacrant une partie de ses terres aux cultures commerciales comme la tomate ou l'oignon (GAY , DANCETTE, 1993). C'est ainsi que dans la région de Podor la culture du riz apparaît sur 95% des périmètres, celle de la tomate sur 55% et celle de l'oignon sur 30% (POITEVIN de, 1993).

Le développement de la culture de la tomate est directement lié à l'espérance de gain. Un rendement moyen de 30 t/ha payé 30 F CFA/kg dégage un revenu de 500 000 F CFA alors que deux cycles de riziculture sont nécessaires pour obtenir un gain de seulement 250 000 F CFA.

Pour répondre au premier objectif de satisfaction des besoins alimentaires, tous les périmètres ont donc 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 qui provoque 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.

1.1.3 conclusion

La diversification durable des cultures dans les casiers rizicoles exige donc l'étude des contraintes majeures liées au type de sol, au mode de préparation du sol et à la conduite de l'irrigation. Le programme en cours étudie les problèmes de la salinisation et de l'alcalisation liés à l'irrigation mais n'a pas encore abordé les problèmes physiques de la mise en culture de ces sols.

Nous avons donc choisi de nous situer dans un périmètre sur vertisol avec polyculture riz-tomate-oignon pour aborder l'effet de la mise en culture sur la structure du sol. Ce périmètre devant également être représentatif des conditions sociales et économiques d'exercice de la culture irriguée, nous avons choisi le périmètre IT3 du village de Donaye situé près de Podor (fig. 5 et 6).

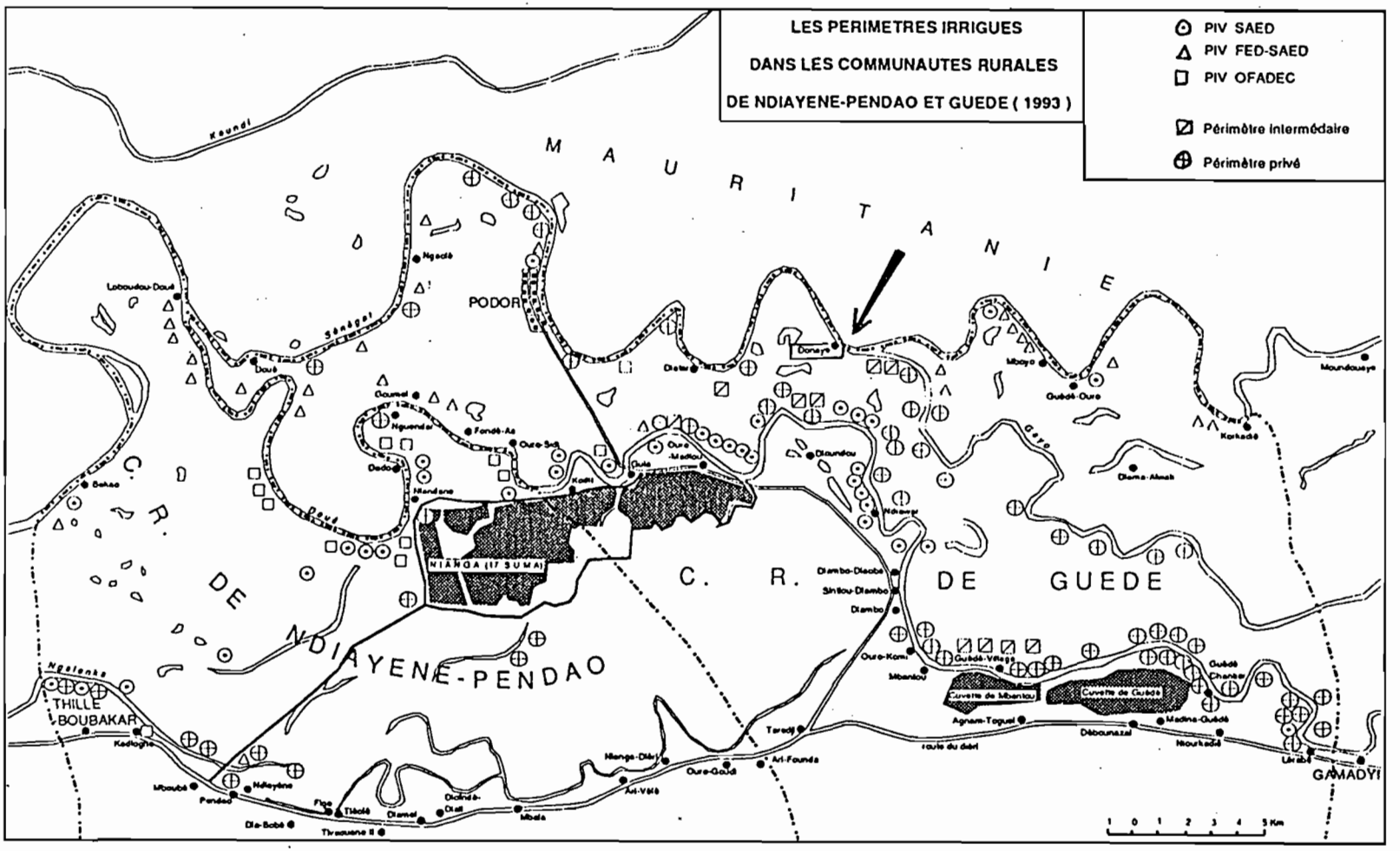


Figure 5 : Carte de localisation des périmètres irrigués près de Podor (d'après LERICOLLAIS, 1993).

1.2 Les conditions sociales de la production agricole dans la région de Podor

Dans le système agraire traditionnel (SOUMARE, 1993), l'agriculteur parvient à tirer profit des potentialités et de la diversité du milieu physique:

- dans les dunes sableuses du *Dieri*, il pratique les cultures pluviales en équilibre avec l'élevage de bovins et de petits ruminants des Peuls
- dans la vallée alluviale du *Waalo*, les crues du fleuve règlent les cultures. Les cuvettes de décantation argileuses reçoivent les cultures de *Hollalde,* les hautes levées limoneuses ou *Fonde* sont exploitées lors des fortes crues tandis que les berges sableuses du fleuve ou *Falo* sont réservées aux cultures maraîchères.

A la fin des années soixante, les conditions climatiques imposent des conditions défavorables à l'exploitation agricole. La période 1968-1985 marquée, à Podor, par un déficit de pluviosité de 36% par rapport à la période 1931-1960, a également des répercussions sur le débit fluvial qui faiblit.

Maintenir, ou même si possible améliorer, la disponibilité alimentaire pour la population devient un impératif pour freiner l'exode rural. La recherche d'une maîtrise des eaux du fleuve, concrétisée par la construction des barrages de Maka-Diama à l'aval (1985) et de Manantali à l'amont (1988) provoque l'émergence de nouvelles formes d'utilisation du sol. En effet, depuis l'aménagement par la SAED en 1970 d'un périmètre rizicole dans la cuvette de Nianga, les superficies irriguées se sont considérablement développées provoquant d'importants changements dans les systèmes de culture.

Cependant, l'image qui émerge des différentes enquêtes (DIOUF, GUILMOTO, 1994; TARRIERE, 1993; SANTOIR, 1993) confirme à la fois l'importance de l'irrigation, qui permet d'établir une tutelle foncière selon le droit coutumier, et celle de la gestion traditionnelle des terres qui est loin d'occuper une place marginale car elle permet la culture sans intrants.

Sur le plan ethnique la région de Podor est essentiellement peuplée par les *Haalpulaaren* (agriculteurs Toucouleurs et éleveurs Peuls), les *Wolofs* sont peu nombreux et les autres ethnies, notamment *Soninké,* très peu représentées (DIOUF, GUILMOTO, 1994).

1.2.1 Agriculture irriguée et élevage

La création du périmètre de Nianga (fig. 5), dans le milieu des années soixante dix, s'accompagne de la construction d'une digue qui soustrait à la crue 10 000 ha de terres cultivées en décrue par les Peuls qui constituent alors 50% des cultivateurs. En 1990-91, seul un quart des Peuls de la région pratique la culture irriguée (SANTOIR, 1993). Autrefois majoritaires dans la culture de décrue, les Peuls sont maintenant minoritaires dans la culture irriguée.

L'examen de quelques variables caractéristiques mesurées chez des Peuls des périmètres irrigués et chez des Peuls pasteurs permet à SANTOIR (1993) d'aborder le problème de l'intégration de l'élevage dans les périmètres irrigués. Les Peuls cultivant dans les périmètres sont à la tête de familles plus nombreuses et ont un cheptel moins abondant mais réparti plus équitablement entre les familles. Paradoxalement ils sont aussi plus nombreux à acheter des aliments pour leur bétail.

La mobilité du cheptel est encore la règle. En saison des pluies, le cheptel bovin évolue dans le *Dieri*. Le *Waalo,* occupé en cette saison par les cultures irriguées, n'accueille que le petit cheptel des Peuls travaillant sur les périmètres. En saison sèche, le *Dieri* continue à supporter la majorité des troupeaux qui peuvent cependant migrer au sud en cas de sécheresse intense. L'auteur constate que les anciennes transhumances entre *Dieri* et *Waalo* ont pratiquement disparu surtout chez les Peuls des périmètres. La complémentarité traditionnelle entre les deux zones n'existe plus. Les périmètres n' apparaissent que très peu comme lieu de pâturage, réservé aux Peuls des périmètres et à leur petit bétail, en raison des faibles superficies qu'ils y cultivent et des conflits avec les agriculteurs voisins. Les cultures de contre-saison limitent le séjour des animaux (15 jours environ) et obligent à un gardiennage très attentif.

La conduite encore fort traditionnelle des troupeaux, l'absence de formes modernes d'élevage, le niveau élevé des activités extra-agricoles et la persistance de l'émigration montrent que le bilan des Peuls dans les périmètres irrigués n'est pas très positif.

En conclusion, on peut dire que le *Waalo* et ses périmètres irrigués n'ont pas permis la reconstitution du cheptel affaibli par les sécheresses. L'intérêt de l'agro-pasteur pour l'irrigation est donc faible. Représentant une minorité juste tolérée, les Peuls des périmètres restent proches du monde pastoral et la présence des périmètres irrigués, en leur offrant des activités diversifiées, leur permet d'autres choix que de devenir paysans. L'intégration des activités pastorales et agricoles n'est pas encore réalisée.

1.2.2 Agriculture irriguée et cultures traditionnelles

Les enquêtes socio-démographiques menées par DIOUF et GUILMOTO (1994) sur un échantillon constitué à partir de deux arrondissements médians de la région de Podor, permettent d'apprécier l'impact des cultures irriguées dans la région de la moyenne vallée du fleuve Sénégal qui a le plus bénéficié des aménagements hydro-agricoles.

Quatre zones correspondant à un regroupement socio-économique sont retenues par les auteurs: le *Dieri* (ou *Jeeri*), l'île à Morfil située entre le fleuve Sénégal et son bras le Doué, "Goudron", le long de la route nationale, et Nianga représentant des populations à l'intérieur et autour du périmètre irrigué.

Le tableau 1 montre que plus de 70% des ménages de la zone disposent de parcelles irriguées ce qui fait de l'irrigation un secteur d'activité très important pour cette région.

Type d'irrigation	*Dieri*	Morfil	Goudron	Nianga	Ensemble
aucune	66,67	7,20	38,71	10,93	29,62
PIV	33,33	91,95	56,45	65,03	63,51
Gd. périmètre	0,00	0,00	1,61	22,40	5,18
autres	0,00	0,85	3,23	1,64	1,69
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 1 : Répartition des ménages par zone selon le type d'irrigation (en % de l'échantillon) (d'après DIOUF et GUILMOTO, 1994)

L'irrigation se fait pour l'essentiel sur des petits aménagements (PIV) anciens dans un état d'entretien médiocre. La taille des surfaces disponibles est très inégale de village à village, l'irrigation étant même techniquement impossible dans les zones éloignées du fleuve (*Dieri* et pour partie Goudron).

La culture de riz est le premier choix des agriculteurs, suivi par les productions commerciales de tomate et d'oignon.

Si la riziculture reste omniprésente parmi tous les irrigants, la fréquence des cultures commerciales (tomate surtout) augmente nettement chez les agriculteurs disposant d'au moins 60 ares de parcelles irriguées (tab. 2).

surface (ares)	riziculture	tomate	oignon
<25	97,19	8,43	2,81
25-49	98,72	13,68	3,85
50-99	98,45	69,77	26,36
>1 ha	97,59	60,24	24,10
Ensemble	98,08	29,92	10,88

Tab. 2 : Cultures pratiquées par classes de surface (d'après DIOUF et GUILMOTO, 1994).

L'étude des facteurs de production et de la destination de la récolte de riz montre l'importance de l'autoconsommation qui concerne les trois quarts des producteurs de la moyenne vallée et l'importance de la main d'oeuvre familiale, notamment celle des femmes. Toutefois il semble que la présence de main d'oeuvre salariée soit primordiale dans les zones à forte production, ce qui sous-tend une faible mécanisation (tab. 3).

paddy (sacs)	hommes	femmes	employés	ne vend pas de riz	nombre de ménages
< 10	1,62	1,77	0,19	92,58%	259
10-19	1,81	2,05	0,73	73,68%	87
20-49	2,08	2,04	1,10	50,00%	101
> 50	2,87	3,45	2,03	24,07%	31
Ensemble	1,11	1,21	0,35	73,64%	812

Tab. 3 : Nombre de personnes engagées dans la riziculture et proportion de ménages ne vendant pas leur récolte par volume de paddy récolté. (d'après DIOUF et GUILMOTO, 1994)

Les femmes interviennent tout au long du processus de la production rizicole, assurant 45% du temps de travail de la filière riz (BARO-DIOP M., 1993) alors qu'elles ne sont attributaires que d' environ 5% des parcelles. Cette pratique sociale d'attribution patriarcale de la terre est contournée par l'occupation de la terre en groupe, ce qui permet aux femmes de mener les opérations et de gérer leurs revenus; cette solution s'applique essentiellement aux cultures maraîchères et au sorgho de décrue. La dispersion géographique du travail des femmes entre le foyer, le périmètre irrigué, le périmètre des femmes, les cultures de décrue, le maraîchage sur les berges (*falo*) impose une surcharge de travail.

L'introduction de la mécanisation pour les travaux de transformation des céréales (décortiqueuse) est toujours plébiscitée par les paysannes mais elle comporte au moins deux risques: la diminution des céréales réservées à l'autoconsommation pour payer la machine et la production de riz blanc, produit démuni des nutriments essentiels.

Ce développement important de la culture irriguée n'occulte cependant pas les cultures traditionnelles qui, sauf dans la région spécifique de Nianga, restent très présentes avec une répartition différente selon les zones. L'île à Morfil est le secteur où les cultures traditionnelles restent les plus vivaces, favorisées par les deux bras du fleuve et la présence de cuvettes non encore aménagées.

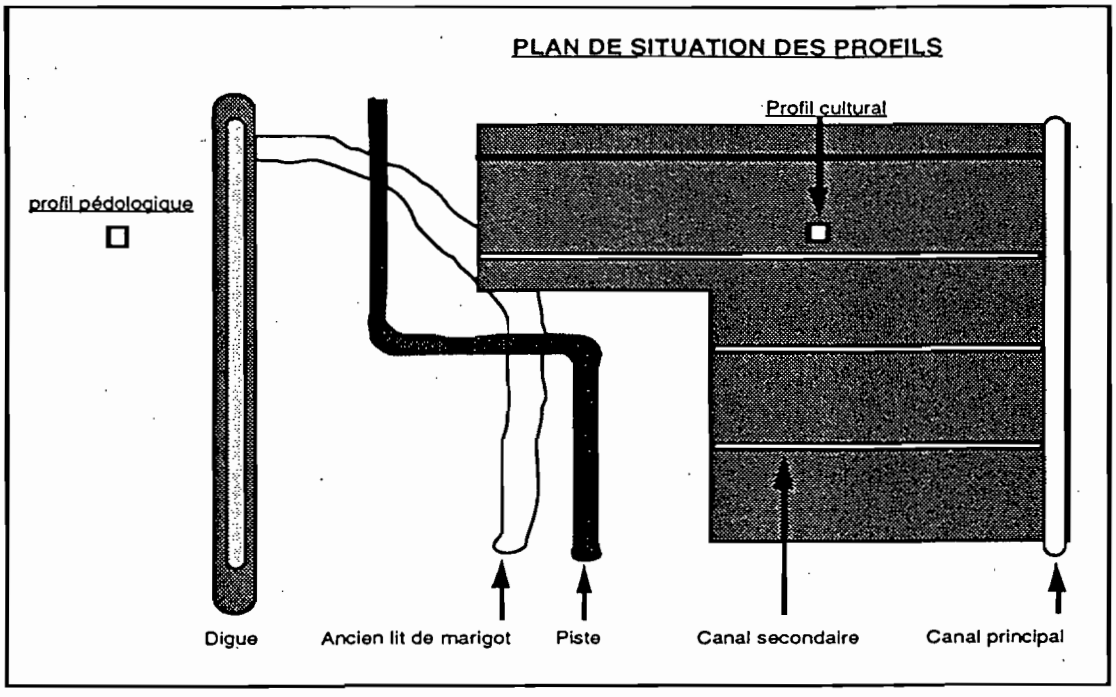
surface (ares)	*Dieri*	*Hollalde*	*Falo*	jardin
pas d'irrigation	31,82	29,55	26,14	27,27
< 25	23,03	55,06	33,71	53,37
25-49	24,36	70,51	55,56	69,23
50-99	7,75	36,43	17,83	43,41
> 1 ha	9,64	31,33	26,51	60,24
Ensemble	22,52	46,62	34,23	48,99

Tab. 4 : Place des cultures traditionnelles chez les irrigants (en % de chaque classe de surface) (d'après DIOUF et GUILMOTO, 1994).

Le tableau 4 ci-dessus montre bien la place encore importante de ces cultures et l'effet du développement de l'irrigation.

Une typologie transversale des ménages permet à DIOUF et GUILMOTO, (1994) de distinguer trois grands groupes qui comprennent aussi bien des irrigants que des non irrigants: 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.

En ce qui concerne les éleveurs cette enquête rejoint l'analyse du milieu Peul faite par SANTOIR (1993): l'intégration ancienne des activités agro-pastorales s'est affaiblie et les grands éleveurs, tenus généralement à l'écart des projets de développement, constituent une catégorie à part. Peu d'entre-eux trouveront une possibilité de sédentarisation sur des périmètres irrigués, les autres tendront à satisfaire la demande extra-régionale.



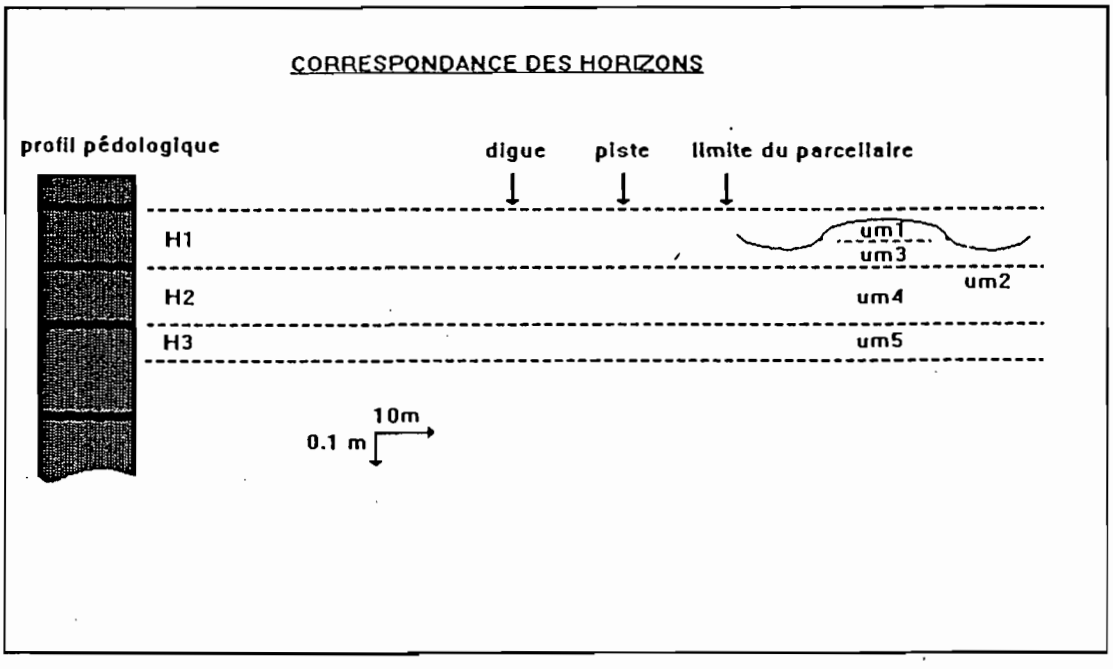


Figure 6 : Carte de localisation des sites.

Les petits paysans, qui forment la part la plus importante de la population, pratiquent peu ou pas les cultures irriguées. Les cultures traditionnelles leur sont indispensables. Les petits irrigants continuent de dépendre des cultures fluviales et ils partagent leurs pratiques entre les cultures de décrue, la culture des berges, celle de leur parcelle de riz et le jardin afin de minimiser les risques.

Chez les paysans moyens ou aisés l'intensification est proportionnelle aux surfaces irriguées et correspond à un recul très net des cultures de *Waalo* et de *Falo* dès que les surfaces atteignent 50 ares. L'introduction des cultures spéculatives (tomate et oignon) correspond à une étape ultérieure de l'intensification qui dépend de la localisation du village, des contraintes techniques et du dynamisme des groupements de producteurs. Ce développement des cultures spéculatives permet un premier enrichissement et semble freiner l'exode urbain.

1.2.3 Organisation villageoise et périmètres irrigués: le village de Donaye

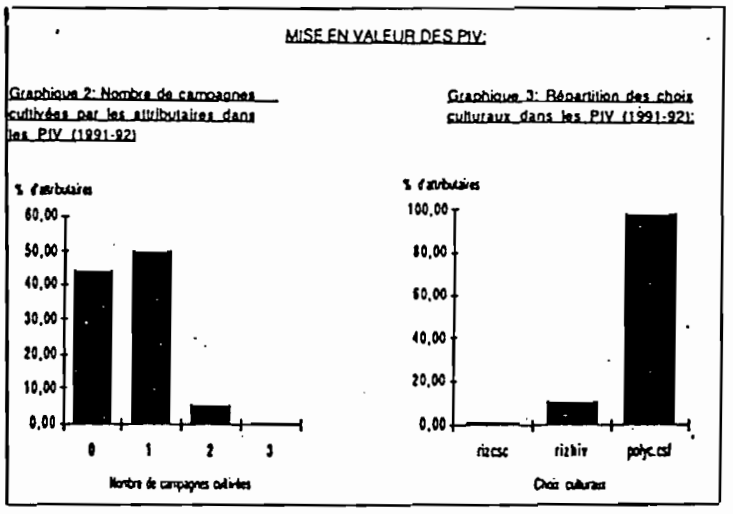
Situé dans la communauté rurale de Guédé, le village de Donaye est implanté dans l'île à Morfil et bénéficie de trois sources d'eau: le fleuve Sénégal, le Doué et le Gayo. Avec une population d'environ 1500 habitants sa surface cultivable est estimée par la SAED à 750 ha dont 70% sont déjà aménagés (534 ha pour 22 aménagements).

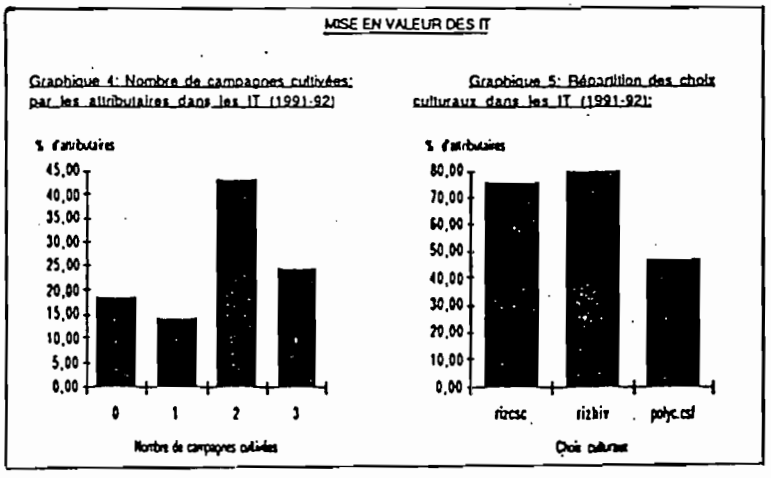
Afin de bien situer l'importance de l'irrigation dans la vie villageoise, les types d'aménagements et leur structure de gestion seront étudiés à partir de l'étude des groupements de producteurs du village de Donaye réalisée par Claire TARRIERE (1993).

1) Les types de périmètres irrigués

La culture irriguée a commencé dans le village de Donaye en 1978 avec les Périmètres Irrigués Villageois (PIV) de la SAED. Aux PIV sont venus s'ajouter les périmètres intermédiaires (IT) et des périmètres privés. Ces aménagements sont gérés par des groupements de producteurs.

Sur l'ensemble de la superficie aménagée, les PIV représentent 20%, les IT 37% et les privés 39%.





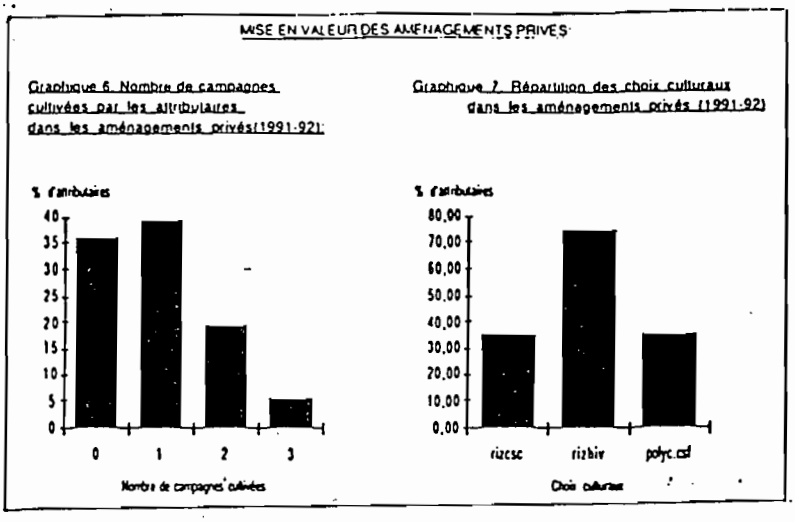


Figure 7 : Mise en valeur des différents types d'aménagements (d'après TARRIERE C., 1993).

a) Les Périmètres irrigués villageois (PIV)

Les PIV sont des aménagements sommaires au coût peu élevé. Le village de Donaye en compte six, créés entre 1979 et 1986 sur des terres cédées à la communauté villageoise par le "maître de la terre". La superficie moyenne d'un PIV est d'environs 20 ha ce qui donne à chaque attributaire une surface moyenne par PIV de 0,14 ha.

Les PIV se caractérisent par une faible mise en valeur et une spécialisation dans la polyculture (tomate, oignon) en contre saison froide (novembre à février) (fig. 7 et 8).

b) Les aménagements intermédiaires (IT)

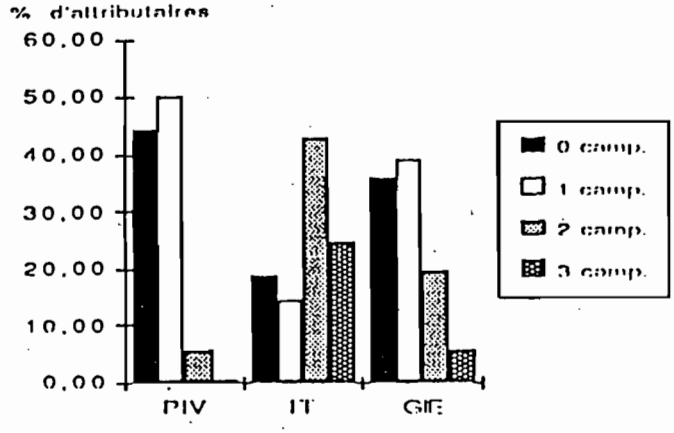
Ce sont des aménagements réalisés dans le cadre de la coopération italienne et d'un programme de l' OMVS. Quatre IT ont été créés à Donaye entre 1985 et 1988. Ce sont des périmètres de 50 ha alimentés par un groupe moto pompe (GMP) et l'irrigation se fait par siphon à partir d'un canal principal. Les tours d'eau se font par secteur et non pas par parcelle.

Les 50 ha sont divisés en 50 parcelles de 1 ha. Pour obtenir une parcelle il faut appartenir à une concession (*galle*) d'au moins 5 personnes, cotiser à la coopérative et résider à Donaye. Un *galle* ne peut théoriquement bénéficier que d'une seule parcelle dans un seul IT. La répartition des parcelles est faite par tirage au sort; elles sont généralement divisées en deux parties, 84 ares pour le riz et 16 ares en polyculture.

A leur départ en 1988 les italiens ont laissé sur chaque IT un fond de roulement en nature de 120 000 FF (gazole, engrais, intrants) régulièrement reconstitué, un GMP, du matériel de motoculture et un magasin. Actuellement seuls le GMP et les décortiqueuses sont fonctionnels. Le mécanicien, licencié au départ des italiens a été à nouveau recruté en 1992 par les groupements de village.

La mise en valeur des IT est nettement supérieure à celle des PIV, les attributaires faisant fréquemment jusqu'à deux campagnes rizicoles et une campagne de polyculture (fig. 7 et 8).

Graphique a: Comparaison des trois types d'aménagements selon le nombre de campagnes cultivées par les attributaires (1991-92)



Graphique b: Comparaison des trois types d'aménagements selon les choix culturaux des attributaires (1991-92)

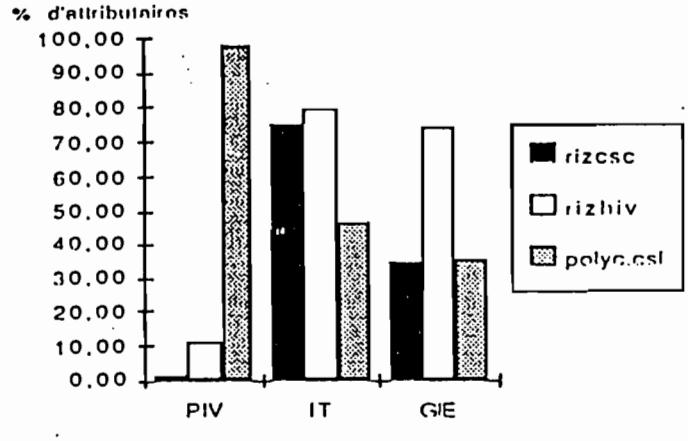


Figure 8 : Nombre de campagnes et choix culturaux selon les types d'aménagements (d'après TARRIERE C., 1993).

c) Les aménagements privés

Ces aménagements sont conçus en dehors des structures administratives. Le premier aménagement de ce type date, à Donaye, de 1985. Le développement des Groupements d'Intérêt Economique (GIE) donnant accès au crédit favorise ces aménagements depuis 1990 (12 sont créés et 6 en cours de création en 1993). Leur surface varie de 5 à 55 ha, le nombre de leurs membres de 2 à 101. Le mode de répartition des parcelles est variable, égalitaire entre les membres ou selon la surface détenue.

Pour les années 1991-92 la mise en valeur, faible, se rapproche de celle des PIV. En 1992, 49% des attributaires n'ont fait qu'une campagne. La culture principale y est le riz d'hivernage (fig. 7 et 8).

2) La gestion des périmètres irrigués

A Donaye, à chaque périmètre correspond un Groupement de Producteurs (GP) qui regroupe les attributaires d'un même périmètre.

La première condition d'affectation d'une terre est la mise en valeur par l'attributaire ou sa famille. Dans cette région la mise en valeur passe par l'irrigation qui nécessite de gros investissements. En se constituant en GIE, les groupements de producteurs, qui n'ont pas de statut juridique, en acquièrent un et ont accès au crédit. Ils deviennent donc potentiellement capables de mettre les terres en valeur.

a) La gestion des PIV

Au niveau de chacun des PIV l'ensemble des attributaires forme un groupement de producteurs. Les groupements sont gérés par la section villageoise coopérative qui, elle, a le statut de GIE. La section villageoise est dirigée par un bureau de six membres au Président élu.

b) La gestion des IT

Ils sont gérés par des groupements de producteurs ayant le statut de GIE. Chaque IT est autonome et gère l'achat des intrants et la commercialisation. Chaque groupement est constitué par les villageois selon des critères d'affinité; les parcelles sont ensuite attribuées par tirage au sort.

Chaque groupement est géré par un bureau constitué d'un Président, d'un trésorier, d'un magasinier, d'un technicien villageois et d'un peseur. L'exploitation des parcelles est individuel, l'entretien des canaux est collectif. La commercialisation du riz se fait par une société privée (DELTA 2000), la culture de la tomate est sous contrat avec la conserverie (SOCAS).

c) La gestion des périmètres privés

Ils sont gérés par des GIE familiaux, individuels ou mixtes. Les GIE familiaux sont constitués par une famille ou des familles ayant des terres voisines; les membres ne sont pas tous attributaires de parcelle mais par le fait d'être inscrits sur la liste ils sécurisent leur patrimoine foncier. Les GIE mixtes sont des GIE familiaux qui, par manque de financement, passent un contrat avec un entrepreneur qui finance l'aménagement; en échange il cultive à son compte une partie des terres pendant 5 à 6 ans. Ce système, aux contrats souvent flous, est à terme source de conflits.

1.2.4 Conclusion

L'apparition à Donaye d'un nouveau quartier de plus de 70 maisons qui s'est développé à la fin des années 1980 montre l'importance du développement de l'irrigation dans la fixation des populations et même le retour au village, ne serait ce que pour des objectifs de sécurisation foncière. Si l'accès à l'irrigation a observé des principes égalitaires dans les PIV et les IT, l'augmentation récente du nombre de périmètres par création de GIE privés montre le développement de la course à la terre dans une région ou les sols cultivables deviennent rares.

Si la riziculture reste la spéculation principale pour laquelle ont été créés les périmètres irrigués, les cultures commerciales et en particulier celle de la tomate, se développent chez les agriculteurs disposant d'au moins 60 ares. La production reste cependant très variable, passant de 54 000 t en 1991-92 à 24 730 t en 1992-93. Pour la campagne 1993-94, les prévisions sont de 50 000 t. En mars 1994 les superficies cultivées étaient de 2500 ha dont 1500 dans la région de Podor (SAED, 1994).

L'irrigation, par les revenus qu'elle dégage, apparaît aussi comme un facteur possible de développement social des villages puisque à Donaye les IT ont participé au financement d'une classe de l'école, de la pharmacie, du dispensaire et de la nouvelle mosquée.

1

2

3

4

5

6

1 : Passage d'offset

2 : Billonneuse

3 : Parcelle billonnée

4 : Canal d'apport et siphons

5 : Etat d'une parcelle entre deux irrigations

6 : Parcelle de tomate et oignon à la récolte

II - LES EFFETS DE LA CULTURE IRRIGUEE DES SOLS ARGILEUX

2.1 Matériel et méthode

Les facteurs pouvant modifier le comportement du 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., l'état structural initial du sol est un facteur déterminant pour l'état final (COULOMB, 1991). Il est donc important d'essayer 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 vertiques 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 les test de Hénin.

Ces considérations nous ont amené à tester deux méthodes, déjà anciennes mais qui ont vu se développer de nouvelles approches, 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.

Les facteurs qui sont susceptibles d'intervenir dans la modification de la structure du sol lors de sa mise en valeur par l'irrigation peuvent être d'ordre physique (travail du sol, compactage) ou/et chimique (action des sels mobilisés lors des remontées de nappe). Dans le contexte de mise en culture de la moyenne vallée du fleuve Sénégal le compactage lors du travail mécanisé du sol et la teneur en ions sodium et calcium du complexe d'échange semblent des éléments importants d'évolution de la structure.

Nous avons donc essayé l'application des méthodes de fragmentation en agrégats et des courbes de retrait dans deux cas de figure:

- la comparaison d'un sol non cultivé et d'un sol cultivé
- l'effet du compactage et des ions sodium et calcium au laboratoire sur échantillons de sol non remanié et sur sol reconstitué.

Ce travail, qui n'a pas pu prendre en compte la reproductibilité des méthodes, est une première approche destinée à fournir des indications sur l'utilisation potentielle de ces méthodes et sur les adaptations nécessaires.

Afin d'éviter les interactions nous avons choisi un périmètre établi sur sol vertique non salé dans une cuvette de décantation située à proximité du village de Donaye. Le périmètre IT3 choisi 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 cultivée billonnée (sol cultivé) (fig. 6).

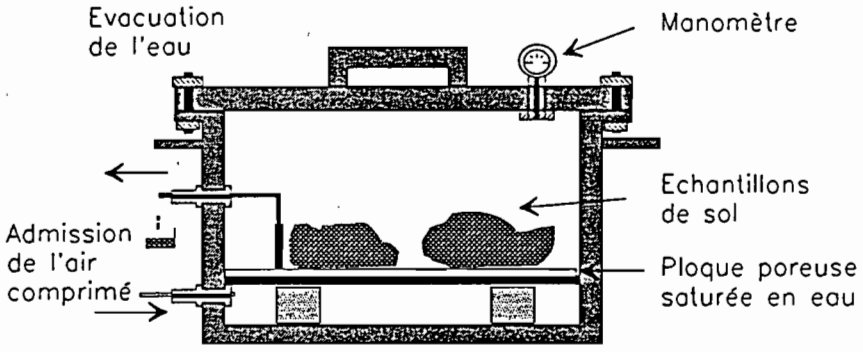
2.1.1 Méthode de fractionnement en agrégats

Le fractionnement physique des agrégats du sol est une méthode de laboratoire utilisée notamment pour l'étude de la stabilité structurale (HENIN, 1938), pour celle de la matière organique (FELLER, 1979) et pour l'étude du comportement structural du sol (BRAUDEAU, 1982; COLLEUILLE, 1993). 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).

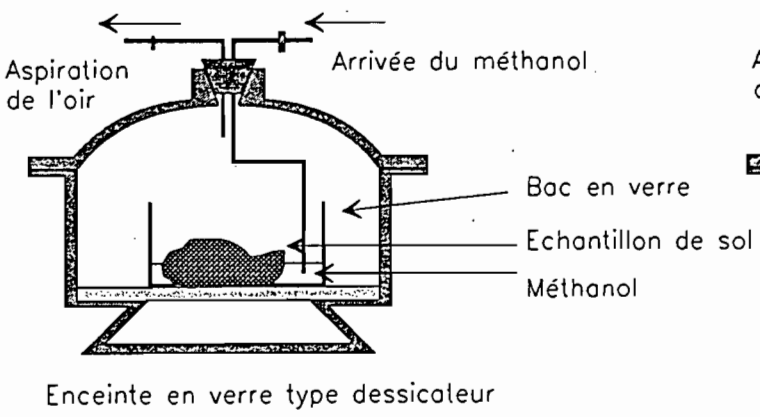
La méthode doit permettre de rompre les forces de liaison inter-agrégats (porosité structurale) sans dénaturer leur cohésion interne (porosité texturale). S'inspirant de la méthode du "critical drying point" (NEWMANN et THOMASSON, 1979; MURRAY et QUIRK, 1980) BRAUDEAU (1982) propose l'emploi du méthanol pour séparer les agrégats de sols humides. Suite aux travaux de COLLEUILLE (1993) portant sur les modalités de l'état hydrique initial, de l'humectation, du tamisage, d'échantillons de sols ferrallitiques de Casamance et de sols vertiques de la région de Podor (cuvette de Nianga), nous avons adopté le protocole suivant (fig. 9):

a) Mise en équilibre de l'échantillon à pF 3,0

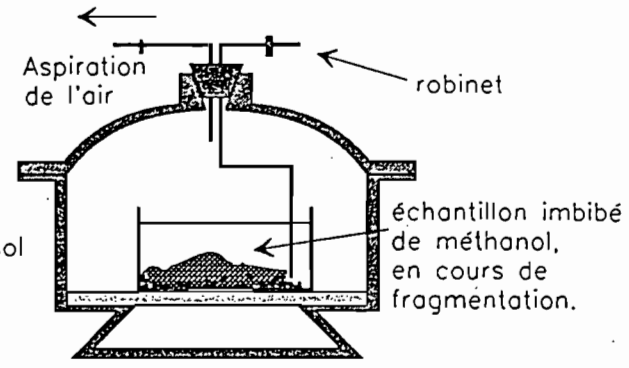
Les échantillons sont humectés lentement par capillarité jusqu'à saturation. Les échantillons sont ensuite placés sur la plaque poreuse de l'appareil de RICHARDS et soumis à une pression de 100 kPa (pF 3,0) jusqu'à équilibre (72 heures).



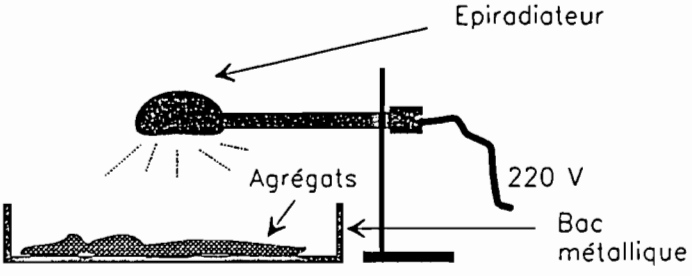
a Mise en équilibre de l'échantillon de sol à l'état hydrique désiré



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 9 : Méthode de fractionnement en agrégats (d'après COLLEUILLE , 1993).

b) 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.

c) Séchage et tamisage

Après avoir éliminé le méthanol par décantation, les agrégats sont mis à sécher sous épiradiateur à silice. Ils sont ensuite tamisés (tamiseuse électromagnétique à vibrations verticales) pendant 10 mn sur une batterie de 22 tamis de 10 à 0,050 mm (10 - 5 - 4 - 3,15 - 2,50 - 2,00 - 1,60 - 1,25 - 1,00 - 0,800 - 0,630 - 0,500 - 0,400 - 0,315 - 0,250 - 0,200 - 0,160 - 0,125 - 0,100 - 0,080 - 0,063 - 0,050 mm).

2.1.2 La courbe de retrait

La courbe de retrait d'un échantillon de sol représente la variation du volume massique (Vm) de l'échantillon en fonction de sa teneur en eau pondérale. Ces courbes sont intéressantes à obtenir car elles fournissent 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:

$$Vm = (1/da) \times (di/df)^3$$

où

- da est la densité apparente
- di est le diamètre de l'échantillon à l'instant i
- df est le diamètre de l'échantillon en fin de retrait

Dès 1923 HAINES distingue trois phases de retrait, "residual" "normal", et "no shrinkage". L'existence de ces trois phases a été largement confirmé. Les travaux de STIRK (1954), qui définit en plus une phase de "structural shrinkage", sont confirmés par REEVE et HALL (1978), alors que BRUAND (1986) ne distingue plus que trois phases qu'il appelle "structural", "normal" et "residual".

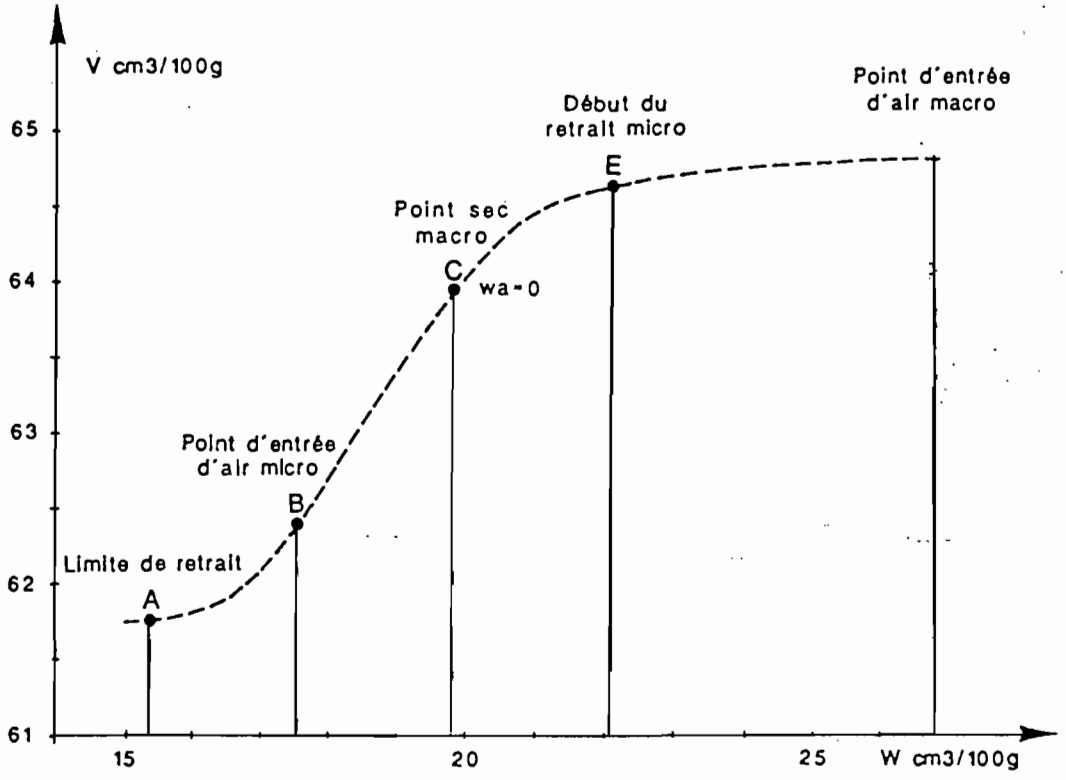
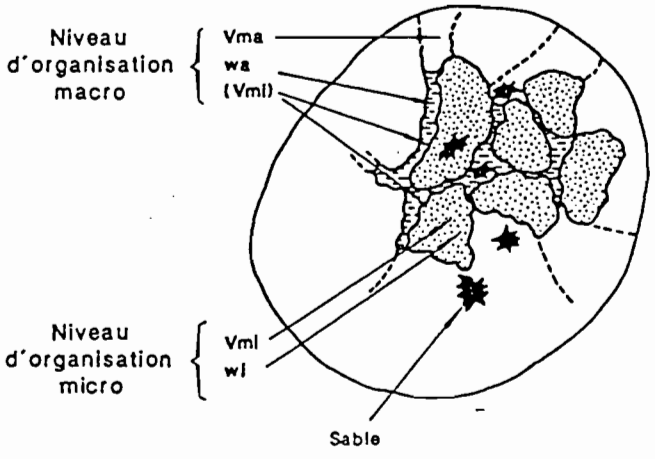


Fig. 10a



Représentation schématique de la structure du sol et de ses volumes structuraux

Fig. 10b

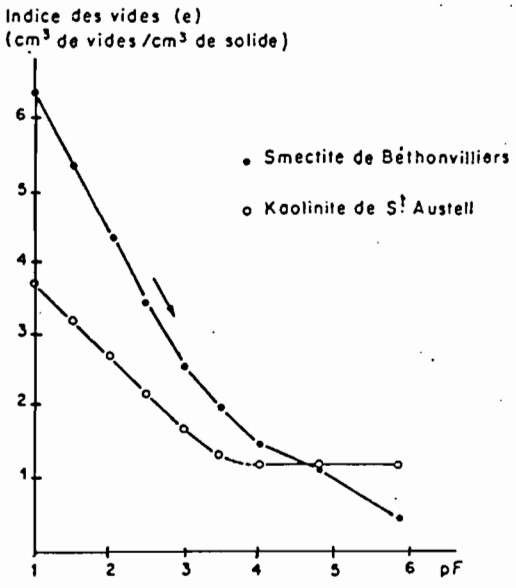


Fig. 10c

Figure 10 : Points caractéristiques de la courbe de retrait théorique (a), niveaux d'organisation de la structure (b) (d'après BRAUDEAU, 1988) et courbes de retrait d'argiles pures (c) (d'après TESSIER, 1980)

McGARRY (1988) calcule des indices de la courbe de retrait du sol pour quantifier les effets du labour sur vertisol, tandis que DANIELLS (1989) montre que la mesure du retrait est une technique qui permet de quantifier les effets du travail du sol sur la structure.

Une formulation mathématique de la courbe est tentée par SPOSITO et GIRALDEZ (1976) mais sur des phases discontinues par manque de points en zone de transition.

La mise au point d'une méthode de mesure en continu permet à BRAUDEAU, (1987) d'obtenir l'intégralité de la courbe de retrait avec ses trois phases de retrait structural, principal et résiduel (fig. 10a) et d'en déduire les principaux paramètres pédo-hydriques des sols ferrallitiques à partir des points caractéristiques de sa courbe qui sont:

- le point A: limite de retrait (SL, Shrinkage Limit)
- le point B: point d'entrée d'air dans la micro-porosité (AE, AirEntry)
- le point C: point sec de la macro-porosité (LM, Limit of Macro-porosity)
- 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 P., 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 participe à l'évaporation.
- 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 macro-porosité jusqu'au point C. Au point C la teneur en eau de la phase macroporale est nulle tandis que la phase microporale est restée saturée en se rétractant. De la saturation à C, la courbe exprime la phase structurale du retrait (Ko)
- de C à B, seule la phase microporale participe au dessèchement. Mais l'entrée d'air dans la phase microporale ne se fait qu'au point B. Le retrait de C à B 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 (Kr). Kr est inférieure à 1 si la diminution du volume des agrégats s'accompagne d'une augmentation du volume macroporal, elle est égale à 1 si ce volume est stable, elle est supérieure à 1 si le volume macroporal (espace inter agrégats) diminue au cours du dessèchement ce qui correspond à une prise en masse. Kr permet donc 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 (Kres).

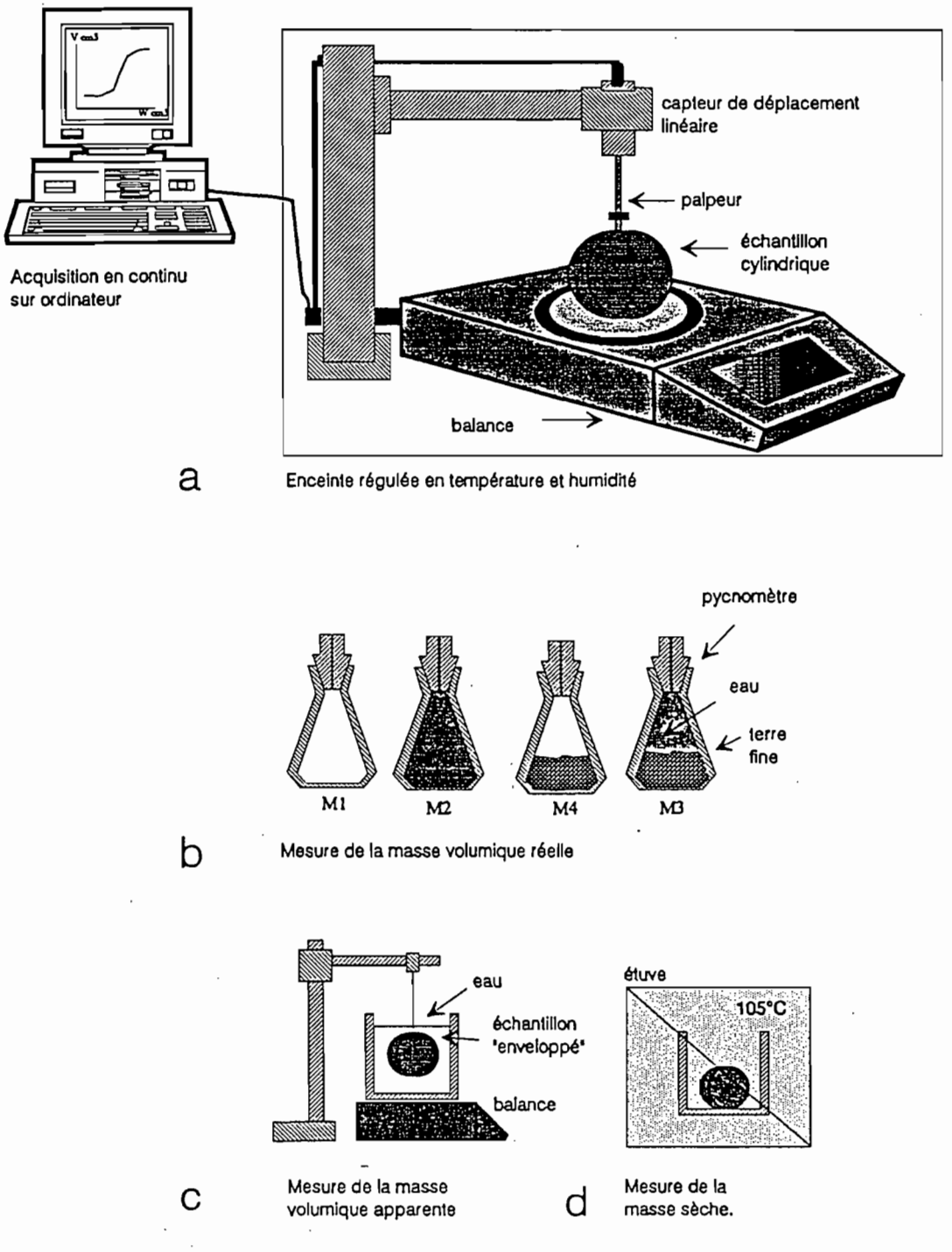
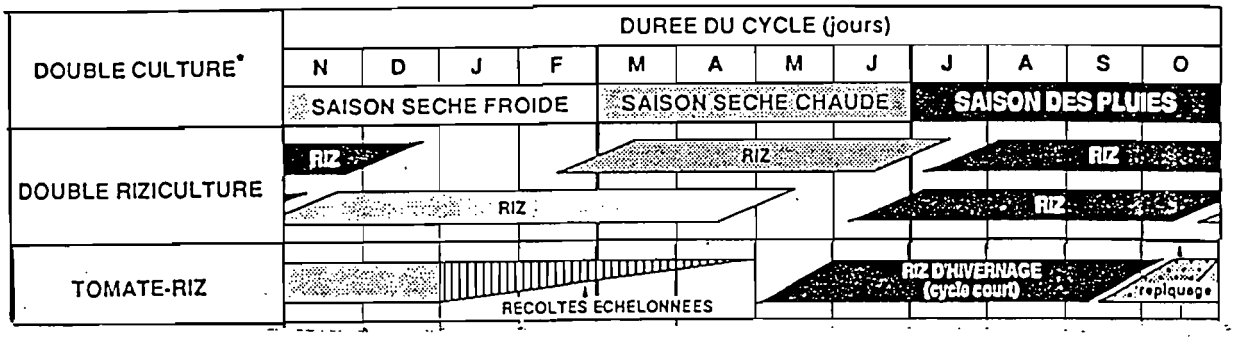


Figure 11 : Méthode de mesure du retrait et des éléments de calcul de la courbe de retrait (d'après COLLEUILLE, 1993).

Successions culturales possibles en double culture annuelle dans la vallée du Sénégal



** La 1ère plante citée dans la succession est la culture prioritaire*

Calendrier d'occupation des sols par les principales cultures annuelles dans la vallée du fleuve Sénégal

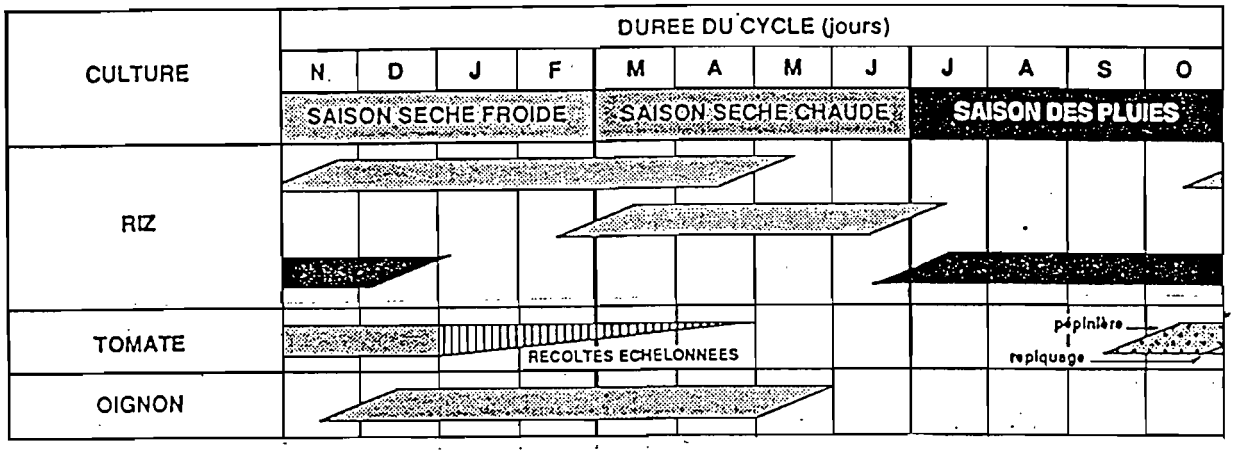


Figure 12 : Calendriers d'occupation du sol (d'après GAY, DANCETTE, 1993).

Nous verrons que 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 vertiques, riches en smectites, peuvent ne pas atteindre leur limite de retrait lors d'un séchage à l'air (fig. 10c).

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. 11). 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.

2.2 Les travaux culturaux

Le cycle des cultures de riz tomate et oignon détermine les successions culturales possibles lors de la double culture (GAY et DANCETTE, 1993) (Fig. 12).

Le périmètre de Donaye IT3 qui nous intéresse a été créé en 1986. Les 50 ha aménagés sont cultivés par 50 attributaires. Le périmètre a été cultivé en riz sur une saison jusqu'en 1989 puis en double culture de 1989 à 1991. Depuis 1992 la diversification fait intervenir la tomate et c'est la double culture tomate-riz qui est pratiquée.

Lors de nos travaux de terrain en avril nous étions en période de fin de récolte de la tomate. Les observations ont donc été effectuées sur parcelle de tomate en fin de culture.

La culture de la tomate commence par un semis en pépinière hors périmètre en septembre suivi d'un repiquage vers le 15 octobre. La récolte est échelonnée de janvier à fin avril. La culture se fait sur billons. Pour la campagne 1993-94, les semis ont commencé le 25 septembre. Une invasion de criquets à partir du 5 octobre a provoqué d'importants dégâts. Au 15 décembre, 50% des superficies repiquées avant le passage des criquets étaient sinistrées (Direction de l'horticulture, 1994). Les variétés cultivées sont *Rio fuego, Roma, Rossol, Slumac F2 et Royal chico.*

Le travail du sol est effectué par un entrepreneur qui dispose d'une charrue à disques, d'offsets 28 et 24 disques et d'une billonneuse. Il commence par un labour aux disques sur sol pré irrigué puis par deux passages croisés à l'offset sur 20 cm de profondeur. Le labour est suivi d'un billonnage qui crée des billons de 80 cm de large avec des interbillons de 40 cm.

Une fumure de fond est appliquée entre le labour et l'offsettage, à raison de 150 à 250 kg/ha de KCl et 200 kg/ha de 18-45-0. Un engrais de couverture (18-45-0 ou KCl) est épandu au cour de la période de récolte, avant les irrigations, en fréquence et doses très variables.

Les irrigations sont pratiquées par siphonage à partir du canal d'amenée à intervalles de 5 à 25 jours selon la disponibilité en eau ou l'intérêt du paysan pour sa culture. La salinité de l'eau à l'entrée de la parcelle est de 0,07 mS cm-1.

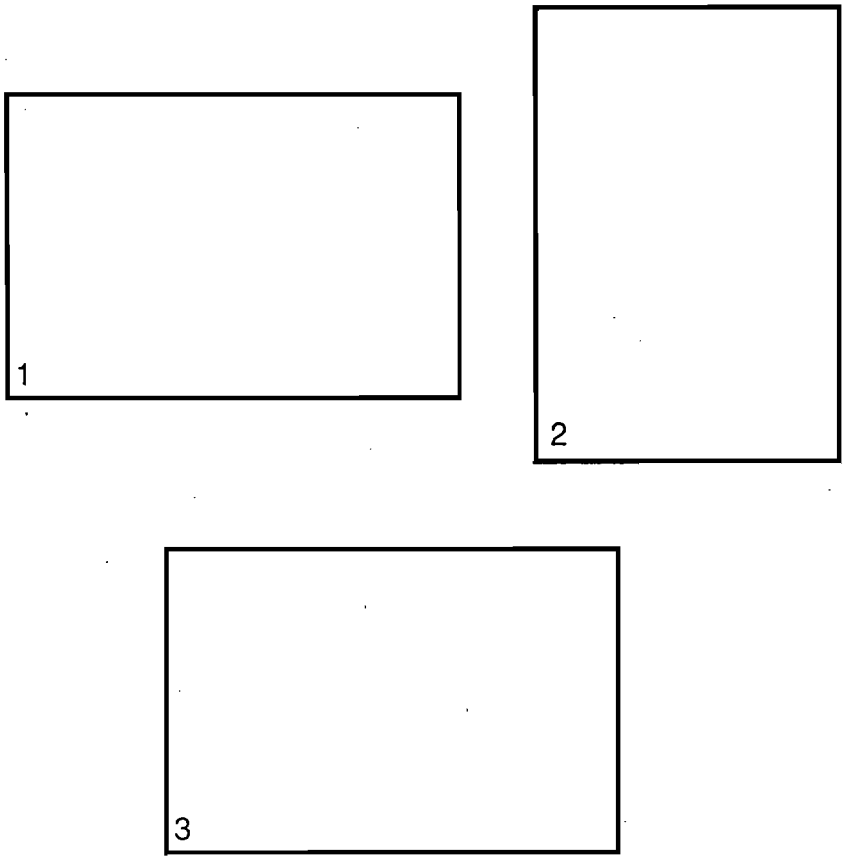
Le repiquage se fait sur deux lignes à la partie supérieure externe des billons avec un écart de plantation en ligne de 40 cm.

Les rendements varient de quelques tonnes à 40-50 t/ha avec une moyenne de 12 à 20 t/ha (CDH, 1980).

La pratique de plusieurs cultures sur un ou plusieurs périmètres provoque la concurrence entre travaux culturaux en novembre-décembre (repiquage des tomates et récolte du riz d'hivernage) et en mars-avril (récolte des plants de tomate et implantation du riz de contre-saison chaude). Nous avons vu que la culture du riz est toujours prioritaire, ce qui contribue à expliquer une partie des variations de rendement des cultures de tomate, un retard sur le repiquage influençant fortement la production (POUSSIN, 1994).

Les aménagements pour l'irrigation et les travaux culturaux, avec en particulier le travail du sol pour la culture en billon de la tomate, se traduisent par une transformation du sol que nous allons montrer par l'étude d'un profil pédologique situé hors du périmètre et par celle du profil cultural.

SEN. 94
IT3



1 : La cuvette de Donaye: au fond, la digue du périmètre IT3,
à droite, l'emplacement du profil pédologique.

2 : Profil pédologique du sol non cultivé

3 : Carottier pour prélèvement des cylindres de rétractométrie

2.3 La description des sols

Après avoir parcouru l'ensemble du périmètre IT3 pour rechercher une situation de proximité entre un sol cultivé et un sol non cultivé nous avons choisi une parcelle dans une zone sans manifestation apparente de salure. Elle est située à 150 m de la digue de clôture du périmètre, ce qui évite la zone d'emprunt pour la construction de la digue. Le sol en place est situé à 65 m de la digue à l'extérieur du périmètre, ce qui doit limiter le risque de variation spatiale des caractéristiques du sol.

2.3.1 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 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: sec, brun, très compact, argilo-sableux, agrégats à faces rugueuses en litage peu net fortement soudés les uns aux autres, localement tendance à lentilles centimétriques, quelques racines fines.

35 - 50 cm: 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.

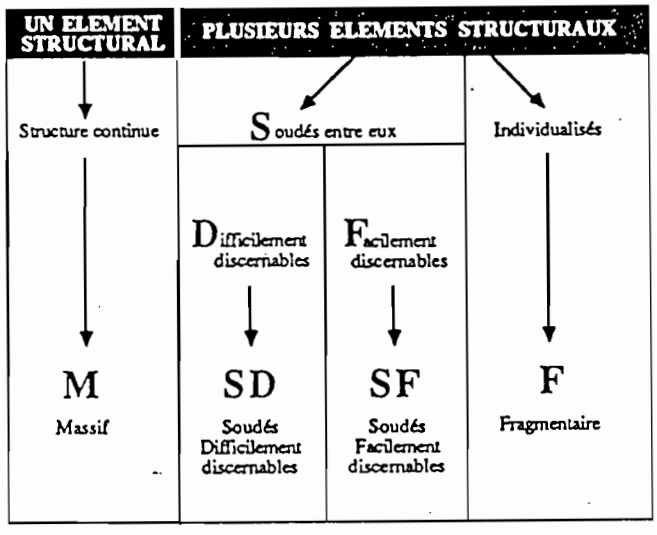
50 - 90: sec, brun foncé, très compact, massif, argileux, tendance à la formation de lentilles de 10 à 15 cm, tâches noires d'oxydes de manganèse de 1 à 2 mm de diamètre, faces lisses et plages sableuses aux interfaces, très peu poreux, pas de racines.

> 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.

ETAT INTERNE	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES
Δ delta	Aspect continu. Les faces de fragmentations sont peu rugueuses, de forme typiquement conchoïdale. Porosité structurale nulle. Résulte d'un compactage sévère d'origine anthropique (roues de tracteur) cohésion élevée en sec.
Φ phi	Proche de Δ, mais contient des amorces de fissures, révélées lors des essais de fragmentation (cas des matériaux ayant une certaine aptitude à la fissuration). Résulte typiquement, par exemple, de l'action du gel.
Γ gamma	Les agrégats, dont la morphologie est variable (en relation avec la texture et les agents naturels), sont discernables dans les mottes. Rugosité assez importante des faces de fragmentation des mottes. Porosité structurale non nulle assez variable. Cohésion plus faible que pour Δ.

Remarque : S'il n'y a pas de mottes, mais uniquement de la terre fine on note tf.

L'Etat interne des mottes



Les modes d'assemblage des mottes

Figure 13 : Etat interne et mode d'assemblage des mottes (d'après MANICHON, 1982).

Les analyses effectuées dans chacun de ces horizons (voir annexe) montrent une granulométrie très homogène sur tout le profil avec une teneur en argile de 53%. La phase 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-1.

2.3.2 Sol cultivé

Pour examiner et décrire le sol cultivé nous avons utilisé les principes énoncés par MANICHON (1982) mis en pratique dans la méthode de description du profil cultural (GAUTHRONNEAU, MANICHON, 1987) en simplifiant la description et en l'adaptant au sol billonné.

Les principes de description du profil cultural (fig. 13) sont ainsi posés par H. MANICHON (1982):

- privilégier les critères rendant compte de l'action des machines, d'une part pour la stratification du profil, d'autre part pour la définition des éléments structuraux.
- distinguer l'action des agents naturels de celle des outils.

Cette approche déterministe implique deux choix:

- retenir des critères morphologiques de description
- différencier dans un horizon les différentes unités morphologiques se distinguant par leur état structural.

De ces choix découle la partition verticale et latérale du volume de sol étudié, ce qui permet de prendre en compte la variabilité spatiale.

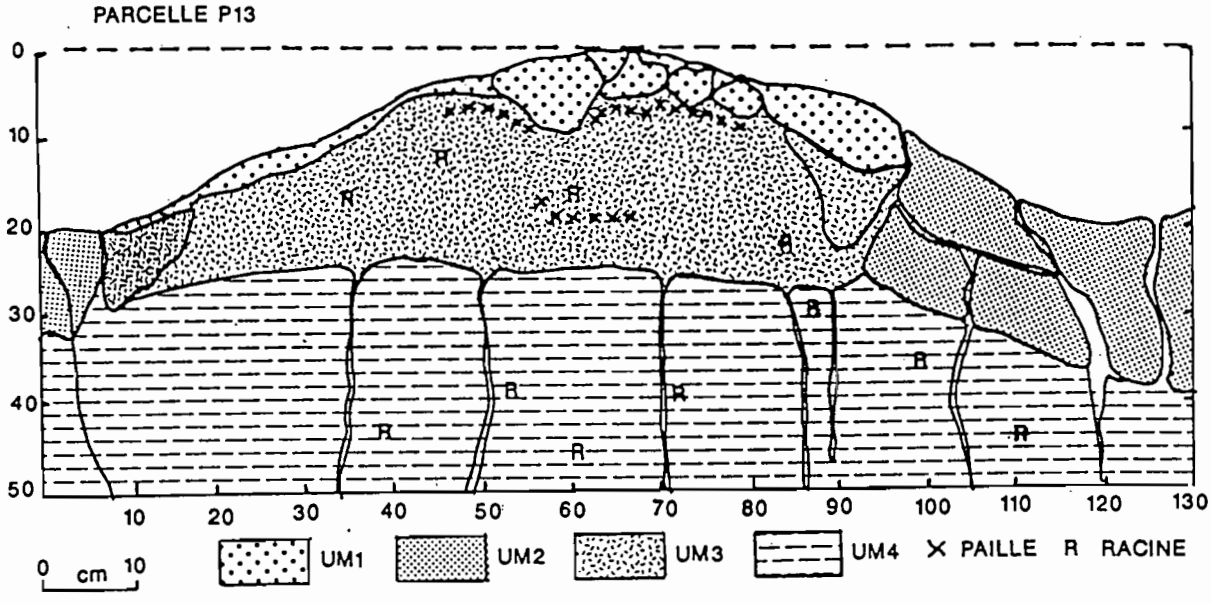
On utilise une grille de description reposant sur deux paramètres:

- l'état interne des éléments structuraux d'origine anthropique
- l'assemblage de ces éléments structuraux.

a) L'état interne des mottes

Le système est basé sur une distinction morphologique des états des mottes.

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



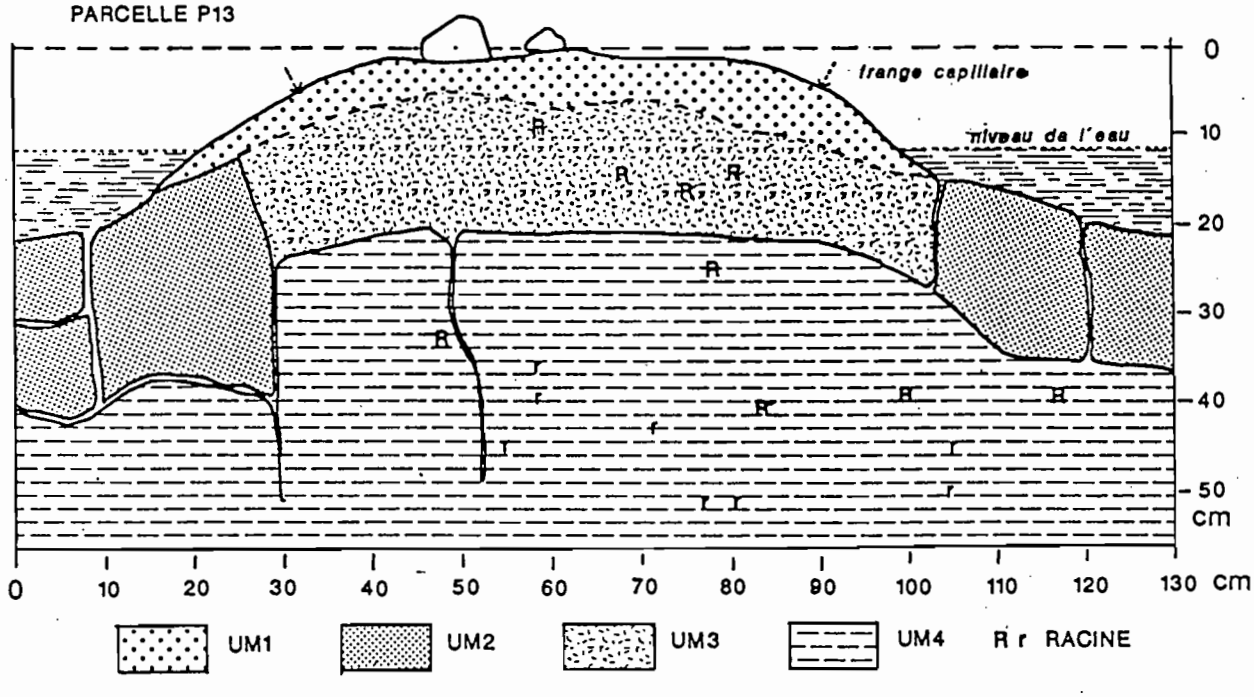


Figure 14 : Profils culturaux, parcelle IT3 P13.

b) Mode d'assemblage des mottes

- **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**).

Pour Manichon, la partition latérale du profil est déterminée par l'emplacement des roues de tracteur. Nous avons remplacé ce repère par l'interbillon. Une règle horizontale placée sur deux piquets et un mètre nous permettent de reporter les éléments de la description sur une feuille quadrillée.

En culture billonnée, irriguée tous les 5 à 15 jours comme ce fut le cas en 93-94, les variations d'humidité du sol dans le profil cultural peuvent être importantes notamment entre le sommet de billon et l'interbillon. L'humidité peut aussi varier dans la même parcelle selon le profil de surface des billons, souvent irrégulier surtout en fin de campagne. Afin de limiter les effets de cette hétérogénéité nous avons choisi une parcelle aux billons réguliers et relativement bien conservés. En pratique il est difficile de connaître la date de la dernière irrigation et plus encore celle de la suivante, le rythme dépend de la récolte qui dépend de l'arrivée du camion de ramassage de la conserverie. Les descriptions et prélèvements sont donc réalisés quand l'interbillon est ressuyé ou sec.

Suite à l'examen d'une dizaine de profils culturaux dans différentes parcelles localisées dans trois périmètres, en situation salée ou non salée, nous avons identifié cinq grandes unités morphologiques qui permettent de rendre compte de l'état d'un profil cultural dans ce système de culture (fig. 14):

- **UM1**: (**F** Γ) située en sommet de billon d'une épaisseur de 5 à 15 cm, elle est constituée de mottes à surface rugueuse de 2 à 5 cm de diamètre comprenant des agrégats poreux, fissurés. Les mottes sont individualisées.
- **UM2**: (**F** Δ) située en interbillon, elle 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 pouvant atteindre plus de 1 cm de large. 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 un état proche de celui de l'UM4.

- **UM3**: (**S** Γ) elle 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** Φ) 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** Φ) 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 celui de la description du système racinaire, qui n'est pas l'objet de l'étude, mais peut être un élément révélateur de la structure et de la compacité du sol. Deux types de méthodes sont utilisées par les spécialistes: le prélèvement de volumes de sol pour extraction par lavage et mesure de masse des racines après tri éventuel et la cartographie horizontale et verticale proposée par TARDIEU et MANICHON (1986) qui révèle mieux l'influence de la structure sur l'enracinement.

La première méthode s'est vite révélée difficilement applicable du fait de la présence de nombreuses racines de riz subsistant des cultures antérieures, ce qui obligeait à un tri, et par le fait que la tomate a de grosses racines longues et faiblement ramifiées, ce qui oblige à des prélèvements systématiques. Nous avons donc opté pour un report cartographique sommaire sur le seul plan vertical de description du profil cultural.

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 de ces unités: 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. L'extrait 1/5 a un pH eau de 5,8 à 6,5 et une conductivité électrique de 0,05 mS cm-1 (voir annexe).

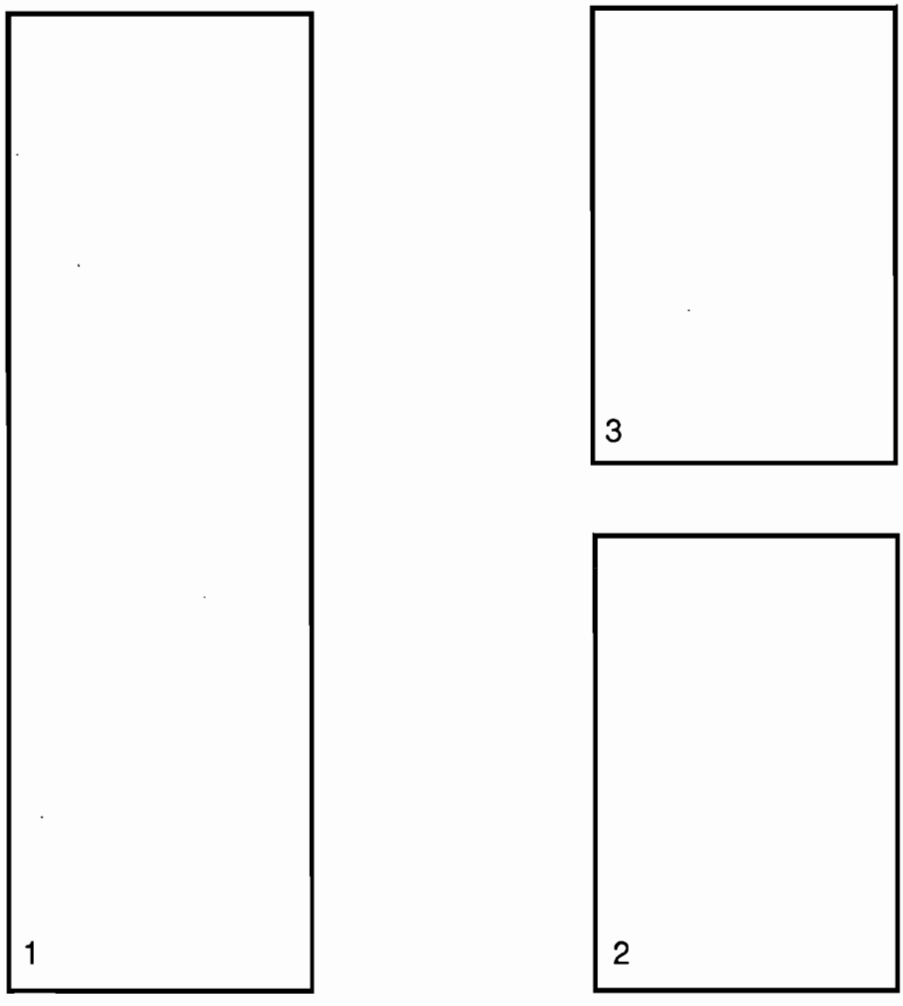
2.3.3 Discussion

Les deux sites choisis, situés de part et d'autre de la digue sont dans la même unité morpho-pédologique mais ne sont pas strictement équivalents de part la granulométrie et la composition de la fraction argileuse du sol. En effet, si les teneurs en argile sont bien équivalentes, les fractions limons grossiers (Lg) et sables fins (Sf) différent entre le profil non cultivé et le profil cultivé avec une moyenne de 24,4 % de Lg et 7 % de Sf pour le sol non cultivé et 16,8 % de Lg et 13 % de Sf pour le sol cultivé (voir annexe). Le passage de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) de la fraction argileuse de 0,3 méq/g à 0,42 méq/g entre le sol non cultivé et le sol cultivé peut laisser supposer une composition en minéraux différente. Le fait que les profils soient situés de part et d'autre d'un ancien chenal peut expliquer ces différences de composition minéralogique, conséquences de modalités différentes de l'alluvionnement.

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 offsettage, 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 mais seule la teneur en argile semble varier selon les unités morphologiques.

Il s'agit maintenant d'apprécier s'il existe des indicateurs de ces changements morphologiques au niveau de la structure. La composition structurale d'un élément de sol peut être indirectement estimée par des mesures physiques comme le fractionnement en agrégats et la courbe de retrait.



1 : Billon et interbillons vus de dessus

2 : Relevé du profil cultural

3 : Profil cultural dans la parcelle P13 du périmètre IT3

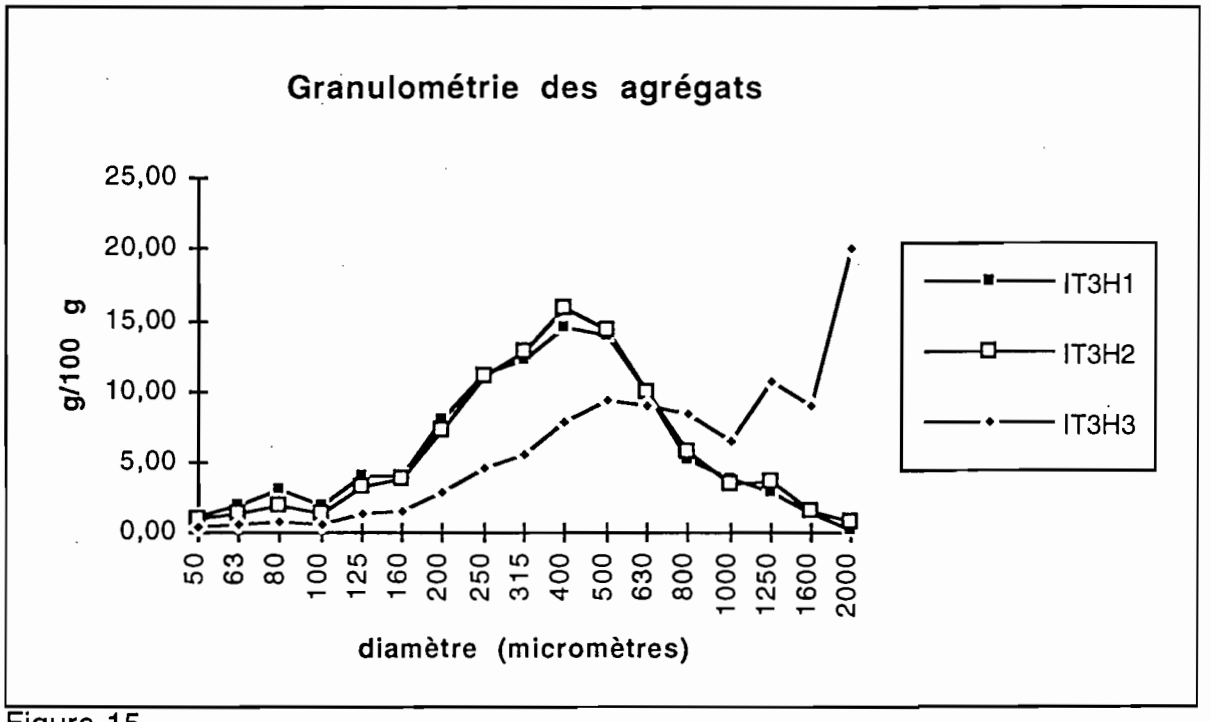


Figure 15

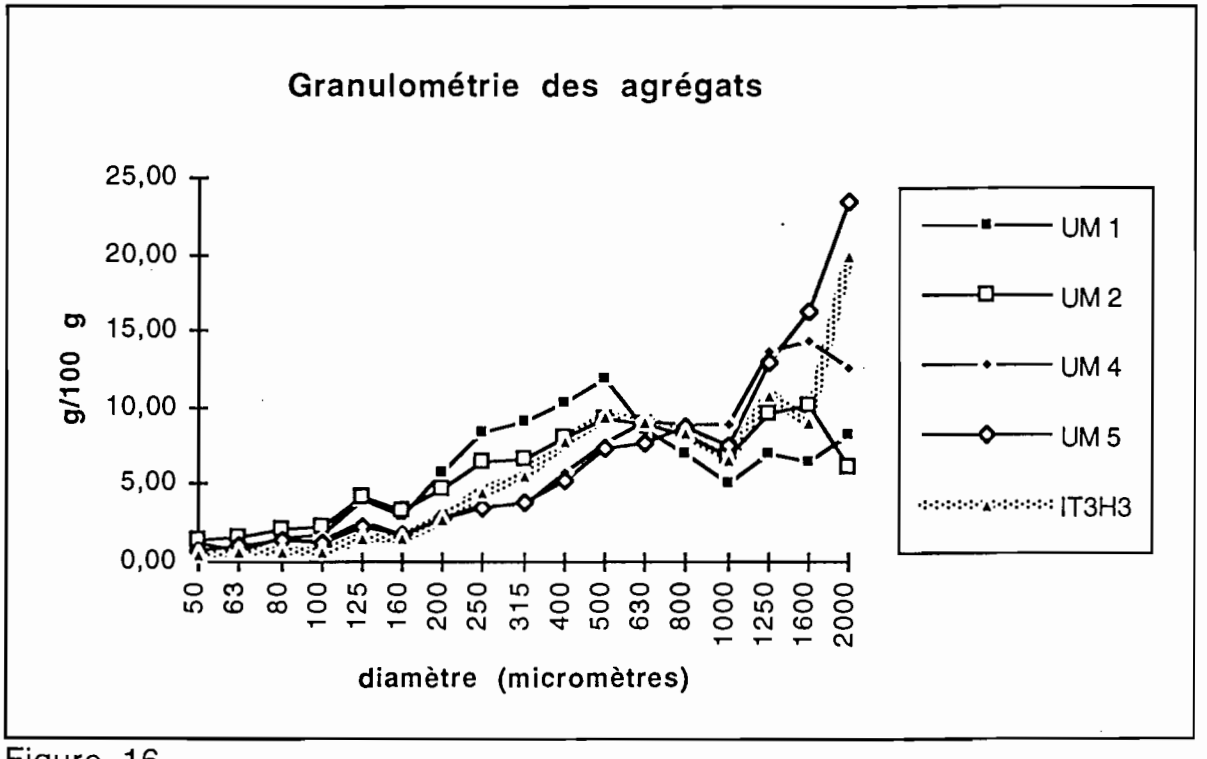


Figure 16

Figures 15 et 16: Granulométrie des agrégats en sol non cultivé (15) et en sol cultivé (16).

2.4 Le fractionnement en agrégats

2.4.1 Distribution des agrégats du sol non cultivé

Trois niveaux de la fosse pédologique ont fait l'objet de l'étude de distribution des agrégats (fig. 15), 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 µm de diamètre. L'horizon de profondeur, sur une distribution des classes de 0-2000 µm, ne présente pas de mode nettement marqué. Ces résultats vont dans le même sens que ceux produits par H. COLLEUILLE (1993).

2.4.2 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 µm. 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 (fig. 16) montrent que les UM4 et 5 du profil cultural présentent le même type de distribution, non modale. Des différences apparaissent cependant dans les fractions 200-500 µm et 1000-2000 µm pour les UM 1 et 2. Le passage de l'UM5 en profondeur de billon à l'UM1 en surface indique une tendance à l'évolution vers le type modal par diminution des pourcentages d'agrégats dans les classes 1000-2000 µm et augmentation dans les classes 200-500 µm 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 le même type de distribution que celle de l'horizon de profondeur de la fosse pédologique.

2.4.3 Discussion

Le nivellement topographique effectué entre la fosse pédologique et le profil cultural révèle une dénivelée d'environ -30 cm de l'interbillon par rapport à la fosse pédologique ce qui permet la correspondance suivante entre les unités morphologiques du profil cultural et les horizons du profil pédologique (fig. 6):

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.

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 µm) ne semble pas être dû au sodium puisque les teneurs moyennes en ions sodium échangeables sont de 0,44 méq% en sol cultivé et de 3,26 méq% 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.

2.5 La courbe de retrait

2.5.1 Analyse des courbes obtenues

Dans le vertisol les échantillons ont été prélevés dans trois horizons, supérieur et médian et profond. Dans le profil cultural, les échantillons représentent les différentes unités morphologiques, sauf celle de surface du billon souvent peu épaisse et très hétérogène (fig. 17).

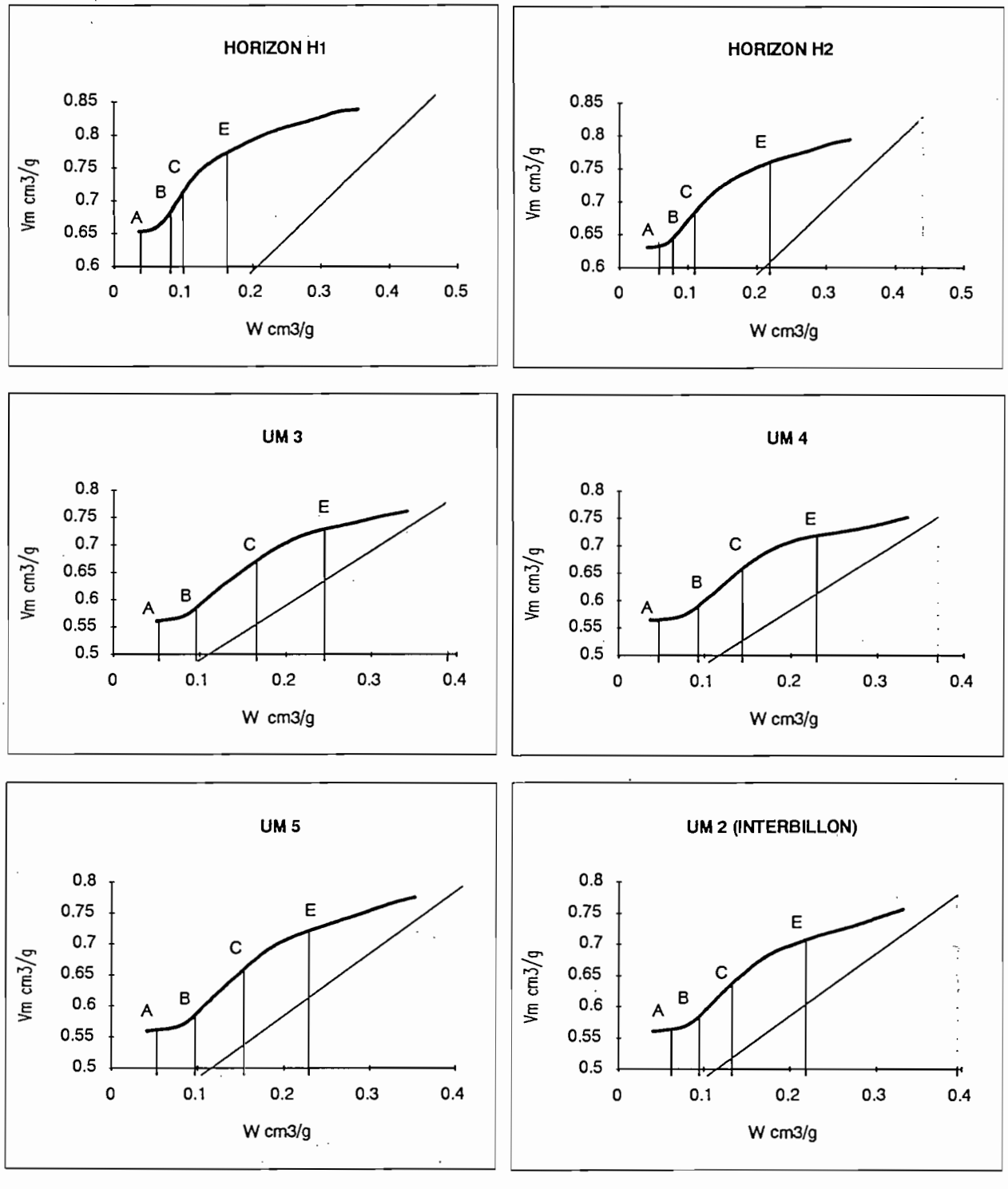
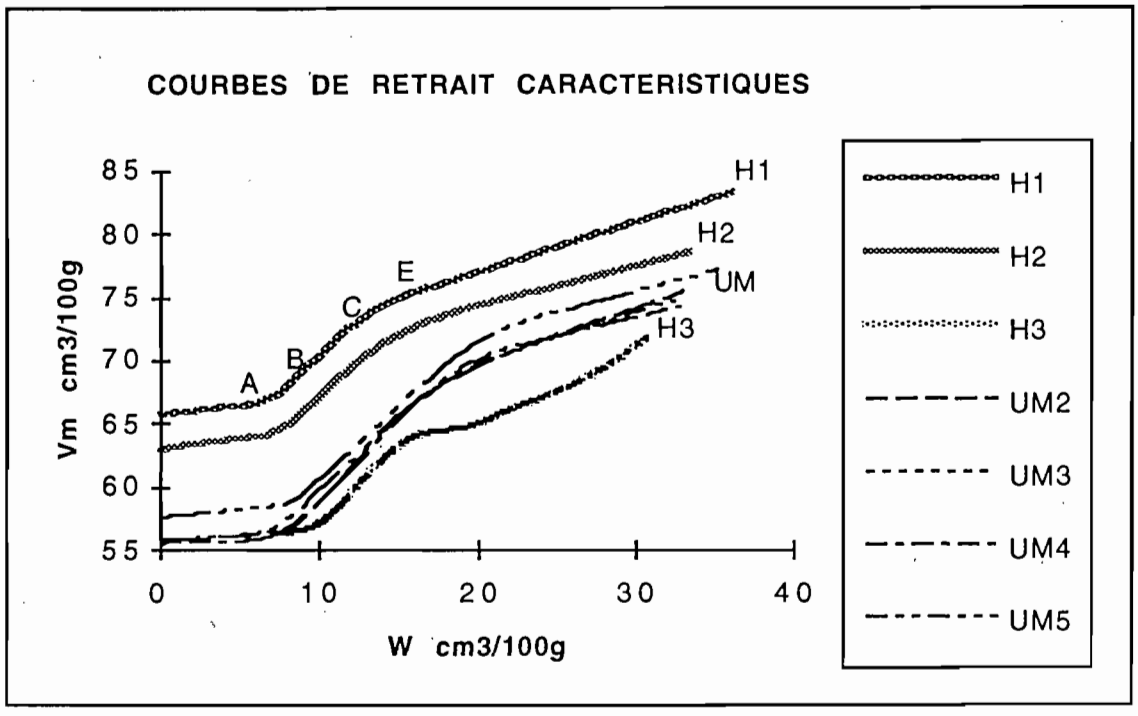


Figure 17: Exemple de courbes de retrait du profil pédologique et du profil cultural



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

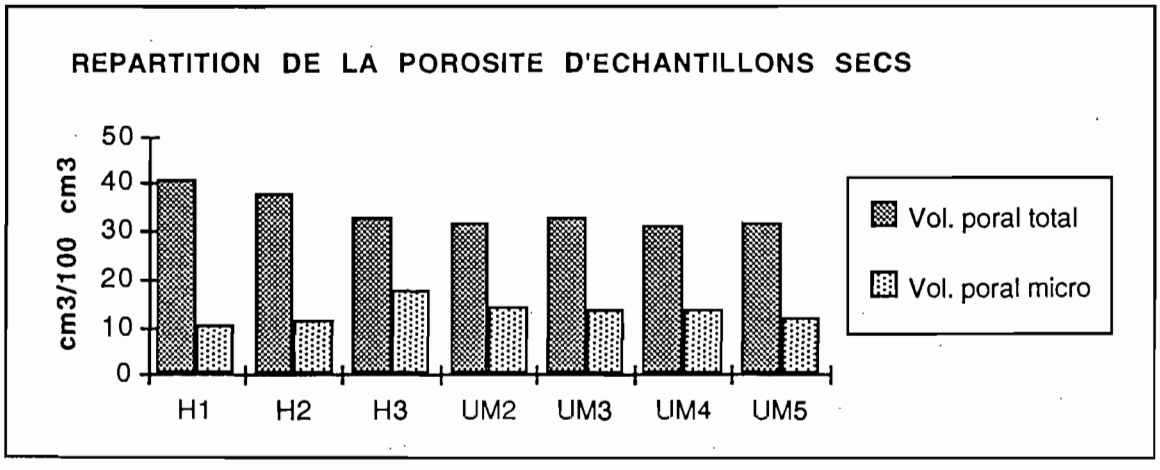


Figure 18 : Courbes de retrait caractéristiques du sol non cultivé (H1, H2, H3) et du sol cultivé (UM2, UM3, UM4, UM5).

Chaque courbe de retrait (sauf H3, ne représentant qu'un échantillon) présentée figure 18 est obtenue en calculant les coordonnées moyennes des points caractéristiques de trois courbes puis en leur appliquant le modèle d'ajustement. On distingue deux grandes familles de courbes: celles des horizons du vertisol et les courbes du profil cultivé. Ces courbes s'ordonnent parallèlement, des volumes massiques les plus élevés aux plus faibles, respectivement de l'horizon supérieur du vertisol aux horizons profonds Il est à remarquer que l'UM3, qui est le coeur du billon, là ou se trouvent les racines, présente des volumes massiques légèrement supérieurs à ceux de l'UM5, non labourée. Cependant elle présente un retrait global de même amplitude que les autres unités morphologiques.

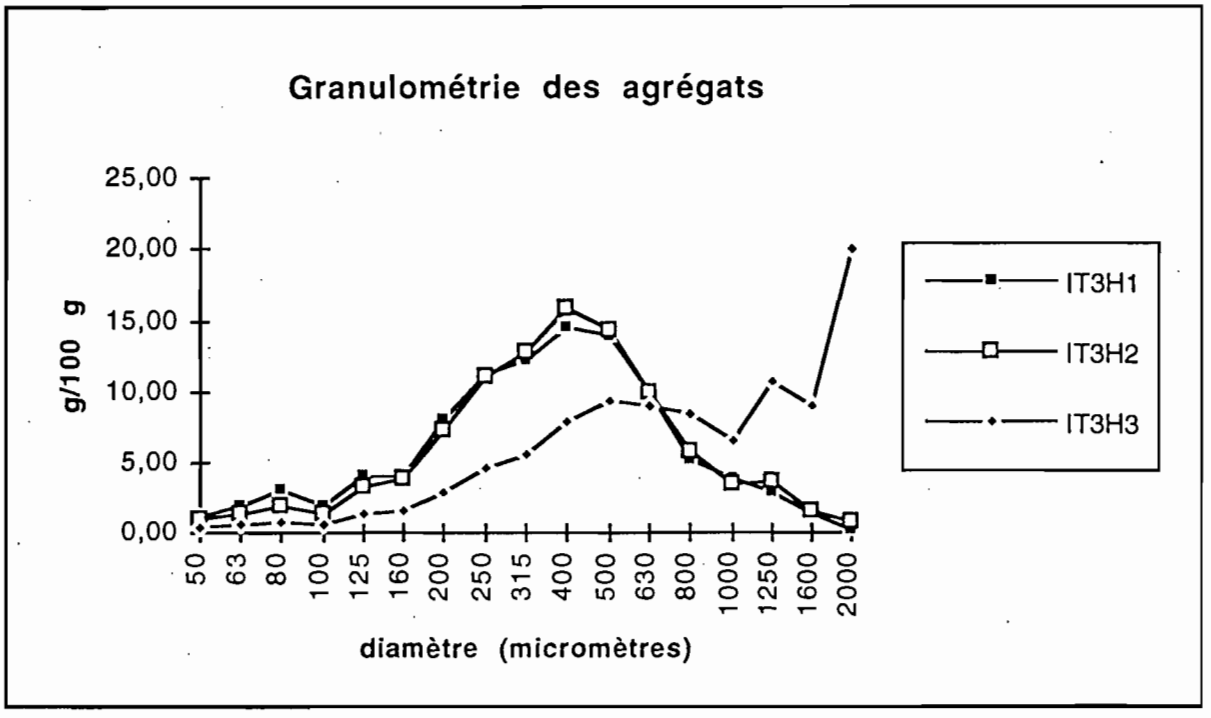
Les points A et B sont dans tous les cas atteints pour des teneurs en eau sensiblement identiques, ce qui s'explique par le fait que les échantillons ont des teneurs en argile peu différentes (55 à 58 %). Les phases de retrait résiduel et les points d'entrée d'air dans la microporosité (B) sont donc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

2.5.2 Discussion

Ces courbes de retrait (fig. 18) montrent que le retrait global de ces échantillons de sol vertique, 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. 19) peut donner 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).



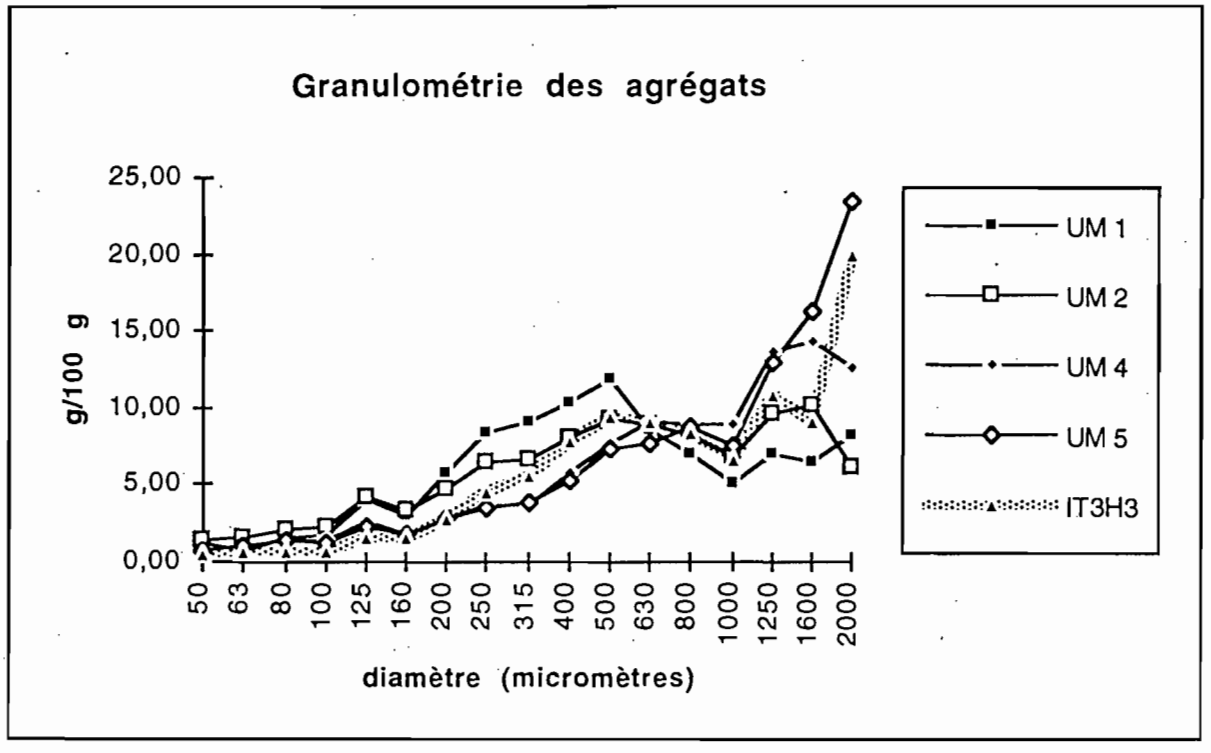


Figure 19 : Courbes de fractionnement en agrégats.

Le travail du sol provoque donc un accroissement des teneurs en gros agrégats qui se traduit par une augmentation 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 à Nianga à proximité 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 fort est observé dans les échantillons qui ont les plus gros agrégats mais les plus faibles teneurs en ions sodium (0,54 méq%) tandis que les échantillons à plus forte teneur en ions sodium (3,26 méq%) 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).

2.6 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.

III - L'INFLUENCE DE CONTRAINTES CHIMIQUES ET PHYSIQUES SUR L'AGREGATION

Pour l'étude au laboratoire des contraintes chimiques, associées ou non à une contrainte physique, nous avons prélevé l'ensemble des échantillons dans l'horizon de profondeur du vertisol (H3). En effet, cet horizon présente la granulométrie et la structure les plus homogènes, c'est à son niveau que se produit la remontée de la nappe et sa distribution dimensionnelle des agrégats est la même que celle du niveau équivalent du sol cultivé.

3.1 Le choix des contraintes

En dehors des contraintes hydriques, les principaux facteurs qui peuvent agir sur la différentiation des vertisols sont mécaniques et chimiques. Nous venons de voir l'influence d'une action mécanique, le travail du sol. L'une des conséquences du travail du sol dans les parcelles est le tassement par les roues des engins. C'est une contrainte physique dont nous aborderons l'étude par le compactage des échantillons.

Le facteur chimique de différenciation de ces sols est directement lié à l'irrigation qui provoque la remise en mouvement des sels. Pour une salinité et une teneur en argile équivalente, ce sont la teneur en ions sodium et le rapport Ca++/Mg++ sur le complexe d'échange qui semblent contrôler la capacité de gonflement-retrait (évaluée par la courbe de retrait) et les caractéristiques de l'organisation de la phase argileuse (évaluée par la distribution dimensionnelle des agrégats après fractionnement) (COLLEUILLE, 1993). La contrainte chimique appliquée aux échantillons a pour but d'étudier l'influence de ces facteurs.

3.1.1 Contrainte chimique

Il s'agit de provoquer un changement de la composition du complexe d'échange du sol en le saturant d'une part en ions sodium et d'autre part en ions calcium afin de mettre en évidence les effets possibles de la remise en mouvement et de la distribution de la salure, suite à l'augmentation importante de la superficie des terres irriguées.

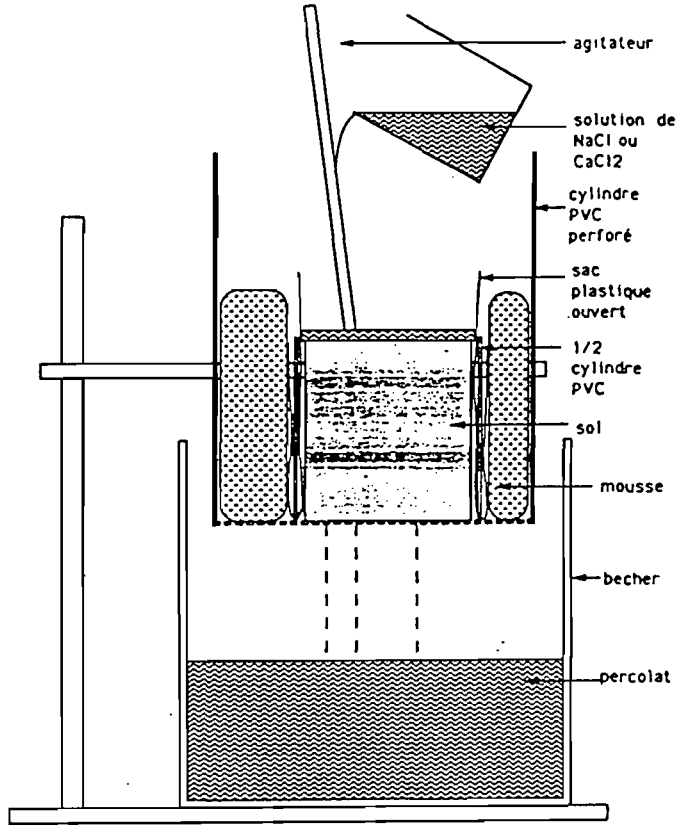


Fig. 20 DISPOSITIF DE PERCOLATION DES SOLUTIONS

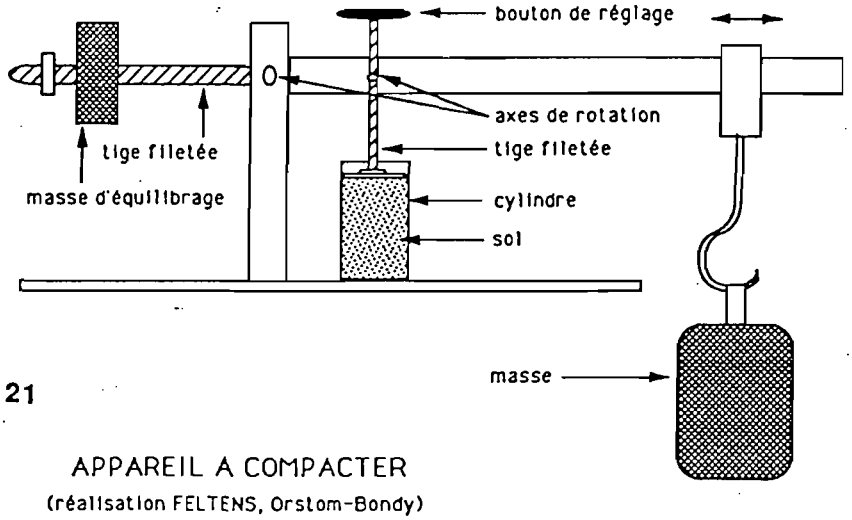


Fig. 21

APPAREIL A COMPACTER
(réalisation FELTENS, Orstom-Bondy)

Figures 20 et 21: Dispositif pour percolation (20) et appareil à compacter (21).

Pour ce faire nous avons choisi la méthode par percolation de solutions de chlorure de sodium (NaCl M) et de chlorure de calcium ($CaCl_2$ M/2) mise en oeuvre à l'aide du dispositif illustré figure 20.

3.1.2 Contrainte physique

Deux éléments sont à prendre en considération lors des essais de compactage: la pression et sa durée d'application, et la teneur en eau au moment du compactage.

Il s'agit ici d'appliquer une pression comparable à celle exercée par les roues des engins agricoles. La gamme des pressions appliquées au sol varie de 50 à 70 kPa pour les pneus basse pression, 150 à 250 kPa pour les roues de tracteur, 400 kPa pour les remorques et tonnes d'épandage. Le temps de contact avec le sol varie entre 1/10ème de seconde et quelques secondes à chaque passage (DE LEON GONZALEZ, 1991). L'étude de l'effet des pneumatiques sur l'état structural rapportée par BOIFFIN *et al.*(1990) se fait par le passage d'un tracteur dont les pneus sont gonflés à 0,5, 1,25 et 2 bars. D'autre part PAPY (1990) applique un compactage par roulage avec 1 et 3 passages de tracteur aux pneus gonflés à 2 bars et un compactage à la machine de 1,5 et 2,25 bars pendant 20 secondes. Nous avons choisi d'appliquer une pression de 200 kPa (2 bars) pendant 20 secondes.

GUERIF (1987) définit trois domaines hydriques de comportement du sol au compactage: pour des valeurs d'humidité faibles, le sol a un comportement solide, on obtient un faible accroissement de compacité; pour des valeurs moyennes, le sol a un comportement fragile, la compacité augmente de manière instantanée par rupture et réarrangement des fragments; pour des valeurs fortes de l'humidité au compactage, on entre dans le domaine visqueux, il y a tassement par rupture et déformation des agrégats en fonction du temps d'application de la contrainte. Enfin, plus récemment, SALA et TESSIER (1993), travaillant sur des massifs d'agrégats argileux, montrent que ce ne sont pas les matériaux les plus secs ni les matériaux saturés d'eau qui sont les plus sensibles au tassement, mais ceux dans lesquels le potentiel de l'eau est de l'ordre de -30 à -100 kPa (pF=2,5 à 3,0). En conséquence nous avons amené les échantillons à - 100 kPa (pF=3,0) avant compactage à l'aide d'une presse construite à cet effet (fig. 21).

3.2 Matériel et méthode

Le principe est de mettre en évidence l'effet de deux types de contraintes associées ou non. D'une part, une contrainte chimique par l'action des ions sodium et des ions calcium et, d'autre part, une contrainte physique, le compactage, appliqué sur sol témoin et sur sol ayant subi la contrainte chimique. Le résultat de ces contraintes devrait pouvoir se traduire par une modification de la courbe de retrait et de la granulométrie des agrégats. Ces contraintes sont exercées sur échantillons non remaniés et remaniés.

Les conditions au compactage et son effet ont été contrôlées sur quelques échantillons. L'humidité massique est obtenue par passage à l'étuve à 105 °C de quelques grammes de l'échantillon amené à pF 3,0 avant son compactage. Les densités apparentes sont mesurées avant et après compactage par la méthode de la poche plastique (BOIVIN et al., 1991) pour les échantillons à pF 3,0 qui seront fragmentés en agrégats. Elle est obtenue par la méthode à la paraffine, en fin de retrait, pour les échantillons passés au rétractomètre.

L'humidité massique moyenne au compactage est de 22,1% (E. type=1,21) pour les échantillons non remaniés (8 échantillons) et de 24,5% (E. type=1,29) pour les échantillons remaniés (6 échantillons).

L'effet du compactage sur les échantillons non remaniés passés au rétractomètre fait passer la densité apparente sèche de 1,77 (E. type=0,097) à 1,87 (E.type=0,082) (moyenne sur 5 échantillons). Cet écart de 0,1 se retrouve également pour les échantillons fragmentés en agrégats à pF 3,0.

L'effet du compactage sur les échantillons remaniés passés au rétractomètre fait passer la densité apparente sèche de 1,73 (E. type=0,093) à 1,84 (E. type=0,029) (moyenne sur 4 échantillons). Elle passe de 1,76 (E. type=0,045) à 1,85 (E. type=0,036) pour les échantillons remaniés fragmentés en agrégats à pF 3,0.

3.2.1 Préparation des échantillons non remaniés

Les échantillons proviennent de la fosse pédologique située à 65 m à l'extérieur du périmètre irrigué. Le sol est prélevé verticalement dans des cylindres PVC de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, entre 80 et 90 cm de profondeur, à l'aide d'un carottier adapté.

- Dans tous les cas, pour permettre un gonflement sans contrainte, les cylindres en PVC sont coupés en deux parties et juste maintenus à l'aide de deux élastiques avant les saturations ou les percolations.

- Les échantillons sans traitement chimique sont saturés sur plaque poreuse par ascension capillaire lente pendant 48 heures minimum. Un premier lot d'échantillons passe directement au rétractomètre, tandis que l'autre est amené à pF 3,0 pour subir ensuite le fractionnement en agrégats.

- La contrainte chimique est appliquée par percolation de 250 ml de NaCl M ou de 250 ml de $CaCl_2$ M/2. La percolation terminée, un lavage est assuré par le passage de 100 ml d'eau distillée. Les échantillons sont ensuite amenés à pF 3,0 après 72 heures sur la plaque poreuse de l'appareil de RICHARDS (1941). Quatre lots sont alors constitués:

- un lot est mis directement à saturer sur plaque poreuse par ascension capillaire lente puis est passé au rétractomètre (retrait sur échantillons Na^+ ou Ca^{++} non compactés)
- un lot passe directement au fractionnement en agrégats. (fractionnement en agrégats sur échantillons Na^+ ou Ca^{++} non compactés)
- un lot est compacté à 200 kPa puis mis à saturer sur plaque poreuse par ascension capillaire lente pour passage au rétractomètre (retrait sur échantillons Na^+ ou Ca^{++} compactés)
- un lot est compacté à 200 kPa puis fractionné en agrégats (fractionnement en agrégats sur échantillons Na^+ ou Ca^{++} compactés).

3.2.2 Préparation des échantillons remaniés

Le sol provient de la même fosse pédologique, prélevé entre les cylindres non remaniés. Séché à 40 °C, il est broyé puis tamisé à la main à 2 mm. 150 g de cette fraction 0-2 mm sont introduits dans un cylindre de dimensions identiques aux précédents et coupé en deux, il est garni intérieurement d'un sachet plastique perforé à la base, repose dans une nacelle constituée par une rondelle de PVC couverte d'un papier filtre et le tout est placé dans un bécher de 250 ml.

Tous les échantillons sont saturés à l'eau permutée par apport progressif dans les béchers. La lame d'eau est maintenue 24 heures à l'affleurement du bord supérieur des cylindres puis elle est évacuée par siphonage. Les nacelles sont ensuite suspendues à l'air libre pendant 48 heures. Après une répétition de ce cycle les échantillons sont resaturés et amenés à pF 3,0 après 72 heures dans l'appareil de RICHARDS (1941). Ils suivent ensuite les mêmes traitements que les échantillons non remaniés.

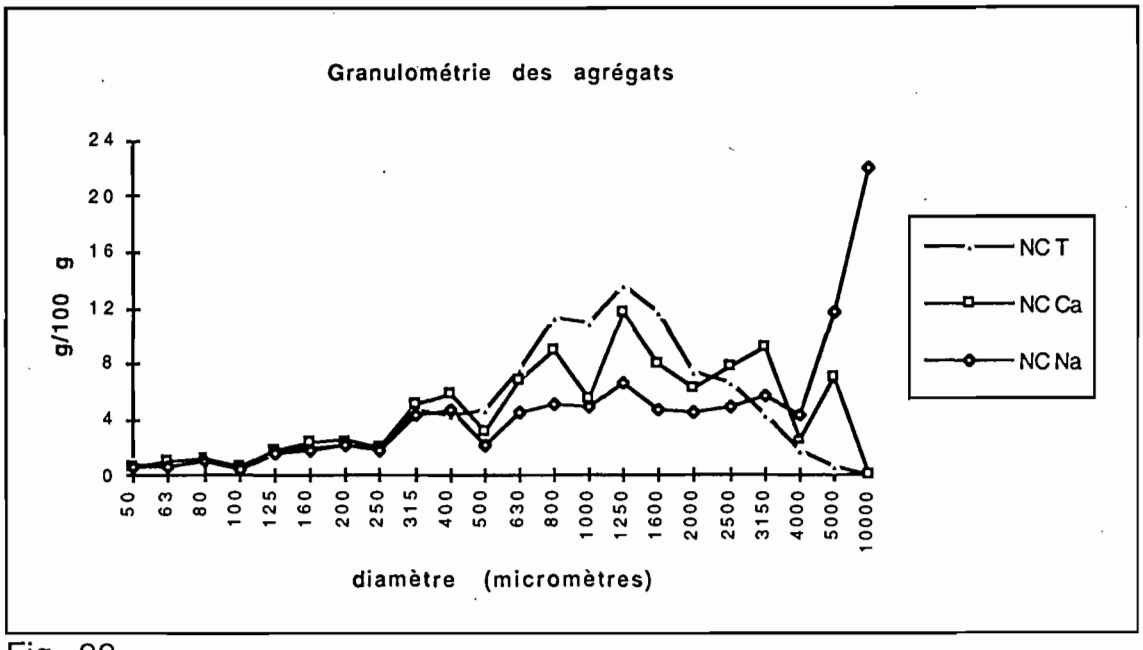


Fig. 22

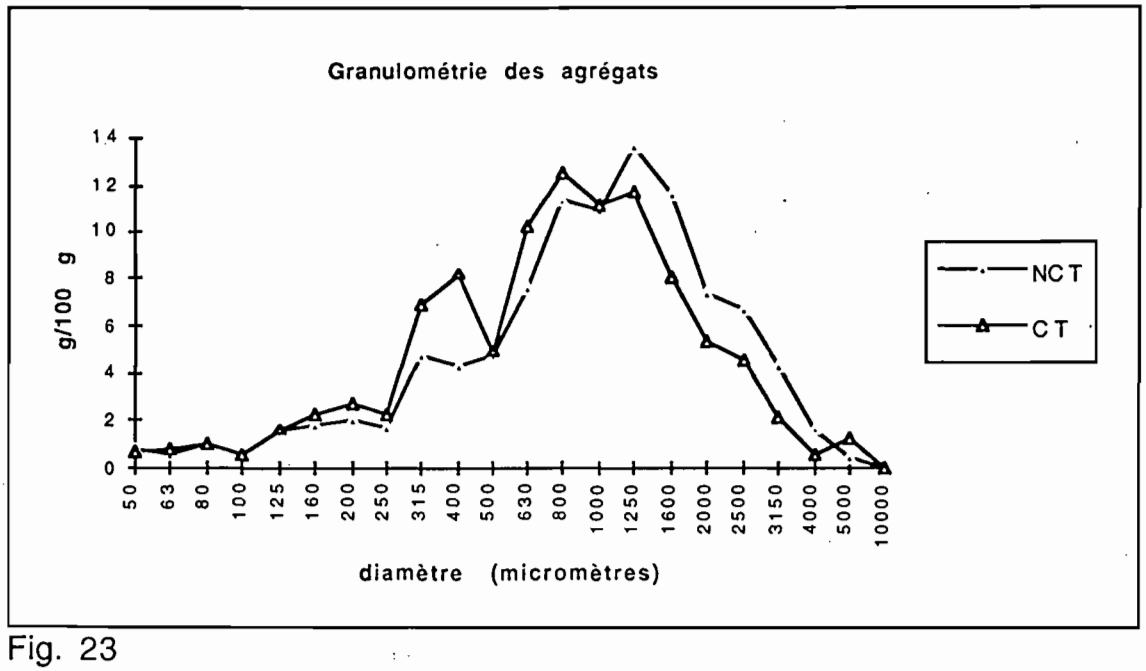


Fig. 23

Figures 22 et 23 : Granulométrie des agrégats: contrainte chimique (22) et physique (23).

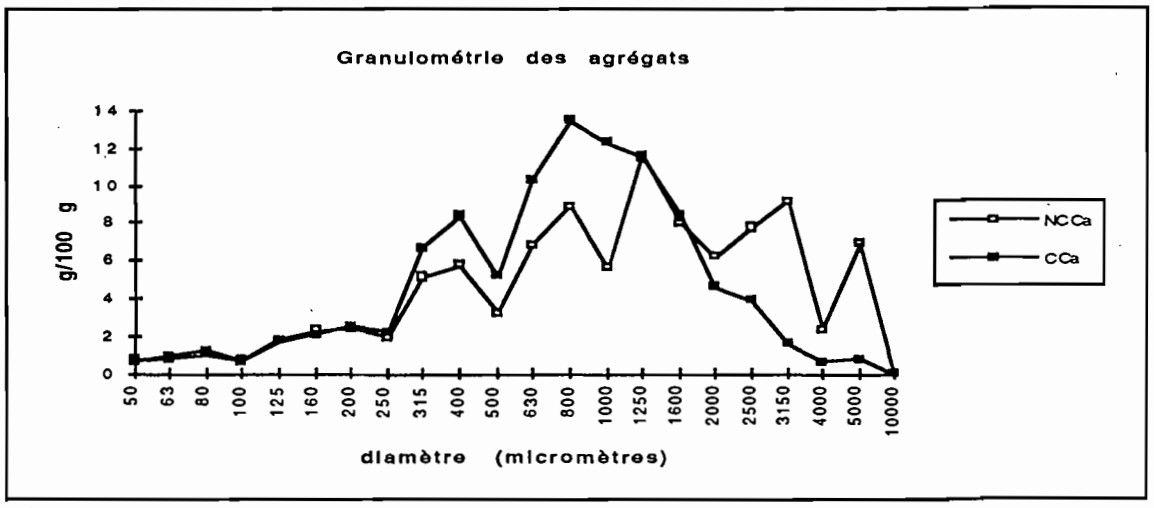


Fig. 24

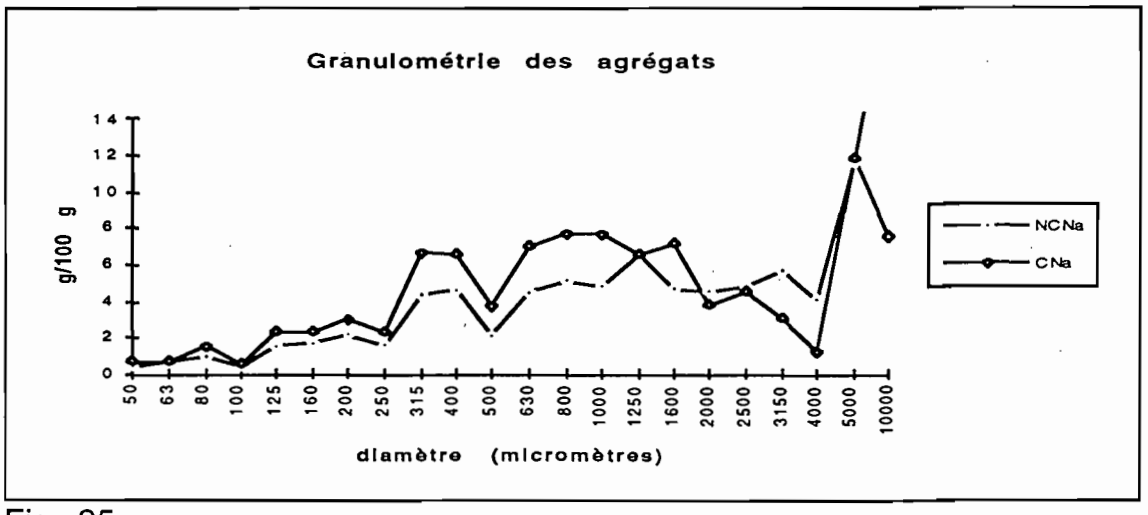


Fig. 25

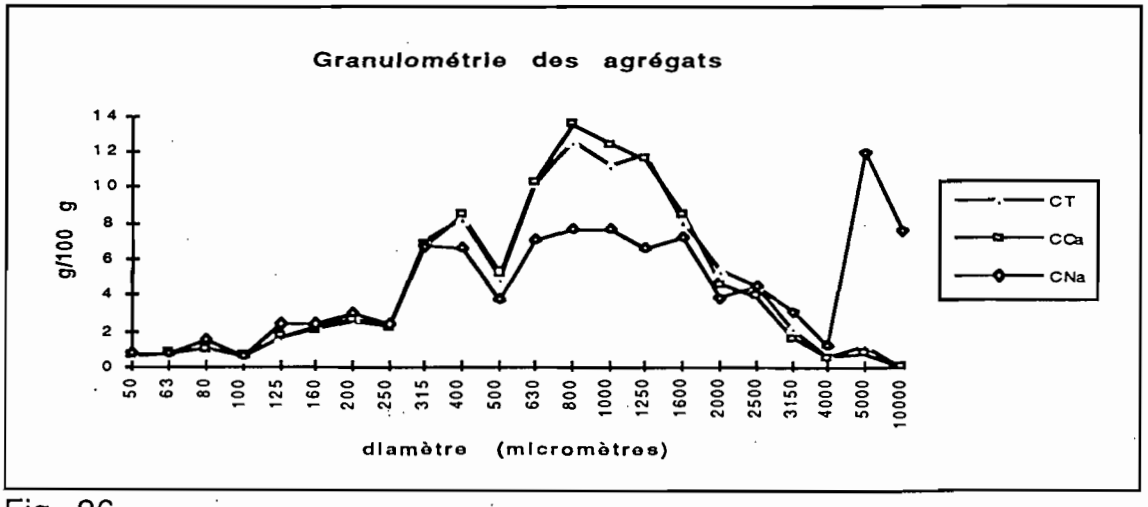


Fig. 26

Figures 24,25,26 : Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés: compactage d'échantillons Ca++ (24), Na+ (25), comparaison au témoin (26).

3.3 L'effet des contraintes sur la distribution des agrégats

3.3.1 Sol non remanié

1) Effet chimique

Les échantillons non remaniés et non compactés traités jusqu'à saturation du complexe absorbant par l'ion calcium (fig. 22) montrent un aplatissement de la courbe de répartition des agrégats au dessus de 500 µm avec enrichissement en agrégats de diamètre supérieur ou égal à 2500 µm. La courbe reste cependant de forme modale.

Ce même phénomène est nettement accentué par les ions sodium avec de forts pourcentages d'agrégats supérieurs à 4000 µm et l'obtention d'une courbe qui n'a plus de caractère modal.

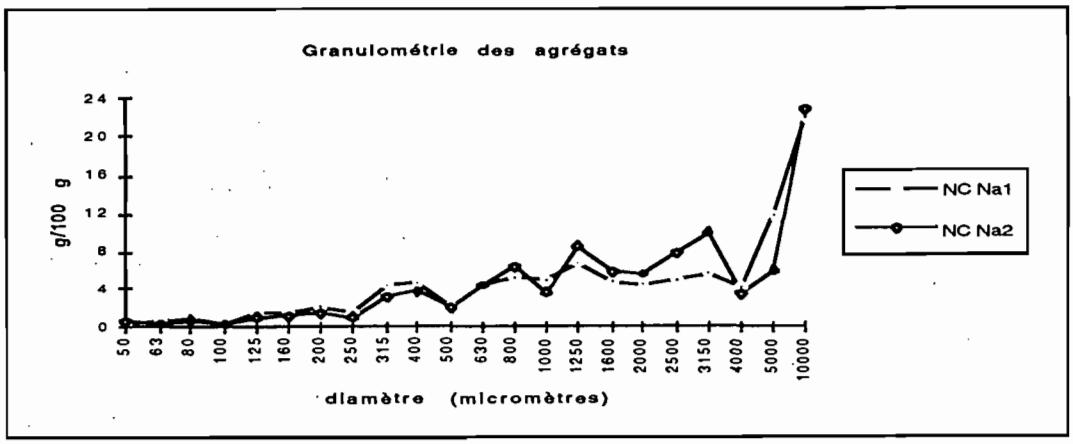
2) Effet physique

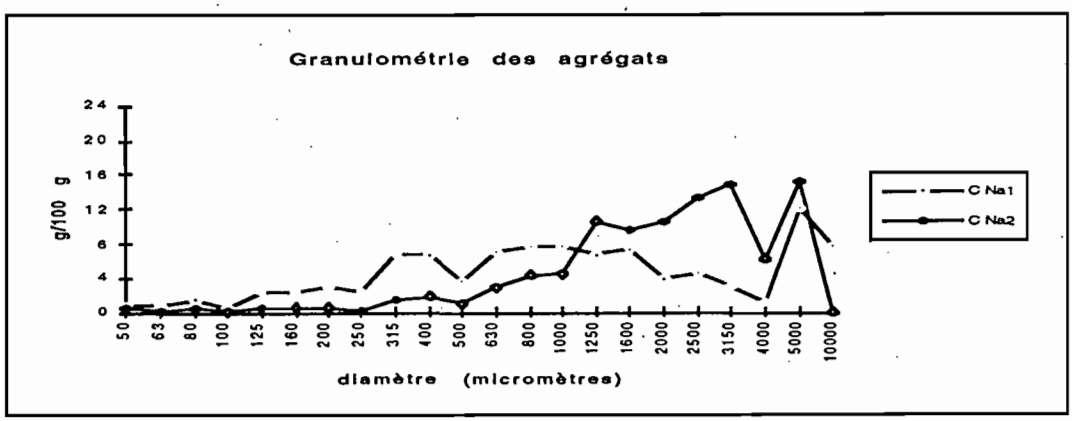
La comparaison des échantillons témoins non compactés (NCT) et compactés (CT) montre un décalage de la courbe de répartition des agrégats vers les diamètres les plus petits avec déplacement du mode de 1250 µm à 800 µm (fig. 23). Les classes de 50 à 250 µm ne sont pas affectées.

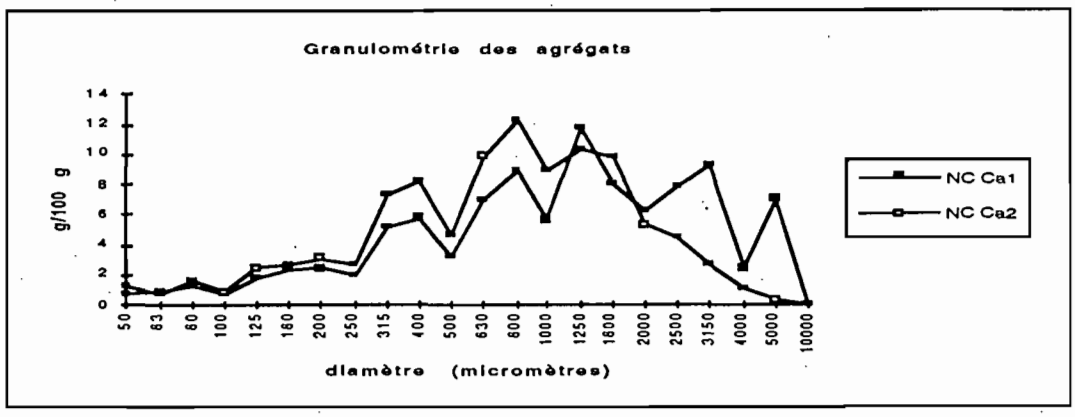
Sur les échantillons au complexe saturé par l'ion calcium (fig. 24) le compactage favorise la reconstitution d'une courbe unimodale avec un maximum à 800 µm au dépend des agrégats des classes de 2000 à 10 000 µm. Les classes de 50 à 250 µm ne sont pas affectées.

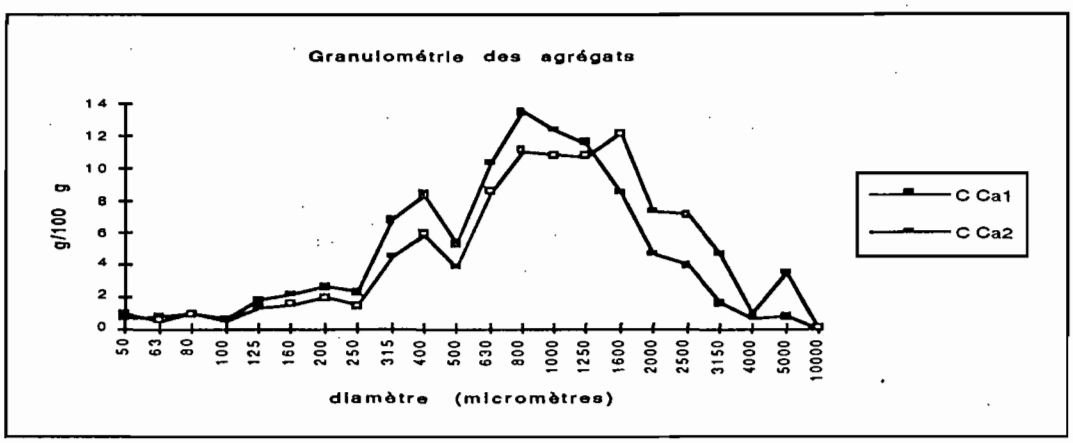
Sur les échantillons au complexe saturé par l'ion sodium (fig. 25) on observe également ce recentrage dans la distribution des agrégats sans toutefois qu'il y ait reconstitution d'une courbe unimodale.

La comparaison au témoin compacté (fig. 26) montre une redistribution pratiquement identique pour l'échantillon Ca^{++} alors que l'échantillon Na^{+} conserve une part importante de gros agrégats (> 4000 µm).









Figures 27,28,29,30 : Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés: répétabilité des résultats.

3) Discussion

L'examen de ces résultats amène quelques questions, la première étant celle de leur représentativité. En raison du petit nombre d'échantillons disponibles et de la durée des expériences une étude statistique n'était pas possible. Néanmoins en opérant à pF 3,0 on s'est placé dans les conditions offrant les plus faibles écarts-types sur les classes de la distribution (COLLEUILLE, 1993). De plus, les mesures faites en double montrent une assez bonne reproductibilité des résultats avec dans tous les cas conservation des phénomènes observés (fig. 27, 28, 29, 30).

Les échantillons au complexe saturé par l'ion sodium présentent des effectifs massiques élevés dans les classes 5000 et 10 000 µm. Ceci est dû en partie à la persistance d'une couche saturée d'environ 1 cm en surface de l'échantillon après passage à pF 3,0. Lors de la dispersion au méthanol cette partie de l'échantillon ne se désagrège pas ou mal, se comportant comme un échantillon saturé. Elle constitue de gros amas au séchage qui sont ensuite retenus dans les tamis de 10 000 et 5000 µm.

L'autre problème dans le traitement des échantillons sodisés apparaît au compactage puisque la partie supérieure, saturée, de l'échantillon flue plus ou moins sous l'effet de la pression ce qui peut expliquer les écarts entre les essais 1 et 2.

Ce phénomène peut se produire mais avec moins d'ampleur pour les échantillons au complexe saturé au chlorure de calcium. Dans ce cas il semble davantage dû à une destruction des agrégats de surface par action physique lors des opérations de percolation avec la solution de chlorure de calcium.

Des essais complémentaires pourraient être menés en faisant varier la concentration des solutions de percolation et les conditions de lavage. Il faut cependant noter que cette déstructuration à saturation et la prise en masse au séchage sont naturellement liées à l'action de l'ion sodium sur les argiles.

3.3.2 Sol remanié

L'effet du broyage et de la reconstitution de l'échantillon peut se juger par rapport au sol témoin non remanié (fig. 31) qui présente une courbe de répartition des agrégats de type unimodal avec un maximum à 1250 µm.

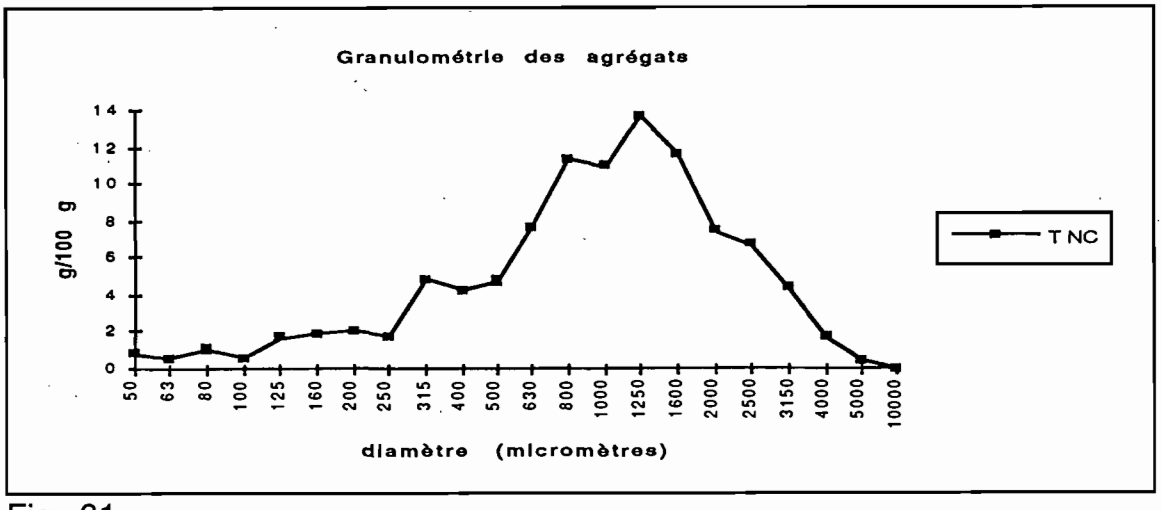


Fig. 31

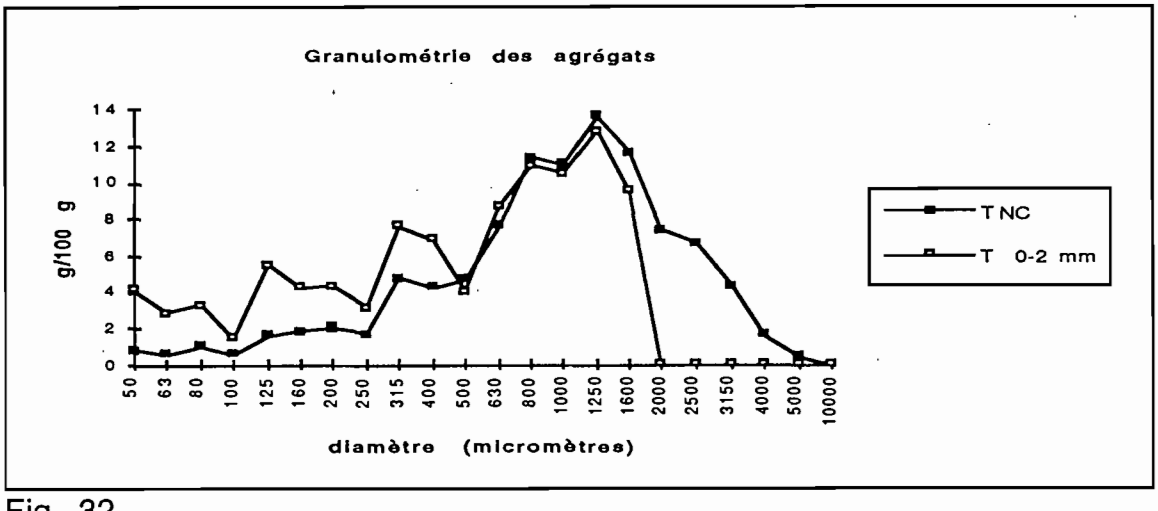


Fig. 32

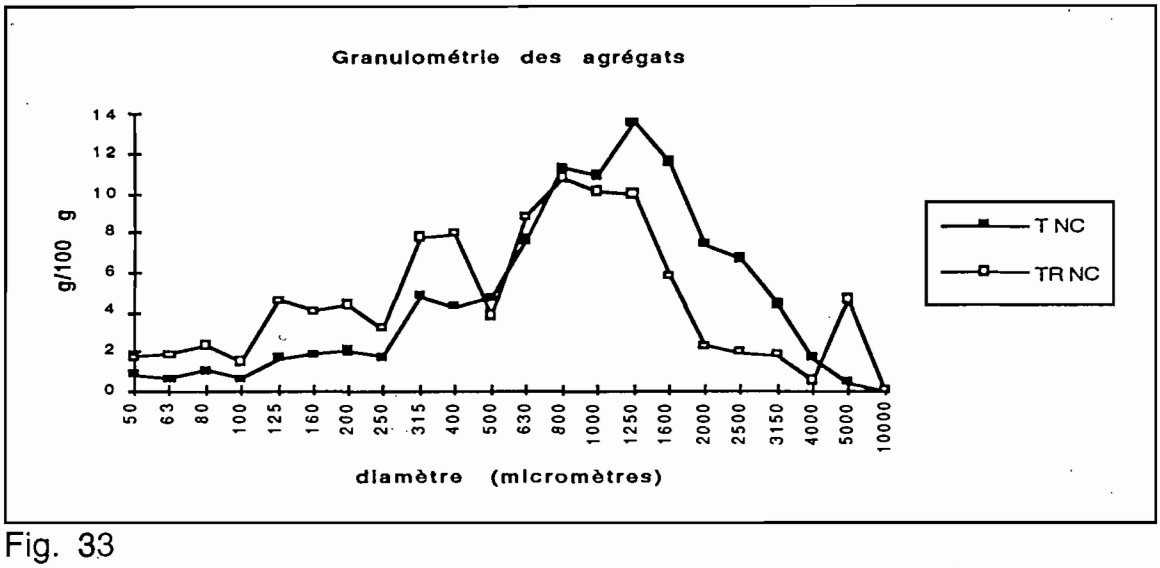


Fig. 33

Figures 31,32,33 : Granulométrie des agrégats: effet de la reconstitution des échantillons.

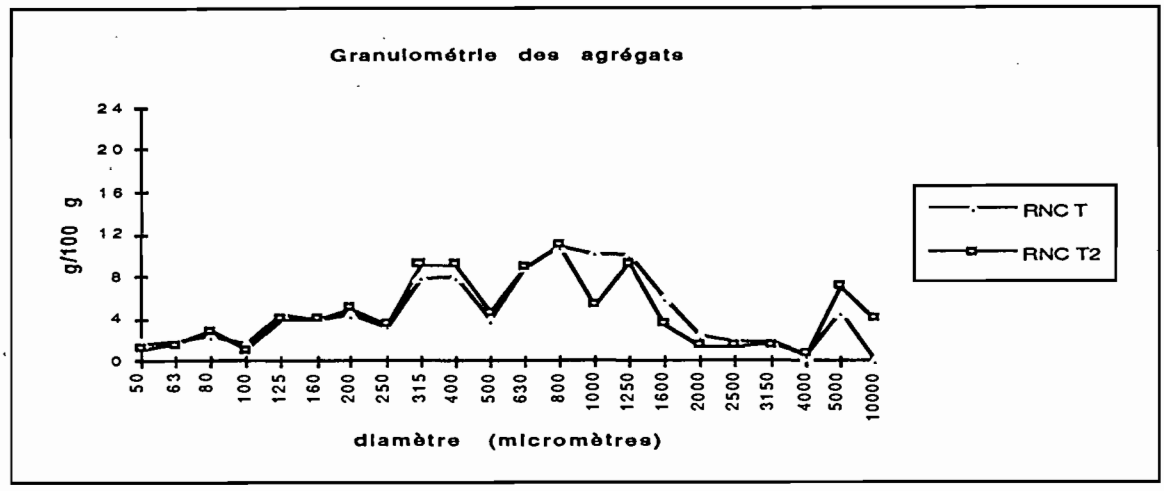
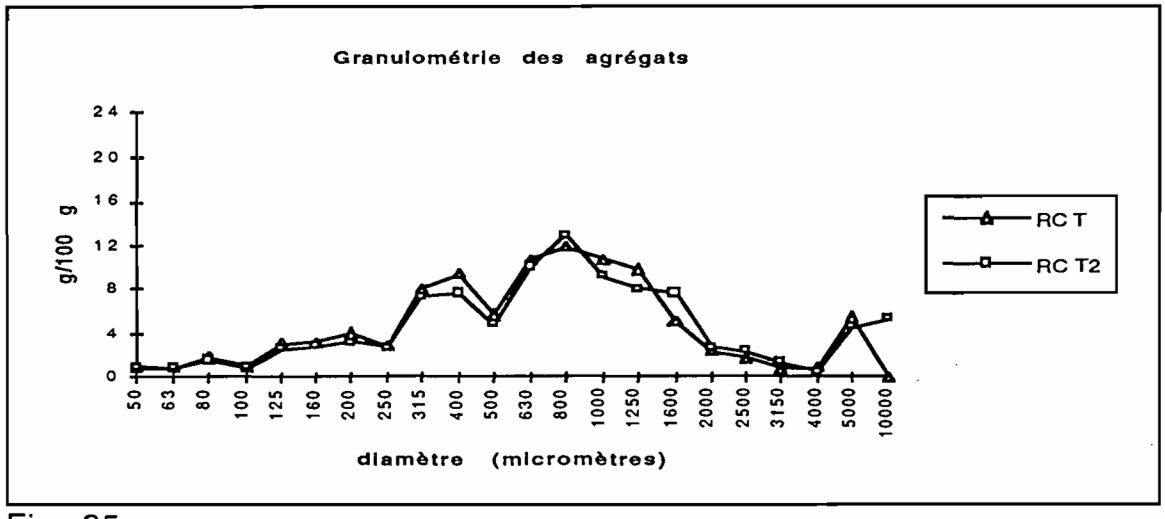


Fig. 34



Fig; 35

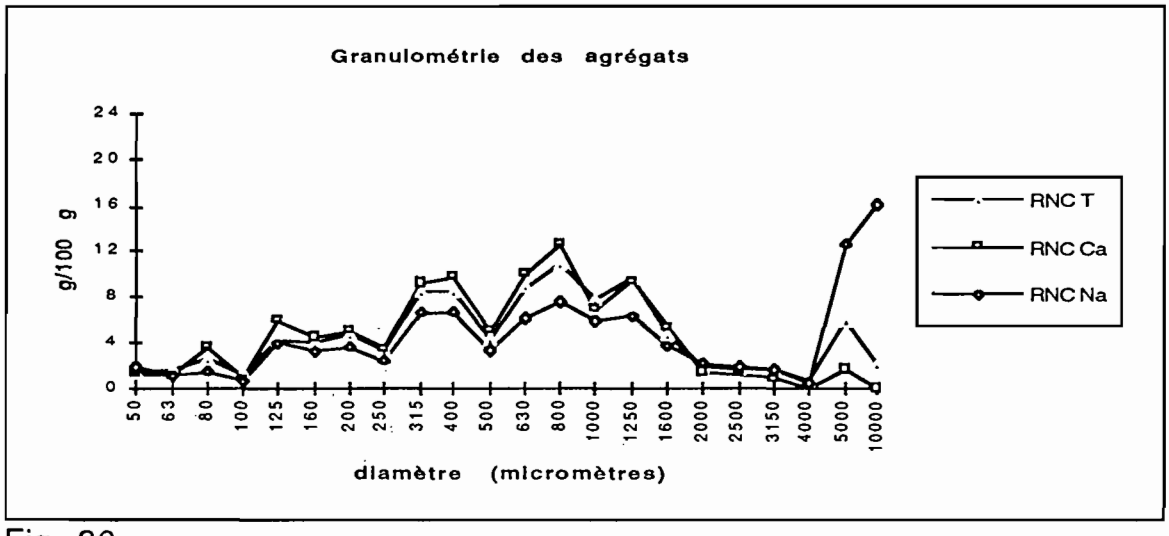


Fig. 36

Figures 34,35,36 : Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés: répétabilité des mesures (34 et 35) et effet chimique (36).

Le broyage manuel au mortier de porcelaine suivi d'un tamisage à 2 mm produit un matériau dont la courbe de répartition granulométrique des agrégats (fig. 32) est sensiblement identique à celle du témoin entre 500 et 1600 µm. Par contre le broyage a provoqué une augmentation de la fréquence des agrégats de taille inférieure à 500 µm.

La reconstitution d'un échantillon à partir de ce broyât a permis de recréer un certain nombre d'agrégats de taille supérieure à 2 mm sans toutefois reproduire le spectre d'un échantillon non remanié (fig. 33).

Seuls les échantillons témoins ont pu être traités en double. La reproductibilité des mesures, appréciée sur deux essais, est satisfaisante sur échantillons témoins non compactés ainsi que sur échantillons témoins compactés (fig. 34 et 35). Par contre le traitement chimique, par l'ion sodium notamment, peut entraîner le maintien d'une couche saturée au sommet de l'échantillon. Dans ce cas les teneurs massiques variables dans les classes 5000 et 10 000 µm peuvent être à l'origine d'une mauvaise reproductibilité.

1) Effet chimique

On retrouve la même action du sodium qui provoque l'aplatissement de la courbe des fréquences jusqu'à 4000 µm et un pic important à 5 et 10 000 µm. Par contre il semblerait que l'ion calcium contribue à la restructuration de l'échantillon (fig. 36).

2) Effet physique

Le compactage des échantillons remaniés, saturés à l'eau permutée, n'apporte pas de modification sensible dans la distribution des agrégats bien qu'il y ait un resserrement de la courbe avec un mode un peu plus élevé après compactage (fig. 37).

Dans le cas d'échantillons traités par une solution sodique, les écarts sont également faibles mais on enregistre un déplacement vers les classes 1000 à 3150 µm au détriment des classes de plus petit diamètre. Le pic dans les classes 5000 et 10 000 µm est conservé (fig. 38).

Le compactage après traitement par la solution de chlorure de calcium provoque une diminution des effectifs dans les classes inférieures à 800 µm et un pic important à 10 000 µm dû à l'existence d'une partie restée saturée au sommet de l'échantillon (fig. 39).

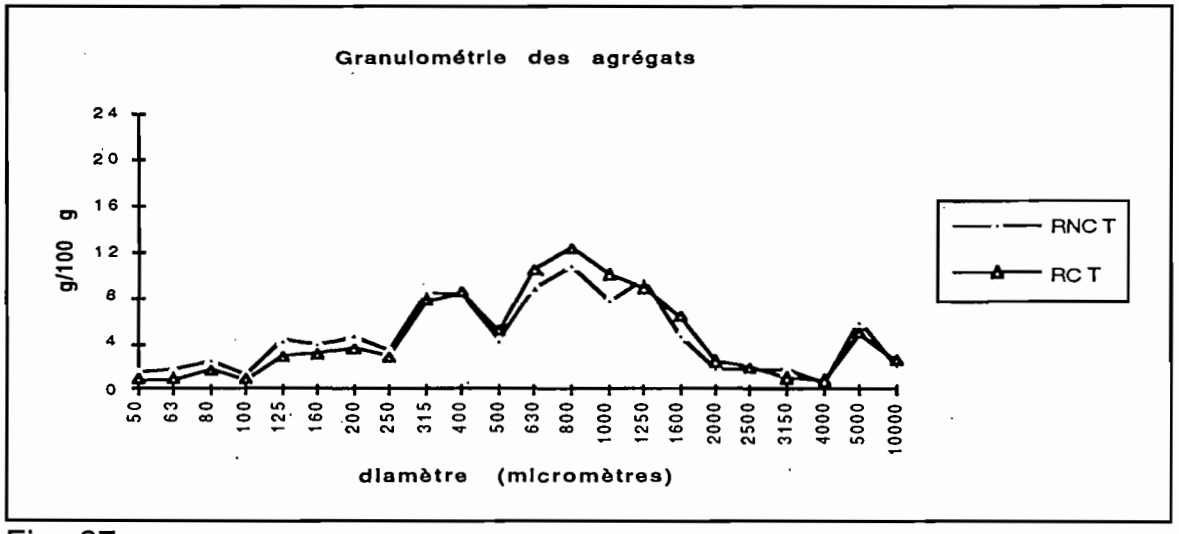


Fig. 37

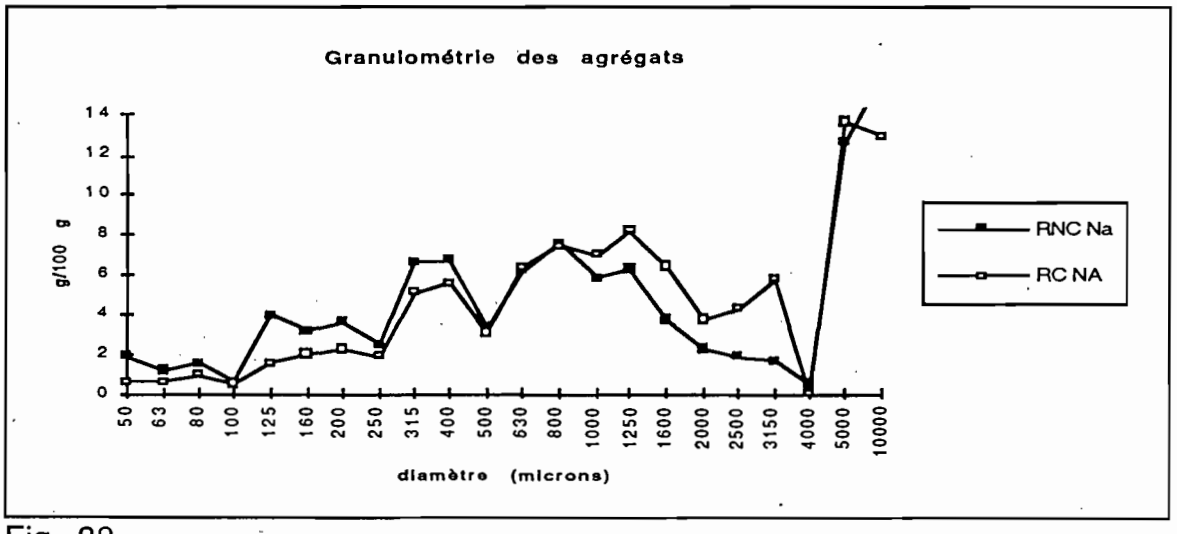


Fig. 38

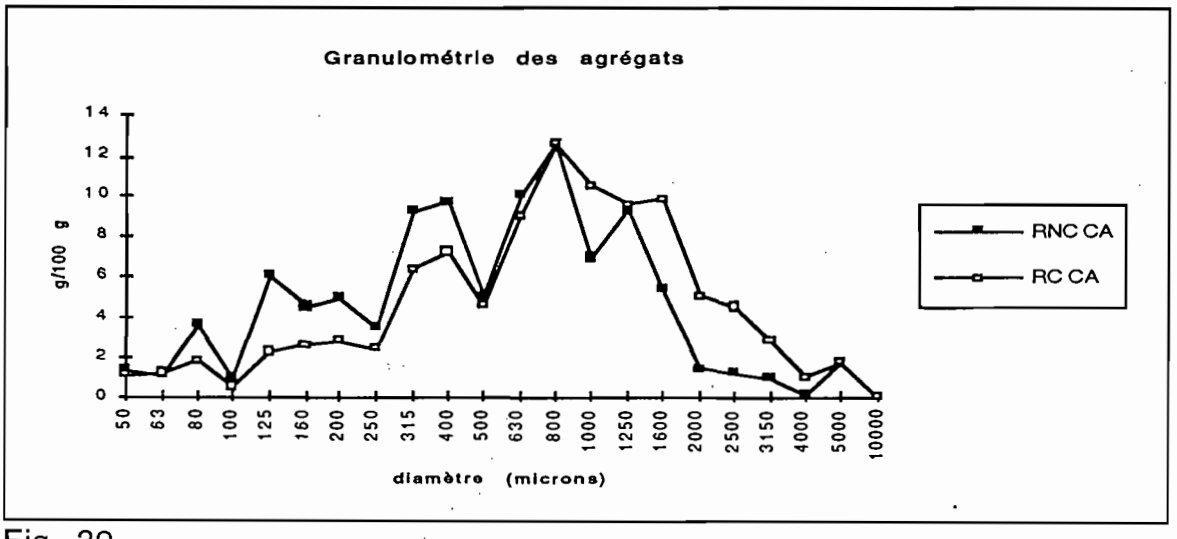


Fig. 39

Figures 37,38,39 : Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés: effet physique.

3) Discussion

Il semble que l'utilisation d'échantillons reconstitués à partir de la fraction 0-2 µm d'un sol broyé et tamisé apporte des changements suffisamment importants pour modifier l'effet chimique et physique obtenu par le traitement d' échantillons de ce même sol non remanié.

Cependant ces conclusions peuvent résulter de modifications ayant pour origine les modalités de reconstitution des échantillons, ce qui pourrait être étudié.

Une première approche consisterait à utiliser un mélange ayant la même distribution fréquencielle des agrégats que le sol non remanié que l'on veut étudier. L'étude des cycles d'humectation-dessication devrait aboutir à la reconstitution d'échantillons ayant une densité apparente proche de celle du sol non remanié, ce qui permettrait un compactage dans les mêmes conditions initiales.

3.3.3 Conclusion

Dans des conditions expérimentales sans étude statistique possible des résultats, seules les grandes tendances peuvent être dégagées. Le calcul des différences relatives entre échantillons témoins et échantillons traités par l'ion sodium pour chacune des fractions ((fraction T - fraction Na)/ fraction T) semble bien confirmer que la méthode de fractionnement des agrégats permet de mettre en évidence l'effet déstructurant de l'ion sodium, qui provoque une diminution des quantités massiques d'agrégats dans les classes de 500 à 3000 µm pour les échantillons non remaniés, compactés ou non (fig. 40). Cette baisse est généralisée de zéro à 1600 µm pour les échantillons remaniés (fig. 41). Une perspective de développement consisterait à multiplier les essais et à rechercher des seuils d'action de l'ion sodium.

3.4 Effet des contraintes sur la courbe de retrait

Les résultats précédants montrent que, dans les conditions de l'expérimentation, c'est essentiellement l'ion sodium qui produit les changements les plus marquants révélés par les méthodes de mesure utilisées. Nous nous limiterons ici à voir si la méthode des courbes de retrait permet de confirmer ces résultats.

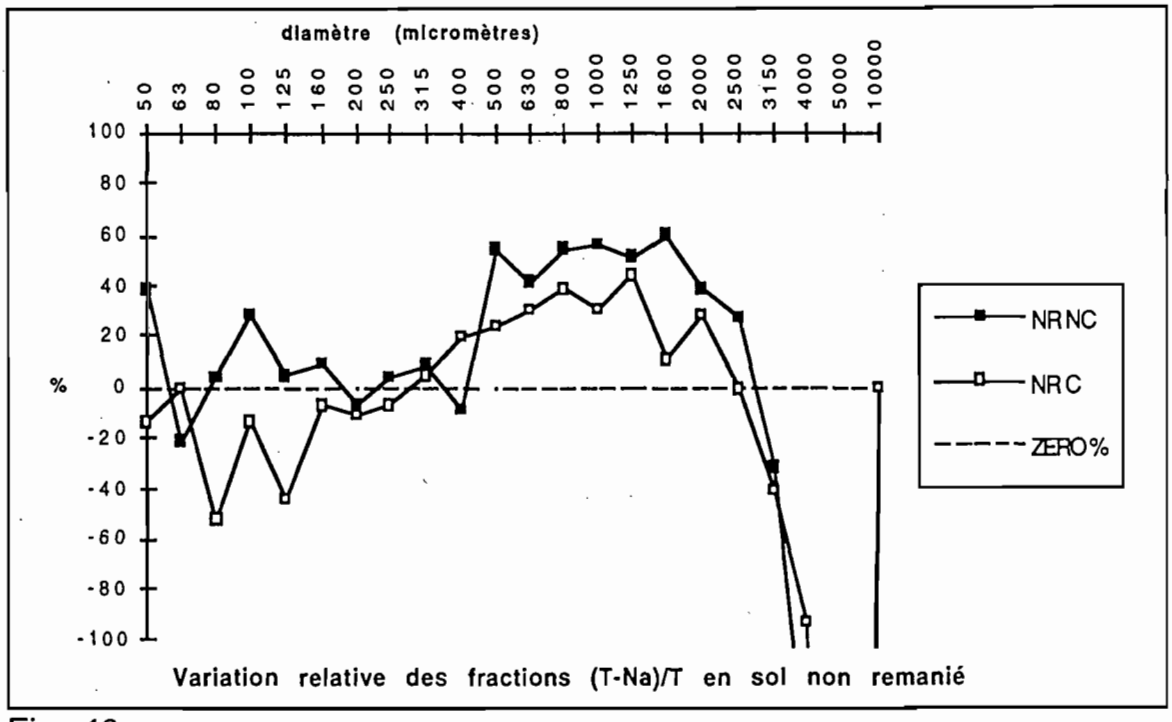


Fig. 40

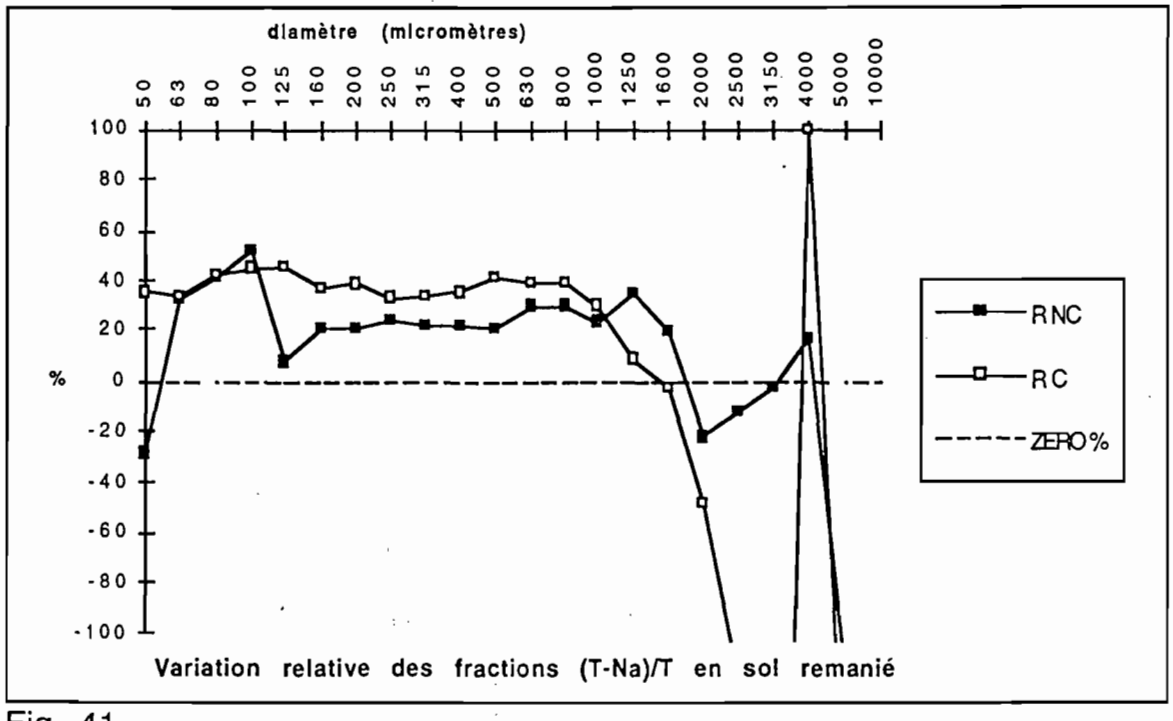


Fig. 41

Figures 40, 41 : Granulométrie des agrégats: effet de l'ion sodium sur échantillon non remanié (40) et remanié (41).

3.4.1 Sol non remanié

La comparaison des courbes témoin et traitement par l'ion sodium montre que l'allure même des courbes diffère (fig. 42).

L'échantillon non traité présente une courbe de retrait qui permet de distinguer la phase de retrait principal, le point d'entrée d'air et le retrait résiduel. Comme pour les courbes précédemment obtenues, la partie de courbe située au dessus du retrait principal est très développée, montrant l'existence d'un assemblage qui se rétracte au cours de la dessiccation.

Le traitement à l'ion sodium rend, quant à lui, l'ajustement du modèle pratiquement impossible car il est souvent difficile de différencier les phases de retrait structural et principal qui ont des pentes très proches. Le point d'entrée d'air peut aussi être difficile à localiser.

3.4.2 Sol remanié

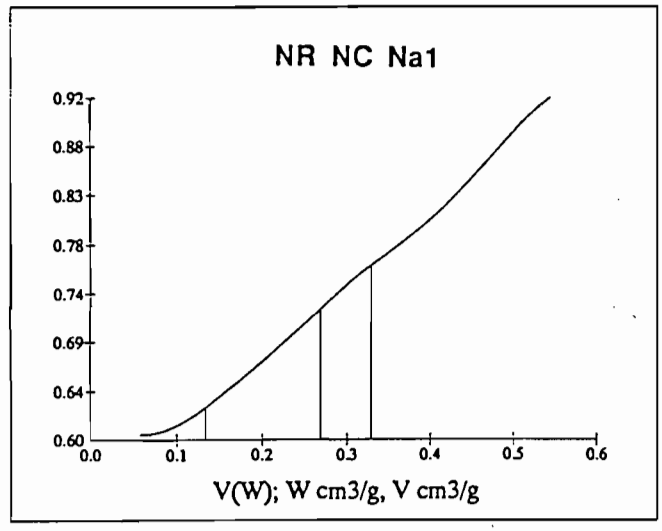
Ici aussi on se limitera à constater l'allure différente des courbes des échantillons témoins et traités par l'ion sodium. Les échantillons témoins permettent d'identifier une phase de retrait principal, le point d'entrée d'air, et le retrait résiduel alors que pour les échantillons traités, il n'est plus possible d'identifier les phases définies par le modèle (fig. 43).

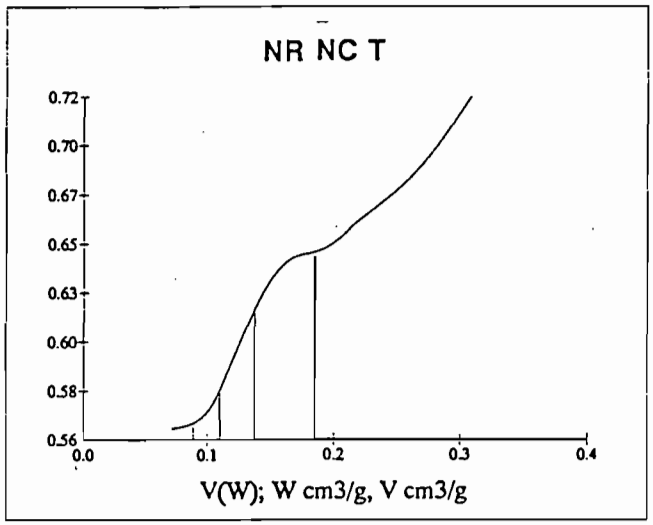
3.4.3 Conclusion

Qu'il s'agisse d'échantillons non remaniés ou remaniés, la méthode des courbes de retrait traduit une action des ions sodium sur la structure du sol: la pente de la phase de retrait structural tend à se confondre avec celle de la phase principale. Toutefois, l'utilisation du modèle d'ajustement de BRAUDEAU (1987, 1988) pour l'interprétation de ce type de courbe n'est pas satisfaisante en raison de l'inadéquation partielle du modèle théorique, élaboré à partir d'expériences sur sol ferrallitique.

3.5 Conclusion

Les méthodes du fractionnement en agrégats et de la courbe de retrait sont toutes les deux sensibles à l'effet d'une contrainte physique et d'une contrainte chimique.





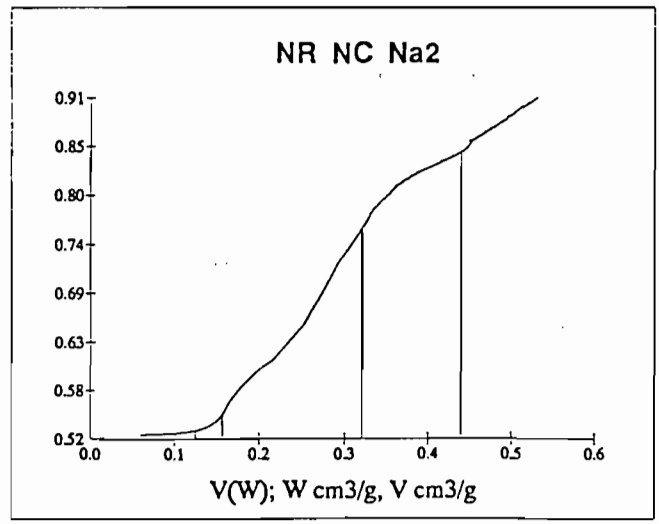
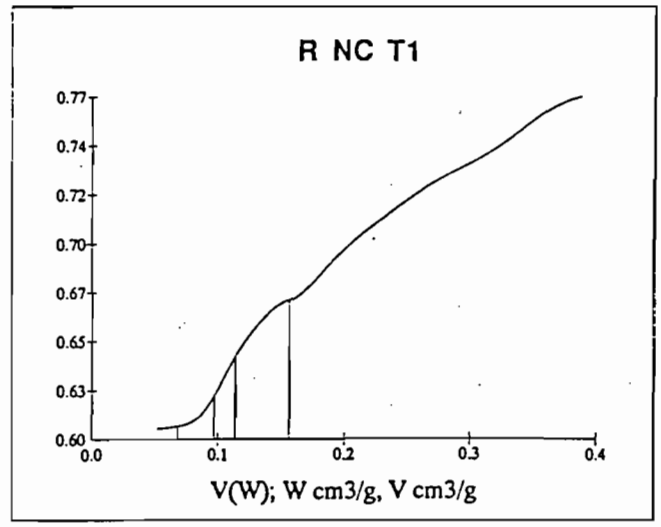
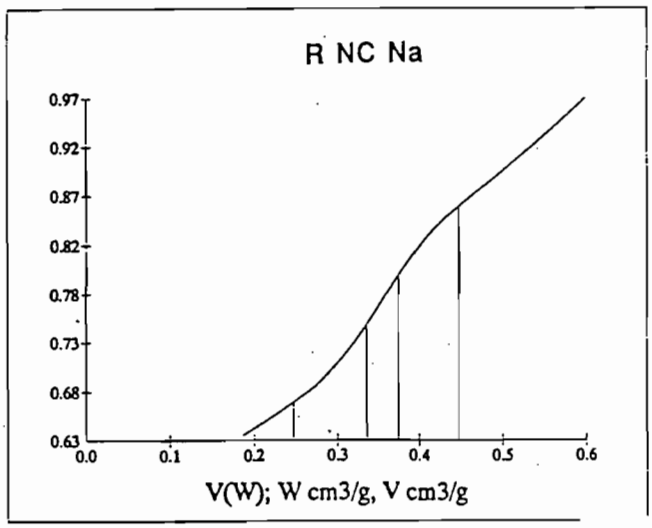


Figure 42: Effet de l'ion sodium sur la courbe de retrait: échantillon non remanié.





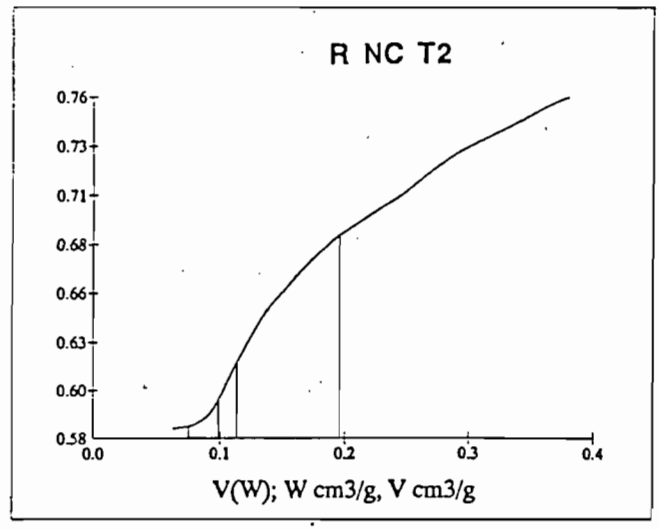


Figure 43: Effet de l'ion sodium sur la courbe de retrait: échantillon remanié.

Le fractionnement en agrégats montre bien l'effet dépressif de l'ion sodium sur les classes d'agrégats de diamètre inférieur à 2500 µm; il semble également traduire un effet du compactage qui reclasse les agrégats vers les classes inférieures lorsqu'il est pratiqué dans de bonnes conditions.

La méthode des courbes de retrait est un indicateur de l'action de l'ion sodium sur la structure mais elle ne permet pas de déduire les modalités du fonctionnement en raison de l'inadéquation du modèle aux phénomènes observés.

Cependant, l'utilisation de ces deux techniques exige des mises au point de protocoles concernant:

- les modalités de saturation du complexe d'échange, qui pourrait se faire *per ascensum* pour éviter la formation d'une pâte à la surface des échantillons, par des solutions dont la composition et la concentration sont à préciser
- les modalités de compactage, par essai de différentes pressions
- les modalités de reconstitution des échantillons si l'on veut travailler sur échantillons remaniés: broyage contrôlé du sol ou spectre, des diamètres d'agrégats identique au sol en place par exemple.

IV - CONCLUSION GENERALE

Dans cette région à très faible pluviosité, traversée par un cours d'eau pérenne marqué par des crues et un étiage fort, il s'était développé un éco-système où la vie était réglée par le régime du fleuve. Confrontés à des sécheresses persistantes et à des besoins alimentaires croissants, les Etats riverains du fleuve Sénégal ont cherché à le régulariser par la construction de deux grands barrages et à développer la culture irriguée.

Ces changements importants ne sont pas sans effets sur les structures sociales et l'environnement.

L'effet sur les structures sociales peut s'apprécier dans les relations entre élevage et irrigation et entre cultures traditionnelles et irrigation. Les conséquences sur l'environnement se manifestent entre autres par des risques de salinisation et de dégradation de la structure des sols.

Une étude rapide des conditions sociales de la production agricole montre le peu d'intérêt de l'agro-pasteur pour l'irrigation: la conduite traditionnelle des troupeaux et l'absence de formes modernes d'élevage en sont les manifestations les plus évidentes. Les périmètres irrigués, rarement adaptés à l'élevage, et le fait que les Peuls constituent une minorité juste tolérée par les autres exploitants, ne favorisent pas l'intégration irrigation-élevage.

La présence de l'irrigation dans la région de Podor est importante: les 3/4 des ménages disposent de parcelles irriguées. Cependant, l'irrigation se fait en majorité dans les Périmètres Irrigués Villageois (PIV) qui sont les périmètres les moins bien aménagés, et aussi ceux où les attributaires cultivent le moins leur parcelle (en 1991-92, près de la moitié des attributaires n'ont pas cultivé). Tous les irrigants pratiquent la riziculture, mais les cultures commerciales se développent surtout chez les exploitants cultivant plus de 60 ares. Les cultures traditionnelles restent importantes chez les petits paysans qui n'ont pas abandonné les cultures de décrue, de berge et de jardin pour minimiser les risques. L'attribution égalitaire des parcelles qui se pratiquait dans les PIV et les IT tend à disparaître avec le développement des périmètres privés, moyen d'assurer une emprise foncière et témoins de la course à la terre.

Ce développement important de l'irrigation, même si les paysans ne cultivent pas toujours la totalité de la surface qui leur est attribuée, n'est pas sans conséquence sur la gestion des sols.

Les études menées dans la vallée du fleuve Sénégal ont montré que la culture irriguée de ces sols a deux conséquences majeures: 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, et 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.

Les premiers résultats obtenus sur sol non cultivé et cultivé non salin et non alcalisé ont montré une évolution physique qui suggère une transformation liée à la pratique de l'irrigation. Elle va dans le sens de la déstabilisation et du compactage. On s'est donc s'intéressé à ce phénomène nonobstant celui de la salinisation-alcalisation.

La comparaison *in situ* des états non cultivé et cultivé met en évidence la transformation d'une part, de la répartition des agrégats par augmentation des masses dans les classes supérieures à 630 µm, et d'autre part de l'amplitude du retrait, plus importante en sol cultivé. Ces changements ne sont, ici, pas dû aux ions sodium mais probablement au travail du sol. Les essais de compactage au laboratoire, à pF 3,0 et sous une pression de 200 kPa, n'ont cependant pas permis de confirmer que ces transformations sont le résultat d'un compactage mécanique. Il faudrait donc définir de nouveaux protocoles avec d'autres modalités d'application des contraintes pour une nouvelle approche de l'étude de ces transformations en laboratoire.

En ce qui concerne la contrainte chimique, les essais après saturation du complexe d'échange par les ions sodium montrent qu'ils provoquent un changement structural qui se traduit sur la répartition granulométrique des agrégats et sur la forme de la courbe de retrait. Cette action reste à préciser par, notamment, la recherche de seuils d'action.

Le fractionnement en agrégats par la méthode au méthanol semble donc être un bon outil pour mettre en évidence l'évolution structurale du sol sous contrainte physique ou chimique. 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 différents 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 montre que ces problèmes de physique du sol sont importants pour le devenir des sols à moyen et long terme, pour 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

BARO-DIOP M., (1993)
Femmes et cultures irriguées. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 8 p. .

BOIFFIN J., GUERIF J., STENGEL P., (1990)
Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales récentes. *In* "La structure du sol et son environnement." Les colloques de l'INRA n°53, INRA (Ed.), Paris, 37-69.

BOIVIN P., (1991)
Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse, collection Etudes 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. .

BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL-ODOUX C., (1991)
Densité apparente d'échantillons de sol: méthode de la poche plastique. Bulletin du G.F.H.N. n° 28, 59-70.

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. Pédol., vol XIX, n°4, 353-367.

BRAUDEAU E., (1987)
Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. Science du Sol, vol. 25/2, 85-93.

BRAUDEAU E., (1988)
Méthode de caractérisation pédo-hydrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. XXIV, n°3, 179-189.

BRUAND A.,(1986)
Contribution à la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Science du sol, 24, 4 , 351-362.

C.D.H., (1980)
Suivi de la campagne de la tomate industrielle 1979-1980 dans les périmètres de Dagana et de Nianga, C.D.H. Camberene, Dakar, 31 p. .

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.

DANIELLS I.G.,(1989)
Degradation and restoration of soil structure in a cracking grey clay used for cotton production. Aust. J. Soil Res., 27, 455-469.

DE LEON GONZALEZ F., (1991)
Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée: contribution à l'interprétation du profil cultural. Thèse, INA-PG, Paris, 133 p + annexes.

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. .

DIRECTION DE L'HORTICULTURE, (1994)
Compte-rendu de la réunion du comité chargé du suivi du protocole sur la tomate industrielle, 16/3/1994 et 21/4/1994. Direction de l'horticulture, Ministère de l'Agriculture, Dakar, 6p. .

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.

GAY J.P., DANCETTE C., (1993)
La diversification des cultures. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 22 p. .

GUERIF J., (1987)
L'analyse de la porosité: application à l'étude du compactage des sols. *In* "soil compaction regeneration" G. Monnier, M.J. Goss Ed.. Balkena Rotterdam/Boston, 1-13.

HAINES W.B., (1923)
The volume changes associated with variations of water content in soil. Soil J. Agric. Sci., 13, 296-310.

HENIN S., (1938)
Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse Univ. Paris.

LOYER J. Y., (1989)
Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Collection Etudes 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.

McGARRY D., SMITH K.J., (1988)
Indices of residual shinkage to quantify the comparative effets of zero and mechanical tillage on a vertisol. Aust. J. Soil Res., 17, 115-120.

MICHEL P., (1973)
Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mémoires ORSTOM n°63, 3 tomes, 752 p. .

MTIMET A., LOYER J.Y., (1978)
Etude pédologique de la cuvette de Ndyerba. Région du fleuve Sénégal. ORSTOM-Dakar.

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.

PAPY F., (1988)
Effet de l'état physique initial d'une couche labourée sur son comportement hydrique et structural. 153-168. In " Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère" (CR de l'ATP "eau"), R. CALVET Ed., INRA, 362 p. .

POITEVIN de F., (1993)
Etude d'impact des techniques culturales sur les aménagements hydro-agricoles dans la région de Podor (Sénégal). Mémoire ESAP, 30 p. + annexes.

POUSSIN J. C., (1993)
Gestion technique de la riziculture irriguée. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 22 p. .

REEVE M.J., HALL D.G.M., (1978)
Shinkage in clayed subsoils of contrasting structure. J. of Soil Sci., 29, 315-323.

RICHARDS, (1941)`
A pressure menbrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci., 51: 377-386.

S.A.E.D, (1994)
Evolution de la campagne de contre-saison froide 93/94, tomate. Ministère de l'agriculture, SAED.

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.

SANTOIR C., (1993)
Des pasteurs sur les périmètres. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 16 p. .

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. .

SOUMARE M. A., (1993)
La diversification des systèmes de culture à Ndiawara. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 24 p. .

SPOSITO G., GIRALDEZ J.V., (1976)
Thermodynamic stability and the law of corresponding states in swelling soils. Soil Sci. Soc. AM. J., 40, 352-358.

STIRCK G.B., (1954)
Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. Aust. J. Agric. Res., 5, 279-290.

TARDIEU F., MANICHON H., (1986)
Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. Agronomie, 6 (5), 415-425.

TARRIERE C., (1993)
Les groupements de producteurs, village de Donaye (département de Podor, communauté rurale de Guédé). Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 20 p. .

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)
Sue 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.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Cartes de situation	5
Figure 2 :	La pluviosité	8
Figure 3 :	Besoins en eau des cultures	10
Figure 4 :	Toposéquence à travers la plaine alluviale	12
Figure 5 :	Carte de localisation des périmètres irrigués près de Podor	14
Figure 6 :	Carte de localisation des sites	20
Figure 7 :	Mise en valeur des différents types d'aménagements	22
Figure 8 :	Nombre de campagnes et choix culturaux selon les types d'aménagement	24
Figure 9 :	Méthode de fractionnement en agrégats	29
Figure 10 :	Points caractéristiques d'une courbe de retrait théorique, niveaux d'organisation de la structure et courbes de retrait d'argiles pures.	31
Figure 11 :	Méthode de mesure du retrait et des éléments de calcul de la courbe de retrait	33
Figure 12 :	Calendriers d'occupation du sol	34
Figure 13 :	Etat interne et mode d'assemblage des mottes	38
Figure 14 :	Profils culturaux parcelle IT3 P13	40
Figure 15 :	Granulométrie des agrégats en sol non cultivé	44
Figure 16 :	Granulométrie des agrégats en sol cultivé	44
Figure 17 :	Exemple de courbes de retrait du profil pédologique et du profil cultural	47
Figure 18 :	Courbes de retrait caractéristiques du sol non cultivé(H1 H2, H3) et du sol cultivé (UM2, UM3, UM4, UM5)	48
Figure 19 :	Courbes de fractionnement en agrégats	50
Figure 20 :	Dispositif pour l'application des contraintes chimiques	53
Figure 21 :	Dispositif pour l'application de la contrainte physique	53
Figure 22 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, effet de la contrainte chimique	57
Figure 23 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, effet de la contrainte physique sur témoin	57
Figure 24 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, effet de la contrainte physique sur échantillon traité Ca	58

Figure 25 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, effet de la contrainte physique sur échantillon traité Na	58
Figure 26 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, effet de la contrainte chimique sur échantillons compactés	58
Figure 27 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, répétabilité sur échantillons non compactés Na+	60
Figure 28 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, répétabilité sur échantillons compactés Na+	60
Figure 29 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, répétabilité sur échantillons non compactés Ca++	60
Figure 30 :	Granulométrie des agrégats: échantillons non remaniés, répétabilité sur échantillons compactés Ca++	60
Figure 31 :	Granulométrie des agrégats: échantillon témoin non remanié	62
Figure 32 :	Granulométrie des agrégats: effet du tamisage à 2 mm	62
Figure 33 :	Granulométrie des agrégats: effet de la reconstitution	62
Figure 34 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, non compactés, répétabilité des mesures	63
Figure 35 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, compactés, répétabilité des mesures	63
Figure 36 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, non compactés, effet chimique	63
Figure 37 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, effet physique sur échantillons témoins	65
Figure 38 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, effet physique sur échantillons Na+	65
Figure 39 :	Granulométrie des agrégats: échantillons remaniés, effet physique sur échantillons Ca++	65

Figure 40 : Granulométrie des agrégats: effet de l'ion sodium sur échantillons non remaniés 67

Figure 41 : Granulométrie des agrégats: effet de l'ion sodium sur échantillons remaniés 67

Figure 42 : Influence de l'ion sodium sur la courbe de retrait: échantillons non remaniés 69

Figure 43 : Influence de l'ion sodium sur la courbe de retrait: échantillons remaniés 70

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

PLANCHE 1: - Photo 1: passage de l'offset 26
- Photo 2: billonneuse
- Photo 3: parcelle billonnée
- Photo 4: canal d'apport et siphons
- Photo 5: état d'une parcelle entre deux irrigations
- Photo 6: parcelle de tomate et oignon à la récolte

PLANCHE 2: - Photo 1: la cuvette de Donaye 36
- Photo 2: profil pédologique du sol non cultivé
- Photo 3: carottier pour le prélèvement des cylindres de rétractométrie

PLANCHE 3: - Photo 1: billon et interbillons vus de dessus 43
- Photo 2: relevé du profil cultural
- Photo 3: profil cultural dans la parcelle IT3 P13

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition des ménages par zone selon le type d'irrigation 17

Tableau 2 : Cultures pratiquées par classe de surface 18

Tableau 3 : Nombre de personnes engagées dans la riziculture et proportion de ménages ne vendant pas leur récolte selon le volume de paddy récolté 18

Tableau 4 : Place des cultures traditionnelles chez les irrigants 19

LEXIQUE DES SIGLES et ABREVIATIONS

SAED:
Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal.
Actuellement: Société nationale d'aménagement et d'exploitation des terres du delta du Sénégal et des vallées du Sénégal et de la Falémé.

U.J.A.K.
Union des Jeunes Agriculteurs du Koyili Wirndi

OFADEC
Office Africain pour le Développement et la Coopération.

S.E.D.AGRI
Sociètè d'Etude et de Développement Agricole.

ORSTOM
Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.

I.S.R.A.
Institut Sénégalais de Recherche Agronomique.

F.A.O.
Food and Agriculture Organisation. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

O.M.V.S.
Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal.

ABREVIATIONS DES GRAPHIQUES:

NC: non compacté
C: compacté
T: témoin
Ca: traité par l'ion calcium
Na: traité par l'ion sodium
R: échantillon remanié
NR: échantillon non remanié

ANNEXES

A - METHODES D'ANALYSE

Les analyses ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Eaux de l'ORSTOM-Dakar.

- Cations échangeables

Saturation à l'acétate d'ammonium à pH 7
Dosage des ions Ca++, Mg++, Na+, K+ par absorption atomique en présence de lanthane et par spectrométrie de flamme.
Il n'y a pas eu élimination des sels solubles au préalable.

- Capacité d'échange cationique

Saturation par CaCl2 N à pH 7
Lavage par CaCl2 N/100
Percolation avec KNO3 1N
Dosage colorimétrique de Ca++ et Cl-

Les échantillons H1, H2, H3, sursaturés, sont salés, présence probable de Na+ dans les cations échangeables.

- Granulométrie

Pipette ROBINSON après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée et dispersion à l'aide du pyrophosphate de sodium.

B - RESULTATS D'ANALYSE DE SOL ET DES EAUX

Analyses de sol

Echantillon	H1	H2	H3	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5
Granulométrie								
A %	53	53,4	55	55,2	55,7	56,2	58,5	58,1
Lf %	17,9	18,6	19,9	17,7	17,6	16,4	17	16,8
Lg %	24,3	25,1	23,7	17,1	17,2	17,8	16,4	15,7
Sf %	7,5	7,3	6,2	13,7	14	13,2	11,7	12,3
Sg %	0,2	0,2	0,2	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
Total	102,9	104,6	105	104,3	105,2	104,2	104,2	103,5
Bases échangeables								
Ca++ méq%	11,29	10,74	9,07	12,57	11,64	15,9	16,35	12,23
Mg+ méq%	10,03	10,07	9,76	8,43	7,98	8,86	9,25	8,39
Na+ méq%	2,05	3,24	4,5	0,49	0,32	0,36	0,79	0,74
K+ méq%	0,2	0,17	0,19	0,54	0,5	0,45	0,3	0,2
Capacité d'échange								
CEC méq%	16,33	15,88	15,77	21,44	23,49	25,96	24,47	22,96
V %	144	153	149	103	87	98	109	94
pH 1/2,5								
eau	5,26	5,35	5,3	5,82	5,99	6,34	5,81	5,76
KCl	4,4	4,41	4,28	4,93	4,66	4,72	4,29	4,09
Extrait 1/5								
pH	5,78	5,87	5,79	5,84	6,14	6,48	6,28	6,37
EC mS20°C	0,67	0,738	0,722	0,307	0,077	0,043	0,074	0,052

Analyses de l'eau d'irrigation

localisation	pH	EC mS 20°C	Cl- méq/l	SO4-- méq/l	HCO3- méq/l	CO3-- méq/l	Ca++ méq/l	Mg+ méq/l	Na+ méq/l	K+ méq/l
IT4 P50	6,65	0,071	0,23	0,04	0,59	0	0,28	0,26	0,19	0,05
Donaye 4	6,66	0,068	0,3	0,05	0,48	0	0,24	0,26	0,21	0,05

C - PARAMETRES DES POINTS CARACTERISTIQUES DES COURBES DE RETRAIT

Points caractéristiques des courbes de retrait

VERTISOL	Point A		Point B		Point C		Point E	
cm3/100 g	W	Vms	W	Vms	W	Vms	W	Vms
H 1 (15-35)	4,43	66,20	8,39	68,54	10,92	71,60	16,56	76,23
H 2 (35-50)	5,73	63,87	8,54	65,52	11,12	68,55	19,84	75,89
H 3 (50-90)	8,53	56,46	11,09	58,18	13,82	61,88	18,27	64,58

PARCELLE	Point A		Point B		Point C		Point E	
cm3/100 g	W	Vms	W	Vms	W	Vms	W	Vms
UM3 (15-20)	5,97	58,40	9,36	60,27	16,72	68,76	24,31	74,04
UM4 (35-45)	4,77	55,79	9,64	58,58	15,25	65,97	22,70	71,17
UM5 (60)	4,60	56,28	8,57	58,41	14,09	65,04	22,26	70,87
UM2 (interb.)	6,25	56,33	9,48	58,45	13,27	63,70	21,85	70,72

	H1	H2	H3	UM2	UM3	UM4	UM5
Kr	1,209	1,174	1,355	1,385	1,153	1,317	1,201
R global%	26,7	25,61	27,28	34,29	32,96	32,78	33,06