

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des Sciences Agronomiques
Département des Sciences du Milieu et de l'Aménagement du Territoire



**Impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés
hydrodynamiques du sol en Moyenne Vallée du Fleuve Sénégal**

Promoteur :

Professeur B. Delvaux

Co-promoteur :

Docteur C. Hammecker

Membres du jury :

Professeur J. Dufey

Professeur M. Vanclooster



Mémoire présenté par Florence Landsberg
en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur Agronome
(orientation Aménagement du Territoire)

Année académique 1998-99
Session de septembre 99

« Ecoute plus souvent
Les chose que les Etres
La voix du Feu s'entend,
Entends la voix de l'Eau.
Ecoute dans le Vent
Le buisson en sanglots :
C'est le souffle des Ancêtres.

Ceux qui sont morts ne sont jamais
partis :
Ils sont dans l'ombre qui s'éclaire
Et dans l'ombre qui s'épaissit.
Les morts ne sont pas sous la Terre :
Ils sont dans l'Arbre qui frémit,
Ils sont dans le Bois qui gémit,
Ils sont dans l'Eau qui coule,
Ils sont dans l'Eau qui dort,
Ils sont dans la Case, ils sont dans la
Foule,
Les Morts ne sont pas morts (...) »

Birago Diop

« Souffles », Leurre et Lueurs

Remerciements

Ce travail personnel, aboutissement de nos cinq années d'étude, n'est pas si personnel, pour s'être fondé sur de nombreux échanges humains, scientifiques et amicaux.

Pour avoir suivi avec diligence, patience et humour le déroulement de ce travail de fin d'étude, nous remercions le professeur Bruno Delvaux, titulaire en Pédologie à l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve et le Docteur Claude Hammecker, chargé de recherches au département Agriculture Irriguée Durable à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) de Dakar.

Nos sincères remerciements vont aussi à Laurent Barbiéro, chargé de recherches, Jean-Luc Maeght et Jean Delarivière, Assistants Ingénieurs de l'IRD pour leur aide scientifique et logistique éprouvée à maintes reprises à Dakar ; ainsi qu'au Professeur Vanclooster pour nous avoir dirigée dans l'analyse critique de notre travail à notre retour en Belgique.

Badiane, Demba et Augustin nous ont été d'un grand secours, en brousse comme à la capitale, par leur disponibilité, leur gentillesse et leur expérience. Nous n'oublions évidemment pas nos compagnons de brousse : Oumar et Mamadou, et les villageois de Donaye, Guia 4 et Ouru Madiou qui nous ont si chaleureusement accueillie.

Et puis un énorme « dieurédiéff » à notre famille africaine, amis du début ou de dernières minutes qui ont permis que ce séjour riche en apprentissage scientifique soit aussi un feu d'artifice d'amitiés et de découvertes culturelles.

Nous remercions l'IRD Dakar pour l'expérience professionnelle irremplaçable que cet institut nous a permis de vivre en mettant à notre disposition des soutiens scientifique et matériel de qualité.

De retour en Europe, nous ne pourrions oublier Messieurs Gérard Bellier et Jean-Pierre Montoroi, chargés de recherches au centre IRD de Bondy, qui ont dirigé nos pas dans des recherches bibliographiques grandement facilitées par leurs conseils. Toujours au sein de l'IRD, nous sommes reconnaissante à Pascal Boivin et Fabienne Favre pour leur serviabilité.

Que notre entourage belge ne se croie pas oublié dans sa discrète et inconditionnelle fidélité. Nous réalisons au fil des expériences la chance d'avoir une famille et des amis tels qu'eux.

Nous tenons aussi à remercier les habitués de la Salle Atlas, avec qui nous avons partagé concentration et découragements dans la bonne humeur.

Nous voudrions terminer en soulignant que malgré les difficultés, notre expérience de vie et de travail au Sénégal seront certainement décisives pour nos choix ultérieurs. Une carrière se construit dès l'Université. Un doigt nous a montré le chemin de notre stage de candidature en Bolivie à l'Ecosse, et de l'Ecosse au Sénégal ; nous l'avons suivi avec enthousiasme jusqu'à l'assumer par choix personnel, fruit d'une maturation intérieure et du hasard (parfois un peu forcé). Alors, nous remercions tous les éléments du puzzle d'avoir été là, au bon endroit, au bon moment.

Le présent travail, nous le dédions à Ahmed Ndiaye, jeune étudiant sénégalais, qui nous a fait réaliser, par sa soif d'apprendre inassouvie, combien étudier dans de bonnes conditions était un privilège.

RÉSUMÉ

Impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques du sol en Moyenne Vallée du Fleuve Sénégal

Florence LANDSBERG

Les propriétés hydrodynamiques de rétention d'eau et de conductivité hydraulique d'un sol dépendent non seulement de la teneur en eau et de la tension appliquée, mais également de la qualité de l'eau, en particulier de la salinité et la teneur en sodium. En effet, une trop forte teneur en sodium par rapport à la concentration en cations divalents et à la teneur totale en sel engendre la déstructuration du sol et la dispersion des minéraux argileux. Ces dégradations structurales affectent les propriétés hydrodynamiques et entraînent des problèmes agronomiques.

Dans le cadre de cette étude, quatre faciès, une eau déminéralisée et trois familles de solutions à SAR et SPAR croissants, ont été infiltrées sur deux sols de la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal, l'un de texture sableuse, l'autre de texture argileuse. Elle a été réalisée dans des conditions insaturées dans une gamme de pF de 0,17 à 0,97. L'infiltration a été suivie dans le temps par infiltrométrie à succion contrôlée et à lecture automatisée. Parallèlement à l'infiltrométrie, les courbes de rétention et de retrait ont été déterminées.

Dans le sol sableux, la conductivité hydraulique à saturation, estimée à l'aide de l'équation de Gardner, varie de $3,85 \cdot 10^{-5}$ et $7,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s alors qu'elle est comprise entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ à $3,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s dans le sol argileux. Aucune tendance particulière ne permet de conclure à un effet de la qualité de l'eau sur l'infiltration cumulée et la conductivité hydraulique. Il en est de même pour la sorptivité et les paramètres de la courbe de rétention et de rétraction, paramètres respectivement proposés par van Genuchten et Braudeau.

Cette absence apparente de résultats est vraisemblablement liée à un protocole expérimental inadéquat et à l'utilisation de modèles trop restrictifs. Quelques pistes de réflexion sur la méthode de terrain et les modèles utilisés sont présentées.

Table des matières

	pages
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME	IV
TABLE DES MATIERES.....	V
Liste des figures.....	VIII
Liste des symboles les plus fréquents	IX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET PROBLEMATIQUE AGRONOMIQUE	
1. RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL	2
A) DÉMOGRAPHIE.....	2
B) ECONOMIE ET AGRICULTURE	2
2. RÉGION D'ÉTUDE : LA MOYENNE VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL	3
A) CONTEXTE BIO-PHYSIQUE	3
<i>A.1 Géographie : le réseau hydrographique du fleuve Sénégal</i>	3
<i>A.2 Géologie et pédologie de la Moyenne Vallée du fleuve</i>	5
<i>A.3 Climat</i>	6
<i>A.4 Végétation</i>	7
B) CONTEXTE SOCIAL	7
C) CONTEXTE AGRONOMIQUE	8
CHAPITRE 2 : SALINISATION ET ALCALINISATION	
1. L'ÉQUILIBRE DE LA CALCITE	10
2. PHYSICO-CHIMIE DU SOL ET DE SA SOLUTION	11
A) DÉFINITIONS ET PROPRIÉTÉS.....	11
<i>A.1 Définitions</i>	11
<i>A.2 Propriétés</i>	12
<i>A.3 Critères de classification</i>	14
B) DESCRIPTION DE L'INTERFACE SOLIDE-SOLUTION DU SOL.....	15
<i>B.1 Charge des minéraux argileux</i>	15
<i>B.2 Interaction argile-solution : théorie de la double couche diffuse de Gouy-Chapman</i>	15

<i>B.3 Interaction entre deux particules d'argile : la théorie DVLO</i>	18
C) CONSÉQUENCES PHYSICO-CHIMIQUES ET AGRONOMIQUES	19
<i>C.1 De la salinisation</i>	19
<i>C.2 De la sodisation</i>	20
3. PRÉVENTION ET RÉHABILITATION	20

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET METHODES

1. MATÉRIAUX	22
A) TYPES DE SOL.....	22
<i>A.1 Guia 4</i>	22
<i>A.2 Ouru Madiou</i>	23
<i>A.3 Donaye</i>	23
B) PRÉSENTATION DES SOLUTIONS	24
C) INFILTROMÉTRIE À SUCCION.....	25
<i>C.1 Mesures</i>	25
<i>C.2 Récolte des données</i>	27
2. MÉTHODE	28
A) MESURES SUR LE TERRAIN	28
<i>A.1 Potentiel de l'eau dans le sol</i>	28
<i>A.2 Dynamique en milieu insaturé</i>	29
B) MESURES EN LABORATOIRE.....	37
<i>B.1 Tensiométrie</i>	38
<i>B.2 Rétractométrie</i>	39
C) EXPÉRIENCE DE TERRAIN.....	40

CHAPITRE 4 : RESULTATS, DISCUSSION ET CONCLUSIONS

1. ANALYSE CHIMIQUE DES SOLS	43
A) DESCRIPTION DES RÉSULTATS D'ANALYSE	43
<i>A.1 ESP</i>	43
<i>A.2 ESPP</i>	44
B) COMMENTAIRES.....	44
<i>B.1 Le taux de saturation</i>	44
<i>B.2 Equilibre entre le complexe d'échange et la solution du sol ?</i>	44
<i>B.3 La relation empirique de Gapon (1933)</i>	45
2.TRAITEMENT DES DONNÉES BRUTES D'INFILTROMÉTRIE	46
A) COURBES D'INFILTRATION	46
<i>A.1 Les courbes d'infiltration cumulée</i>	46
<i>A.2 L'application des modèles déterministes</i>	47

B) GUIA 4	48
3. RÉSULTATS	49
A) INFILTROMÉTRIE	49
A.1 La conductivité hydraulique à saturation, K_s	49
A.2 La sorptivité standard, S	50
B) TENSIOLOGIE.....	51
B.1 α	51
B.2 Le paramètre n	53
C) LA TANGENTE, K_R	54
4. DISCUSSION.....	55
A) INFILTROMÉTRIE	55
A.1 La conductivité hydraulique	55
A.2 La sorptivité	55
B) TENSIOLOGIE.....	56
C) RÉTRACTOMÉTRIE.....	56
5. CONCLUSIONS	56
A) ORGANISATION DES SORTIES DE TERRAIN.....	57
B) LES MODÈLES DÉTERMINISTES.....	57
B.1 La détermination de la sorptivité grâce à l'équation de Philip.....	58
B.2 L'utilisation du modèle de Gardner.....	58
C) PERSPECTIVES.....	59
BIBLIOGRAPHIE.....	61
ANNEXES	65

Liste des figures

Figure 1 : Carte de l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal (Dubresson et al., 1994)	3
Figure 2 : Carte de la vallée et de ses différentes composantes (Boivin et al., 1995)	4
Figure 3 : Région de Podor (Boivin et al., 1995)	5
Figure 4 : Pluviométrie annuelle à Podor (SAED, 1993)	7
Figure 5 : Solubilité de la calcite en fonction de la pression de CO ₂ et du pH (Driessen & Dudal, 1991)	11
Figure 6 : Distribution du potentiel électrique en fonction de la distance (Tan, 1982)	17
Figure 7 : Forces répulsive, attractive et résultante en fonction de l'épaisseur de la double couche ou de la distance interparticulaire (Tan, 1982)	18
Figure 8 : Threshold concentration curve : état des particules en fonction de l'ESP et de la TEC (Quirk & Schofield (1955) dans Moutier, 1996)	19
Figure 9 : Schéma de distribution de la taille des particules dans trois types de sol : argileux, limoneux et sableux (Hillel, 1988)	24
Figure 10 : Infiltromètre à succion à membrane déportée et à suivi automatisé (J-L Maeght, 1998)	26
Figure 11 : Allure générale de la relation K(h) dans deux types de sols (Musy & Soutter, 1991)	31
Figure 12 : Evolution de la sorptivité avec la teneur en eau initiale du sol (Musy & Soutter, 1991)	35
Figure 13 : méthode de la poche plastique (Boivin et al., 1990)	36
Figure 14 : Schéma du dispositif expérimental combiné de rétractométrie et tensiométrie	38
Figure 15 : Interprétation physique des paramètres de van Genuchten (Moutier, 1996)	39
Figure 16: Modèle de Braudeau (Notes de Jean Delarivière)	40
Figure 17 : Courbes d'infiltration du Blanc 1 d'Ouru Madiou	46
Figure 18 : Linéarisation de la courbe d'infiltration cumulée en fonction du temps et détermination de la pente et de l'ordonnée à l'origine dans le cas du Blanc 1 d'Ouru Madiou	47
Figure 19 : K _s en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye	50
Figure 20 : S en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye	51
Figure 21 : α en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye	52
Figure 22 : n en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye	53
Figure 23 : K _r en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye	54

Liste des symboles les plus fréquents

E_c	la conductivité électrique	(mS/cm)
ψ	le potentiel électrique	(Volt)
$1/\kappa$	l'épaisseur de la double couche de Debye	(m)
Z_i	la valence de l'ion	
l	lame d'eau infiltrée	(m)
Ψ_z	le potentiel de gravité	(J/m ³)
Ψ_h	le potentiel de pression	(J/m ³)
Ψ_o	le potentiel osmotique	(J/m ³)
Ψ_g	le potentiel géostatique	(J/m ³)
$\Psi_{p,tot}$	le potentiel total par unité de poids	(m)
H	la charge hydraulique	(m)
h	la tension appliquée exprimée en hauteur d'eau	(m)
θ	la teneur en eau volumique	(m ³ /m ³)
θ_s	la teneur en eau volumique à saturation	(m ³ /m ³)
$K(h)$	la conductivité hydraulique	(m/s)
$K(\theta)$	la conductivité hydraulique	(m/s)
K_s	la conductivité hydraulique à saturation	(m/s)
$C(h)$	la capacité capillaire	(m ⁻¹)
$D(\theta)$	la diffusivité capillaire	(m ² /s)
\rightarrow		
q	la densité de flux surfacique	(m/s)
S	la sorptivité	(m/s ^{1/2})
A	le flux gravitaire	(m/s)
α	paramètre de la courbe de rétention (van Genuchten, 1980)	(m ⁻¹)
n	paramètre de la courbe de rétention (van Genuchten, 1980)	(-)
$K_{rés}$	le retrait résiduel de la courbe de retrait (Braudeau, 1992)	(cm ³ /g)

NB : Les charges sont exprimées en équivalents (éq) et non en moles charges (mole_c)

INTRODUCTION

Introduction

Toutes origines confondues, on estime que 6,5% des terres du globe, soit 9 millions de km², sont déjà affectés par la salinisation, ce pourcentage atteignant 39% dans les zones arides (Cheverry & Bourrié, n.d.).

L'état des lieux des surfaces salines mené sur la base de données GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation) suggère que la salinisation liée aux activités humaines (irrigation, contamination chimique, changement d'occupation du sol, ...), salinisation dite « secondaire », compte pour moins de 10% de toutes les surfaces salines (Cheverry & Bourrié, n.d.). Seulement, par l'extension de l'agriculture, l'irrigation, principale responsable de cette salinisation secondaire, couvre une surface multipliée par 4 depuis 1949, pour atteindre 2,7 millions de km² en 1994. Le problème devient menaçant : la perte de 10 millions d'hectares de terres arables est le tribut annuel à payer par l'agriculture irriguée pour sa pratique ; et près de la moitié de toutes les superficies irriguées sont menacées à long terme par la salinisation (Cheverry & Bourrié, n.d.).

La salinisation secondaire n'est pas un mal actuel. Vers 3.500 A.C., entre le Tigre et l'Euphrate, le rapport blé-orge cultivés était pratiquement de 1 pour 1. Près de 1.000 ans plus tard, le blé moins halotolérant ne représentait plus qu'un sixième de la totalité de la production, pour disparaître totalement vers 1.700 A.C.

A l'échelle du Sénégal, Loyer estimait (1989) à un million d'hectares, c'est-à-dire à 5% du territoire national, la superficie touchée par les sels au sens large. Un effort récent dans l'aménagement de la vallée du fleuve Sénégal met en péril la qualité et la productivité des terres et ce d'autant plus que l'évapotranspiration très élevée n'est pas compensée par une pluviométrie trop faible.

Au sein des travaux menés par le laboratoire d'Agriculture Irriguée Durable de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, ex-ORSTOM), nous avons été associée à une étude sur l'impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques du sol, indices de son état structural. Nous avons quantifié et analysé ces propriétés pour deux sols de la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal et ce par rapport à quatre qualités d'eau d'irrigation.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET PROBLÉMATIQUE AGRONOMIQUE

Chapitre 1 : Contexte environnemental et problématique agronomique

1. République du Sénégal (adapté de Marlier, 1998)

Encadrée par les méridiens de longitude 11°30' et 17°29' Ouest et les parallèles de latitude 12°20' et 16°40' Nord, la République du Sénégal s'étend sur 196.200 km² et constitue, par la presqu'île de Dakar, l'extrême pointe Ouest du continent africain dans l'Océan Atlantique. Son point le plus bas est à 0 mètre, au niveau de l'Océan Atlantique, et son point culminant se situe dans les collines du Fouta Djallon, à une hauteur de 581 m (site internet 1).

A) Démographie

En 1995, la population du Sénégal était estimée à 8,31 millions d'habitants c'est-à-dire une densité moyenne de 43 habitants au km² et le taux de croissance annuel de la population était de 3,12 % (site internet 2). Compte tenu du phénomène de concentration urbaine, les zones de forte densité sont localisées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, dans le bassin arachidier et en Basse-Casamance.

Plusieurs communautés habitent le pays. La population est à 36% Wolof, 17% Peul, 17% Sérère, 9% Toucouleur, 9% Diola, 9% Mandingue et 3% autre (libanaise, européenne, ...) (site internet 2). En plus d'un fort sentiment d'appartenance à une ethnie, il faut aussi souligner l'impact de la religion et son omniprésence : les sénégalais sont à 92% musulmans, à 6% de religion traditionnelle et à 2% chrétiens (site internet 2).

B) Economie et agriculture

En 1994, le PNB s'élevait à 3,8 milliards de dollars, soit un revenu moyen par habitant de 470 dollars. La balance du commerce extérieur est largement déficitaire. Le pétrole brut, les denrées alimentaires de base représentent la moitié des importations. L'arachide, le phosphate, le pétrole raffiné, le poisson et les textiles sont les produits les plus exportés.

Les deux-tiers de la population pratiquent l'agriculture et l'élevage. Les terres arables représentent 27% de la superficie. Elles s'épuisent et sont victimes des sécheresses qui affectent le Sahel depuis les années '70. L'économie nationale, y compris le secteur industriel et les échanges extérieurs, a pour base

essentielle la production agricole. Les principales cultures vivrières sont les céréales (mil et sorgho) et le riz. Ensuite viennent le maïs, le niébé et le manioc. Les cultures maraîchères de saison sèche se sont aussi répandues. La culture marchande fondamentale est l'arachide. La culture du coton a également été mise en place depuis 1965.

2. Région d'étude : la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal

A) Contexte bio-physique

A.1 Géographie : le réseau hydrographique du fleuve Sénégal

Prenant naissance dans le massif du Fouta Djalon situé en Guinée Conakry, le fleuve recueille deux rivières, le Bafing et le Bakoy, qui convergent au Mali (Figure 1). A cheval sur les longitudes 12° et 16°30' Ouest et les latitudes 14°40' et 16°40' Nord, le fleuve Sénégal arrose un bassin de 450.000 km² et traverse plusieurs états : Guinée, Mali, Mauritanie et Sénégal. Son cours s'étend sur 1.640 kilomètres, dont près de 900 en tant que frontière entre le Sénégal et la Mauritanie, avant de se jeter dans l'Océan au niveau de Saint-Louis.

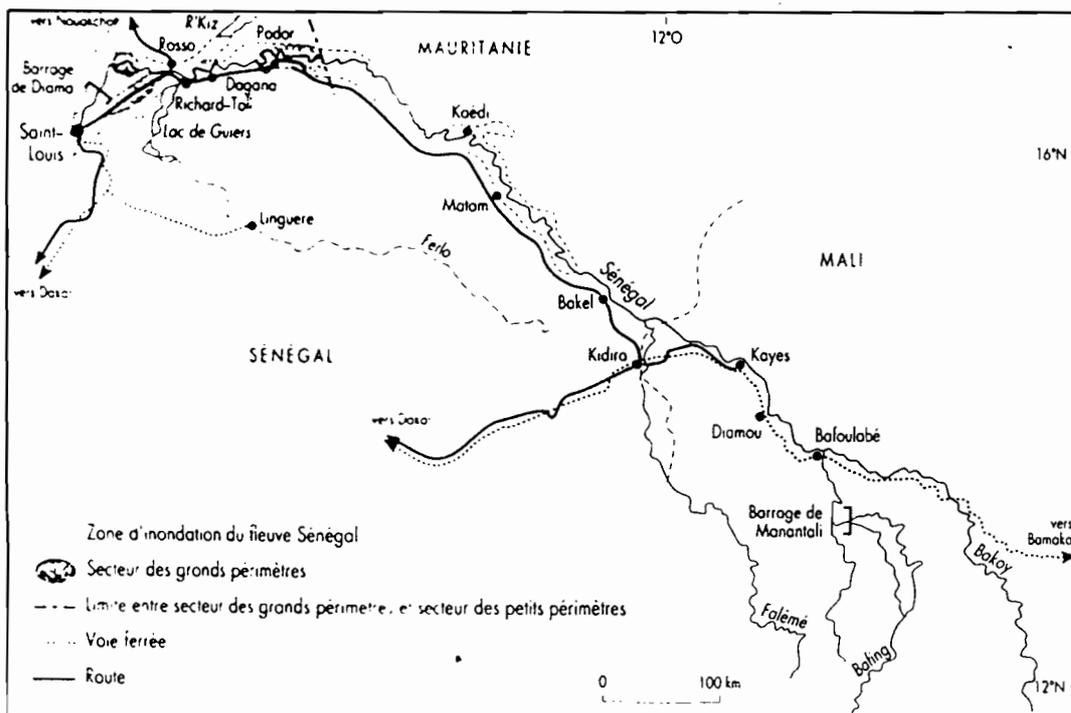


Figure 1 : Carte de l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal (Dubresson et al., 1994)

Avant la construction des barrages, le régime hydrique du fleuve dépendait essentiellement des variations climatiques caractérisant son bassin versant en Guinée tropicale. Pendant les périodes de hautes eaux, le fleuve débordait sur 15 à 20 kilomètres en fertilisant la vallée alluviale. Pour éviter les

désavantages des phénomènes de crue et la remontée de la langue salée, la pente du fleuve n'étant que de 0.003% (Programme Equesen, 1993), deux barrages ont été construits (Figure 1). Le barrage anti-sel se situe à Maka-Diama (1986) et rehausse, tout en empêchant une intrusion océanique, le niveau d'eau pour ainsi faciliter la prise d'eau d'irrigation. Le barrage de régulation de débit se situe à Manantali (1988), au Mali. Ce dernier fut conçu pour (1) permettre la production d'électricité (idéalement 800 MWh/an), (2) la mise en place de cultures irriguées (375.000 ha étaient prévus mais 60.000 ha seulement réalisés en 1994 (Dubresson *et al.*, 1994)), (3) la navigation fluviale jusqu'à Kayes et (4) l'approvisionnement en eau potable de Dakar et Nouakchott.

Le bassin principal du fleuve est habituellement sectionné en trois parties (Figure 2) avec la Moyenne Vallée aval reprise entre Kaedi et Richard-Toll. Notre région d'étude étant concentrée aux environs de la ville de Podor.

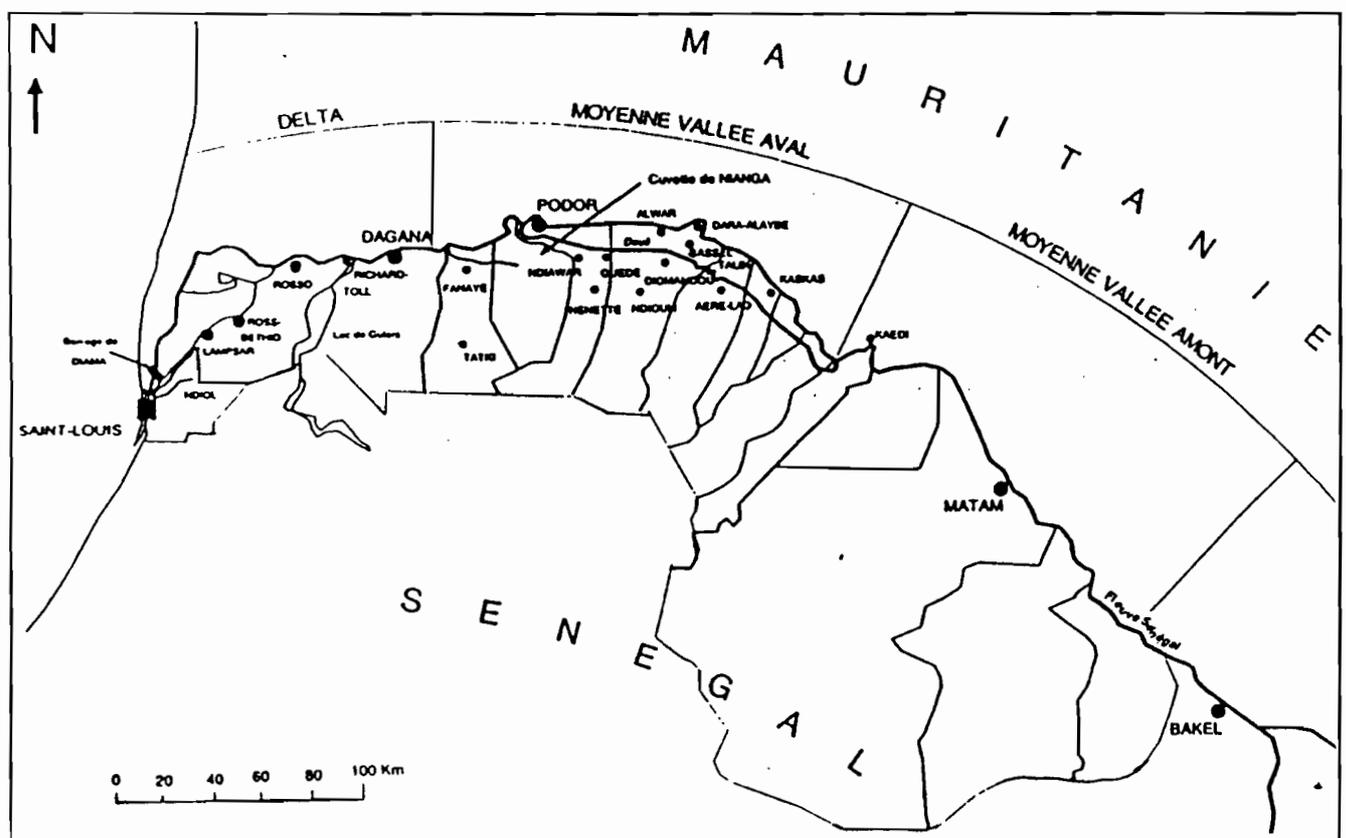


Figure 2 : Carte de la vallée et de ses différentes composantes (Boivin *et al.*, 1995)

Dans la région de Podor (Figure 3), à côté des petits marigots et chenaux, les principaux cours d'eau secondaires sont :

- le marigot du Doué, un défluent et affluent permanent du fleuve Sénégal, qui délimite la zone dite « Ile-à-Morphil » ;
- le Wali Diala et le Nmardé, deux défluents temporaires qui traversent la cuvette de Nianga ;
- le Ngalenka, un affluent fossile dont le lit est en train d'être recreusé pour sa remise en eau.

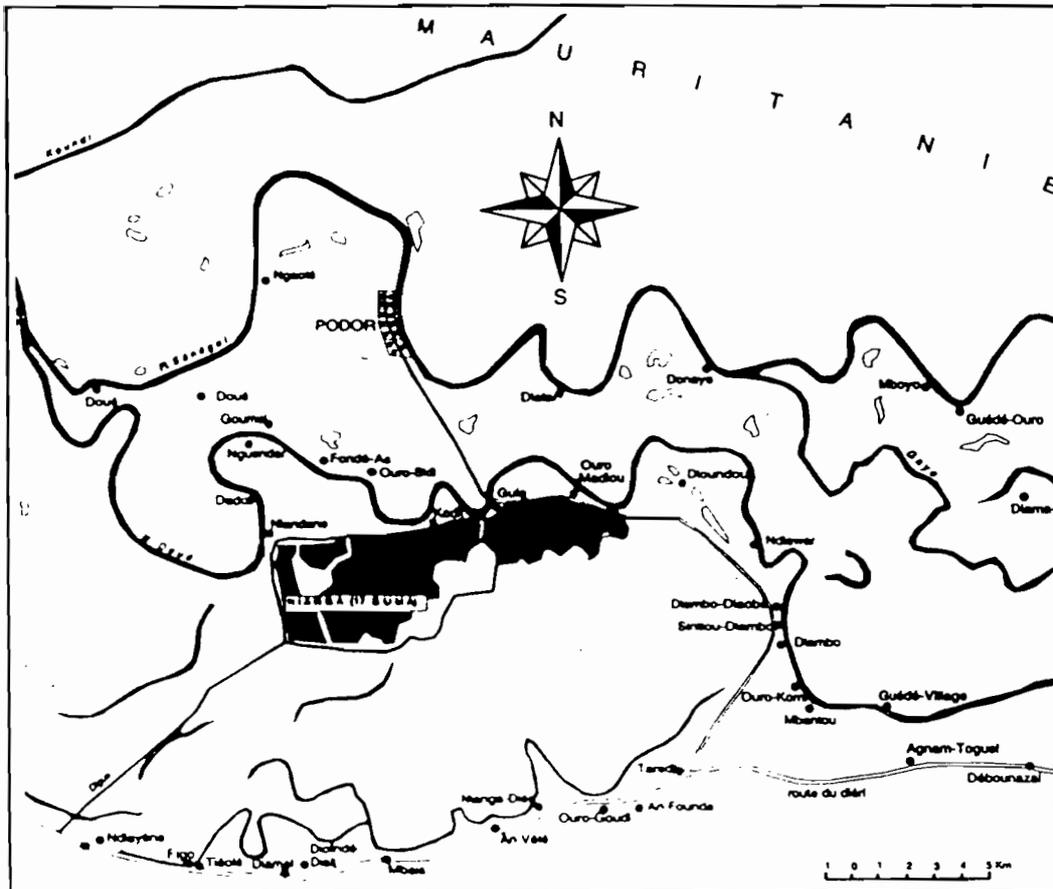


Figure 3 : Région de Podor (Boivin et al., 1995)

A.2 Géologie et pédologie de la Moyenne Vallée du fleuve

A.2.1 Géologie (extrait de Boivin et al., 1998)

La dernière transgression (6.000 AC) a permis au golfe marin de remonter à l'intérieur du pays et d'y placer des sédiments sablo-limoneux et des sels (Michel, 1973). Une mangrove littorale s'est développée, puis des sédiments fluviaux ont été déposés. En raison de la très faible pente, le fleuve a un parcours sinueux et se divise en très nombreux bras. Les différents bras ou marigots ont édifiés des bourrelets de berge de texture argilo-sablo-limoneuse. Des cuvettes de décantation des eaux de crue se sont formées et présentent des formations argileuses à caractères verticaux prononcés. Ces alluvions fluviales et fluvio-marines récentes sont l'objet d'aménagement hydro-agricoles visant à développer les productions irriguées.

A.2.2 Pédologie

En reprenant l'étude bibliographique de Rokhaya Samba (1998) sur les caractéristiques des sols de cette partie de la vallée, il est établi que :

- les sols argileux (plus de 45% d'argile) sont les plus représentés (environ 75% des surfaces cultivées en Moyenne Vallée) (de Poitevin, 1993) ;
- les sols à dominante sablo-limoneuse contiennent souvent une proportion non négligeable d'argiles (25% environ), sont compacts, très peu perméables et donc hydromorphes ;
- la fraction argileuse est composée à 60% d'argiles gonflantes (smectite et interstratifiés), ce qui explique le comportement de gonflement-retrait observé au contact de l'eau et l'importance des caractères vertiques des sols de cuvette ;
- tous les sols manifestent une certaine instabilité structurale, amplifiée par la submersion ou la mise en culture ;
- à une profondeur moyenne de l'ordre de 1 mètre, se trouve sous les horizons argileux une terrasse marine constituée de sables fins datant du Nouakchottien (Michel, 1973) ;
- sur le plan chimique, le complexe d'échange des argiles est essentiellement saturé par du calcium et du magnésium.

A.3 Climat

La Moyenne Vallée est couverte par le secteur sahélo-saharien à deux saisons très contrastées :

- une courte saison des pluies de 2 à 3 mois caractérisée par des pluviométries de moins de 400 mm (Figure 4) ;
- une très longue saison sèche de 9 à 10 mois ayant un indice xéothermique de 290 jours sans pluie entre octobre et juillet (selon le diagramme de Gaussen).

Mais ce climat, à l'instar de toutes les régions sahéliennes, tend ces dernières années vers une aridité plus marquée, marquée non seulement par un rétrécissement de la saison pluvieuse mais aussi par un déficit hydrique croissant.

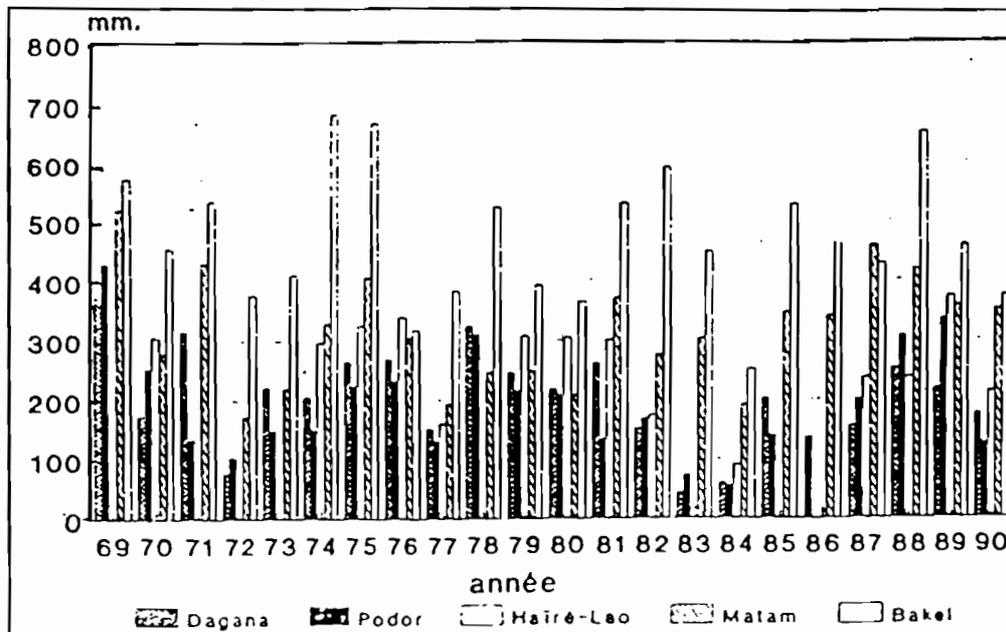


Figure 4 : Pluviométrie annuelle à Podor (SAED, 1993)

A.4 Végétation (largement inspiré de Loyer, 1989)

A l'extérieur de la zone inondable, occupant la bordure du lit majeur, la couverture végétale naturelle des sols de la moyenne vallée est caractérisée par un peuplement arboré et arbustif clair, typique de la zone sahélo-soudanienne (*Acacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, ...).

Dans la vallée proprement dite, un peuplement hydrophile en voie de dégradation accélérée, occupe la zone alluviale basse (*Acacia nilotica*, ...).

De moins en moins résistante au stress hydrique et à la présence de sels dans le sol, la séquence écologique sera, des abords du fleuve à l'intérieur du pays : palétuviers - *Tamanis senegalensis* - *Prosopis juliflora* - *Acacia senegal* pour les espèces arbustives et arborées ; et *Sueda fruticosa*, *Arthrocnemum glaucum*, *Philoxyrus vermicularis* - *Borreria verticillata*, *Indigofera oblongifolia* pour les espèces herbacées.

B) Contexte social (extrait de Boivin et al., 1995)

La Moyenne Vallée du fleuve est majoritairement habitée par les Haalpularen, c'est-à-dire « ceux qui parlent le pulaar ». Leur société s'est construite autour d'une écologie politique du territoire qui gère les complémentarités et concurrences entre les modes d'exploitation du milieu propre aux différents groupes sociaux – agriculteurs, pêcheurs, éleveurs – qui se partageaient l'espace de la vallée (Boutillier et Shmitz, 1987). Ainsi, les éleveurs laissent leurs terres aux soins des agriculteurs pendant leur migration saisonnière. La crise agro-climatique des années '70 a induit une révision des rôles attribués. Parallèlement à l'évolution de l'organisation traditionnelle, les mouvements migratoires entamés dans les

années '60 en tant que régulation de l'économie paysanne ont été amplifiés. La mise en place de périmètres irrigués implique des aménagements concrets faisant intervenir différentes structures juridiques : droit de propriété, d'usage, ... Eleveurs et agriculteurs ont dû se réorganiser autour d'aménagements nouveaux et faire face à la nouvelle classe de travailleurs que sont les migrants.

Les Toucouleurs, ordinairement agriculteurs, ont conservé leur mode de vie mais doivent dorénavant gérer les financements et le matériel commun, ce qui implique une interdépendance nouvelle. Pour les Peuls, originellement pasteurs, une minorité a gardé son statut itinérant, une autre minorité a complètement abandonné le métier ancestral et la majorité a combiné les deux types d'activité en pratiquant l'agro-pastoralisme.

Les tensions inhérentes à la cohabitation obligée de populations aux habitudes différentes et à l'unicité de leur source de revenu sont perceptibles dans les villages et doivent être prises en compte dans l'étude de la région

C) Contexte agronomique (adapté de Boivin *et al.*, 1995)

Les sols de la région d'étude sont aménagés en périmètres irrigués dont la superficie varie de 10 à 2.000 hectares. Les infrastructures réalisées sont très variables. On distingue (i) les Périmètres Irrigués Villageois (PIV) et les périmètres privés assimilés, (ii) les Périmètres Intermédiaires (IT) et (iii) les grands aménagements. Les PIV sont de petits périmètres (10 à 50 ha) réalisés très sommairement. Ils sont mal planés, mal endigués (débordements fréquents) et ne disposent pas d'infrastructure de drainage. Les IT sont plus grands (50 à 200 ha). Ils sont bien planés, protégés par une digue de ceinture, mais non drainés en général. Les grands aménagements disposent d'infrastructures complètes, y compris un réseau de drains hiérarchisés.

La plupart des périmètres se situe sur des sols contenant plus de 40% d'argiles et 90% des surfaces annuelles sont cultivées en riziculture. Il s'agit d'une culture par submersion : une lame d'eau de 10 à 15 cm est maintenue pendant 1,5 mois par cycle de riz, deux fois par an en cas de double riziculture.

L'eau d'irrigation est pompée dans le fleuve dont l'eau semble de qualité constante. Très peu minéralisée (58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductivité électrique), de pH neutre, elle a un SAR inférieur à 1. Seulement d'influence continentale, sa concentration par évaporation conduit à une élévation de pH par accumulation résiduelle de carbonates et à celle du SAR par contrôle du calcium. Etant donné la pratique cumulative de l'irrigation, les eaux d'irrigation peuvent dans les conditions naturelles se concentrer d'un facteur de l'ordre de 2.000 et donc des problèmes d'excès de sels sont à craindre.

Les propriétés de l'eau d'irrigation et du substrat géologique sont propices au développement de sols impropres à toutes cultures si eau et sol ne sont pas gérés par les acteurs du développement de la région.

C'est dans ce cadre multi-disciplinaire et multi-acteur que s'est développée la collaboration entre l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherche Agricole) et l'IRD pour orienter l'évolution des systèmes de culture.

Dans le cadre du programme « Fleuve Sénégal », la performance actuelle de l'irrigation et les problématiques sociales et environnementales mises en jeu sont évaluées pour proposer une évolution favorable vers une diversification et une meilleure rentabilité (Boivin *et al.*, 1995). L'ensemble de la moyenne vallée est représenté par la région de Podor. Pendant les premières années de recherche (1991-94), un inventaire général a été fait dans chacune des disciplines du programme (démographie, géographie, sociologie, économie, agronomie, hydrologie et pédologie).

Au département de Pédologie de l'IRD, le projet Agriculture Irriguée Durable (AID) vise à la description du comportement du sol et des transferts hydriques et salins sous la pression de l'intensification de la culture, l'augmentation des surfaces irriguées et les perturbations induites par les deux barrages.

Ces dernières années, la recherche a porté sur cinq points :

- caractérisation physique des sols
- réaction des argiles et de leur structure au contact de solutions salines
- poursuite de bilans hydro-salins sous culture
- étude de la structure des nappes aquifères à l'aide de méthodes de prospection électrique
- étude de la répartition de la salinité dans les sols non aménagés

Etant donné les contextes environnementaux, sociaux et agronomiques brièvement présentés, nous allons tenter, dans ce travail de fin d'étude, de déterminer quel est l'impact, dans la Moyenne Vallée du Fleuve Sénégal, de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques du sol.

Chapitre 2 : Salinisation et alcalinisation des sols

Ce chapitre présente l'origine des problèmes dus à la salinisation et à l'alcalinisation par la description de la physico-chimie du sol et de sa solution. Vu que nous savons que l'eau d'irrigation pompée du fleuve accumule des carbonates lors de son évaporation dans les canaux, nous allons rappeler les conditions de formation de la calcite, importante régulatrice du stock d'ions calcium en solution. Nous terminerons en abordant les mesures de prévention et de réhabilitation des sols dégradés par ces phénomènes.

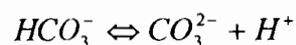
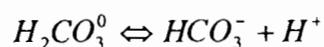
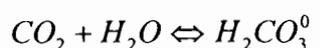
1. L'équilibre de la calcite

L'équilibre minéral-espèces en solution de la calcite est :



Cet équilibre est donc gouverné par trois facteurs :

- la concentration d'ions calcium dans la solution du sol ;
- le pH de la solution du sol ;
- la pression partielle en gaz carbonique à partir de laquelle l'ion carbonate est formé :



L'équation globale est donc :



Compte tenu de la valeur de la constante de la constante d'équilibre en conditions standards (sous 1 atm et à 25°C), l'expression logarithmique de l'équation (2) s'écrit comme suit (Figure 5) :

$$\log[Ca^{2+}] + pH + \log pCO_2 = 9.76 \quad (3)$$

(3)

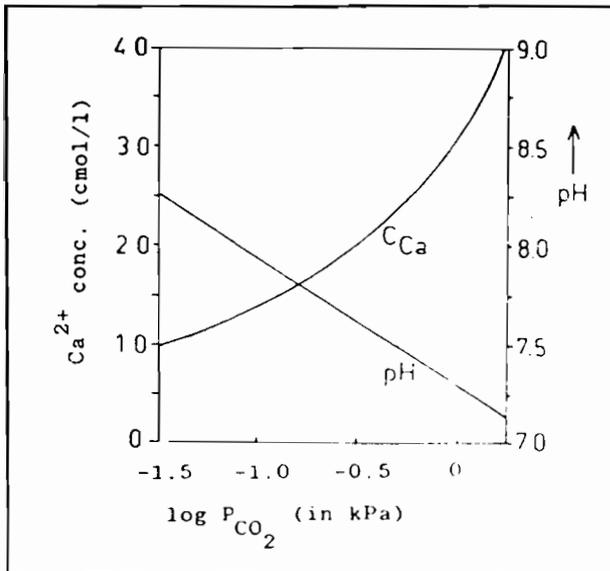


Figure 5 : Solubilité de la calcite en fonction de la pression de CO₂ et du pH (Driessen & Dudal, 1991)

2. Physico-chimie du sol et de sa solution

A) Définitions et propriétés

A.1 Définitions (Lozet, 1997)

- Salinisation : « ensemble des mécanismes suivant lesquels le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert, à un degré plus ou moins fort, le caractère salé. La salinisation se réalise principalement dans les régions semi-arides et arides et dans les zones côtières ou déprimées dans lesquelles la teneur en argile est assez élevée et la perméabilité est faible, ce qui réduit le lessivage. Les sulfates et les chlorures sont les sels dominants alors que les nitrates et borates sont beaucoup plus rares. »

- Alcalinisation : « processus par lequel la teneur en sodium échangeable d'un sol augmente par fixation sur le complexe colloïdal : le sel Na₂CO₃ étant beaucoup plus soluble que les carbonates de calcium et magnésium, les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ précipitent avant l'ion Na⁺ de sorte que celui-ci peut se fixer sur le complexe colloïdal. Englobe les termes sodisation et alcalisation. »

- Sodisation : « ensemble des mécanismes suivant lesquels, au contact de solutions de sels neutres sodiques, le sol s'enrichit en sodium échangeable sans que ce phénomène

n'entraîne, de manière marquée, une dégradation de l'état structural ni une forte élévation du pH. »

- Alcalisation : « type particulier de sodisation qui s'accompagne, de manière permanente, par une dégradation marquée de l'état structural, en relation fréquente avec l'un ou plusieurs caractères suivants :
 - Forte baisse de la salinité
 - Forte élévation du pH (pH $1/_{2,5}$ pouvant avoisiner 10)
 - Apparition des sels de la série alcaline (carbonates mono et bisodiques). Dans ce cas, le sol acquiert le caractère à alcalis. »

A.2 Propriétés

Nous allons définir quelques propriétés majeures du système à l'interface solide-solution mais nous rappelons au lecteur que, par commodité, les charges sont exprimées dans les anciennes unités du SI, les équivalents (éq) en lieu et place des unités SI actuelles, les moles charges (mole_c).

- CEC (Cation Exchange Capacity) : capacité du sol à adsorber des cations ; celle-ci se mesure par la quantité de cations adsorbés par le complexe d'échange, à un pH donné, qu'il convient de préciser.

Pour des sols alcalins (Sposito, 1989), cette CEC vaut :

$$\text{CEC} = \text{Ca}_{\text{échangeable}} + \text{Mg}_{\text{échangeable}} + \text{Na}_{\text{échangeable}} + \text{K}_{\text{échangeable}} \quad (\text{még}/100\text{g}) \quad (4)$$

avec les ions exprimés en még/100g

- ESR (Sodium Exchangeable Ratio) et ESP (Exchangeable Sodium Percentage) : fraction de la CEC occupée par du sodium échangeable

$$\text{ESR} = (\text{Na}_{\text{échangeable}}) / \text{CEC} \quad (-) \quad (5)$$

avec (), la concentration (még/100g)

$$\text{ESP} = \text{ESR} * 100 \quad (\%) \quad (6)$$

- ESPP (Exchangeable Sodium and Potassium Percentage) : fraction de la CEC occupée par le sodium et le potassium échangeables

$$ESPP = (Na_{\text{échangeable}}) + (K_{\text{échangeable}})/CEC * 100 \quad (\%) \quad (7)$$

avec (), la concentration (mécq/100g)

□ SAR (Sodium Adsorption Ratio) : teneur de l'eau en sodium par rapport aux teneurs en calcium et magnésium

$$SAR = \frac{|Na^+|}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}} \quad (\text{mmole/l})^{1/2} \quad (8)$$

avec [], la concentration (mécq/l)

La relation entre le SAR et l'ESR découle de la réaction d'équilibre entre les espèces adsorbées sur le complexe d'échange et les ions en solution (Gapon, 1933). Ainsi, en considérant l'échange calcium-sodium, les ions potassium et magnésium ainsi négligés, on a :



avec Na-Sol, un équivalent d'échangeur saturé en sodium

Ca_{1/2}-Sol, un équivalent d'échangeur saturé en calcium

d'où l'on exprime le coefficient de Gapon, K_G (Tan, 1982) par le rapport suivant :

$$K_G = \frac{[Na - sol] * \sqrt{[Ca^{2+}]}}{[Ca - sol] * (Na^+)} \quad (\text{mécq/l})^{-1/2} \quad (10)$$

c'est-à-dire

$$K_G = \frac{[Na - sol]}{[Ca - sol]} * \frac{1}{SAR} \quad (\text{mécq/l})^{-1/2} \quad (11)$$

avec (), activité en solution

(mécq/l)

[], concentration des ions adsorbés

(mécq/100g)

Ainsi, en considérant exclusivement l'échange avec l'ion sodium et le pool des ions calciques et magnésiens, la relation entre le SAR et l'ESR est donnée par la relation empirique de Gapon :

$$ESR = K_G * SAR_{\text{solution drainante}} \quad (-) \quad (12)$$

Dans la littérature, sont reprises des relations entre le SAR et l'ESP, comme celle de l'USDA (1969) déterminée sur des sols de l'ouest des USA et validées en de nombreux autres endroits :

$$ESP = 1.1475 SAR + 1.26 \quad r = 92,3\% \quad (13)$$

ou plus localement établie, celle de Moutier (1996), déterminée sur les sols de Béthonvilliers :

$$ESP = 2,8375 SAR - 2,6243 \quad r = 99,4\% \quad (14)$$

□ SPAR, (Sodium and Potassium Adsorption Ratio) : teneur de l'eau en sodium et potassium par rapport aux teneurs en calcium et potassium

$$SPAR = \frac{[Na^+] + [K^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}} \quad (\text{mmole/l})^{1/2} \quad (15)$$

avec [], la concentration (még/l)

A.3 Critères de classification (Tan, 1982)

Comme tous les sols salés ne sont pas alcalins, il a fallu trouver un autre indicateur que le pH pour les caractériser. L'US Salinity Laboratory (1954) a proposé d'utiliser les critères de concentration en sels solubles et la teneur en sodium échangeable. Le premier est mesuré par la conductivité électrique (ECe), exprimé en millisiemens par centimètre (mS/cm) et le deuxième par l'ESP (%). Sur base de ces deux critères, trois groupes ont été définis :

Type de sol	ECe (mS/cm) à 25°C	ESP (%)	Caractéristiques du système colloïdal
salin	> 4	< 15	Floculation pH < 8.5
salin et alcalin	> 4	> 15	Floculation si excès de sels pH ≤ 8.5 si excès de sels
sodique	< 4	> 15	Dispersion 8.5 ≤ pH ≤ 10

Le choix d'une valeur seuil de 4 mS/cm pour la conductivité électrique fait référence à la valeur de conductivité électrique au-delà de laquelle la croissance végétale commence à diminuer. Entre 2 et 4 mS/cm, seules les plantes très sensibles subissent des dommages à cause de la concentration en sels. Au delà de 4 mS/cm, beaucoup de plantes voient leur croissance réduite. Au delà de 8 mS/cm, seules

les plantes tolérantes supportent les conditions du milieu et au delà de 16 mS/cm, seules les plantes très tolérantes survivent (Richards, 1954).

B) Description de l'interface solide-solution du sol

Le sol est un ensemble triphasique constitué d'une phase liquide (la solution du sol), gazeuse (l'atmosphère du sol) et solide (les constituants minéraux). Chacune de ces composantes est en relation étroite avec les deux autres. Nous allons dans ce point décrire l'interface solide-liquide, plus particulièrement l'interaction argile-solution du sol et l'impact de l'ion sodium sur cette surface argileuse.

B.1 Charge des minéraux argileux

La plupart des minéraux argileux (minéraux de taille inférieure à 2 μm (USDA, 1969)) font partie du groupe des phyllosilicates. Par abus de langage, les termes « minéraux argileux » et « phyllosilicates » sont pris l'un pour l'autre.

Les minéraux argileux sont des constituants porteurs de charges permanentes et variables. Les premières proviennent des substitutions isomorphiques dans la structure cristalline du minéral (un ion Si^{4+} remplacé par un ion Al^{3+}) ; elles ne varient pas en fonction des propriétés de la solution. Les deuxièmes sont conditionnées par les réactions acide-base à la surface des argiles et sont donc dépendantes du pH et de la force ionique de la solution d'équilibre. Généralement, aux valeurs de pH usuelles, la surface des argiles porte une charge résultante négative. La charge négative superficielle est compensée par des cations, dits « échangeables ».

B.2 Interaction argile-solution : théorie de la double couche diffuse de Gouy-Chapman (Tan, 1982)

La distribution des cations dans l'environnement des surfaces chargées résulte de deux forces antagonistes : l'attraction électrostatique et les forces d'agitation thermique qui tendent à uniformiser la répartition des cations dans l'espace. Le modèle de la double couche diffuse est basé sur cet équilibre : l'attraction électrostatique provoque un gradient de concentration entre la solution et la surface, ce gradient générant à son tour une force de diffusion en sens inverse.

Ce modèle postule que, tout en respectant l'électroneutralité, la distribution des ions induite par le potentiel électrique de surface suit l'équation de Boltzmann et que ce potentiel électrique ψ est décrit par l'équation de Poisson.

La théorie de la double couche diffuse dérive donc de trois équations fondamentales :

B.2.1 Le principe d'électroneutralité

L'ensemble « complexe d'échange-double couche diffuse » doit être de charge résultante nulle. Ce principe d'électroneutralité s'énonce mathématiquement par :

$$\sigma = - \int_0^{\infty} \rho dx \quad (16)$$

avec σ , la densité superficielle de charge (charge/m²)
 ρ , la densité spatiale de charge en x (charge/m³)
 x , la distance entre la surface chargée et l'ion (m)

B.2.2 L'équation de Maxwell-Boltzmann

Si la charge négative est considérée comme également distribuée sur la surface, la distribution des ions dans la phase liquide suit l'équation de Boltzmann :

$$C_x = C_{\infty} \exp\left(\frac{-Z\mathcal{F}\psi_x}{RT}\right) \quad (17)$$

avec C_x , la concentration de cations à une distance x de la surface (ion-g/l)
 C_{∞} , la concentration dans la solution libre (ion-gramme/l)
 Z , la valence
 ψ , le potentiel électrique (Volt)
 R , constante des gaz (8,314 J/(mole*K))
 T , température absolue (298 K)
 \mathcal{F} , la constante de Faraday (96,5 C/Eq)

B.2.3 L'équation de Poisson

Le potentiel électrique initial de la surface colloïdale est maximum au niveau de cette surface et décroît exponentiellement avec la distance (Figure 6) :

$$\psi_x = \psi_0 \exp(-\kappa x) \quad (\text{Volts}) \quad (18)$$

avec ψ_x , le potentiel électrique à une distance x (Volts)
 ψ_0 , le potentiel de surface (Volts)
 κ , une constante (m⁻¹)

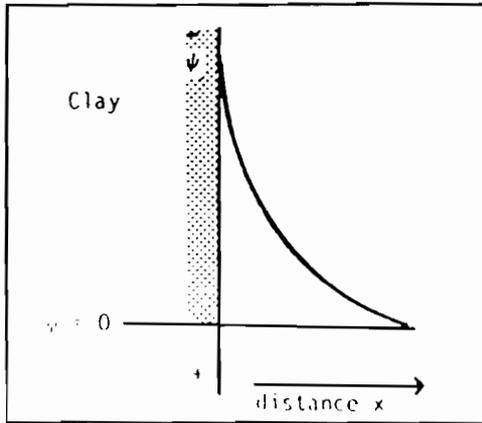


Figure 6 : Distribution du potentiel électrique en fonction de la distance (Tan, 1982)

La constante κ est associée à la concentration, la valence de l'ion, la constante diélectrique et la température :

$$\frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0 RT}{2(N_a q_e)^2 1000 I_s}} \quad (\text{m}) \quad (19)$$

avec $1/\kappa$, l'épaisseur de la double couche de Debye	(m)
ϵ_r , la constante diélectrique du milieu	(80 pour l'eau)
ϵ_0 , la permittivité du vide	($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
R , constante des gaz	(8.314 J/(mole*K))
T , température absolue	(298 K)
N_a , nombre d'Avogadro	($6 \cdot 10^{23}$ mole ⁻¹)
q_e , charge de l'électron	($1.6 \cdot 10^{-19}$ C)
I_s , la force ionique	(mole/l)

$$I_s = 0.5 \sum C_i Z_i^2 \quad (\text{mole/l}) \quad (20)$$

avec C_i , la concentration dans la solution libre (mole/l)

Z_i , la valence de l'ion

Effet de la concentration des électrolytes sur la double couche diffuse

L'augmentation de la concentration en ions correspond donc à une augmentation de cations. Ceux-ci, plus nombreux, réduisent le gradient de potentiel à l'interface solution-solide. Ainsi la tendance des cations à diffuser diminue, d'où une diminution de l'épaisseur de la double couche.

Effet de la valence des ions sur la double couche diffuse

Etant donné que la tendance des ions à diffuser est décroissante dans l'ordre mono, di et trivalent, les ions mono, di et trivalents produisent des couches d'épaisseur décroissante.

B.3 Interaction entre deux particules d'argile : la théorie DVLO

La théorie DVLO décrit quantitativement les interactions entre particules argileuses. Le concept de base est qu'il y a, d'une part, répulsion mutuelle à cause de la superposition des deux doubles couches diffuses et, d'autre part, attraction à cause des forces de Van der Waals.

Les forces répulsives augmentent avec l'épaisseur de la couche diffuse alors que les forces attractives (Van der Waals) diminuent avec le carré de la distance interparticulaire, ce qui restreint l'importance de ces forces attractives aux particules voisines.

L'état dispersé ou floculé des argiles est fonction de l'équilibre atteint entre les forces résultantes de répulsion et d'attraction (Figure 7). Ainsi les particules sont floculées seulement si la couche diffuse est assez mince pour que les forces de Van der Waals dominent les forces répulsives. A moins de 20Å entre les particules, les forces de Van der Waals dominent et les argiles floculent (Tan, 1982). Au-delà, les forces répulsives l'emportent et les argiles sont dispersées.

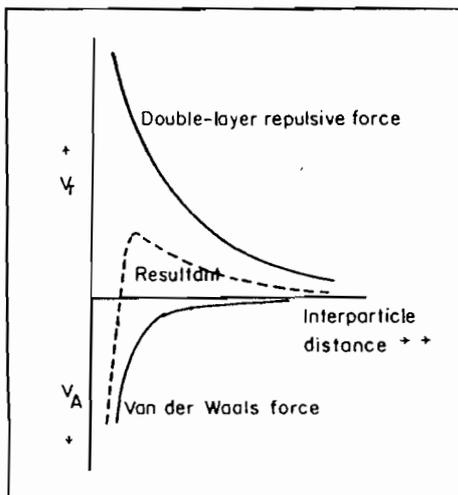


Figure 7 : Forces répulsive, attractive et résultante en fonction de l'épaisseur de la double couche ou de la distance interparticulaire (Tan, 1982)

Vu l'interaction argile-solution et la théorie DVLO, la peptisation ou dispersion peut avoir lieu pour n'importe quel SAR pour peu que la concentration en sels soit sous la Concentration Critique de Floculation (CFC) (Figure 8). Cette CFC est définie comme la concentration minimale d'électrolytes nécessaire pour floculer une suspension colloïdale donnée, dans un temps fixé par l'expérimentateur. Si

la concentration en sels est supérieure à la CFC, les forces attractives domineront et les argiles flocculeront.

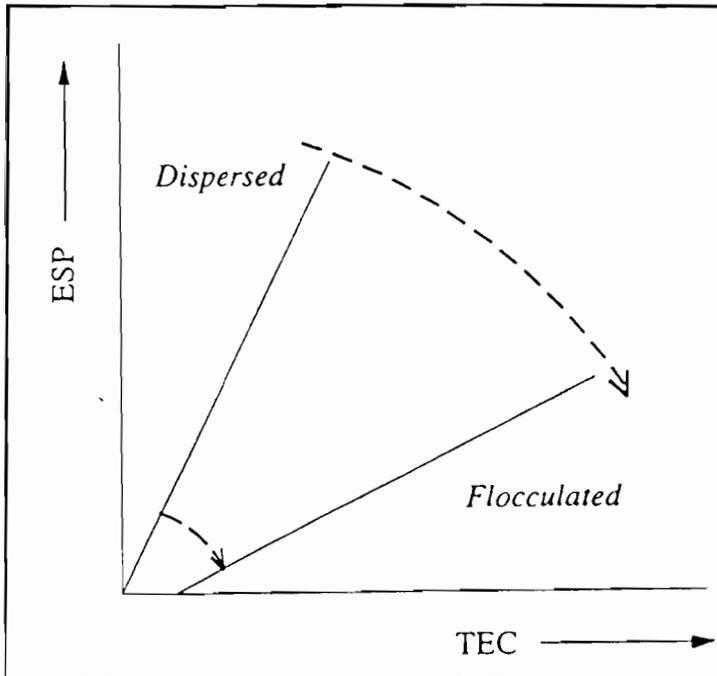


Figure 8 : Threshold concentration curve : état des particules en fonction de l'ESP et de la TEC (Quirk et Schofield (1955) dans Moutier, 1996)

Intermédiaire entre la flocculation et la peptisation, le gonflement de la structure argileuse est l'augmentation de son volume due à une adsorption d'eau (Lozet, 1997). Ce phénomène se rencontre quand le potentiel chimique de l'eau de la solution est supérieur à celui de la solution interparticulaire, c'est-à-dire soit que le contenu en eau augmente soit que la concentration en électrolytes de la solution diminue. Comme le potentiel total de particules argileuses dans une solution d'électrolytes dépend de la densité superficielle de charge de la particule, de la concentration de la solution et de la valence des ions, le gonflement est fondamentalement dépendant de ces trois caractéristiques. C'est ainsi que, vu leur capacité cationique respective (80-120, 5-15 et 10-40 méq/100g) et leur surface spécifique respective (600-800, 10-20 et 70-120 m²/g) (Chamayou & Legros, 1989), la smectite présente ce gonflement plus fort que la kaolinite ou l'illite (Iwata and Tabushi, 1988).

C) Conséquences physico-chimiques et agronomiques (inspiré de Black, 1968)

C.1 De la salinisation

L'un des effets négatifs de la salinisation tient à l'augmentation du potentiel osmotique de la solution du sol induite par l'augmentation de la teneur en sel. La capacité d'adaptation quant à la régulation du potentiel interne en fonction du potentiel de la solution est une caractéristique propre à chaque espèce

ou variété. Deuxièmement, en augmentant, la concentration peut dépasser le seuil de toxicité tolérable, seuil qui est variable d'une plante à l'autre, en fonction de l'ion concerné.

Enfin, les éventuels changements de pH peuvent rendre le sol infertile, c'est-à-dire inapte à la croissance végétale. Cette action du pH peut être directe ou indirecte, par exemple en provoquant des carences en ions dont la solubilité est fonction du pH. Cela peut être le cas pour le phosphore, le fer et le zinc.

C.2 De la sodisation

En nutrition végétale, des déficiences en Ca et Mg peuvent être induites par la précipitation de carbonates à partir des pH 7-8 et vu l'adsorption non sélective de sodium, il y a un excès relatif de l'ion sodium dans les sols à ESP élevé et donc une adsorption plus importante par les racines.

Néanmoins, l'influence fondamentale du Na échangeable est celle qu'il exerce sur les propriétés physiques des sols à cause des forces d'attraction et de répulsion respectives des ions sodium et calcium. Comme l'épaisseur de la double couche diffuse est plus épaisse en présence de sodium, l'ion sodium crée un environnement plus propice à la peptisation.

Cette peptisation des argiles, susceptibles de migrations ultérieures au sein d'un milieu poreux, affecte les propriétés hydrodynamiques, à savoir les courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique (Moutier, 1996).

3. Prévention et réhabilitation

Du point de vue préventif, les infrastructures d'exploitation doivent permettre de gérer l'irrigation selon sa définition propre (Adams *et al.*, 1990) : application d'eau aux cultures et drainage du surplus.

Il faut veiller à appliquer une dose d'irrigation comprenant l'eau nécessaire aux plantes plus la fraction lessivante, fraction de l'eau d'irrigation qui doit être lessivée pour contrôler l'accumulation en sel à n'importe quelle profondeur (USDA, 1969) et à maintenir le niveau de la nappe à une profondeur suffisante.

Les risques de salinisation et de sodisation de sols d'après la qualité de l'eau d'irrigation sont évalués à partir de deux indices :

- le SAR pour le risque de sodisation : plus faible est le SAR, meilleure est la qualité de l'eau d'irrigation

CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX ET MÉTHODES

□ la conductivité électrique pour le risque de salinisation :

Risque salin	ECe (mS/cm) À 25°C
Faible	< 0.75
Moyen	0.75-1.5
Elevé	1.5-3
Très élevé	> 3

Du point de vue curatif, il faut évacuer les sels accumulés dans le profil. Un lessivage de surface permet d'évacuer une certaine quantité excédentaire. Le ralentissement de la dégradation passe aussi par l'abaissement de la nappe sous 1,5 – 2 mètres de profondeur. En effet les nappes peu profondes sont aussi à l'origine de l'accumulation de sels. Le lessivage de ces sels devient fréquemment inefficace et un mouvement d'eau ascendant par capillarité a lieu en raison de l'évaporation à partir de la surface et de la consommation par la culture, ce qui transporte les sels vers la surface (FAO, 1976) et donc dans l'environnement racinaire.

Dans le cas de la sodisation, il est indispensable de déplacer le sodium fixé sur les argiles soit par application d'amendements calciques (gypse), soit par traitement acidifiant, soit encore par drainage. Les propriétés hydrauliques du sol peuvent être stabilisées par l'adjonction de polymères.

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes

Maintenant que nous avons traité du processus et des conditions de déstructuration (peptisation), nous allons aborder les matériaux (les sols étudiés, les solutions infiltrées et l'infiltromètre) et les méthodes (les modèles déterministes) qui nous permettront de qualifier en fonction de la qualité de l'eau d'infiltration l'évolution structurale des sols grâce à celle des propriétés hydrodynamiques, à savoir : la conductivité hydraulique à saturation et la sorptivité pour l'infiltrométrie, les paramètres de van Genuchten (1980) pour la tensiométrie et un paramètre de Braudeau (1992) pour la rétractométrie.

1. Matériaux

Le cadre de recherche est la région de la cuvette de Nianga et l'Ile-à-Morphil. Celles-ci se trouvent à la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie, à gauche du Doué dans la plaine alluviale de Podor, et s'étend sur 20.000 hectares. Elle a la particularité d'avoir été endiguée et défrichée depuis 1974.

Les sites choisis pour mener notre travail étaient des surfaces non cultivées, initialement à Ouru Madiou, Donaye et Guia 4 (Figure 3). Seuls les deux premiers ont été finalement retenus pour un dépouillement plus poussé des mesures collectées sur le terrain. Les raisons pour lesquelles le troisième a été mis de côté seront évoquées dans le chapitre suivant (chapitre 4, 2B).

Les coordonnées ont été déterminées sur un GPS MAGELLEN NAV 1000 PLUS. Le système GPS est basé sur le World Geodetic Survey de 1984 (WGS) et l'ellipsoïde de référence est celle de Clarke.

A) Types de sol

Quel que soit le sol et son type de formation géo-pédologique (levées, fonds de cuvette), le type d'argile est sensiblement identique. Cette argile contient entre 51 et 59% de kaolinite, 2 à 15% d'illite et 32 à 45% d'interstratifiés avec une forte proportion de smectites (communication de J.-L. Maeght).

A.1 Guia 4

Coordonnées : 16° 36' 72" Nord
14° 55' 66" Ouest

A.2 Ouru Madiou (adapté de De Luca, 1996)

Coordonnées : 16° 36' 00" Nord
14° 53' 94" Ouest
Altitude (IGN): 6,2 m

Les sols de ce périmètre irrigué sont des sols alluviaux peu évolués. La nappe est par endroits présente à deux mètres de profondeur et subit l'influence des crues, avec un battement plus marqué près du fleuve. Ce battement engendre une certaine hydromorphie. D'après le tableau suivant, les sols sont de type sablo-limoneux mais en réalité, nous passons de la berge à la route d'une zone sablo-limoneuse vers une zone argileuse (Annexe 1). Le gradient du contenu en sable varie d'une soixantaine de pourcents près de la berge à une trentaine au niveau de la route. Ce gradient provient de la vitesse de sédimentation différenciée des matériaux constitutifs du sol lors des crues du fleuve.

Argiles (%) → 2µm	Limon fin (%) 2-20 µm	Limon grossier (%) 20-50 µm	Sable fin (%) 50-200 µm	Sable grossier (%) 200-2000 µm
9,49	4,44	21,62	63,94	0,51

Tableau 1 : Composition granulométrique du sol d'Ouru Madiou (Rapport final Orstom-ISRA, 1996-97)

Vu le fort gradient de salinité (De Luca, 1996) caractérisant le périmètre, il est nécessaire de situer notre terrain d'étude avec précision : nos 18 m² se situaient à 45 m au Sud-Est du piézomètre 2, entre les courbes isosalines de 0,5 et 1 mS/cm (Annexe 1).

A.3 Donaye

Coordonnées : 16°37' 24" Nord
14° 51' 24" Ouest
Altitude (IGN) : 5,15 m

La composition granulométrique montre une teneur en argile nettement supérieure à celle du sol précédent. Les argiles y sont de type gonflant (cfr p. 19).

Argiles (%) → 2µm	Limon fin (%) 2-20 µm	Limon grossier (%) 20-50 µm	Sable fin (%) 50-200 µm	Sable grossier (%) 200-2000 µm
59,7	15,1	14,1	12,8	0,5

Tableau 2 : Composition granulométrique du sol de Donaye (Rapport final Orstom ISRA, 1995-97)

Disposant d'un sol plus argileux (Donaye) et d'un plus sableux (Ouru Madiou), la distribution de la taille de leurs particules est significativement différente (Figure 9).

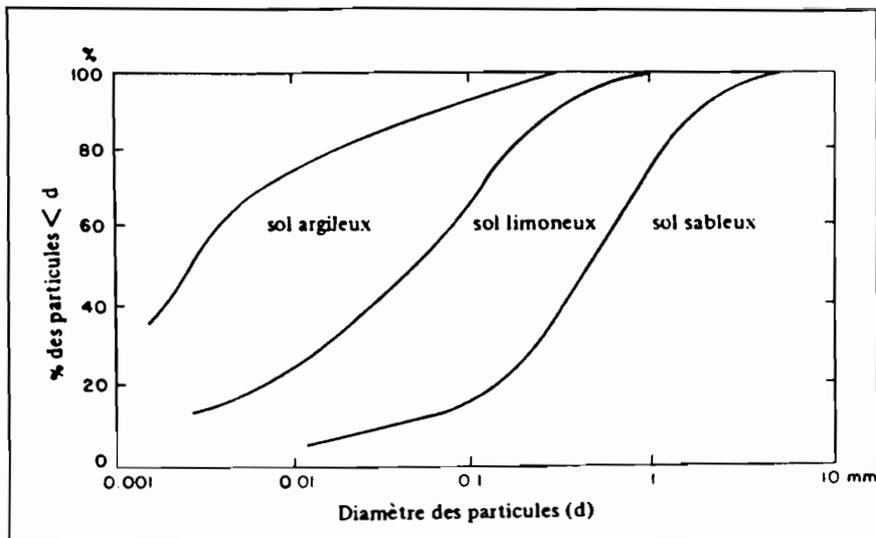


Figure 9 : Schéma de distribution de la taille des particules dans trois types de sol : argileux, limoneux et sableux (Hillel, 1988)

B) Présentation des solutions

Dans une région donnée, les problèmes agronomiques rencontrés suite à une salinisation dépendent tant de la nature des sels impliqués que du niveau de concentration saline lui-même.

Nous avons 4 faciès : un constitué d'eau déminéralisée (les blancs) et trois familles qui se distinguent les unes des autres par leur composition en sel. Dans chaque famille, il y a quatre concentrations différentes (les solutions). L'analyse chimique de celles-ci a donné les résultats suivants :

	pH	EC	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	Ca	Mg	Na	K	S cations	S anions	balance ionique	SAR	SPAR
		mS/cm	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	(mmol/l) ^{1/2}	(mmol/l) ^{1/2}
Famille 1															
1	7,19	0,0952	0,74	0,02	0,59	0	0,27	0,16	0,56	0,65	1,64	1,35	0,29	1,21	2,61
2	9,45	0,364	0,96	0,07	2	0,4	0,05	0,78	2,2	0,78	3,81	3,43	0,38	3,42	4,63
3	10,33	1,122	2,9	0,4	2,4	3,8	0,11	1,5	8	2,6	12,21	9,5	2,71	8,92	11,81
4	10,41	4,22	16	0,77	10	14	0,14	2,3	34	11	47,44	40,77	6,67	30,78	40,74
Famille 2															
5	8,75	0,1443	0,86	0,43	0,88	0	0,94	0,18	0,46	0,13	1,71	1,97	-0,26	0,61	0,79
6	8,45	0,369	1	1,1	1,6	0	0,76	0,57	1,8	0,76	3,89	3,7	0,19	2,21	3,14
7	9,62	1,042	3,9	3,3	1,8	0,63	0,09	2,8	5,4	2,7	10,99	9,63	1,36	4,49	6,74
8	9,77	4,09	18	21	6,1	4,8	0,22	12	25	12	49,22	49,9	-0,68	10,11	14,97
Famille 3															
9	8,46	0,1347	0,34	0,52	0,47	0	0,73	0,16	0,33	0,12	1,34	1,33	0,01	0,49	0,67
10	8,1	0,517	1,9	2	1	0	1,7	0,98	1,5	0,82	5,4	4,9	0,50	1,64	2,35
11	8,51	1,363	6,2	6,3	1,1	0	2,6	3	6,2	2,7	14,5	13,6	0,90	3,71	5,32
12	8,01	5,16	50	10	1,2	0	6,6	12	29	12	59,6	61,2	-1,60	9,51	13,44

Tableau 3 : Analyse chimique des 3 familles de solutions d'infiltration

Selon le diagramme de classification des eaux d'irrigation de l'USDA (USDA, 1969), le risque dû à la salinisation est :

- faible pour EC entre 0.1 et 0.25 mmhos/cm ou mS/cm
- moyen pour EC entre 0.25 et 0.75 mmhos/cm ou mS/cm
- élevé pour EC entre 0.75 et 2.25 mmhos/cm ou mS/cm
- très élevé pour EC au-delà de 2.25 mmhos/cm ou mS/cm

Toujours selon ce diagramme, le risque dû au sodium est

- faible pour un SAR entre 0 et 10 (mmole/l)^{1/2}
- moyen pour un SAR entre 10 et 18 (mmole/l)^{1/2}
- élevé pour un SAR entre 18 et 26 (mmole/l)^{1/2}
- très élevé pour un SAR au-delà de 26 (mmole/l)^{1/2}

Par ailleurs la teneur en carbonates est décroissante de la famille 1, à la famille 2, à la famille 3.

Au sein de chaque famille, la fourchette de pH est croissante et entre les familles, la fourchette de pH est plus basique de la famille 3, à la famille 2, à la famille 1.

Dans notre cas, l'évolution de la teneur en sels est moins spécifique à chaque famille, ces trois familles ne sont classées que d'après leur risque d'alcalinisation. Nous avons donc :

- la famille 1, à risque d'alcalinisation élevé ;
- la famille 2, à risque d'alcalinisation moyen ;
- la famille 3, à risque d'alcalinisation faible.

C) Infiltrométrie à succion (adapté des notes de J.-L. Maeght, 1998)

C.1 Mesures

L'infiltromètre à succion est constitué de trois parties principales (Figure 10) :

- le disque ou embase, mis en contact avec le sol
- le réservoir d'eau
- un système de contrôle de pression ou vase de Mariotte

Deux types d'infiltromètre existent : un à membrane fixe, dont les trois parties sont solidaires, et un infiltromètre à membrane déportée, dont le disque est relié à l'ensemble réservoir-vase de Mariotte par un tuyau. Le deuxième est plus fiable car les instabilités subies par le réservoir et le vase de Mariotte n'ont pas de conséquences sur la parfaite association sol-disque nécessaire pour valider les mesures.

L'eau à l'intérieur de l'infiltromètre est en dépression et entre en contact avec le sol à travers une membrane microporeuse, fixée sur un disque. Le flux est engendré et entretenu par la succion du sol. Une couche de sable est appliquée à la surface du sol pour garantir un bon contact sur toute la surface de la membrane. La succion (h) à la surface du sol, et donc au niveau de la membrane, est contrôlée par la profondeur à laquelle le tube d'entrée d'air est enfoncé dans le vase de Mariotte (X). Il faut soustraire à cette valeur la pression hydrostatique entre la sortie du tube de communication et la membrane (Y).

$$h = X - Y$$

(m)

(21)

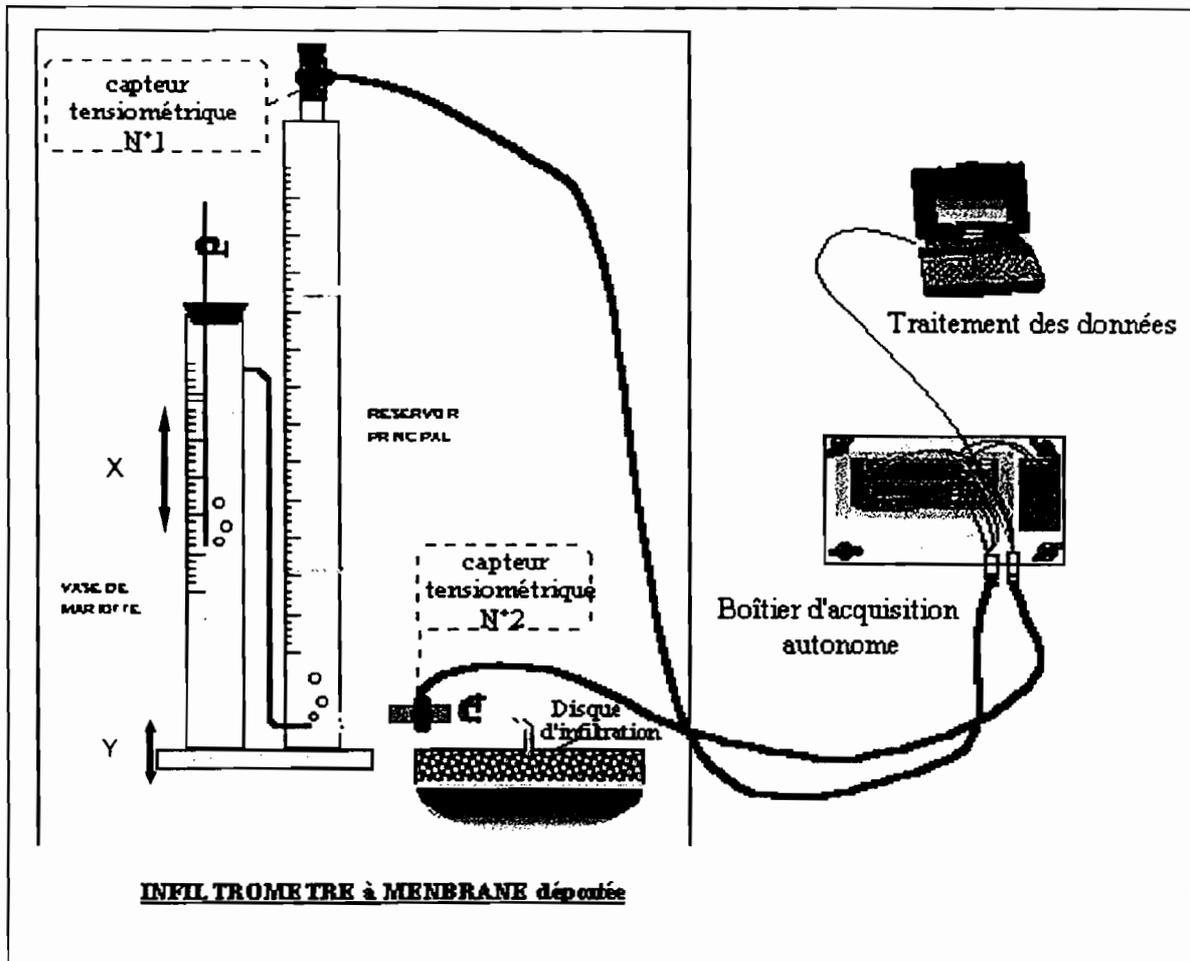


Figure 10 : Infiltromètre à succion à membrane déportée et à suivi automatisé (J-L Maeght, 1998)

Les tensions effectives étaient de l'ordre de -9 cm et $-1,5$ cm, soit de pF respectif de 0,97 et 0,17, le pF étant défini comme le logarithme de la charge de pression négative exprimée en cm d'eau.

Vu la relation entre la tension et la taille des pores, connue sous le nom de Loi de Jurin (Musy et Soutter, 1991):

$$r = \frac{2\sigma \cos \gamma}{|h| \rho_w g} \quad (\text{cm}) \quad (22)$$

avec r , le rayon du pore (cm)

h , la hauteur de la dépression appliquée (cm)

Pour σ , la tension de surface eau-air = $75 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$

ρ_w , la densité de l'eau = 1000 kg/m^3

γ , l'angle de contact = 0°

g , la pesanteur = $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$,

ces tensions correspondent à une gamme de pores de 1,60 à 10,2 micromètres de rayon.

L'avantage de l'infiltromètre à succion par rapport aux méthodes de laboratoire est double : il permet (1) d'atteindre rapidement le régime permanent (De Luca, 1996) et (2) d'éviter les écoulements préférentiels grâce à la dépression imposée.

C.2 Récolte des données

La lecture de la lame infiltrée peut soit se faire directement sur le réservoir gradué et requiert alors la présence d'un observateur pour noter celle-ci à intervalles réguliers, soit être enregistrée automatiquement par deux capteurs de pression.

Dans le cas du suivi automatisé (Figure 10), un des capteurs est fixé à la partie supérieure du réservoir principal et l'autre l'est au niveau de la jonction du tube qui relie le disque d'infiltration au réservoir principal. Ils sont tous deux raccordés à un boîtier d'acquisition préprogrammé (centrale d'acquisition de type 21X de Campbell Scientific).

Le premier capteur (capteur tensiométrique n°1) mesure la tension à laquelle l'air est soumis dans le volume supérieur du réservoir. Cette tension diminue proportionnellement à la quantité d'air pénétrant dans la colonne principale. La caractérisation de son évolution permet de suivre l'infiltration de l'eau dans le sol. Le deuxième capteur (capteur tensiométrique n°2) permet de mesurer la tension imposée par le tube d'entrée d'air au niveau du disque d'infiltration. Cette tension négative reste constante pendant l'infiltration à moins d'une intervention de l'opérateur au niveau des tubes d'entrée d'air. L'utilisation de deux capteurs est préconisée (Ankeny *et al.*, 1988) pour minimiser l'impact des variations de tension dues à la formation de bulles dans le vase de Mariotte.

Le calcul de la différence de pression mesurée par les deux capteurs indique la baisse du niveau d'eau de la colonne. La tension est convertie en lame d'eau infiltrée par rapport à la surface du disque pour obtenir la courbe d'infiltration en tenant compte des caractéristiques électriques des capteurs, résumées dans les paramètres d'étalonnage A et B :

$$l = ((T * A) + B) * (r^2/R^2) \quad (\text{cm}) \quad (23)$$

avec l, lame d'eau infiltrée	(cm)
T, différence de tension enregistrée	(mV)
r, rayon du réservoir principal	(cm)
R, rayon du disque d'infiltration	(cm)
A, constante déterminée expérimentalement	(cm/mV)
B, constante déterminée expérimentalement	(cm)

2. Méthodes

Pour qualifier les propriétés structurales du sol après irrigation, nous allons décrire ses caractéristiques hydrodynamiques telles que la conductivité hydraulique à saturation, la sorptivité et la distribution de l'espace poral.

A) Mesures sur le terrain

Les manipulations menées sur le terrain visent à fournir des données expérimentales pour déterminer *in situ*, via des modèles déterministes, la conductivité hydraulique à saturation et la sorptivité standard. Ces modèles s'appuient sur l'énergie de l'eau du sol et sa mesure.

A.1 Potentiel de l'eau dans le sol

Le potentiel total de l'eau du sol est défini comme la quantité de travail requise pour transporter réversiblement et à température constante une quantité infinitésimale d'eau à partir d'un bassin d'eau pure à une altitude donnée et à la pression atmosphérique jusqu'à l'eau du sol dans les conditions considérées (Société internationale de sciences du sol, 1963 dans Musy & Soutter, 1991).

Considérant que la pression barométrique (force engendrée par le poids d'une phase gazeuse extérieure en contact avec l'unité de volume d'eau, isolée physiquement de la matrice de sol qui développe la force réactive de l'intérieur du globe) est égale à chaque profondeur, le potentiel total, Ψ_t , s'écrit comme la somme de ses principales composantes sous la forme générique suivante :

$$\Psi_t = \Psi_z + \Psi_h + \Psi_o + \Psi_g \quad (\text{J/m}^3) \quad (24)$$

avec Ψ_z , le potentiel de gravité :

$$\Psi_z = \rho_w g z \quad (\text{J/m}^3) \quad (25)$$

avec z , la différence d'altitude entre les deux positions (m)

g , la pesanteur (m/s²)

ρ_w , la densité de l'eau (kg/m³)

Ψ_h , le potentiel de pression résultant des forces hydrostatique (force engendrée par le poids d'une phase liquide extérieure en contact avec l'unité de volume d'eau, isolée physiquement de la matrice de sol qui développe la force réactive de l'intérieur du globe) et capillaire (force engendrée par les effets de tension de surface de la phase liquide, et les effets à l'interface des phases liquide, solide et gazeuse) :

$$\Psi_h = \rho_w g (h_{h,A} + h_{c,A} - h_{h,B} - h_{c,B}) = \rho_w g h \quad (\text{J/m}^3) \quad (26)$$

avec h_h , charge de pression hydrostatique (m)

h_c , charge de pression capillaire (m)

h , la résultante des charges h et c (m)

A et B , les deux situations étudiées

Ψ_o , le potentiel osmotique :

$$\Psi_o = \mu_i^0 + RT \ln \aleph_i \quad (\text{J/m}^3) \quad (27)$$

avec μ_i^0 , le potentiel chimique de la substance i à l'état pur (J/mole)

\aleph_i , la fraction molaire de i dans la solution

R , la constante molaire des gaz (J/(mol K))

T , la température (K)

Ψ_g (J/m³), le potentiel géostatique, la force engendrée par le poids des particules solides en contact avec l'unité de volume d'eau, isolées physiquement de la matrice de sol qui développe la force réactive de l'intérieur du globe.

A.2 Dynamique en milieu insaturé

En général, faute de données suffisantes, des hypothèses simplificatrices sont inévitables. Dans le présent cas, le milieu solide est considéré comme homogène, isotrope et indéformable ; et la phase liquide comme homogène. En effet, l'intégration de la déformabilité globale du milieu, de l'hétérogénéité

et de l'anisotropie de la phase solide ou de l'hétérogénéité de la phase liquide à la description des processus d'écoulements se manifeste respectivement par une modification des termes du bilan de masse ou équation de continuité, par une modification de la forme mathématique de la conductivité hydraulique dans l'équation dynamique de Darcy, et par la prise en compte des processus physiques spécifiques aux phénomènes de transferts de solutés (Musy et Soutter, 1991). Il faut signaler que l'hypothèse d'indéformabilité est fort restrictive dans le cas de Donay, étant donné que la force géostatique dans les sols à argiles de type gonflant est non négligeable.

Par exemple, en milieu homogène et isotrope, la conductivité hydraulique est identique pour les trois directions d'écoulement, il ne faut déterminer qu'une valeur. En milieu homogène et anisotrope, la conductivité hydraulique est déterminée pour chaque direction, il faut déterminer trois valeurs. En milieu hétérogène, les propriétés varient d'un point à l'autre : il faut deux et six valeurs pour des milieux respectivement isotropes et anisotropes.

Comme la solution du sol est considérée comme homogène, seuls les potentiels gravitationnel et de pression vont varier et constituer la force motrice responsable du déplacement de la solution du réservoir de l'infiltromètre à l'espace poral du sol. Bien qu'existant, le potentiel osmotique sera donc ignoré dans les expressions de dérivées du potentiel total. Celui-ci s'exprimera par unité de poids et sera nommé charge hydraulique totale qui, l'axe vertical dirigé vers le bas, s'écrit :

$$\Psi_{p,tot} = H = h - z \quad (m) \quad (28)$$

avec $\Psi_{p,tot}$, le potentiel total par unité de poids (m)

H , la charge hydraulique (m)

h , la tension appliquée exprimée en hauteur d'eau (m)

z , la distance par rapport à la surface de référence (m)

Pour faciliter le maniement des valeurs de H , il est d'usage d'utiliser une échelle logarithmique en base 10 :

$$pF = \log_{10}(-H) \quad (29)$$

A.2.1. La conductivité hydraulique

En conditions insaturées, la teneur en eau et la charge de pression diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la saturation. Par l'augmentation de la tortuosité et la diminution des vitesses, la conductivité hydraulique diminue également rapidement (Figure 11).

Une relation empirique a été établie par Gardner (1958) pour relier la conductivité hydraulique à la charge de pression :

$$K(h) = K_s (\exp(\alpha h)) \quad (\text{m/s}) \quad (30)$$

avec $K(h)$, la conductivité hydraulique (m/s)

K_s , la conductivité hydraulique à saturation (m/s)

α , un coefficient empirique (m^{-1})

h , la tension appliquée exprimée en hauteur d'eau (m)

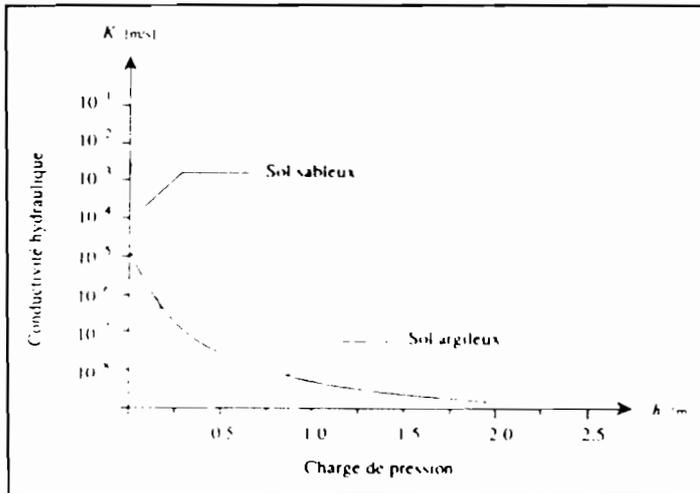


Figure 11: Allure générale de la relation $K(h)$ dans deux types de sols (Musy et Soutter, 1991)

A.2.2 Modélisation du transport

L'équation de Darcy-Buckingham

La loi de Darcy (1856) en milieu saturé stipule que le débit total de l'eau est directement proportionnel au gradient de charge appliquée et à la section de passage. Dans nos hypothèses de travail, cette loi s'écrit :

$$\vec{q} = -K_s \nabla H \quad (\text{m/s}) \quad (31)$$

avec \vec{q} , la densité de flux surfacique (m/s)

K_s , la conductivité hydraulique à saturation (m/s)

∇H , le gradient du potentiel total (H en m)

Dans des conditions insaturées, la relation est analogue mais elle tient compte de la variation de la conductivité hydraulique exprimée en fonction soit de la tension appliquée, h , soit de la teneur en eau volumique, θ :

$$\vec{q} = -K(h)\nabla H \quad (\text{m/s}) \quad (32)$$

ou

$$\vec{q} = -K(\theta)\nabla H \quad (\text{m/s}) \quad (33)$$

avec h , la tension appliquée (m)

θ , la teneur en eau volumique (m³/m³)

L'équation de continuité

Cette équation dérive du principe de conservation de la masse de l'eau au sein d'un volume infinitésimal. Le bilan de masse dans l'espace donne:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Delta M)}{\partial t} &= -\left(\frac{\partial(\rho_w q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_z)}{\partial z}\right)\Delta x\Delta y\Delta z \\ &= -\text{div}\left(\rho_w \vec{q}\right)\Delta V \end{aligned} \quad (34)$$

avec M , la masse (kg)

$$\text{Comme } \Delta M = \rho_w \Delta V \theta$$

avec V , le volume (m³)

θ , la teneur en eau volumique (m³/m³)

$$\frac{\partial(\rho_w \Delta V \theta)}{\partial t} = -\text{div}\left(\rho_w \vec{q}\right)\Delta V \quad (35)$$

Etant donné que le milieu est considéré comme rigide ($\Delta V = 0$) et la phase liquide comme incompressible et homogène ($\Delta \rho_w = 0$), l'équation de continuité en milieu non saturé est :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}\left(\vec{q}\right) = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \quad (36)$$

Les équations d'écoulement

L'injection de la loi de Darcy (32) dans celle de continuité (37) donne l'équation d'écoulement, qui peut s'exprimer exclusivement en fonction soit de la teneur en eau θ (38) soit de la tension appliquée h (39) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta)\nabla H) \quad (37)$$

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(K(h)\nabla H) \quad (38)$$

avec $C(h)$, la capacité capillaire	(m^{-1})
$C(h) = d\theta/dh$, la tangente à la courbe de rétention	(39)
$K(h)$, la conductivité hydraulique	(m/s)
$K(\theta)$, la conductivité hydraulique	(m/s)
∇H , le gradient du potentiel total	(H en m)

A.2.3 Détermination des valeurs de sorptivité et de conductivité hydraulique

Les équations d'écoulement sont transformées en équations analogues à des équations de diffusion et de conduction de la chaleur pour lesquelles il existe des solutions applicables dans des conditions strictes. Ces transformations reposent sur la substitution, dans la loi de Darcy (32), du gradient de potentiel par le gradient de teneur en eau correspondant (Musy et Soutter, 1991).

Les modèles utilisés pour intégrer l'équation de transport dans le cas de l'infiltromètre à disque sont basés sur les théories de Philip (1957) pour le stade premier, caractérisé par un régime transitoire, et de Wooding (1968) pour le stade ultime, caractérisé par un régime constant.

Sorptivité

Comme au tout début de l'infiltration (Haverkamp *et al.*, 1995),

$$I_{3D} = I_{1D} \quad (\text{m}) \quad (40)$$

avec I , l'infiltration cumulée	(m)
I_1 et I_{3D} , caractère mono- et tri-dimensionnel	

nous déterminons la sorptivité grâce à l'équation de Philip, qui n'est strictement applicable qu'aux flux uni-directionnels. Ainsi, l'équation de l'écoulement (38) n'est exprimée que selon la direction verticale et devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{dK(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (41)$$

avec $D(\theta)$, la diffusivité capillaire (m²/s)

$$D(\theta) = K(\theta)/C(h) \quad (42)$$

Pour des conditions initiales et aux limites suivantes :

1) $\theta = \theta_i$ pour $z \leq 0$ et $t = 0$

2) $\theta = \theta_0$ pour $z = 0$ et $t > 0$

et d'après la définition de l'infiltration cumulée, I , et celle de la sorptivité, S (Kutilek & Nielsen, 1994)

$$I = \int_{\theta_i}^{\theta} z d\theta \quad (m) \quad (43)$$

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta} \eta(\theta) d\theta \quad (m/s^{1/2}) \quad (44)$$

avec z , la profondeur dans le sol (m)

η , la transformation de Boltzmann (m/s^{1/2})

le développement en série arrêté au deuxième terme de l'infiltrabilité, i , et l'infiltration cumulative, I , s'écrit (Philip, 1957) :

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad (45)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + A \quad (46)$$

avec S , la sorptivité (m/s^{1/2})

A , le flux gravitaire (m/s)

Physiquement, la sorptivité traduit la capacité d'un sol à adsorber l'eau par capillarité (Musy & Soutter, 1991). Dans le modèle déterministe appliqué, le flux gravitaire correspond à la densité de flux surfacique de Wooding (Zhang, 1998). En linéarisant l'infiltration cumulative par la fonction de I/\sqrt{t} en fonction de \sqrt{t} :

$$\frac{I}{\sqrt{t}} = S + q\sqrt{t} \quad (m/s^{1/2}) \quad (47)$$

nous déterminons la sorptivité par l'ordonnée à l'origine et le flux gravitaire ou densité surfacique par la pente. Il faut savoir que différents modèles sont proposés dans la littérature pour la valeur de A du modèle de Philip () (Kutllek et Nielsen, 1994 ; Zhang, 1997a ; Zhang, 1997b ; Zhang, 1998).

La sorptivité dépendant des conditions initiales et aux limites du système, elle est fonction des teneurs en eau initiale du sol θ_i et imposée en surface θ_0 .

Une modélisation reconnue de la sorptivité du sol en fonction de la teneur en eau du sol est celle de Parlange (1971) :

$$S(\theta_i, \theta_0) = \sqrt{\int_{\theta_i}^{\theta_0} (\theta_s + \theta - 2\theta_i) D(\theta) d\theta} \quad (\text{m/s}^{1/2}) \quad (48)$$

avec θ_s , la teneur en eau à saturation (m^3/m^3)

θ , la teneur en eau de l'échantillon (m^3/m^3)

Pour un sol donné, l'approximation empirique de Musy et Soutter (1991) permet la détermination de la valeur standard S_0 , correspondant à une infiltration à capacité sur un sol sec, pour $\theta_i = 0$ (Figure 12):

$$S = S_0 \left(1 - \frac{\theta_i}{\theta_s} \right) \quad (\text{m/s}^{1/2}) \quad (49)$$

avec S_0 , valeur de sorptivité standard d'un sol donné ($\text{m/s}^{1/2}$)

θ_i , teneur en eau initiale du sol (m^3/m^3)

Dans nos conditions de travail, nous émettons les hypothèses suivantes :

- 1) $S = S_1$ déterminée par la courbe d'infiltration de la première tension appliquée
- 2) $\theta_s = \theta_f$ déterminée par le prélèvement en boîte d'humidité en fin de deuxième tension

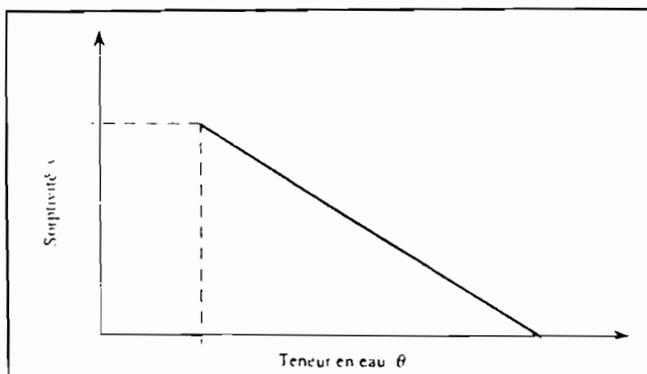


Figure 12 : Evolution de la sorptivité avec la teneur en eau initiale du sol (Musy et Soutter, 1991)

Le calcul des teneurs en eau volumique (Annexes 2 et 3) recourt à la loi d'Archimède au travers de la méthode de la poche plastique (Boivin *et al.*, 1990) pour la détermination de la densité apparente du sol. Le principe est de mesurer la poussée d'Archimède exercée sur un échantillon de sol placé sous vide, dans une poche plastique fine et souple. Le matériel requis est simple (Figure 13) : il est constitué d'une poche plastique en polyéthylène, d'une pompe à vide, d'un bécher d'eau, d'une balance électronique et d'une potence supportant le sachet connecté à la pompe à vide au moyen d'un tuyau en caoutchouc souple et d'un collier de serrage.

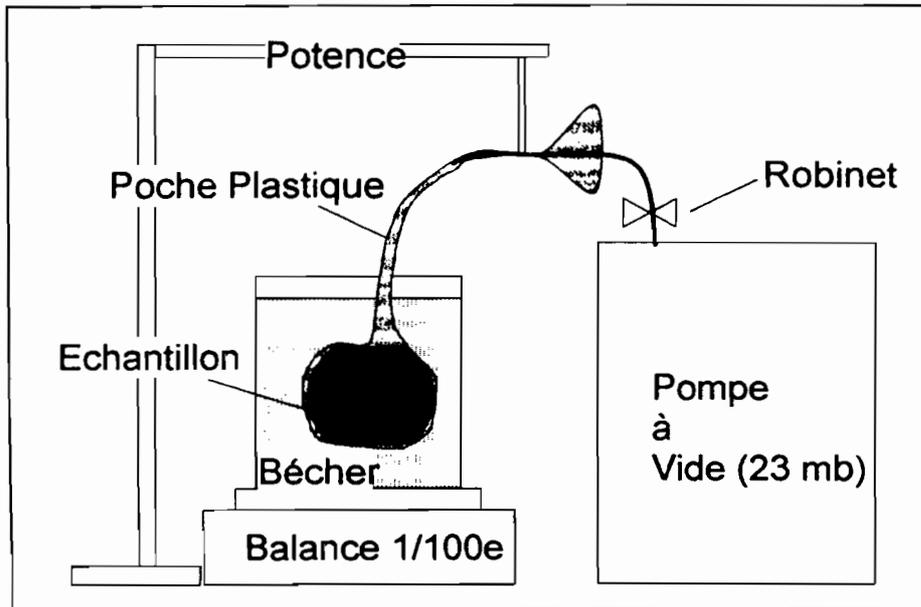


Figure 13 : méthode de la poche plastique (Boivin *et al.*, 1990)

Conductivité hydraulique

Le flux d'infiltration émanant d'une surface circulaire de rayon r , alimentée en eau sous une pression effective h_0 (négative, nulle ou positive), tend vers un régime permanent dont la valeur est donnée par (Wooding, 1968):

$$q_0 = K_0 + \frac{4\phi_0}{\pi r} \quad (\text{m/s}) \quad (50)$$

avec q_0 , la densité de flux surfacique (m/s)

K_0 , la conductivité hydraulique à la pression h_0 (m/s)

r , le rayon de la source (m)

ϕ_0 , le potentiel matriciel (Gardner, 1958) (m²/s)

$$\phi_0 = \int_{\theta_0}^{\theta} D(\theta) d\theta = \int_{h_0}^h K(h) dh = K_s \frac{(\exp(\alpha h))}{\alpha}$$

avec $D(\theta)$, la diffusivité capillaire (m²/s)

La relation empiriquement établie par Gardner (30) est introduite dans l'équation de Wooding (50) et donne :

$$q_0 = K_s \exp(\alpha h_0) + \frac{4K_s \exp(\alpha h_0)}{\alpha r \pi}$$

$$= K_s \exp(\alpha h_0) * \left(1 + \left(\frac{4}{\alpha r \pi} \right) \right) \quad (51)$$

avec K_s , la conductivité hydraulique à saturation (m/s)
 α , un coefficient empirique (m^{-1})
 h_0 , la tension appliquée (m)
 r , le rayon de la source (m)

Pour déterminer α et K_s , il faut résoudre un système d'équations à deux inconnues. Deux méthodes se présentent : la méthode multi-rayons, basée sur la mise en place de disques de tailles différentes et la méthode multi-potentielle, basée sur des mesures à différents potentiels. La première approche a été délaissée au profit de la seconde à cause du changement d'emplacement qu'elle implique.

Compte tenu de la forte hystérèse de la relation $K(h)$ (Thony, 1990), les deux tensions doivent être appliquées dans un ordre bien défini : la plus forte tension (le h le plus négatif) doit être appliquée en premier lieu.

Par les deux densités surfaciques, q_0 et q_1 , correspondant aux tensions h_0 et h_1 , avec $q_0 < q_1$ pour $h_0 > h_1$, et déterminées par la pente de l/\sqrt{t} en fonction de \sqrt{t} (Equation), nous obtenons :

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{q_0}{q_1}\right)}{(h_0 - h_1)} \quad (52)$$

avec q_0 et q_1 , les densités de flux surfaciques (m/s)
 h_0 et h_1 , les tensions appliquées (m)

La réintroduction de α dans l'équation de Garner (30) permet de calculer K_s et donc de définir $K(h)$.

B) Mesures en laboratoire

Grâce à un dispositif expérimental combiné (Figure 14), nous avons suivi la désorption de petits échantillons non remaniés.

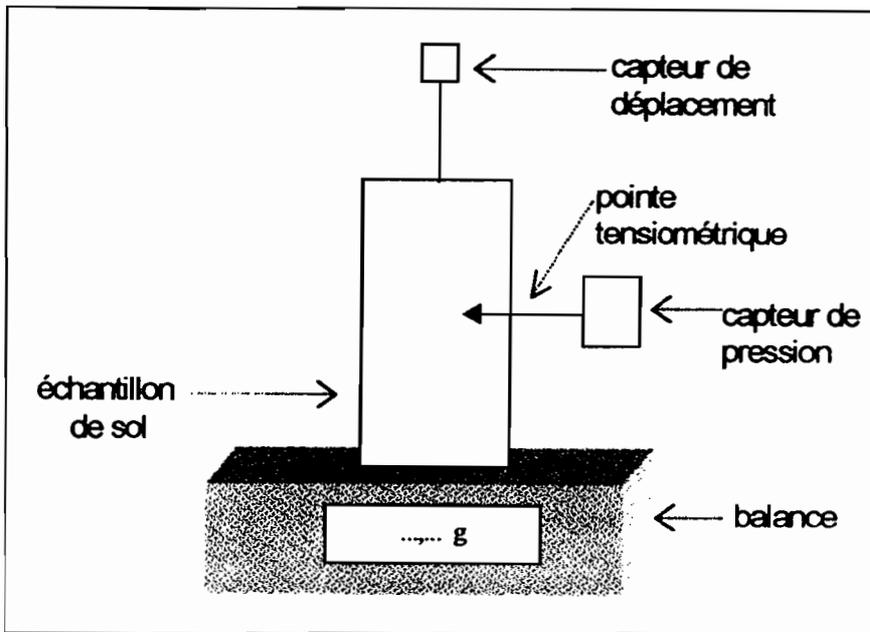


Figure 14 : Schéma du dispositif expérimental combiné de rétractométrie et tensiométrie

B.1 Tensiométrie

Dans les milieux poreux insaturés, la relation empirique de van Genuchten (1980) lie le contenu en eau volumétrique au potentiel matriciel suivant des fonctions paramétriques ne présentant pas d'hystérèse. L'équation de cette courbe dite de rétention (Figure 15) est :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (53)$$

avec h , la tension imposée	(m)
θ_s , le contenu en eau à saturation	(m^3/m^3)
θ_r , le contenu en eau résiduel	(m^3/m^3)
α , paramètre de la courbe (point d'inflexion)	(m^{-1})
n , paramètre de la courbe	(-)
$m = 1 - 1/n$	(-)

Le paramètre α est le point d'entrée d'air correspondant au point d'inflexion caractérisant le sol. Quant au paramètre n , ou paramètre d'homogénéité du milieu poreux, il décrit la distribution de l'espace poral. Les paramètres de la fonction de van Genuchten (1980) peuvent être substitués par des équations reliant ces paramètres aux propriétés du sol (Shirazi *et al.*, 1988 ; Scheinost *et al.*, 1996). Les paramètres de distribution de la taille des agrégats, d_g et σ_g , sont considérés comme dépendants des paramètres de distribution de la taille des pores, α et n :

$$\alpha = f(d_g) \quad (54)$$

$$n = f\left(\frac{1}{\sigma_g}\right) \quad (55)$$

avec d_g , diamètre géométrique moyen des particules (mm)
 σ_g , la déviation standard de d_g

Pour la détermination d' α , n et θ_s , un modèle RETC (Retension Curve Fitting) utilise une méthode d'ajustement non linéaire (Marquardt, 1963) pour ajuster les relations théoriques de Van Genuchten aux données expérimentales.

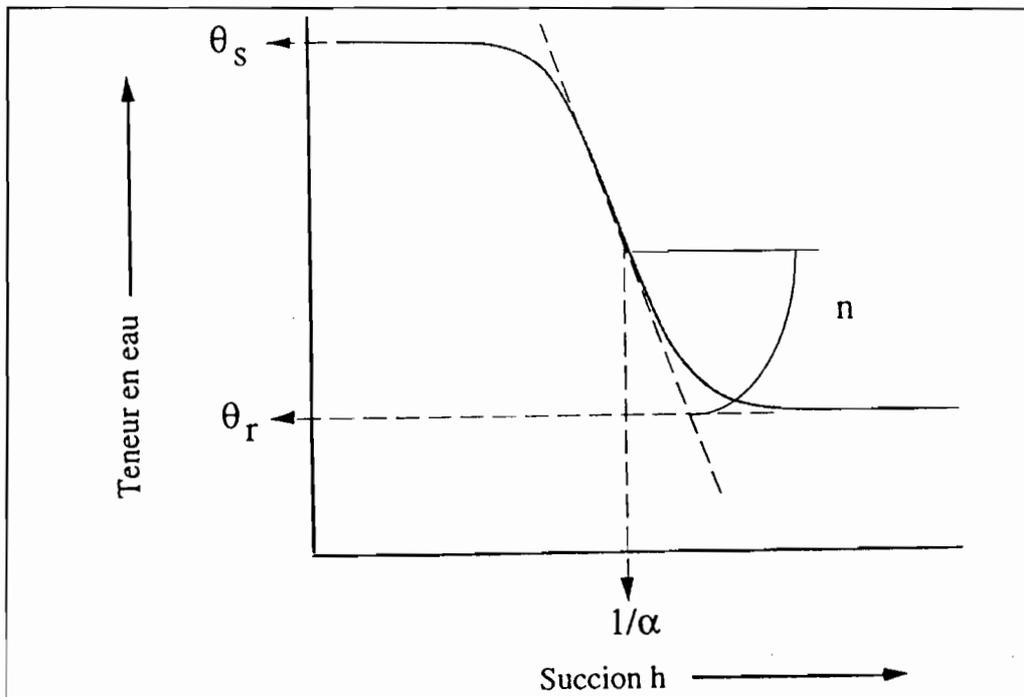


Figure 15 : Interprétation physique des paramètres de van Genuchten (Moutier, 1996)

B.2 Rétractométrie

La structure du sol présente deux propriétés complémentaires et inséparables : organisation hiérarchisée et variation volumique des organisations par interaction entre l'eau et le plasma argileux (Braudeau, 1992). La courbe de retrait représente la variation de volume massique d'un sol lors de l'évaporation de son contenu en eau, en fonction de la teneur en eau massique (Figure 16). Cette courbe de retrait synthétise un grand nombre d'informations sur la structure du sol et la variation de son système poral en fonction de la teneur en eau :

- 1) K_0 , le retrait structural ou macroporal (cm³/g)
- 2) K_r , le retrait « normal » (cm³/g)

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS, DISCUSSION ET CONCLUSIONS

- 3) $K_{rés}$, le retrait résiduel
- 4) A, la limite de retrait
- 5) B, le point d'entrée d'air micro
- 6) C, le point sec macro
- 7) E, le début du retrait micro

(cm^3/g)

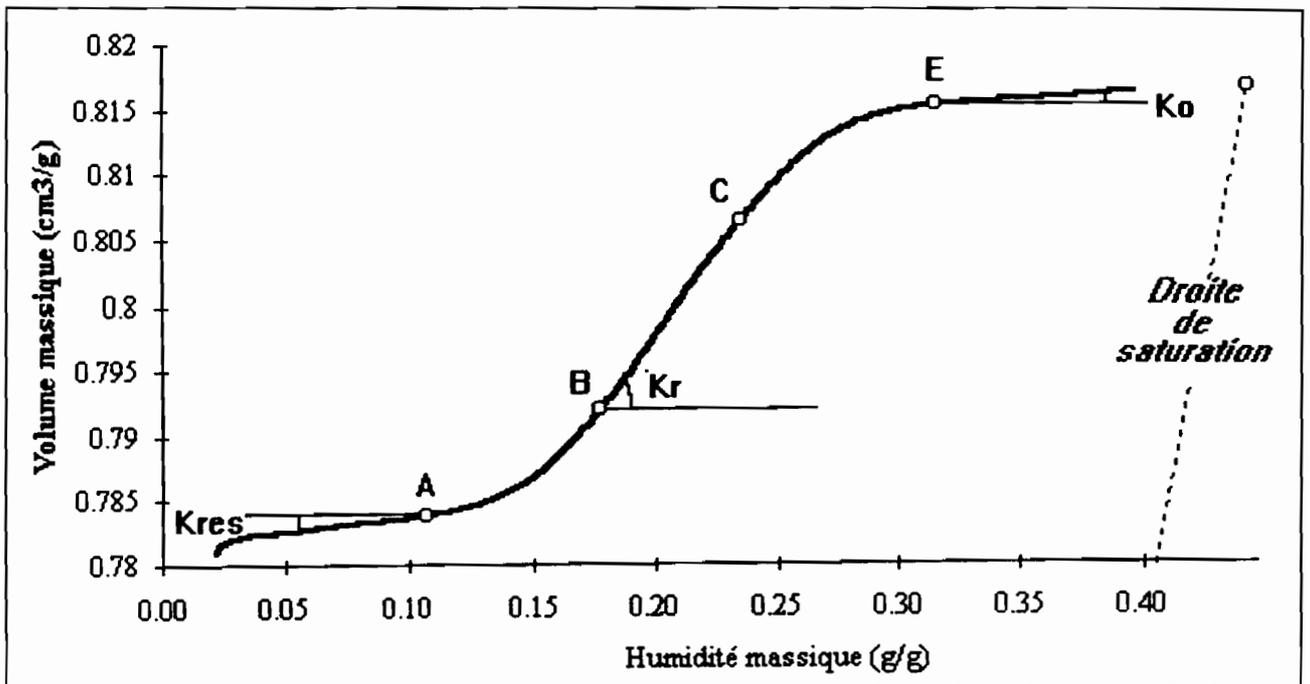


Figure 16: Modèle de Braudeau (Notes de Jean Delarivière)

Cette modélisation est très restrictive et ne permet de considérer comme fiable que K_r , la dérivée partielle du volume global de l'échantillon V par rapport au volume de la microporosité, qui caractérise la structure de l'échantillon (Braudeau, 1992).

D) Expérience de terrain

Notre étude se focalise sur l'analyse des caractéristiques physiques du sol après irrigation avec 4 faciès d'eau de qualité différentes : un d'eau déminéralisée (les blancs) et trois familles de composition différentes. Pour les 3 familles, nous traitons le sol avec un premier volume de solution en faisant l'hypothèse d'équilibration entre l'eau d'irrigation, la solution du sol et le complexe d'échange.

Les manipulations commençaient par la préinfiltration de 3 litres de solution d'infiltration (Meyer, 1997) à l'intérieur de cylindres de 12 cm de rayon et 8 cm de hauteur à l'abri de bâches plastiques pour minimiser l'évaporation (Photos 1 et 2).

Le sol séchait à l'air libre durant 24 à 120 heures en fonction du degré d'humidité évalué visuellement lors de l'extraction du cylindre. La pré-infiltration ne remet pas en question la condition d'humidité initiale requise pour l'application de l'équation de Wooding étant donné que l'influence d'un sol humide avant le début de la mesure est inférieure au bruit de fond de cette mesure (De Luca, 1996)



Photo 1 : Préinfiltration, séchage à l'air libre et mesures à Guia 4

La surface du sol directement sous l'embase était préparée par nivellement et dépôt d'une fine couche de sable tamisé à 2 mm. Comme cette couche sert à assurer un contact hydraulique horizontal aussi parfait que possible sans affecter le régime permanent d'infiltration, il fallait que la conductivité hydraulique soit nettement supérieure à celle du sol sous-jacent d'où le choix de sable grossier (Vauclin & Chopart, 1992). Pour les sites de Donave et de Guia 4, la partie supérieure a dû être éliminée en plus pour éviter les effets de croûte (Photos 2 et 3).

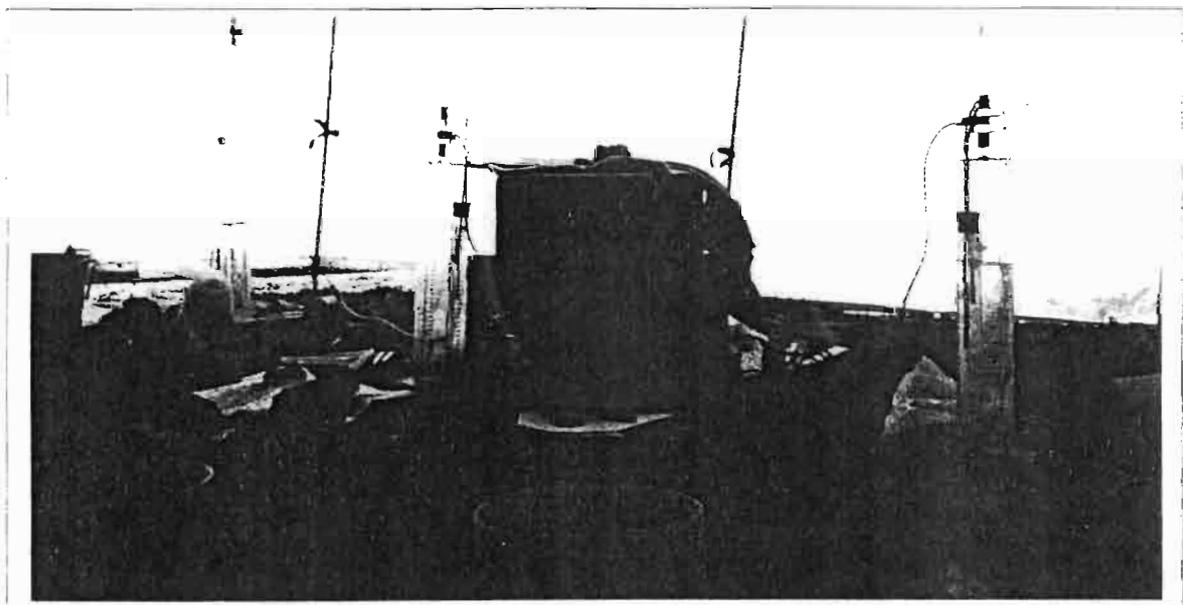


Photo 2 : Les 3 infiltromètres en action

Parallèlement aux infiltrations, nous prélevions quatre échantillons de sol : deux pour déterminer les teneurs en eau volumique initiale et finale, un pour la rétractométrie et un pour les lames minces. Le prélèvement de l'échantillon pour les conditions initiales oblige à préfiltrer 3 litres d'une même solution dans deux cylindres voisins.

Les résultats des observations micromorphologiques des lames minces donneront une description de la porosité du sol (forme, orientation et taille). Ces résultats n'étaient pas encore disponibles lors de la rédaction de notre travail.



Photo 3 : Un infiltromètre, les capteurs et l'ensemble « boîtier enregistreur - batterie » à Donaye

Le travail de terrain s'est effectué par séjours de 7 à 10 jours entre août et décembre 1999, sur une durée totale de 42 jours. Les journées commençaient à 7H30 du matin avec l'installation du matériel. Chaque tension était appliquée pendant 2 à 4 heures, sauf pour Guia 4 où, vu les conditions de travail, nous laissions chaque tension 12 heures. Le soir, vers 19H30, les données brutes étaient dégrossies au campement pour déterminer s'il y avait lieu ou pas de refaire une des solutions infiltrées dans la journée.

Chapitre 4 : Résultats, discussion et conclusions

L'infiltrométrie a exigé l'utilisation des modèles de Philip (1957), Gardner (1958) et Wooding (1968) pour obtenir, à partir des courbes d'infiltration cumulée (Annexes 6, 7 et 8), la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et la sorptivité (S). La rétractométrie et la tensiométrie quant à elles ont fourni des courbes expérimentales (Annexes 11 et 12) qui ont été modélisées à l'aide des modèles respectifs de van Genuchten (1980) et Braudeau (1992) pour estimer les valeurs des paramètres alpha (α) et n en tensiométrie et de la tangente (K_r) en rétractométrie.

1. Analyse chimique des sol

L'analyse chimique des sols après infiltration est présentée dans l'Annexe 4. Les valeurs d'ESP et d'ESPP ont été calculées d'après les relations 6 et 7 (p. 12 et 13).

A) Description des résultats d'analyse

A.1 ESP

A.1.1. Ouru Madiou

Les valeurs d'ESP des échantillons d'Ouru Madiou ont comme borne inférieure 0,55% et comme borne supérieure 26,1%. Les blancs présentent des valeurs entre cette borne inférieure et 1,6% alors que les valeurs de la famille 1 sont bornées par 1 et la borne supérieure, 26,1%. La famille 2 a donné des taux de sodium échangeable sur les complexes d'échange compris entre 1,2 et 17,5% et la famille 3 entre 0,75 et 23,05%.

A.1.2. Donaye

A Donaye, l'ensemble des valeurs d'ESP sont limitées par 1,9 et 18,3%. Dans le cas de l'infiltration par l'eau déminéralisée (les blancs), les bornes des valeurs d'ESP sont 1,9 et 2,7%. Après l'infiltration de la famille 1, les valeurs d'ESP calculées sont entre 2,4 et 18,3% alors que pour la famille 2, les valeurs sont comprises entre 2,4 et 12,6%. La famille 3 présente des valeurs bornées par 2,3 et 12,3%.

A.2 ESPP

A.2.1 Ouru Madiou

Pour l'ensemble des 4 faciès, les valeurs d'ESPP d'Ouru Madiou sont comprises entre 5,7 et 64,15%. Les valeurs d'ESPP des blancs sont bornées par 5,8 et 11,8% et celles de la famille 1 par 5,7 et 37,2%. La famille 2 présente des valeurs limitées par 6,9 et 64,15% alors que les valeurs de la famille 3 le sont par 6,15 et 40%.

A.2.2 Donaye

A Donaye, la borne inférieure des valeurs d'ESPP est 4,9% et la borne supérieure 23,3%. Les blancs présentent des taux de saturation en sodium et potassium sur le complexe d'échange de 4,9 à 5,7% tandis que les valeurs d'ESPP des sols infiltrés avec la famille 1 varient de 5,25 à 23,3%. Les valeurs calculées pour la familles 2 sont comprises entre 5,45 et 19,3% et celles de la famille 3 entre 5 et 19,1%.

B) Commentaires

B.1 Le taux de saturation

La détermination des bases échangeables est réalisée par la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium à pH 7. Compte tenu de la valeur de ce tampon, la mise en solution de sels est possible. Cette solubilisation peut expliquer les taux de saturation en bases supérieurs à 100% quand les pH de la solution du sol sont voisins ou supérieurs à pH 8 ; par contre les sursaturations rencontrées à des pH inférieurs à 7-8 restent inexplicables et sont probablement liées à une erreur d'analyse.

B.2 Equilibre entre le complexe d'échange et la solution du sol ?

L'hypothèse d'équilibre entre la solution du sol et le complexe d'échange est remise en doute au vu des différences importantes observées en terme de valeurs d'ESP et ESPP entre deux infiltrations successives d'une même solution (les infiltrations de la solution 12 d'Ouru Madiou, échantillons 12 et 12').

Etant donné la teneur en potassium *a priori* aberrante de l'échantillon de sol 8 d'Ouru Madiou, nous ne tiendrons pas compte de sa valeur d'ESPP (64,14%) dans la présentation des résultats.

B.3 La relation empirique de Gapon (1933)

Plusieurs études (Gapon, 1933 ; USDA, 1964 ; Moutier, 1996) font état de relations étroites entre le SAR de l'eau d'irrigation et l'ESP du sol. Nous avons établi ces relations (Annexe 5) pour nos résultats d'analyse d'eau (Tableau 3, p. 24) et de sols (Annexe 4).

Vu le protocole appliqué, certaines solutions ont été infiltrées deux fois. Par conséquent pour éviter qu'un seul SAR ou SPAR se voit attribuer deux valeurs d'ESP et d'ESPP différentes, nous avons préféré faire la moyenne mathématique de ces deux pourcentages.

Huit graphes sont présentés, quatre pour le SAR, quatre pour le SPAR (Annexe 5) :

1. les figures 5a et 5b reprennent toutes les solutions ;
2. les figures 5c et 5d ne tiennent pas compte des solutions 8 et 12. En effet, comme celles-ci se différencient fortement des autres points dans les deux graphes initiaux (5a et 5b), nous avons voulu déterminer la pente des droites ne prenant pas en considération ces échantillons ;
3. les figures 5e et 5f se basent sur la même réflexion mais excluent l'extrémité non plus du point de vue des valeurs de SAR mais bien d'ESP et ESPP, c'est-à-dire la solution 4 ;
4. Les figures 5g et 5h excluent les deux types d'extrêmes, ceux des abscisses et ceux des ordonnées.

Il est inutile de comparer nos relations à celles énoncées dans le chapitre 2 (Equations 13 et 14, p.14). En effet, elles ne traitent pas des mêmes données : la littérature met en relation l'ESP du complexe d'échange et le SAR de la solution drainante du sol ou de l'extrait de pâte saturée, ceux-ci estimés comme étant à l'équilibre avec le complexe d'échange, alors que dans notre cas, ni les solutions drainantes, ni les extraits de pâte saturée n'ont été caractérisés. Nous rapportons l'ESP du sol au SAR de l'eau d'irrigation alors que, très vraisemblablement, nous ne sommes pas dans une situation d'équilibre.

2. Traitement des données brutes d'infiltrométrie

Nous allons présenter les relations du chapitre 3 en les appliquant aux courbes d'infiltration récoltées sur le terrain à travers un exemple-type et comme annoncé précédemment, nous évoquerons le cas de Guia 4, site que nous avons préféré mettre de côté.

A) Courbes d'infiltration

A.1 Les courbes d'infiltration cumulée

Les courbes d'infiltration (Annexes 6, 7 et 8) présentent l'évolution de la lame infiltrée (en cm) en fonction du temps (en secondes).

Pour chaque solution infiltrée, il y a deux courbes d'infiltration caractérisée par une tension donnée : h_1 , la tension la plus forte et h_2 , la tension la plus faible. Parmi les 120 courbes enregistrées, nous proposons de commenter le Blanc 1 d'Ouru Madiou (Figure 17).

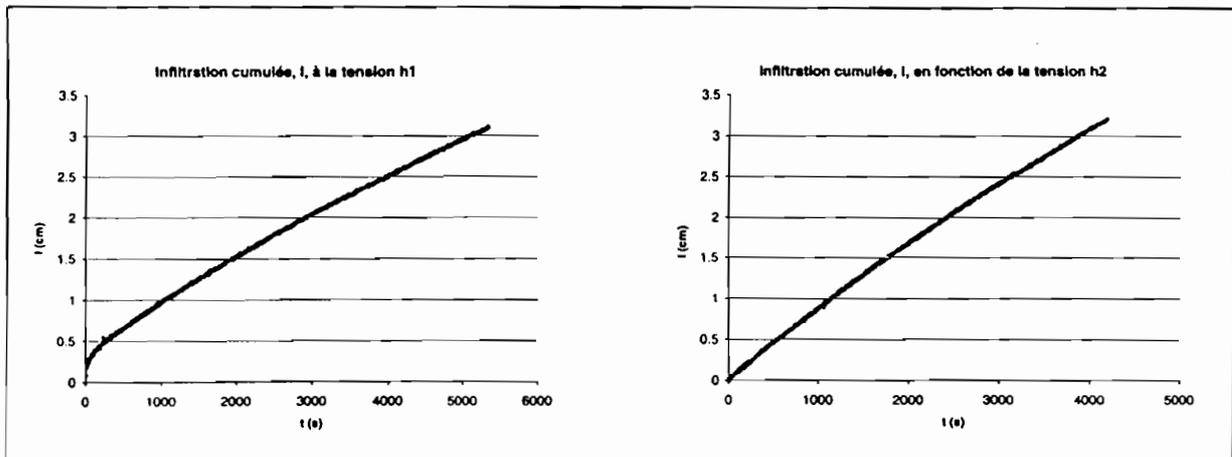


Figure 17 : Courbes d'infiltration du Blanc 1 d'Ouru Madiou

La forme de la courbe est fonction de la teneur en eau, qui est elle-même directement déterminée par la tension appliquée. Dans les deux cas, faible (h_2) et forte (h_1) tension, la relation entre l'infiltration cumulée et le temps commence par une allure curvilinéaire, c'est le régime transitoire : la sorptivité est prédominante. Le gradient de pression s'annule au fur et à mesure que la teneur en eau s'approche de la teneur en eau en équilibre avec la succion imposée. Dans la deuxième partie de la courbe, le régime devient permanent et la gravité est le moteur du mouvement. La partie linéaire sera d'autant plus vite atteinte que la teneur en eau sera proche de la saturation.

A.2 L'application des modèles déterministes

Nous linéarisons l'infiltration cumulée, I , en fonction du temps, t , par I/\sqrt{t} en fonction de \sqrt{t} (Equation 47, p. 34). Nous obtenons alors la sorptivité (Philip, 1957) et la densité de flux surfacique (Zhang, 1998) caractéristiques à la teneur en eau (c'est-à-dire à la tension appliquée) par respectivement, l'ordonnée à l'origine et la pente (Figure 18) de la droite. Comme nous avons deux tensions, donc deux droites, nous obtenons deux valeurs de densités de flux surfaciques (q_1 et q_2) et deux valeurs de sorptivité (S_1 et S_2).

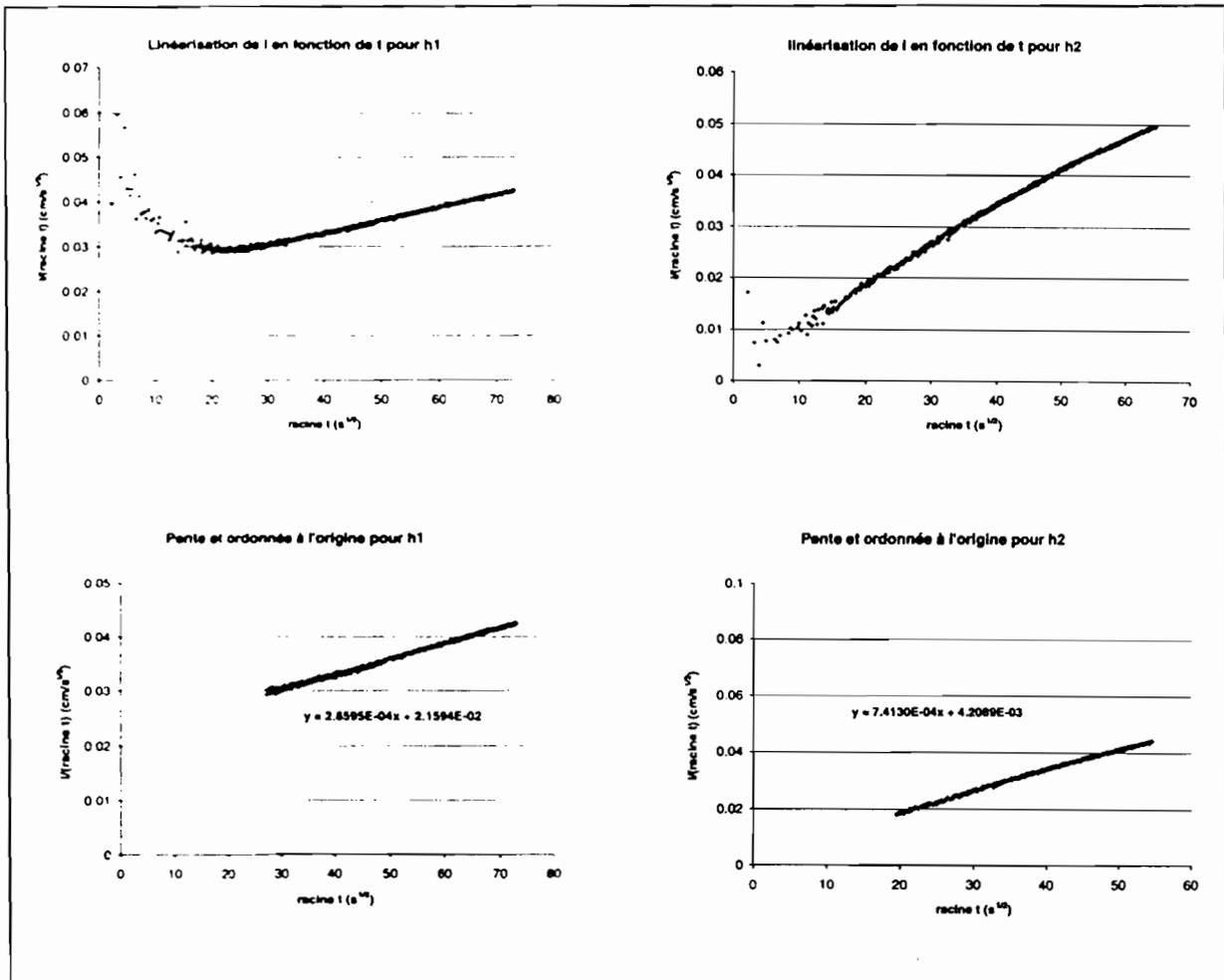


Figure 18 : Linéarisation de la courbe d'infiltration cumulée en fonction du temps et détermination de la pente et de l'ordonnée à l'origine dans le cas du Blanc 1 d'Ouru Madiou

Grâce aux deux densités de flux surfaciques (q_1 et q_2), l'équation de Wooding (Equation 50, p. 36) est résolue et fournit α (Equation 52, p. 37). Cette valeur est introduite dans la relation de Gardner (Equation 30, p. 31) et permet l'extrapolation des valeurs de $K(h)$ mesurées en K_s . Ces premiers résultats (q_1 , q_2 , S_1 , S_2 , α et K_s) sont présentés dans le tableau de l'Annexe 9.

Etant donné que la sorptivité est dépendante de la teneur en eau, la comparaison des valeurs de sorptivité implique leur standardisation par la formule empirique de Musy et Soutter (1991) (Equation 49, p. 35), et ce tenant compte des hypothèses mentionnées. Les teneurs en eau volumiques initiale et finale nécessaires à cette standardisation, ont été déterminées grâce aux prélèvements de sol sur le terrain et par la méthode de la poche plastique (Boivin, 1990). Les tableaux récapitulatifs de ces déterminations sont présentées dans les Annexes 2 et 3.

B) Guia 4

Nous avons prévenu qu'un site initialement prévu avait été mis de côté par manque de temps. Nous allons ici évoquer les raisons qui ont motivé notre choix.

Au niveau de la mesure de terrain, l'infiltration fut extrêmement lente. Par souci d'obtenir une quantité de données suffisantes, les tensions étaient appliquées 12 heures chacune.

Au niveau du traitement des données, certaines courbes obtenues sont très irrégulières, en ce sens qu'elles ne se « linéarisent » pas (Annexe 8, courbes des blancs 1, 2, 3 et solutions 1, 4, 6, 7 et 10).

Nous avons profité de la sortie de terrain suivante pour étudier le profil des 20 premiers centimètres. Nous avons pu constater deux discordances dans ses 20 premiers centimètres : une croûte de 2-2,5 cm en surface et une différence nette de teneur en eau à une profondeur de 12 cm.

Ces observations et des informations additionnelles nous ont permis d'émettre quelques hypothèses quant aux irrégularités des courbe enregistrées.

Les analyse chimiques du sol menées à différentes profondeurs révèlent, dans la tranche de 0-30 cm, à l'extérieur du périmètre, un ESP de 15.86 %. Cet ESP pourrait être responsable d'une déstructuration du sol telle que l'enregistrement de l'évolution des tensions en fonction du temps (c'est-à-dire de la lame d'eau infiltrée en fonction du temps) soit couvert par le bruit de la mesure, bruit dû aux fluctuations de tension causées par le phénomène d'ébullition dans le vase de Mariotte (Ankeny *et al.*, 1988).

La croûte de 2-2,5 cm peut être supposée responsable d'irrégularités de certaines courbes constatées pendant la première tension. Cependant cette hypothèse est mise à mal par la régularité des courbes du blanc 4 et des solutions 8, 11 et 12. La différence de teneur en eau située à une profondeur de 12 cm et révélée par un changement de couleur pourrait expliquer certaines irrégularités pendant la deuxième tension.

La compréhension de ces observations exigeait un temps dont nous ne disposons pas dans le cadre de ce travail ; mais il sera sujet de recherches ultérieures approfondies.

3. Résultats

Les résultats à partir desquels les graphes ont été dessinés sont présentés sous forme de tableau récapitulatif en Annexe 10. Les graphes présentés ci-après mettent en relation l'ESP et l'ESPP et les résultats, à savoir K_s et S pour l'infiltrométrie, α et n pour la tensiométrie et K_r pour la rétractométrie. Les graphes propres à chaque site sont mis en vis-à-vis, Ouru Madiou à gauche et Donaye à droite.

Vu l'absence généralisée de tendance, nous allons décrire les intervalles propres à l'ensemble des blancs et à chacune des familles de solutions d'infiltration.

Pour certains couples de graphe, l'allure générale de la courbe se présente différemment en fonction de l'ESP et de l'ESPP. Cette dissemblance provient du tri des ESP et ESPP par ordre croissant, le tri de l'un ne correspondant pas nécessairement à celui de l'autre. Mais malgré un ordonnancement éventuellement différent, les fourchettes de résultats varient peu. Pour Ouru Madiou, nous devons distinguer l'ESP et l'ESPP pour certaines fourchettes de la famille 2 vu qu'un des ESPP de cette famille, celui de l'échantillon 8, n'a pas été retenu, étant considéré comme non fiable.

A) Infiltrométrie

A.1 La conductivité hydraulique à saturation, K_s (Figure 19)

A.1.1 Ouru Madiou

L'ensemble des valeurs de K_s est repris entre $3,85 \cdot 10^{-5}$ et $7,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Les valeurs des blancs varient de 1 à $4,5 \cdot 10^{-4}$ cm/s et celles de la famille 1 sont pratiquement entièrement dans la gamme de ces dernières, allant de $5 \cdot 10^{-5}$ à $4,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Pour la famille 2, les K_s obtenus passent de $3,85 \cdot 10^{-5}$ à $6,75 \cdot 10^{-4}$ cm/s et pour la famille 3, de $4,15 \cdot 10^{-5}$ à $7,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

A.1.2 Donaye

Au niveau des valeurs de K_s de Donaye, l'intervalle de valeurs est borné par $1,6 \cdot 10^{-5}$ et $3,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Les valeurs mesurées avec les blancs sont comprises entre $3,1 \cdot 10^{-5}$ et $1,35 \cdot 10^{-4}$ cm/s et les valeurs de K_s de la famille 1 présentent une gamme similaire à celles des blancs, variant entre $1,7$ et $9,1 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Les valeurs de la famille 2 sont encadrées par $3,1 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-4}$ cm/s alors que celles de la famille 3 le sont par $6,7 \cdot 10^{-5}$ et $3,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

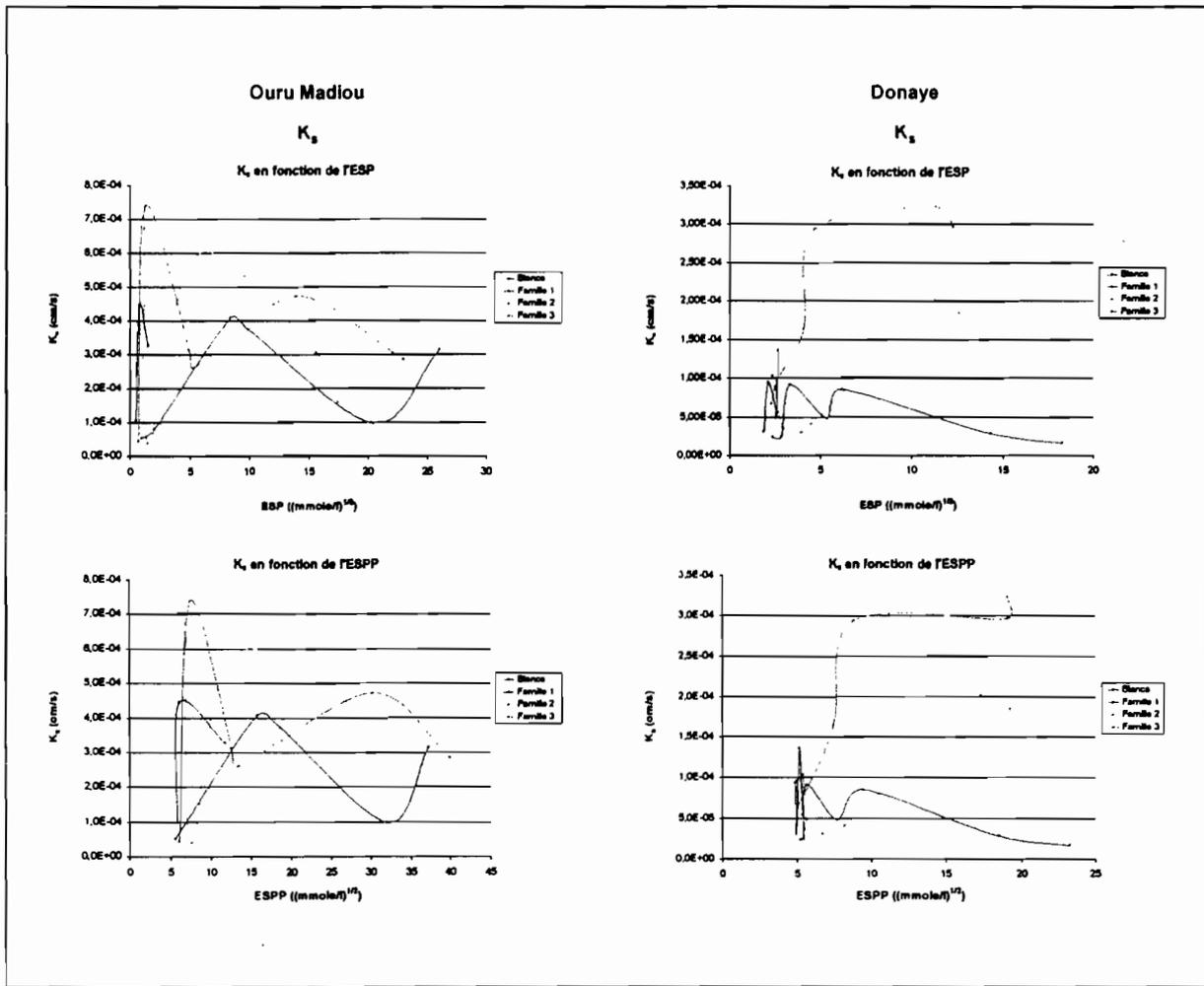


Figure 19 : K_s en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye

A.2 La sorptivité standard, S (Figure 20)

A.2.1 Ouru Madiou

A Ouru Madiou, les valeurs de sorptivité des 3 familles et des blancs sont dans l'intervalle $6,75 \cdot 10^{-3}$ - $4,95 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2}. Par rapport à ces bornes, les valeurs des blancs couvrent une large gamme de valeurs, celles-ci passant de $6,75 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2}. Les valeurs minimale et maximale de la famille 1 sont $7,8 \cdot 10^{-3}$ et $3,9 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2} tandis que les valeurs de la famille 2 couvre presque la totalité de l'intervalle des valeurs rencontrées, passant de $1,5 \cdot 10^{-2}$ à $4,95 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2}. Les valeurs de sorptivité de la famille 3 passent, quant à elles, de $2,6 \cdot 10^{-2}$ à $3,6 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2}.

Il est à noter que si la sorptivité n'est plus exprimée en fonction de l'ESP mais de l'ESPP, ni la borne supérieure de la totalité des valeurs, ni celle de la famille 2, n'est plus $4,95 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2} mais, respectivement $3,9 \cdot 10^{-2}$ et $3,55 \cdot 10^{-2}$ cm/s^{1/2}.

A.2.2 Donaye

Toutes les valeurs de sorptivité de Donaye sont bornées par les valeurs de $2,3 \cdot 10^{-3}$ et $5,15 \cdot 10^{-2}$ $\text{cm/s}^{1/2}$. Les valeurs de S des blancs présentent $2,3 \cdot 10^{-3}$ comme minimum et $3,5 \cdot 10^{-2}$ $\text{cm/s}^{1/2}$ comme maximum. Celles de la famille 1 varient de $4,55 \cdot 10^{-3}$ à $2,1 \cdot 10^{-2}$ $\text{cm/s}^{1/2}$. La famille 2 présente des valeurs comprises entre $1 \cdot 10^{-2}$ et $5,15 \cdot 10^{-2}$ $\text{cm/s}^{1/2}$ et la famille 3 entre $1,65 \cdot 10^{-2}$ et $4,4 \cdot 10^{-2}$ $\text{cm/s}^{1/2}$.

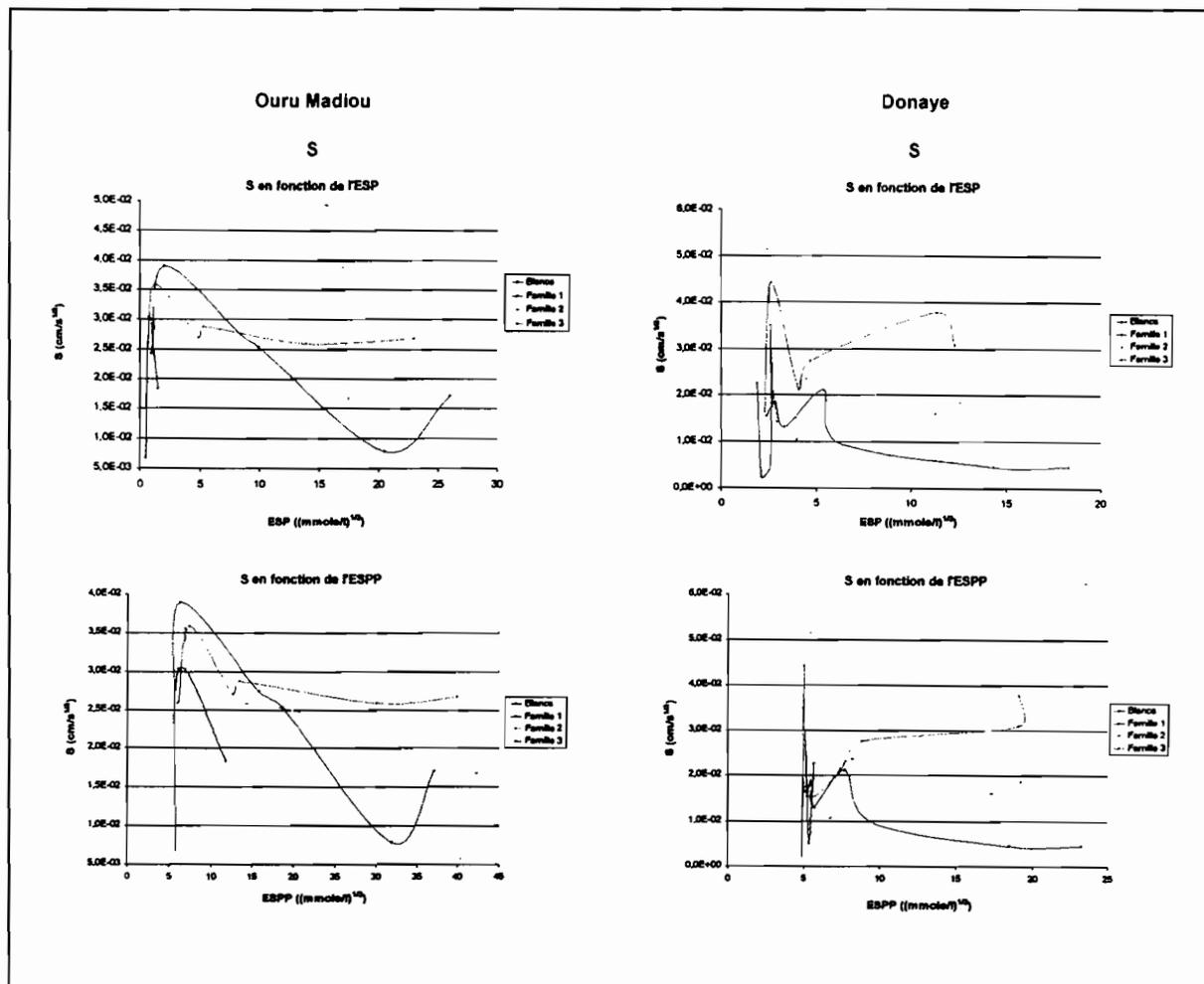


Figure 20 : S en fonction de l'ESP et l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye

B) Tensiométrie

B.1 α , α (Figure 21)

B.1.1 Ouru Madiou

Pour l'ensemble des résultats, les valeurs d' α estimées varient de $4,95 \cdot 10^{-3}$ à $8,2 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} . Du point de vue des blancs, les valeurs se présentent entre $6,1$ et $7,75 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} . Celles des familles 1 et 2 sont dans les intervalles respectifs suivants : de $5,2$ à $8,2 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} et de 5 à $7,5 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} tandis que les

valeurs de la famille 3 couvrent presque l'ensemble des valeurs d' α , avec des bornes de $4,95$ et $8,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

B.1.2 Donaye

Les valeurs d' α de Donaye sont variablement distribuées, allant de $2,5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$. Celles des blancs de Donaye sont circonscrites par $2,5 \cdot 10^{-3}$ et $1,45 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$. La famille 1 présente un éventail de valeurs comprises entre $3,9 \cdot 10^{-3}$ et $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ et la famille 2 entre $4,85 \cdot 10^{-3}$ à $2,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$. Les valeurs d' α pour la famille 3 varient de $5,5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$.

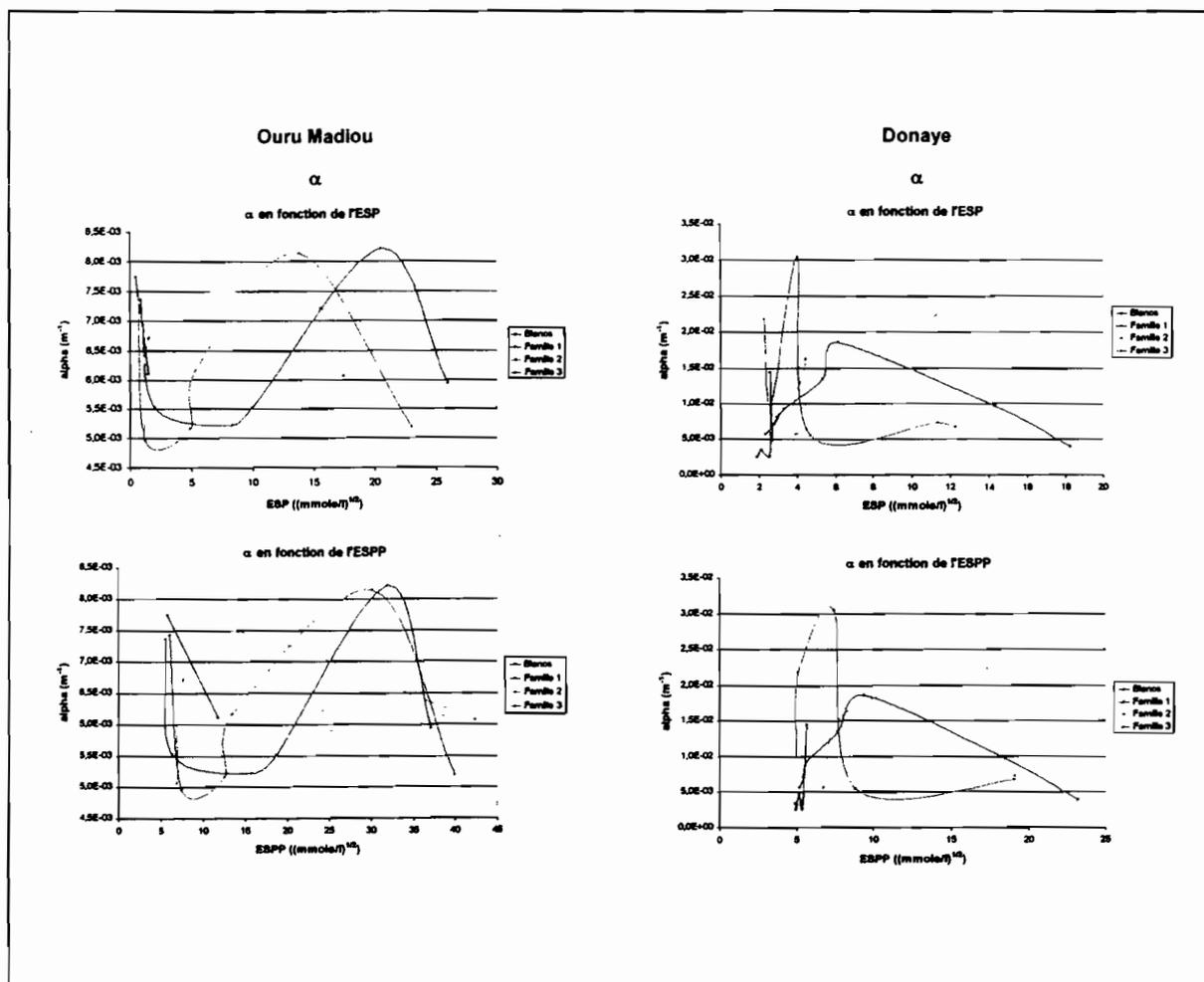


Figure 21 : α en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye

B.2 Le paramètre n (Figure 22)

B.2.1 Ouru Madiou

En fonction de l'ESP, les deux valeurs extrêmes de n obtenues à Ouru Madiou sont 2,05 et 3,8. Les valeurs des blancs sont comprises entre 2,45 à 2,6 tandis que les bornes de la famille 1 correspondent aux valeurs extrêmes, à savoir : 2,05 à 3,8. La famille 2 présente des valeurs comprises entre 2,35 et 3,5 et la famille 3 entre 2,35 et 3,8.

En fonction de l'ESPP, seule la borne inférieure de la famille 2 varie : la valeur minimale de 2,05 est remplacée par 2,68.

B.2.2 Donaye

L'ensemble des valeurs de n est borné par les valeurs extrêmes de la famille 3 qui se démarque fortement des blancs et des deux autres familles avec des valeurs comprises entre 1,15 et 2,85. Les valeurs des blancs varient de 1,15 à 1,6 alors que celles des familles 1 et 2 restent pratiquement constantes, prenant, pour la première, des valeurs de 1,15 à 1,4 et, pour la deuxième, de 1,15 à 1,35.

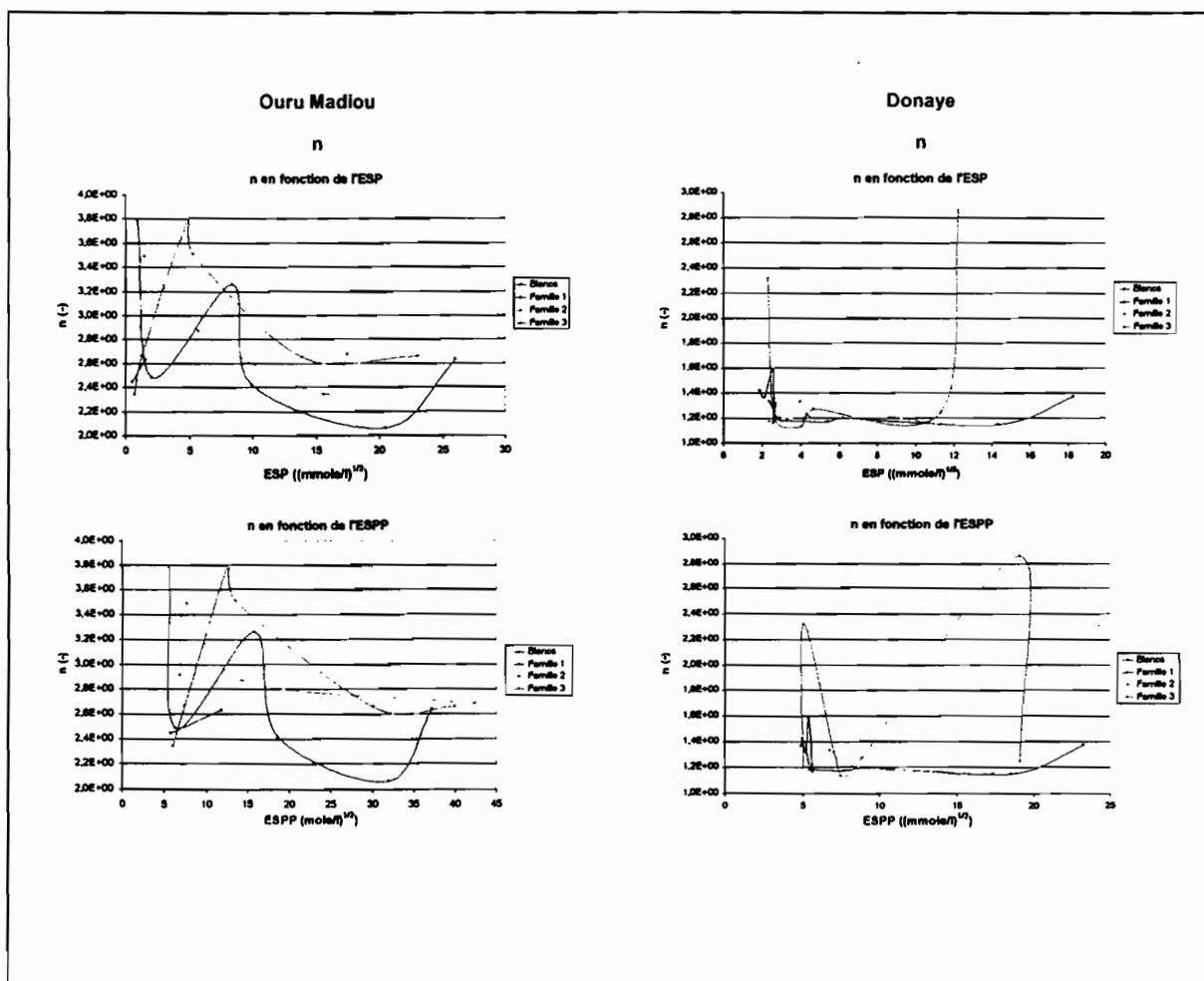


Figure 22 : n en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye

C) La tangente, K_r (Figure 23)

C.1 Ouru Madiou

Pour l'ensemble des K_r , la fourchette de valeurs est de $3,55 \cdot 10^{-2}$ à $1,1 \text{ cm}^3/\text{g}$. Les valeurs de K_r des blancs sont comprises entre $1,15$ et $2,9 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$. Celles de la famille 1 varient de $6,6 \cdot 10^{-2}$ à $1,1 \text{ cm}^3/\text{g}$ alors que les valeurs de la famille 2 sont limitées par $3,5 \cdot 10^{-2}$ et $1,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$. La famille 3, quant à elle, présente des valeurs de K_r à l'intérieur d'un intervalle borné par $7 \cdot 10^{-2}$ et $6,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$.

C.2 Donaye

Pour les 4 faciès, l'ensemble des blancs et les 3 familles de solutions, la valeur minimale de K_r est $4,4 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$ et la valeur maximale $1,1 \text{ cm}^3/\text{g}$. Ces deux valeurs sont aussi les extrêmes des valeurs calculées de la famille 3. L'ensemble des valeurs des blancs est repris entre $7,7$ et $9,1 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$. La famille 1 a ses valeurs bornées par $6,85$ et $9,6 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$ et les valeurs de la famille 2 fluctuent entre $6,6$ et $9,2 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$.

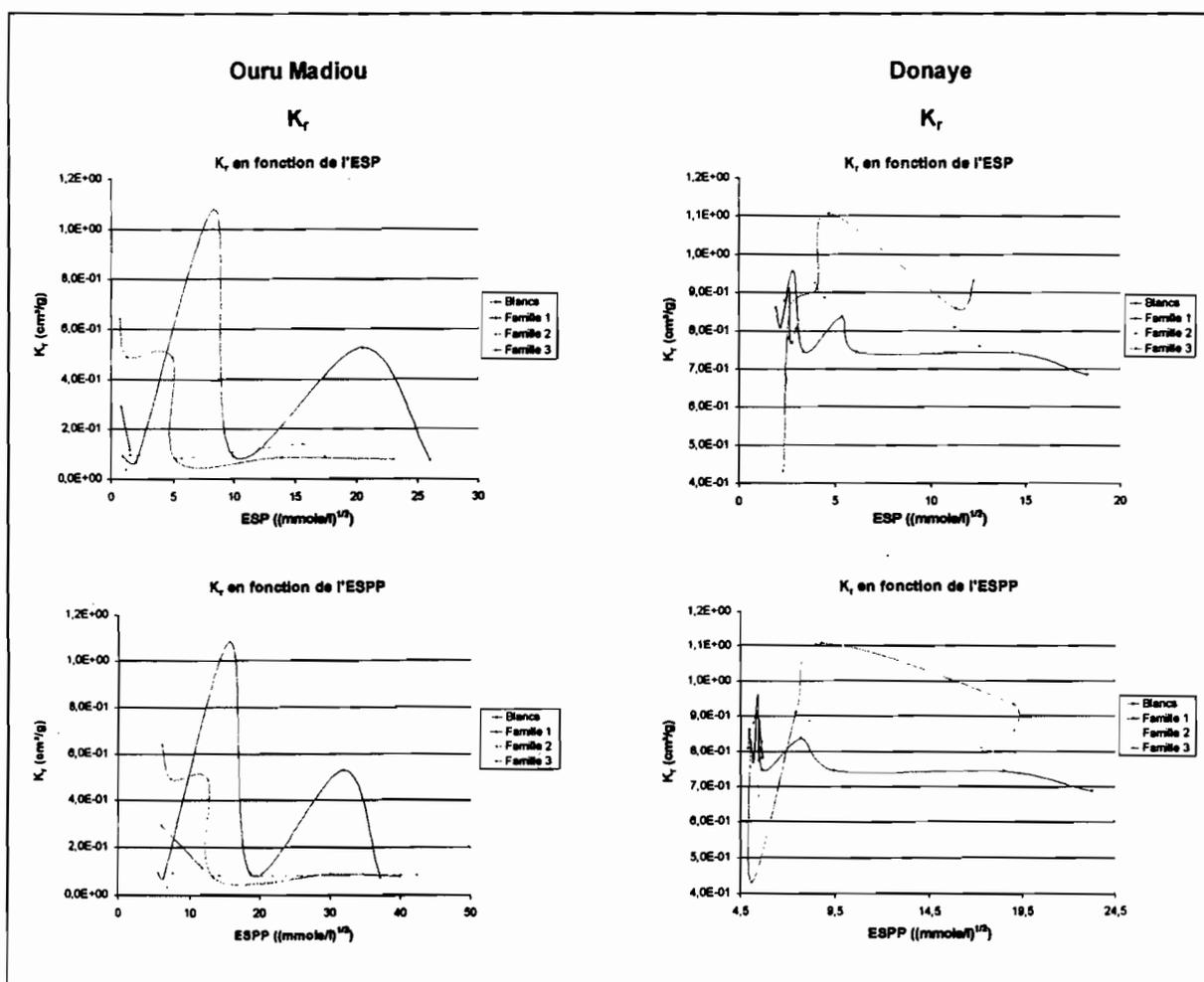


Figure 23 : K_r en fonction de l'ESP et de l'ESPP à Ouru Madiou et Donaye

4. Discussion

A) Infiltrométrie

A.1 La conductivité hydraulique

Comparant les valeurs de conductivité hydraulique à saturation de matériaux de textures différentes, Musy et Soutter (1991) observent que la conductivité hydraulique diminue de 10^{-3} à 10^{-11} m/s, de la texture sableuse grossière à argileuse et situent le « niveau d'imperméabilité » à $K_s \leq 10^{-6}$ m/s.

Vu les types de sol observés sur nos deux sites d'investigation, il était attendu que la conductivité hydraulique à saturation mesurée à Ouru Madiou soit supérieure à celle observée à Donaye. Une telle différence est constatée mais elle est non significative : les conductivités hydrauliques à saturation varient entre $3,85 \cdot 10^{-5}$ et $7,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s à Ouru Madiou et entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ et $3,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s à Donaye.

La littérature montre que la conductivité hydraulique à saturation varie avec le SAR, et donc avec la proportion de sodium sur le complexe d'échange (ESP), ces deux paramètres étant corrélé (USDA, 1954).

Dès 1954 (USDA, 1954), une valeur d'ESP de 15 est reconnue comme seuil à ne pas dépasser pour éviter des perturbations de la structure du sol et donc de la conductivité hydraulique. Quirk et Schofield (1954) ont mis en évidence qu'à faible concentration en électrolytes, la valeur seuil d'ESP est encore plus faible.

En utilisant des solutions d'infiltration de différentes valeurs de SAR dans trois types de sols de Californie, Abu-Sharar *et al.* (1987) ont observé que la conductivité hydraulique à saturation diminuait avec l'augmentation du SAR. Bien que démontrant l'inexistence de valeurs critiques d'ESP à de faibles concentrations en sels pour deux sols siciliens, Crescimanno *et al.* (1995) ont aussi observé une diminution de la valeur de K_s en fonction de l'ESP.

Finalement, qu'un seuil existe ou pas et quelle que soit sa valeur, la littérature est unanime : l'augmentation de l'ESP a des conséquences négatives sur la conductivité hydraulique à saturation du sol.

A.2 La sorptivité

La sorptivité est intimement dépendante de la teneur en eau. Cette dépendance nécessite de spécifier la teneur en eau à laquelle la sorptivité est mesurée. Dans notre cas, nous avons procédé à la « standardisation » des valeurs de sorptivité en utilisant la formule empirique de Musy et Soutter

(Equation 49, p. 35). D'après leur relation empirique, Musy et Soutter (1991) présentent les valeurs de sorptivité standard en fonction de la texture suivantes :

Sable fin : $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}^{1/2}$

Limon : $4,9 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}^{1/2}$

Argile : $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$

Nos valeurs de sorptivité varient de $6,75 \cdot 10^{-3}$ à $4,95 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}^{1/2}$ à Ouru Madiou et de $2,3 \cdot 10^{-3}$ à $5,15 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}^{1/2}$ à Donaye.

Compte tenu que les valeurs précisées dans la littérature ne sont pas mesurées pour $\theta_i = 0$, leur comparaison avec nos résultats est mal aisée.

B) Tensiométrie

Les deux paramètres de distribution de la taille des pores de van Genuchten (1980), α et n , sont considérés comme dépendant des paramètres de distribution de la taille des agrégats, d_g et σ_g (Equations 54 et 55, p. 39 : Shirazi *et al.*, 1988 ; Scheinost *et al.*, 1996).

Si la déstructuration du sol avait été observée, nous nous serions *a priori* attendu à une diminution de la taille des agrégats et donc du paramètre α et à une diminution de la variance de la taille (diamètre) et donc à une augmentation de n avec l'ESP.

C) Rétractométrie

En cas de déstructuration, nous supposons que la tangente à la courbe de rétractométrie aurait varié, mais nous n'avons pas trouvé de résultats auxquels comparer nos valeurs et nos résultats ne montrent aucune tendance.

5. Conclusions

Les résultats récoltés ne correspondent manifestement pas à ceux escomptés : ce travail sur l'impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques du sol dans la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal n'a pas mis en relief des principes déjà établis sous d'autres conditions expérimentales et n'en a pas établi d'autres, plus spécifiques à notre zone de travail.

A partir de ce constat, il nous paraît incontournable et instructif de nous remettre en question, autant au niveau de l'expérimentation sur le terrain que dans le choix des modèles déterministes. Cette analyse,

que nous voulons constructive, se rapporte à l'infiltrométrie. Nous allons, à partir de notre expérience sur le terrain et des embûches rencontrées, réfléchir au protocole mis en œuvre et émettre quelques propositions ; et, à partir de la littérature, proposer des pistes de réflexion sur l'adéquation des modèles théoriques.

A) Organisation des sorties de terrain

Avant tout, nous pensons nous être trop dispersée. L'étude d'un seul site avec un ensemble d'échantillons statistiquement représentatifs aurait permis de tirer des conclusions plus fiables et plus rigoureuses sur l'évolution de la structure en fonction de la composition des eaux d'irrigation.

Nous préconiserions d'étudier un moindre nombre de familles de solutions mais mieux caractérisées, par exemple en infiltrant une seule famille de huit à neuf solutions.

Pour tenir compte de la variabilité spatiale, il serait nécessaire de penser l'ordonnement des blancs par rapport à la distribution des solutions.

Au niveau des infiltrations *sensu stricto*, le volume d'eau de préinfiltration devrait être revu pour Donaye car ce site est beaucoup plus argileux et composé d'argiles gonflantes. De plus, le temps d'équilibration entre eau d'irrigation, solution du sol et complexe d'échange s'est vraisemblablement avéré insuffisant.

Nous croyons n'avoir pas avoir profité des informations que recelaient les échantillons de sol, entre autre au niveau des analyses chimiques de la solution drainante ou de l'extrait de pâte saturée pour définir les relations ESP-SAR et ESPP-SPAR.

B) Les modèles déterministes

La sélection des modèles est fonction du type d'application, de la rigueur mathématique et physique exigée et des préférences de l'utilisateur (Clausnitzer *et al.*, 1998). Nous ne prétendons pas proposer ici un aperçu de la littérature sur les conditions d'application des différents modèles mais seulement des pistes de réflexion.

Les conclusions des articles sont strictement applicables aux conditions de travail rencontrées mais il pourrait être intéressant de rapporter ce type de raisonnement aux sols à caractériser.

B.1 La détermination de la sorptivité grâce à l'équation de Philip

Clausnitzer *et al.* (1998) comparent sept modèles d'infiltration pour étudier leur capacité à simuler les données d'infiltration, à savoir : les modèles de Green-Ampt (1911) et Philip (1957) avec deux paramètres ; ceux de Horton (1940), Mezencev (1948), Swartzendruber (1987) et Parlange *et al.* (1982) avec 3 paramètres et enfin celui de Barry *et al.* (1995) avec 4 paramètres.

Ces modèles ont été comparés à des courbes de rétention et de conductivité hydraulique de référence décrites par les modèles de van Genuchten (1980) pour un sol argileux et un limon sableux. Il a été conclu des expérimentations menées que la sorptivité prédite par le modèle de Philip était proche de la valeur théorique attendue pour les sols étudiés. Cette modélisation est donc considérée comme adéquate pour la détermination de la sorptivité.

B.2 L'utilisation du modèle de Gardner

Nous avons utilisé la relation de Gardner pour extrapoler les deux conductivités hydrauliques, $K(h_1)$ et $K(h_2)$, et déterminer K_s .

A l'inverse de Simunek et van Genuchten (1997) qui reconnaissent la validité de la traditionnelle analyse de Wooding/Gardner comme première approximation, Jarvis et Messing (1995) remettent en cause l'adéquation de la relation de Gardner pour la mesure de la conductivité hydraulique proche de la saturation (à des tensions de 10 à 5 cm).

En effet, ces derniers ont confronté les valeurs pairées expérimentales de $K(h)$ et h , récoltées pendant le régime constant, à trois modèles :

- 1) une simple exponentielle (Gardner)
- 2) une exponentielle double correspondant à un système poral bimodal (Keng & Lin, 1982 ; Messing & Jarvis, 1993)
- 3) la fonction continue de Mualem - van Genuchten (Mualem, 1976 ; van Genuchten, 1980).

Les résultats mettent en évidence que la valeur de K_s estimée par extrapolation à partir de mesures de conductivité hydraulique insaturée, dans des conditions proches de la saturation est étroitement dépendante du modèle choisi pour $K(h)$.

Le degré de précision de chacun des modèles était évalué par la somme des carrés moyens et vu la valeur élevée de cette somme, la relation de Gardner a dû être écartée par Jarvis et Messing (1995). Par contre, les deux autres modèles se révèlent beaucoup plus appropriés.

C) Perspectives

Que préconiserions-nous pour caractériser *in situ* l'impact de la qualité de l'eau d'irrigation en Moyenne Vallée du fleuve Sénégal en ayant 6 mois disponibles pour y séjourner ?

Dans le cadre de ce sujet, l'expérimentation sur le terrain semble fondamentale et l'est, pour autant que les outils théoriques aient été comparés pour déterminer lequel convient le mieux vu les conditions d'application. Cette détermination nous semble faire partie intégrante du travail de recherche.

Les sorties de terrain devraient être mieux réparties dans le temps pour permettre de rectifier le protocole si les conditions de travail ne sont pas remplies, comme ce fut le cas pour le temps de séchage des sols préinfiltrés. Nous croyons que 45 jours de terrain sont suffisantes pour travailler un seul site et notre choix se porterait sur le site d'Ouru Madiou qui a déjà été sujet de nombreuses recherches (Boivin *et al.*, 1995 ; De Luca, 1996).

Nous limiterions les faciès infiltrés à deux : (1) l'eau déminéralisée, pour les mesures de référence, et (2) une seule famille de solutions. Afin d'acquérir des données statistiquement fiables sur l'impact de la famille de solutions infiltrées sur le site choisi, celle-ci comporterait 8 à 10 solutions, correspondant à une concentration croissante de sels.

Il faudrait adapter à chaque site la quantité d'eau de préinfiltration, pour s'assurer que le complexe d'échange soit significativement influencé par l'eau d'irrigation. Au niveau des analyses chimiques, la solution devrait être caractérisée par un extrait de pâte saturée du sol en fin de deuxième tension afin d'en calculer le SAR.

Au niveau de la modélisation, nous croyons que les données de terrain n'ont pas été suffisamment exploitées. Il conviendrait d'appliquer différents modèles, analytique et numérique, que ce soit pour la détermination de la sorptivité ou pour l'extrapolation des conductivités hydrauliques, et de les comparer.

Dans cette perspective, il serait intéressant d'utiliser une approche récente qu'est l'inversion numérique de l'équation de Richards. Le principe de cette approche est la minimisation d'une fonction-objectif, fonction qui exprime les divergences entre les valeurs observées et la réponse attendue par le modèle numérique. Cette minimisation de la fonction-objectif est réalisée par la méthode de minimisation non linéaire de Marquardt (1963), avec génération d'intervalles de confiance autour des paramètres optimisés. Les estimations initiales des paramètres optimisés sont améliorées par itération lors du processus de minimisation jusqu'à atteindre le degré de précision souhaité. Il est donc possible de valider les mesures.

Simunèk *et al.* (1996, 1997) ont utilisé cette approche pour déterminer le nombre de données de terrain nécessaires pour obtenir un minimum unique à cette fonction objectif. A partir du modèle analytique des propriétés hydrauliques du sol de van Genuchten (1980), ils ont conclu que la seule mesure d'infiltration cumulée ou d'infiltrabilité ne fournit pas ce minimum unique pour la détermination de

K_s , α et n . Il faut simultanément mesurer les tensions et les teneurs en eau. Cette méthode a aussi permis de comparer différentes méthodes de terrain (Simunek *et al.*, 1998).

Et finalement, pour les sols de Donay, qui contiennent des argiles de type gonflant, il faudrait intégrer le potentiel géostatique par un modèle numérique adéquat (Kim *et al.*, 1992).

Même si ce travail n'apporte pas en tant que tel des résultats, nous espérons qu'il générera une réflexion et des travaux ultérieurs qui porteront leurs fruits.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ABU-SHARAR T.M., BINGHAM F.T., RHOADES J.D. 1987. Reduction in Hydraulic Conductivity in relation to Clay Dispersion and Disaggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 51 : 342-346.

ADAMS W.M., HUGHES F.M.R. 1990. *Irrigation Development in Desert Environments. Techniques for desert reclamation*, Goudie, Oxford : 135-160.

ANKENY M.D., KASPAR T.C., HORTON R. 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 3 : 893-896.

ANONYME. 1993. *Bulletin Technique n°7*, SAED.

ANONYME. 1997. *Rapport final ORSTOM-ISRA 1996-97*.

AYERS R.S., WESTCOT D.W. 1976. *La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 29*, Rome, 81 p.

BLACK 1968. *Soil-Plant Relationship*. Wiley, New York, 792 p.

BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL-ODOUX C. 1990. Densité apparente d'échantillon de sol : méthode de la poche plastique. *Milieux poreux et hydriques, bulletin du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique et des Techniques associées*, 28 : 59-71.

BOIVIN P., DIA I., LERICOLLAIS A., POUSSIN J.-C., SANTOIR C., SECK S.M. 1995. *Nianga, Laboratoire de cultures irriguées en moyenne vallée du Sénégal*. ORSTOM, Paris, 562 p.

BOIVIN P., FAVRE F., MAEGHT J.-L. 1998. Sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : caractéristiques et évolution sous irrigation. *Etude et gestion des sols*, 5, 4 : 235-246.

BRAUDEAU E. 1992. *La structure du sol, son interaction avec l'eau. Aspects qualitatifs et quantitatifs. Rapport de synthèse, Atelier de Formation aux Techniques d'Etude de l'eau dans les systèmes Sol-Plante-Atmosphère*.

BRESLER E., MCNEAL B.L., CARTER D.L. 1982. *Saline and Sodic Soils : Principles-Dynamics-Modeling*. Springer-Verlag, Berlin, 236 p.

CHAMAYOU H., LEGROS J.-P. 1989. *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Agence de Coopération Culturelle et Technique.

CHEVERRY C., BOURRIE G. n.d. La salinisation des sols *in* Sols : interfaces fragiles, INRA & Nathan, 3^e partie : 1-24.

CLAUSNITZER V., HOPMANS J.W., STARR J.L. 1998. Parameter uncertainty Analysis of Common Infiltration Models. *Soil Science Society of America Journal* 62 (6) : 1477-1487.

CRESCIMANNO G., IOVINO M., PROVENZANO G. 1995. Influence of Salinity and Sodicity on Soil Structural and Hydraulic Conductivity Characteristics. *Soils Science Society of America Journal*, 59 : 1701-1708.

DELARIVIERE J. 1998. Notes de laboratoire : Analyse rétractométrique Dakar-utilisation. ORSTOM, Dakar, 13 p.

DE LUCA A. 1996. Caractérisation physique des sols alluviaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal- Etude préliminaire pour une détermination des conductivités hydrauliques à saturation. Mémoire EPFL et ORSTOM, Dakar, 83 p.

DRIESSEN P.M., DUDAL R. 1991. The major soils of the world. Agricultural University, Wageningen, 310 p.

DROUBI A. 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Sciences Géologiques, mémoire n°46, 177p.

DUBRESSON A., MARCHAL J.-Y., RAISON J.-P. 1994. Les Afriques au sud du Sahara. Belin, Paris, 480 p.

HAVERKAMP R., ROSS P.J., SMETTEN K.R.J., PARLANGE J.Y., 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disk infiltrometer. *Water Resources Research*, 31 (10) : 2491-2495.

HILLEL D. 1988. L'eau et le sol – Principes et processus physiques. Academia, Louvain-la-Neuve, 288 p.

IWATA S., TABUSHI T. 1988. Soil-Water interactions : Mechanisms and applications. Marcel Dekker, New York, 265 p.

JARVIS N.J., MESSING I. 1995. Near-saturated Hydraulic Conductivity in Soils of contrasting Texture Measures by Tension Infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* 59,1 : 27-34.

KIM D.J., VEREecken H., FEYEN J., VANCLOOSTER M., STROONIJDER L. 1992. A numerical Model of Water Movement and Soil Deformation in a Ripening Marine Clay Soil. *Modeling Geo-Biosphere Processes*, 1 : 185-203.

- KUTILEK M., NIELSEN D.R. 1994. Soil Hydrology. GeoEcology, Germany, 370 p.
- LOYER J.-Y. 1989. Les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal : caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Thèse de doctorat, ORSTOM, Paris.
- LOZET J., MATHIEU C. 1997. Dictionnaire de Science du sol. Tec & Doc, Paris, 488 p.
- MAEGHT J.L. 1998. Notes : rapport sur la modification de l'infiltromètre. ORSTOM, Dakar, 9 p.
- MARLIER C. 1998. Contribution de la géomatique à la conception d'un plan d'aménagement forestier intégré aux systèmes de production villageois. Mémoire de fin d'étude, Faculté Agronomique, UCL.
- MEYER L. 1997. Etude du transport des sels au cours des écoulements et de l'évolution des propriétés physiques du sol au contact de différentes solutions salines. Mémoire EPFL-ORSTOM, Dakar.
- MOUTIER M. 1996. Hydrodynamic properties of unsaturated porous media as affected by clay dispersion and migration induced by water quality. Mémoire de fin d'étude, Faculté Agronomique, UCL, 199 p.
- MUSY A., SOUTTER M. 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 335 p.
- SAMBA-DIENE R. 1998. Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée de fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture, Thèse ORSTOM, Dakar.
- SCHEINOST A., SINOWSKI W., PRIESACK E. 1996. Regionalisation of soil property functions in a highly variable soilscape *dans* The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe, workshop proceedings, Orléans : 65-69.
- SHIRAZI M.A., BOERSMA L., HART J.W. 1988. A unifying quantitative analysis of soil texture : Improvement of precision and extension scale. Soil Science Society of America Journal, 52, 1 : 181-190.
- SIMUNEK J., VAN GENUCHTEN M.T. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. Water Resources Research, 32, 9 : 2683-2696.
- SIMUNEK J., VAN GENUCHTEN M.T. 1997. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data. Soil Science, 162, 6 : 383-398.
- SIMUNEK J., VAN GENUCHTEN M.T., GRIBB M.M., HOPMANS J. 1998. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. Soil & Tillage Research, 47 : 27-36.
- SPOSITO G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press, New York, 277 p.

TAN H.K. 1982. Principles of Soil Chemistry. Dekker, New York, 265 p.

TESSIER D. 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse de Doctorat, INRA, Paris, 361 p.

THONY J.L., VACHAUD G., CLOTHIER B.E., DANIEL T.C. 1990. Field measurement of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, 4 : 111-123.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF. (1954) 1969. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA, Agriculture Handbook, 60, 160 p.

VAN GENUCHTEN M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 : 892-898.

VAUCLIN M., CHOPART J.-L. 1992. L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'agronomie tropicale*, 46, 4 : 259-272.

WOODING R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4 : 1259-1273.

ZHANG R. 1997a. Determination of Soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer, 1997, *Soil Science Society of America Journal*, 61, 4 : 1024-1030.

ZHANG R. 1997b. Infiltration models for the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 6 : 1597-1603.

ZHANG R. 1998. Estimating Soil hydraulic Conductivity and macroscopic Capillary Length from the Disk Infiltrator. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 6 : 1513-1521.

NETTOGRAPHIE

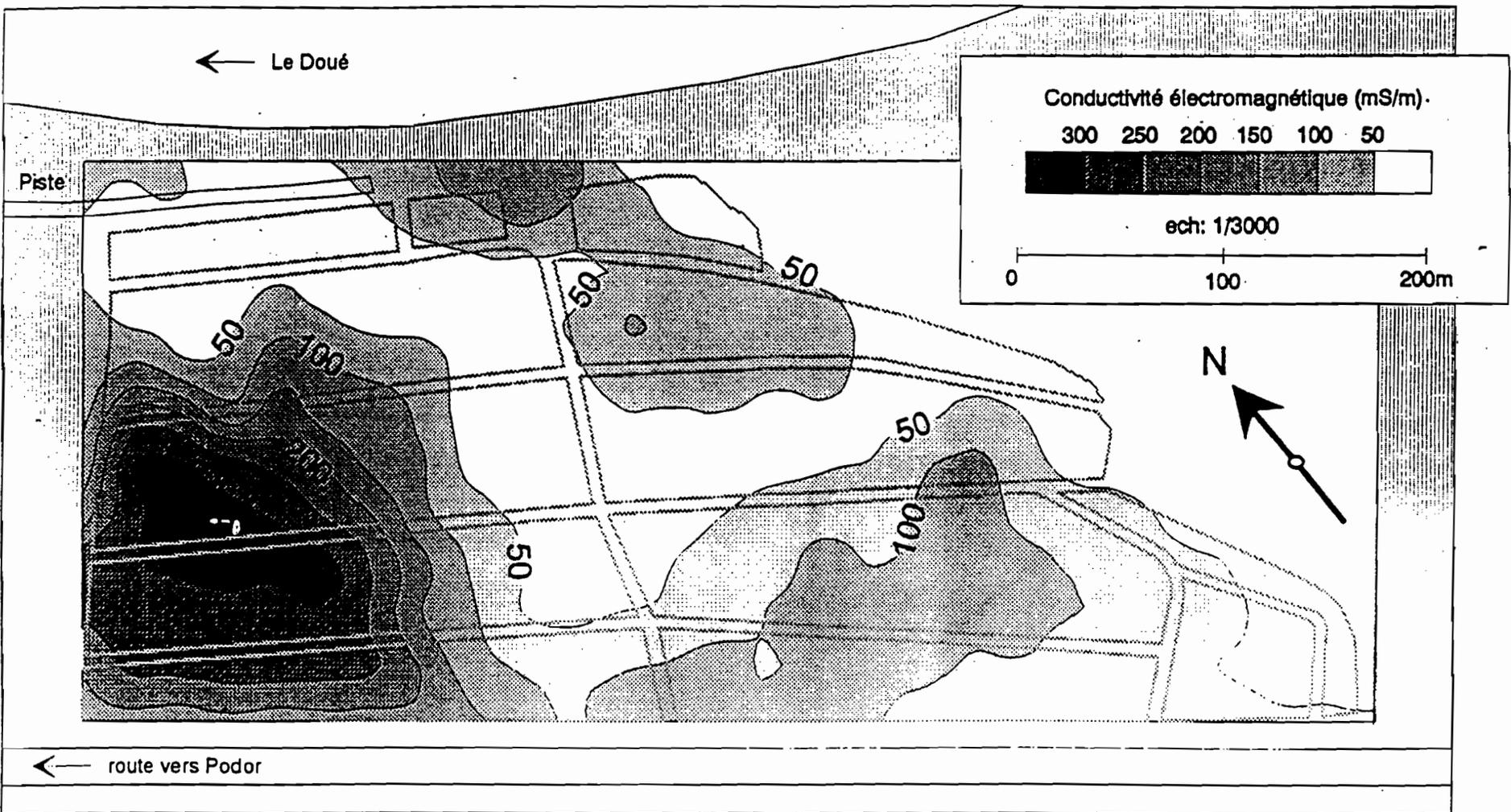
1. <http://ciapubs.bilkent.edu.tr/publications/factbook/sg.html#geo>

2. http://www.theodora.com/wbf/senegal_people.html

ANNEXES

Liste des Annexes :

Annexe 1 : Carte de salinité d'Ouru Madiou et localisation de la surface étudiée	65
Annexe 2 : Détermination de la teneur en eau volumique, θ , pour les échantillons de sol d'Ouru Madiou	66
Annexe 3 : Détermination de la teneur en eau volumique, θ , pour les échantillons de sol de Donaye	67
Annexe 4 : Analyse chimique des échantillons de sols d'Ouru Madiou et de Donaye	68
Annexe 5 : Graphiques de la relation ESP-SAR et ESPP-SPAR	69
Annexe 6 : Courbes d'infiltration d'Ouru Madiou	70
Annexe 7 : Courbes d'infiltration de Donaye	75
Annexe 8 : Courbes d'infiltration de Guia 4	80
Annexe 9 : Tableau récapitulatif des valeurs de q , S , α et K_s d'Ouru Madiou et Donaye	83
Annexe 10 : Tableau récapitulatif des résultats	84
Annexe 11 : Courbes de rétention des échantillons de sols d'Ouru Madiou et de Donaye	85
Annexe 12 : Analyse rétractométrique des échantillons d'Ouru Madiou et de Donaye	86



Annexe 2 : Détermination de la teneur en eau volumique, θ_v pour les échantillons

de sol d'Ouru Madiou

Solutions	Référence	Tare (g)	Poids saturé (g)	Poids saturé net (g)	Poids sec (g)	Poids sec (net)	Teneur en eau (g)	Thêta	Poids échantillon (g)		Voi déplacé (cm ³)	Voi déplacé sans plastique (cm ³)	Densité apparente (g/cm ³)	
									sans plastique	avec plastique				
Blanc 1	initia	47	19,17	171,9	152,73	166,58	146,41	0,32	0,00	9,75	6,08	6,08	6,2278	1,40
	final	155	15,64	189,8	154,16	147,74	132,1	22,08	0,11	49,6	34,05	34,05	33,2978	1,40
Blanc 2	initia	269	20,39	177,1	156,71	174,25	153,86	2,65	0,03	5,04	4,34	4,34	3,5878	1,40
	final	448	16,25	218,5	202,25	186,39	172,14	30,11	0,22	84,77	63,66	63,66	63,1078	1,30
Blanc 3	initia	1	15,6	148,68	133,08	147,72	132,12	0,98	0,01	2,41	2,05	2,05	1,2978	1,88
	final	239	19,67	218,5	198,83	186,5	169,83	29	0,23	80,72	59,2	59,2	58,4478	1,55
Blanc 4	initia	6	19,04	194,6	175,56	186,21	170,17	5,39	0,04	29,68	21,48	21,48	20,7278	1,43
	final	53	19,68	224,6	206,12	193,13	173,45	31,67	0,23	71,04	48,09	48,09	47,3378	1,50
Blanc 5	initia	23 A	15,97	148,7	132,73	142,48	126,52	6,21	0,06	13,56	11,32	11,32	10,5878	1,28
	final	7	14,61	171,1	156,49	150,58	136,97	20,32	0,18	20,38	15,35	15,35	14,5878	1,40
Blanc 6	initia	23 A	15,97	148,7	132,73	142,48	126,52	6,21	0,06	13,56	11,32	11,32	10,5878	1,28
	final	13	14,68	180,8	146,12	141,25	126,57	19,55	0,19	73,48	53,53	53,53	52,7778	1,38
1	initia	223	20,18	151,5	131,32	141,45	121,27	10,05	0,09	9,27	8,24	8,24	7,4878	1,24
	final	1020	15,61	189,9	174,29	163,46	147,85	26,44	0,22	28,77	20,6	20,6	19,8478	1,45
2	initia	312	20,22	180,88	160,68	186,92	166,7	13,98	0,11	36,73	26,8	26,8	27,8478	1,43
	final	72	15,49	218,9	201,41	185,53	170,04	31,37	0,24	86,44	64,35	64,35	63,5878	1,52
3	initia	144	15,98	186,2	152,24	156,38	136,4	12,84	0,18	22,38	19,38	19,38	18,6278	1,20
	final	186	19,03	205,97	190,9	171,87	151,7	34,1	0,23	34,94	25,83	25,83	25,0778	1,38
3	initia	236	18,9	194,5	175,6	183,47	164,57	11,03	0,08	45,98	33,61	33,61	32,86	1,40
	final	36	16,36	208,2	191,84	178,67	160,21	31,63	0,24	69,9	48,3	48,3	47,56	1,47
4	initia	113	16,05	153,4	137,35	142,9	126,85	10,5	0,16	108,73	79,7	79,7	78,9478	1,38
	final	292	20,52	199	178,48	173,62	153,1	25,38	0,21	42,34	29,71	29,71	28,9578	1,45
4	initia	10	15,58	172,3	156,72	161,24	145,66	11,08	0,09	13,61	11,01	11,01	10,26	1,33
	final	180	22,54	207,9	186,38	174,44	151,9	33,46	0,28	84,57	56,08	56,08	55,31	1,53
5	initia	278	19,83	191	171,17	179,91	157,08	14,09	0,12	25,47	18,39	18,39	17,6078	1,45
	final	1021	20,89	213	192,31	188	166,31	27	0,21	75,34	52,32	52,32	51,5878	1,46
6	initia	10	18,22	178,08	158,88	169,38	150,14	8,72	0,08	19,87	15,04	15,04	14,2878	1,40
	final	507	20,18	207,22	187,04	178,08	157,88	29,18	0,23	105,5	72,39	72,39	71,6378	1,47
7	initia	37	20,32	198,8	178,48	183,67	163,35	13,13	0,11	83,37	65,65	65,65	64,8878	1,44
	final	56	18,33	207	187,67	177,4	158,07	29,6	0,23	47,7	33,82	33,82	33,1678	1,44
8	initia	112	15,66	174	158,34	161,56	148,9	12,44	0,11	27,85	20,88	20,88	20,2278	1,38
	final	117	19	192,1	173,1	187	148	25,1	0,20	64,64	40,88	40,88	40,1078	1,38
8	initia	168	20,25	182,1	161,85	173,12	152,87	8,98	0,06	15,83	12,46	12,46	11,71	1,38
	final	83	19,17	223,6	204,43	190,36	171,22	33,21	0,24	36,33	25,01	25,01	24,26	1,50
9	initia	189	19,33	196,97	179,64	182,35	162,02	16,62	0,13	18,17	13,62	13,62	12,8878	1,41
	final	147	19,01	222,73	203,72	191,05	172,04	31,68	0,24	153,38	101,68	101,68	100,9078	1,52
10	initia	161	20,8	186,6	165,8	175,79	154,99	10,81	0,09	31,84	24,38	24,38	23,6278	1,35
	final	270	20,29	234,4	214,11	198,35	178,08	38,05	0,28	28,07	28,77	28,77	28,0178	1,48
11	initia	127	20,15	181	160,85	168,27	148,12	12,73	0,11	13,09	9,88	9,88	9,2278	1,42
	final	156	20,73	221	200,27	186,72	166,99	31,28	0,24	118	78,47	78,47	77,7178	1,52
11	initia	235	15,94	157,5	141,58	148,64	132,7	8,86	0,09	32,59	22,31	22,31	21,56	1,51
	final	51	16,08	193,4	177,34	163,31	147,25	30,09	0,28	86,6	61,39	61,39	60,64	1,48
12	initia	202	19,48	204,5	185,04	186,08	168,62	16,42	0,13	113,08	77,19	77,19	76,4378	1,48
	final	8 H	16,04	217	200,98	186,85	170,81	30,15	0,23	162,79	107,02	107,02	106,2678	1,53
12	initia	150	19,15	182,1	162,95	172,21	153,06	9,89	0,08	17,67	13,86	13,86	13,21	1,33
	final	139	20,42	207,8	187,38	175,73	155,31	32,07	0,28	95,6	67,61	67,61	67,08	1,44

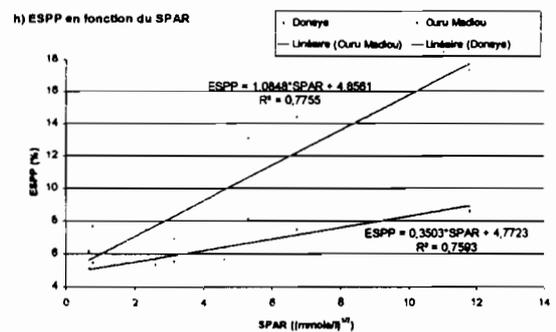
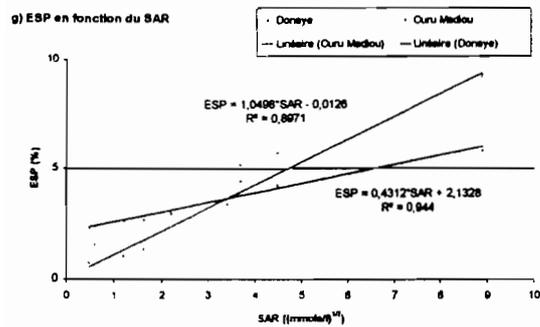
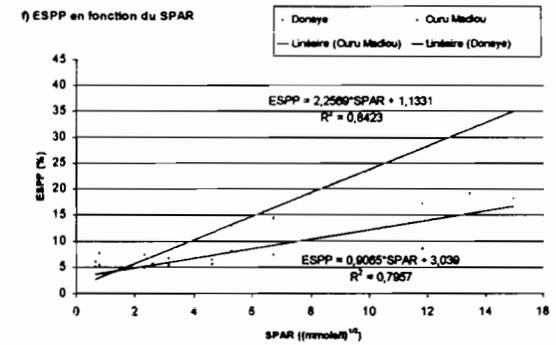
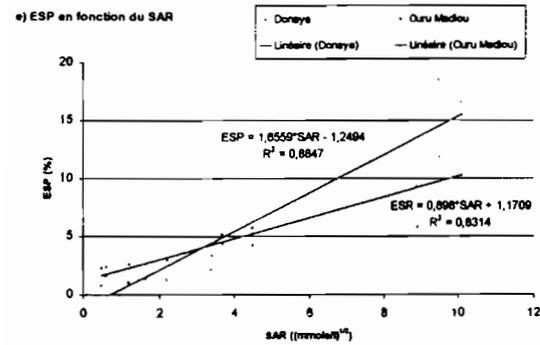
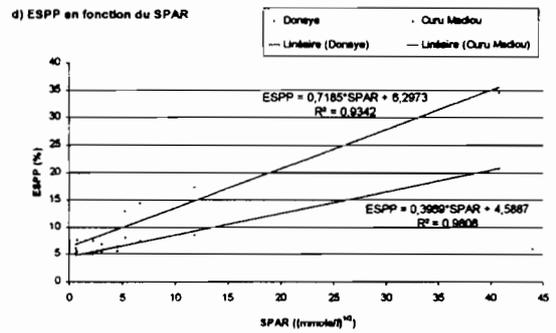
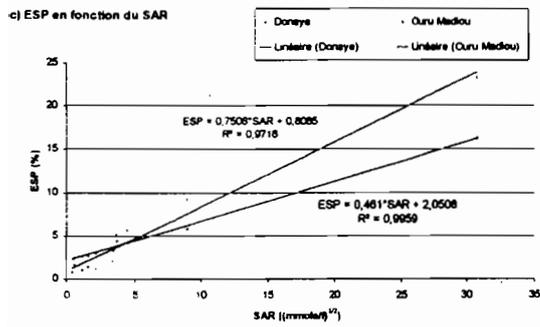
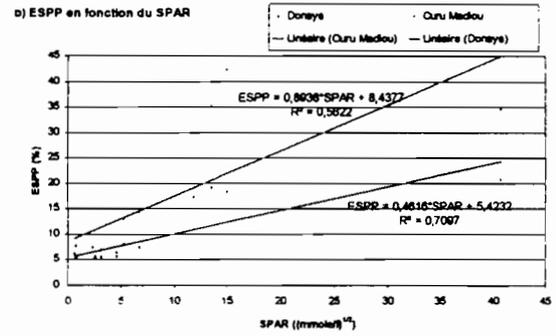
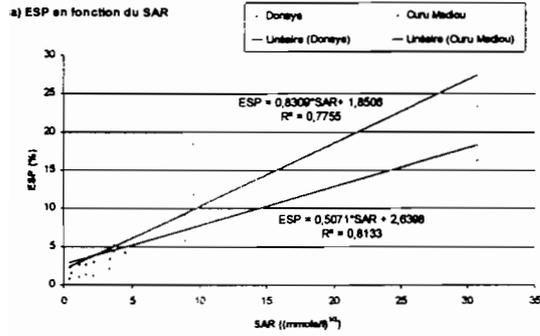
Annexe 3 : Détermination de la teneur en eau volumique, θ , pour les échantillons de sol de Donayé

		Référence	Tare (g)	Poids saturé (g)	Poids saturé net (g)	Poids sec (g)	Poids sec (net)	Teneur en eau (g)	Thêta	Poids échantillon (g)	Poids sous vide (g)	Voi déplacé (cm3)	Voi déplacé sans plastique (cm ³)	Densité apparente (g/cm ³)
										sans plastique	avec plastique			
Blanc 1	initial	132	20,8	145,9	125,1	137,35	116,55	8,55	0,11	7,54	5,61	5,61	4,6576	1,55
	final	220	20,21	203,6	183,39	163,86	143,65	39,74	0,37	30,56	16,72	16,72	17,9676	1,70
Blanc 2	initial	139	20,41	116,7	96,29	112,02	91,61	4,68	0,07	11,84	8,71	8,71	7,9576	1,49
	final	150	19,17	211,3	192,13	164,65	145,48	46,85	0,38	66,95	44,82	44,82	44,0676	1,56
Blanc 3	initial	146	20,28	129,2	108,94	124,07	103,81	5,13	0,07	5,42	4,56	4,56	3,8276	1,42
	final	186	19,1	194,6	175,5	150,57	131,47	44,03	0,43	62,5	36,92	36,92	36,1676	1,73
Blanc 4	initial	47	19,16	163,9	144,74	156,65	137,49	7,25	0,08	9,39	6,89	6,89	6,1376	1,53
	final	144	15,95	170	154,05	132,66	116,93	37,12	0,34	22,31	16,71	16,71	15,9576	1,40
Blanc 5	initial	246	15,77	108,94	93,17	103,3	87,53	5,64	0,09	27,2	16,22	16,22	17,4676	1,56
	final	553	19,22	214,89	195,67	169,95	150,73	44,94	0,36	119,82	76,21	76,21	75,4576	1,59
1	initial	30	19,13	149,94	130,81	133,17	114,04	16,77	0,17	53,98	41,01	41,01	40,2576	1,34
	final	13	14,69	160,08	145,39	125,18	110,49	34,9	0,36	35,95	24,4	24,4	23,6476	1,52
1'	initial	102	19,88	137,67	117,79	125,02	105,14	12,85	0,15	14,55	10,9	10,9	10,1476	1,43
	final	154	22,37	203,54	181,17	163,57	141,2	39,97	0,34	115,9	75,59	75,59	74,8376	1,55
2	initial	337	27,21	140,74	113,53	126,91	101,7	11,83	0,14	14,53	11,75	11,75	10,9976	1,32
	final	117	19	192,8	173,8	155,8	136,8	37	0,35	49,13	30,82	30,82	30,0676	1,63
3	initial	151	20,41	133,52	113,11	117,99	97,58	15,53	0,19	52	36,04	36,04	37,2876	1,39
	final	156	20,73	219,04	198,31	174,3	153,57	44,74	0,34	70,88	48,12	48,12	47,3676	1,50
3'	initial	526	20,34	167,8	147,46	151,23	130,89	16,57	0,17	19,62	13,46	13,46	12,71	1,54
	final	30	19,15	205,8	186,65	166,4	147,25	39,4	0,32	76,25	50,4	50,4	49,65	1,54
4	initial	186	19,09	144,4	125,31	130	110,91	14,4	0,16	24,94	16,73	16,73	17,98	1,39
	final	246	15,79	172,3	156,51	139,02	123,23	33,28	0,34	62,21	39,77	39,77	39,02	1,59
4'	initial	194	20,61	151,8	131,19	134,33	113,72	17,47	0,18	17,45	13,98	13,98	13,23	1,32
	final	145	19,16	202,9	183,74	159,84	140,68	43,06	0,36	56,82	37,28	37,28	36,53	1,56
5	initial	B	16,45	144,49	128,04	127,04	110,59	17,45	0,21	57,99	36,94	36,94	36,1876	1,52
	final	202	19,46	180,15	160,69	141,2	121,74	38,95	0,33	27,28	20,82	20,82	20,0676	1,36
6	initial	143	15,78	130,58	114,8	117,04	101,26	13,54	0,16	7,71	6,33	6,33	5,5776	1,38
	final	347	20,45	179,38	158,93	144,45	124	34,93	0,35	37,41	24,2	24,2	23,4476	1,60
7	initial	23A	15,98	124,2	108,22	111,6	95,62	12,6	0,16	6,59	5,61	5,61	4,8576	1,36
	final	152	20,7	224,81	204,11	179,97	159,27	44,84	0,33	124,52	82,63	82,63	81,8776	1,52
7'	initial	197	20,79	139,92	119,13	124,73	103,94	15,19	0,18	16,7	14,14	14,14	13,3876	1,40
	final	5	20,38	194,12	173,74	154,97	134,59	39,15	0,33	106,81	75,56	75,56	74,8276	1,45
8	initial	155	15,64	93,1	77,46	86,59	70,95	6,51	0,11	16,7	15	15	14,2476	1,31
	final	166	19,85	173,9	154,05	135,38	115,53	36,52	0,36	40,11	26,48	26,48	27,7276	1,45
8'	initial	146	20,24	147,6	127,36	135,05	114,81	12,55	0,14	19,57	14,84	14,84	14,09	1,39
	final	144	15,94	195,7	179,76	153,28	137,34	42,42	0,38	106,35	66,46	66,46	65,71	1,62
9	initial	1020	15,6	137,88	122,28	120,48	104,88	17,4	0,19	33,56	26,19	26,19	25,4376	1,32
	final	809	20,58	213,64	193,06	169,55	146,97	44,09	0,35	66,79	45,49	45,49	44,7376	1,54
10	initial	292	20,55	160,33	139,78	138,01	117,46	22,32	0,22	104,36	78,06	78,06	77,3076	1,35
	final	163	20,09	192,67	172,58	154,3	134,21	38,37	0,34	120,59	79,75	79,75	78,9976	1,53
11	initial	7	14,64	120,56	105,92	107,62	92,98	12,94	0,17	16,5	13,71	13,71	12,9576	1,43
	final	112	15,66	175,77	160,11	136,78	123,12	36,99	0,36	110,66	71,85	71,85	71,0976	1,56
11'	initial	266	20,17	147,2	127,03	131,93	111,76	15,27	0,16	17,78	14,24	14,24	13,49	1,32
	final	132	20,79	201,1	180,31	156,65	137,86	42,45	0,36	60,95	40,41	40,41	39,66	1,54
12	initial	127	20,14	106,43	86,29	94,07	73,93	12,36	0,20	16,31	13,55	13,55	12,7976	1,43
	final	114	15,85	169,78	153,93	133,98	118,13	35,8	0,36	64,43	42,69	42,69	41,9376	1,54
12'	initial	220	20,19	145,8	125,61	132,22	112,03	13,58	0,14	20,28	16,01	16,01	15,26	1,33
	final	13	14,69	172,6	157,91	133,59	118,9	39,01	0,37	89,24	60,02	60,02	59,27	1,51

Annexe 4 : Analyse chimique des échantillons de sols d'Ouru Madiou et de Donaye

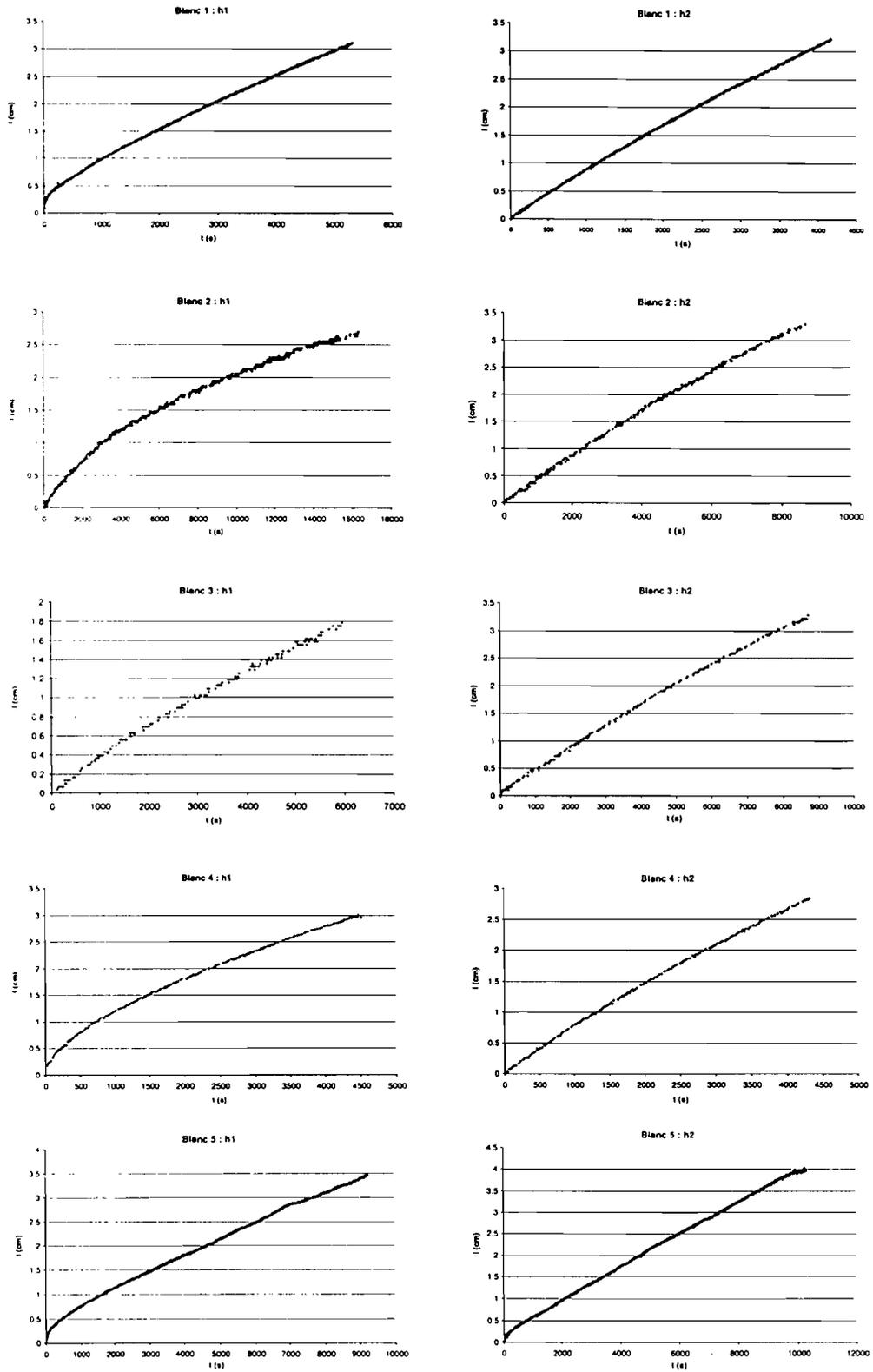
Ouru Madiou										
	Bases échangeables (méc%)				CEC (méc%)	Taux de saturation	pH eau	pH KCl	ESP %	ESPP %
	Ca	Mg	Na	K						
Blancs										
1	3,04	1,44	0,05	0,33	6,22	78	6,73	5,79	0,80	6,11
2	4,61	1,94	0,09	0,59	5,76	125	7,42	7,25	1,56	11,81
3	3,82	1,93	0,04	0,4	7,56	82	7,39	7,17	0,53	5,82
Famille 1										
1	2,33	1,33	0,06	0,28	5,98	67	6,67	5,72	1,00	5,69
2	4,27	2,01	0,17	0,35	8,12	84	6,54	6,11	2,09	6,40
3	3,57	1,54	0,64	0,57	7,62	83	7,63	7,02	8,40	15,88
3'	3,63	1,81	0,55	0,48	5,5	117	7,58	6,39	10,00	18,73
4	2,43	1,21	1,04	0,58	5,06	104	8,06	7,03	20,55	32,02
4'	4,25	1,74	1,81	0,77	6,94	123	8,27	6,87	26,08	37,18
Famille 2										
5	2,55	1,52	0,08	0,32	5,22	86	7,23	6,40	1,53	7,66
6	5,02	2,22	0,09	0,42	7,4	105	6,70	6,01	1,22	6,89
7	3,22	1,64	0,34	0,52	5,98	96	7,25	6,60	5,69	14,38
8	1,46	1,67	0,74	2,30	4,74	131	7,39	6,59	15,61	64,14
8'	2,73	1,92	0,92	1,31	5,26	131	8,18	6,81	17,49	42,40
Famille 3										
9	3,85	1,94	0,05	0,37	6,84	91	6,85	6,25	0,73	6,14
10	3,63	1,78	0,09	0,42	6,84	87	6,59	6,15	1,32	7,46
11	2,59	1,52	0,27	0,42	5,46	88	7,04	6,39	4,95	12,64
11'	3,61	1,96	0,28	0,43	5,26	119	6,90	5,94	5,32	13,50
12	2,94	1,93	1,36	1,00	5,9	123	7,00	6,66	23,05	40,00
12'	4,23	2,47	0,9	1,05	6,46	134	7,07	6,27	13,93	30,19
Donaye										
	Bases échangeables (méc%)				CEC (méc%)	Taux de saturation	pH eau	pH KCl	ESP %	ESPP %
	Ca	Mg	Na	K						
Blancs										
1	11,07	8,16	0,48	0,56	18,38	110	6,09	4,36	2,61	5,66
2	11,97	8,47	0,45	0,58	21,02	102	6,25	4,44	2,14	4,90
3	12,49	8,52	0,53	0,57	20,46	108	6,28	4,47	2,59	5,38
4	12,53	8,06	0,36	0,58	18,94	114	6,41	4,75	1,90	4,96
5	11,07	8,41	0,56	0,51	20,66	99	6,24	4,47	2,71	5,18
Famille 1										
1	12,51	8,44	0,61	0,55	21,26	104	6,18	4,45	2,87	5,46
1'	11,75	7,83	0,47	0,56	19,7	105	6,41	4,61	2,39	5,23
2	10,79	8,75	0,73	0,5	21,78	95	6,38	4,39	3,35	5,65
3	11,73	8,8	1,19	0,51	22,06	101	6,62	4,65	5,39	7,71
3'	10,39	8,24	1,23	0,65	19,86	103	6,69	4,72	6,19	9,47
4	11,91	8,84	2,08	0,9	21,5	115	7,52	5,94	14,33	18,51
4'	10,97	8,21	3,93	1,07	21,5	113	7,93	6,46	18,28	23,26
Famille 2										
5	12,13	8,03	0,45	0,57	18,7	113	6,58	4,85	2,41	5,45
6	11,61	8,24	0,64	0,56	21,74	97	6,29	4,45	2,94	5,52
7	10,91	7,65	0,88	0,73	19,62	103	6,75	5,17	4,49	8,21
7'	11,59	8,82	0,88	0,61	22,1	99	6,23	4,50	3,98	6,74
8	11,25	8,71	2,45	1,32	21,78	109	6,68	5,35	11,29	17,36
8'	10,1	8,39	2,61	1,38	20,7	109	7,30	5,89	12,61	19,28
Famille 3										
9	12,27	8,39	0,47	0,57	20,34	107	6,57	4,57	2,31	5,11
10	12,39	8,77	0,64	0,57	24,14	93	6,18	4,47	2,65	5,01
11	11,07	10,33	0,85	0,7	20,82	110	6,13	4,68	4,08	7,44
11'	11,63	11,09	0,92	0,81	19,62	125	6,53	5,04	4,69	8,82
12	10,08	7,39	2,09	1,43	18,42	114	6,16	4,94	11,35	19,11
12'	10,53	8	2,5	1,38	20,34	110	6,24	4,86	12,29	19,08

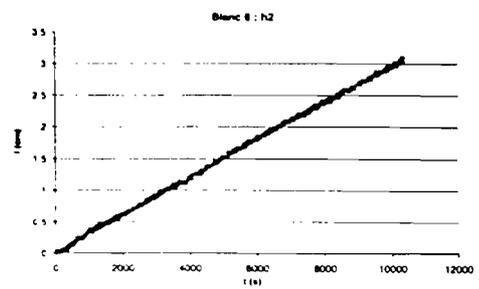
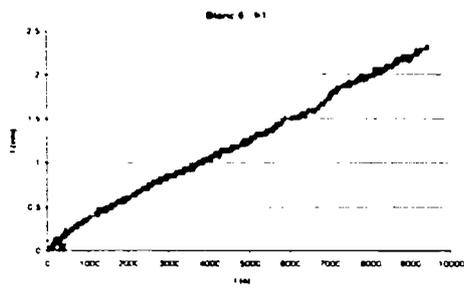
Annexe 5 : Graphiques de la relation ESP-SAR et ESPP-SPAR et ESPP-SPAR



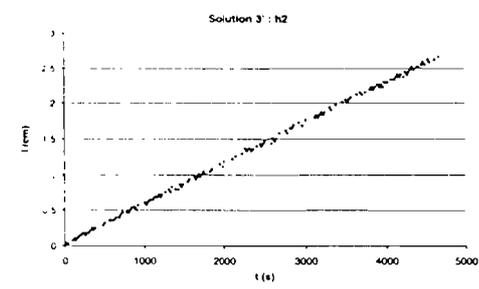
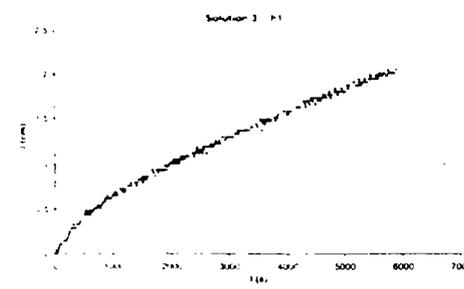
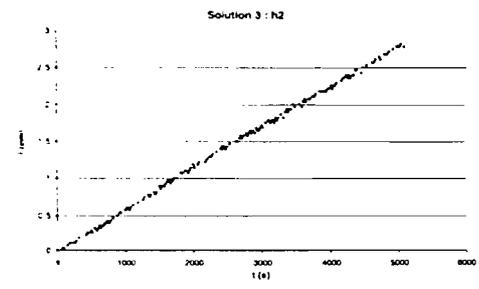
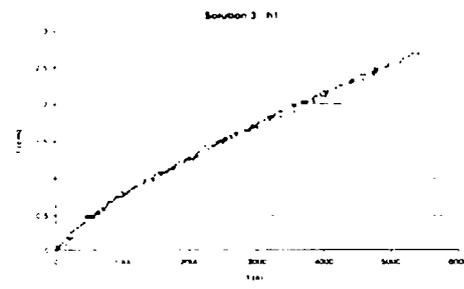
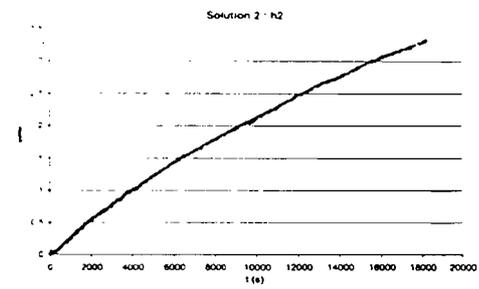
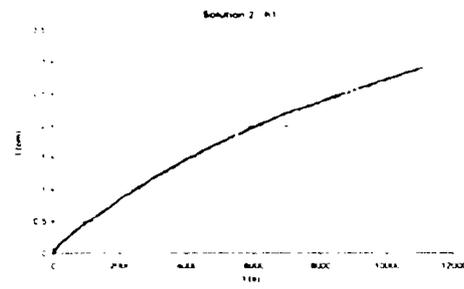
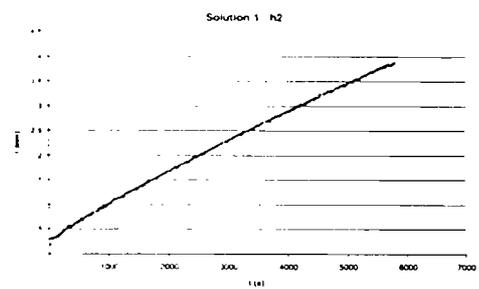
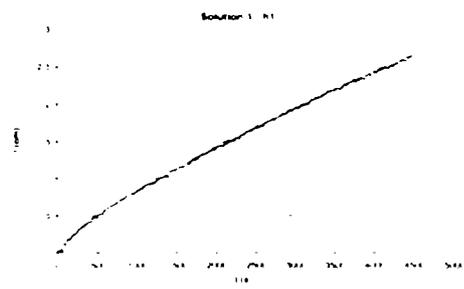
Annexe 6 : Courbes d'infiltration d'Ouru Madiou

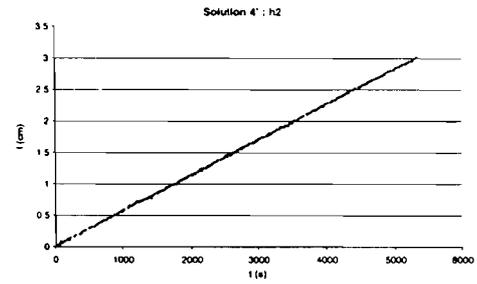
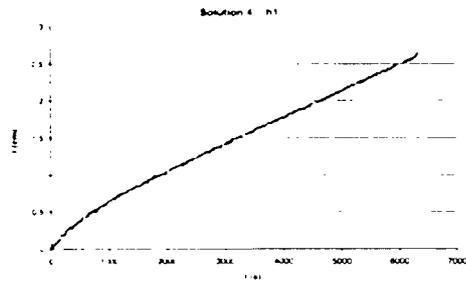
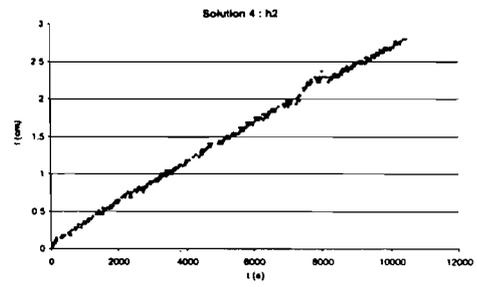
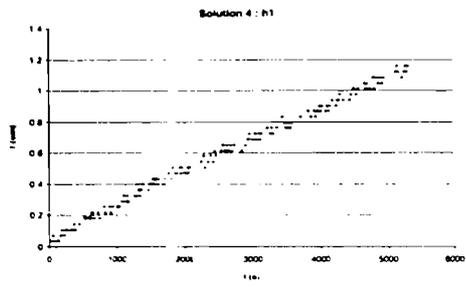
Blancs



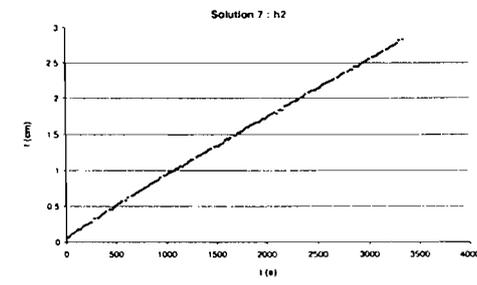
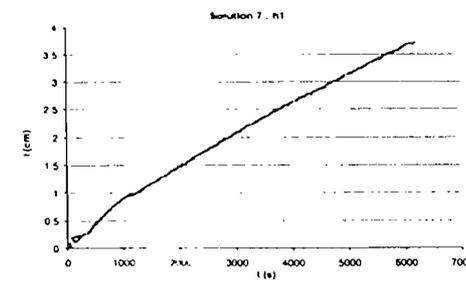
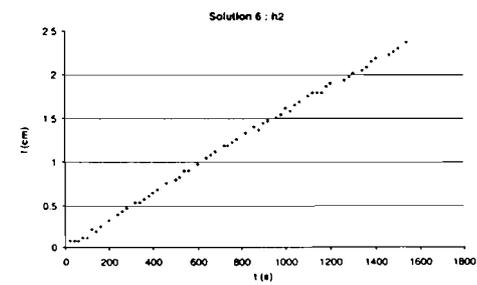
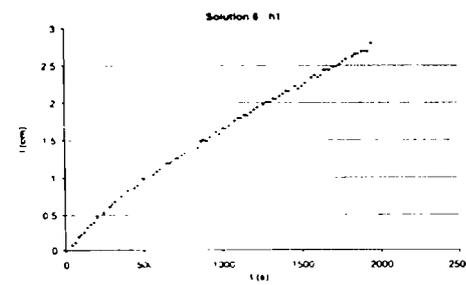
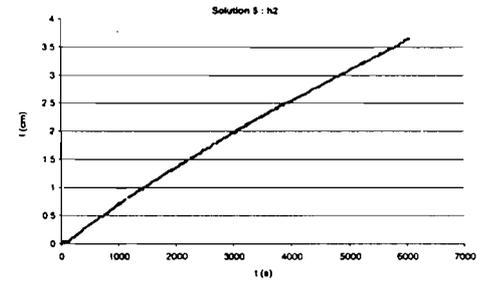
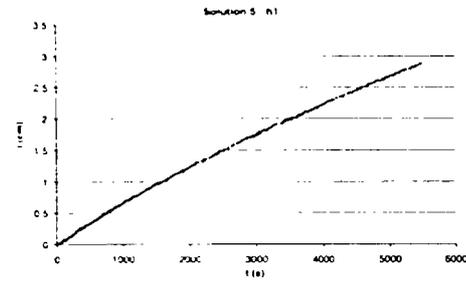


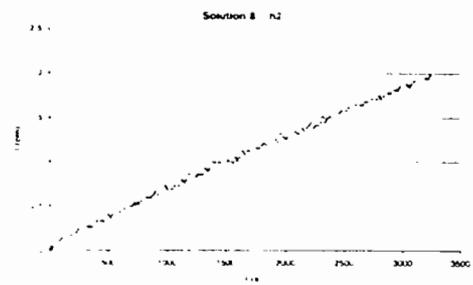
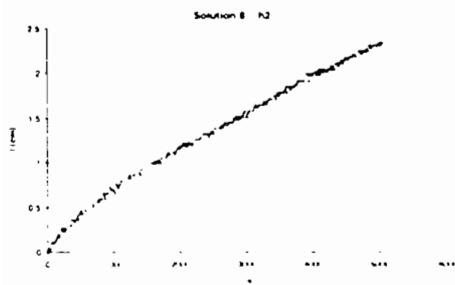
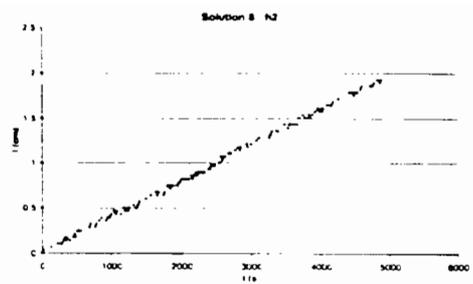
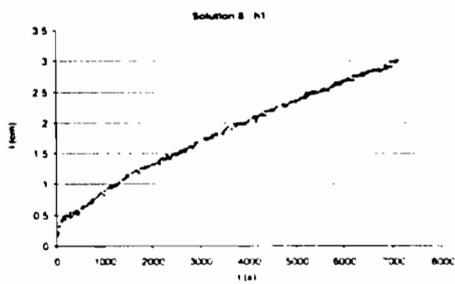
Famille 1



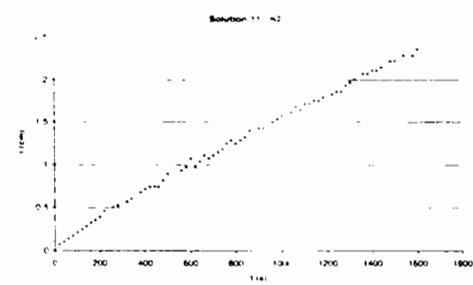
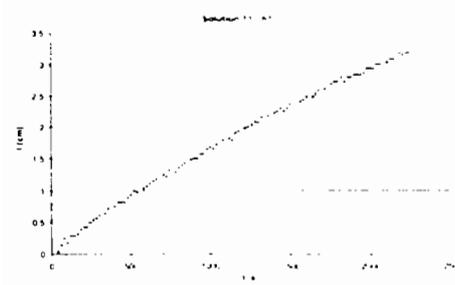
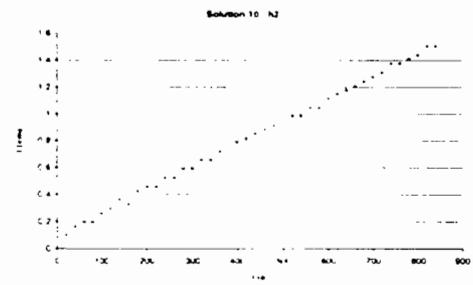
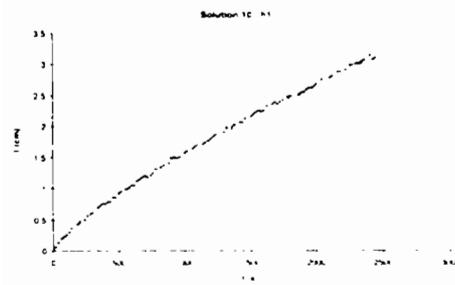
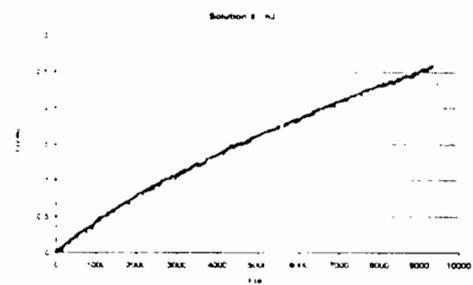
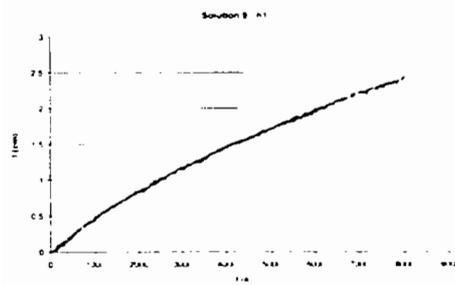


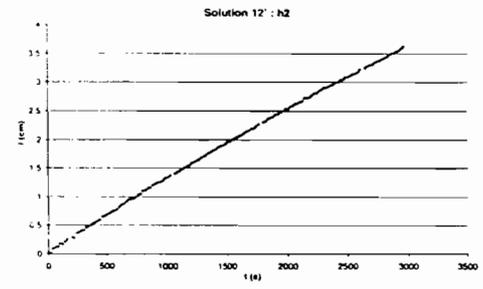
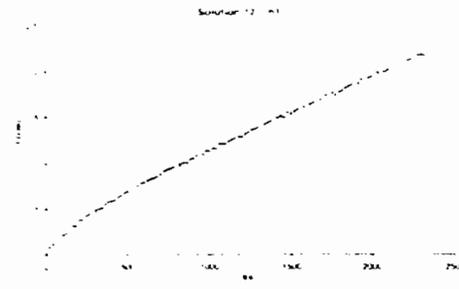
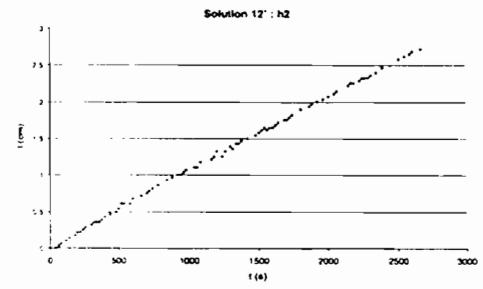
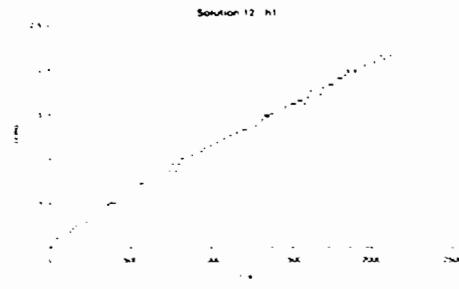
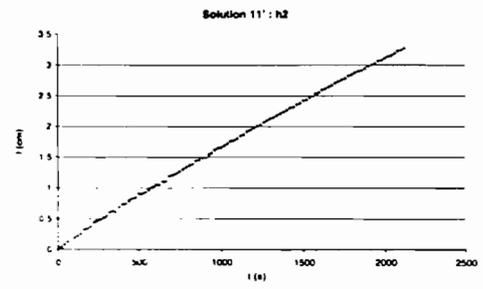
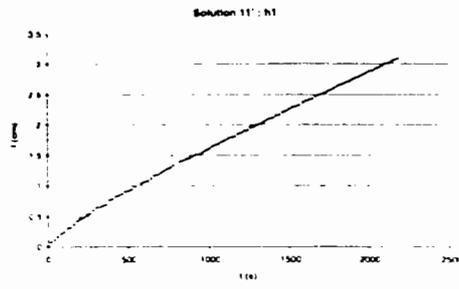
Famille 2





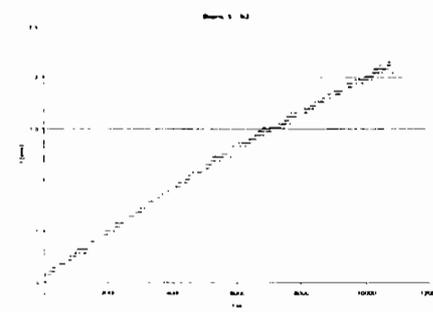
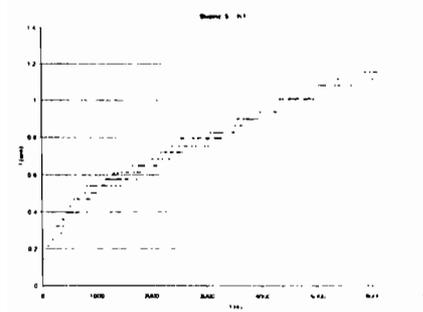
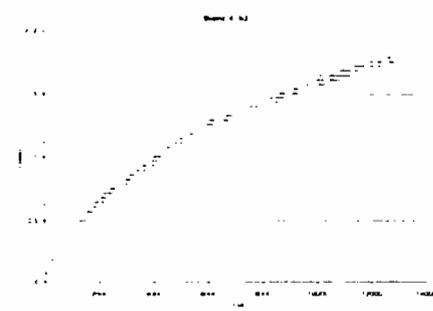
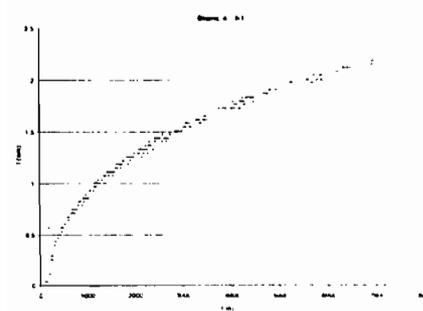
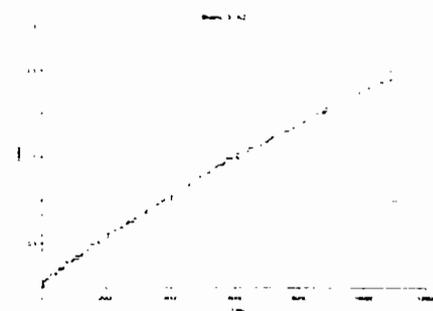
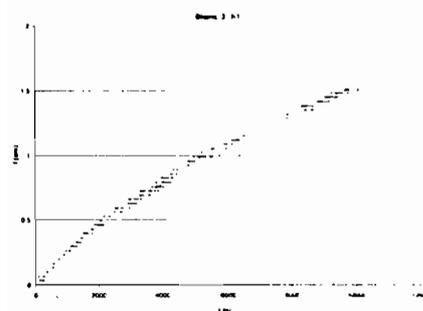
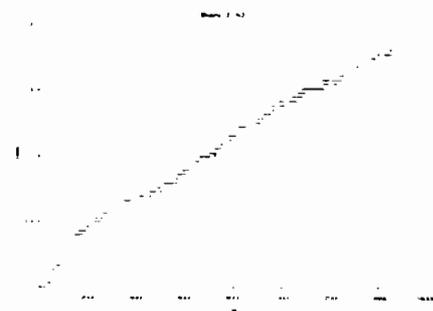
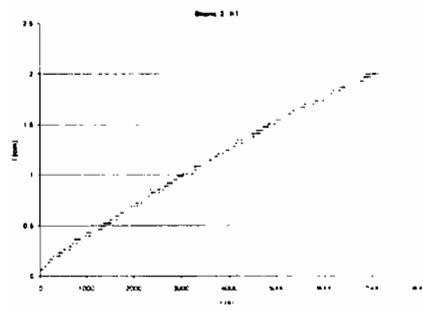
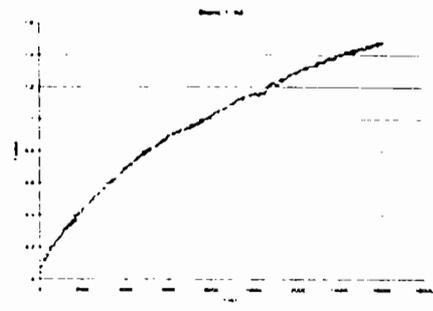
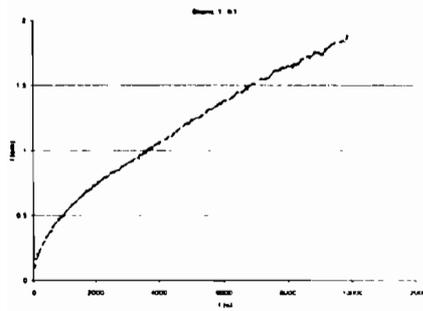
Famille 3



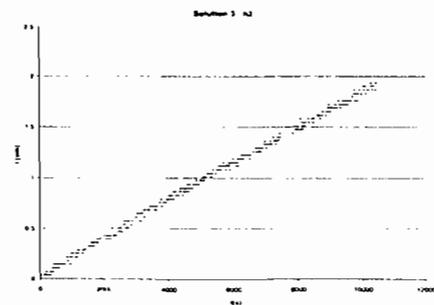
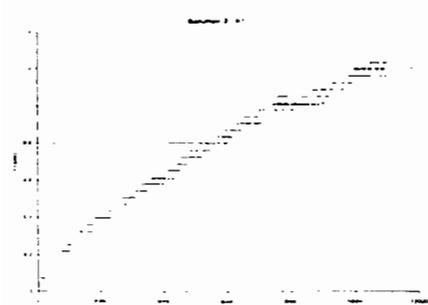
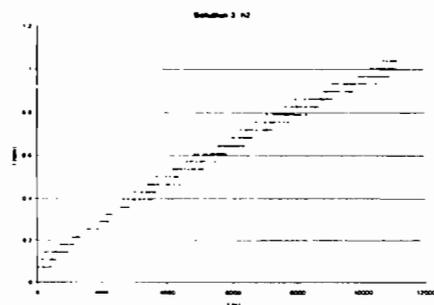
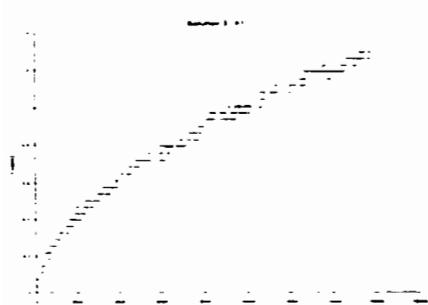
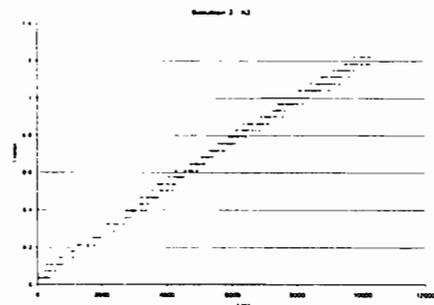
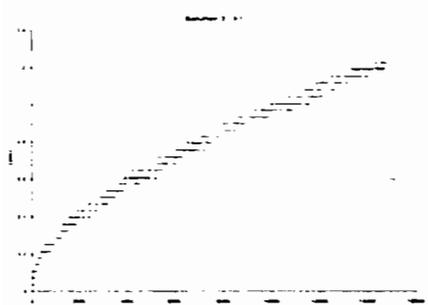
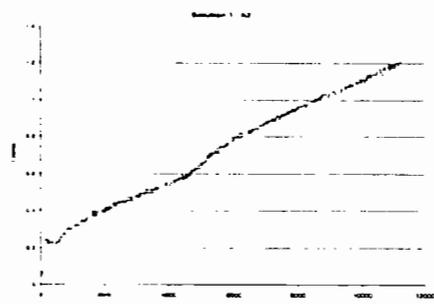
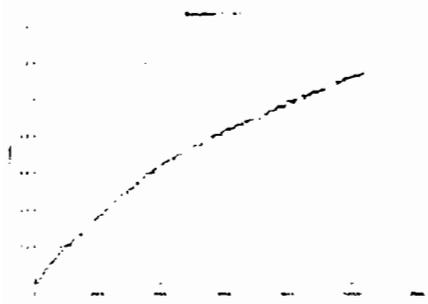
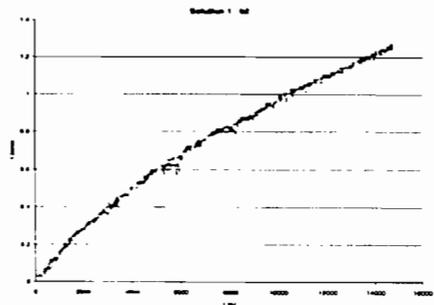
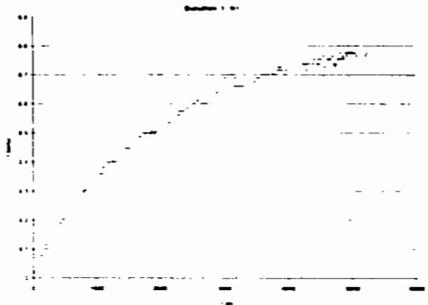


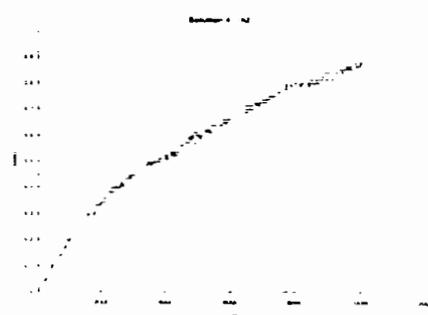
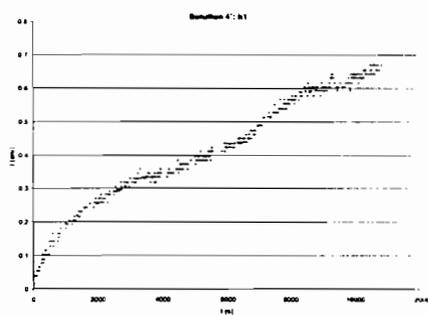
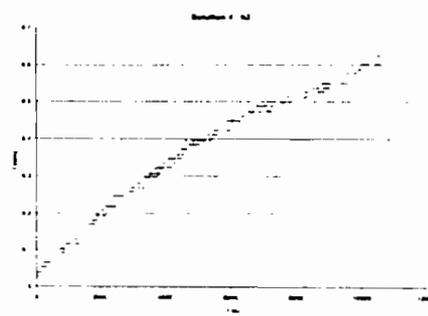
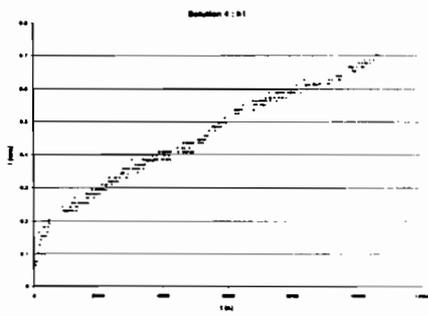
Annexe 7 : Courbes d'infiltration de Donaye

Blanca

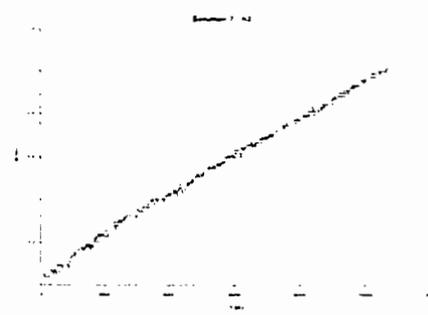
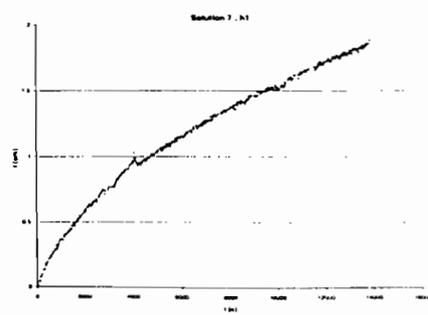
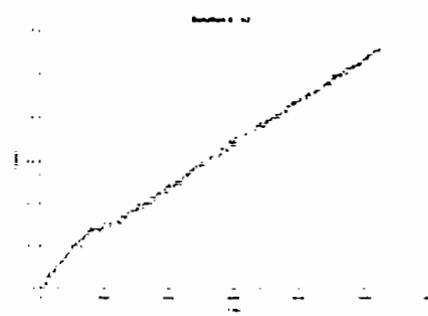
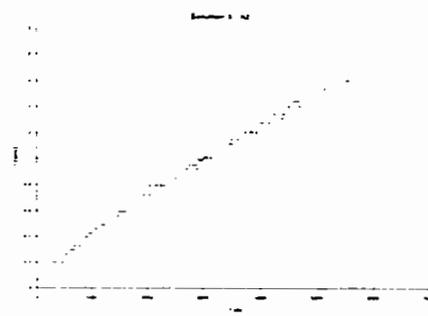
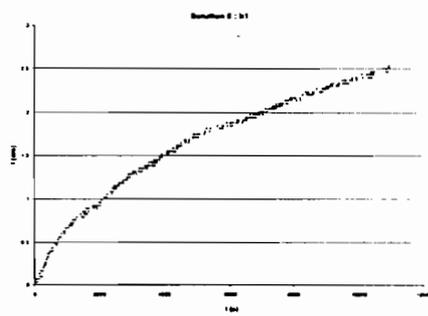


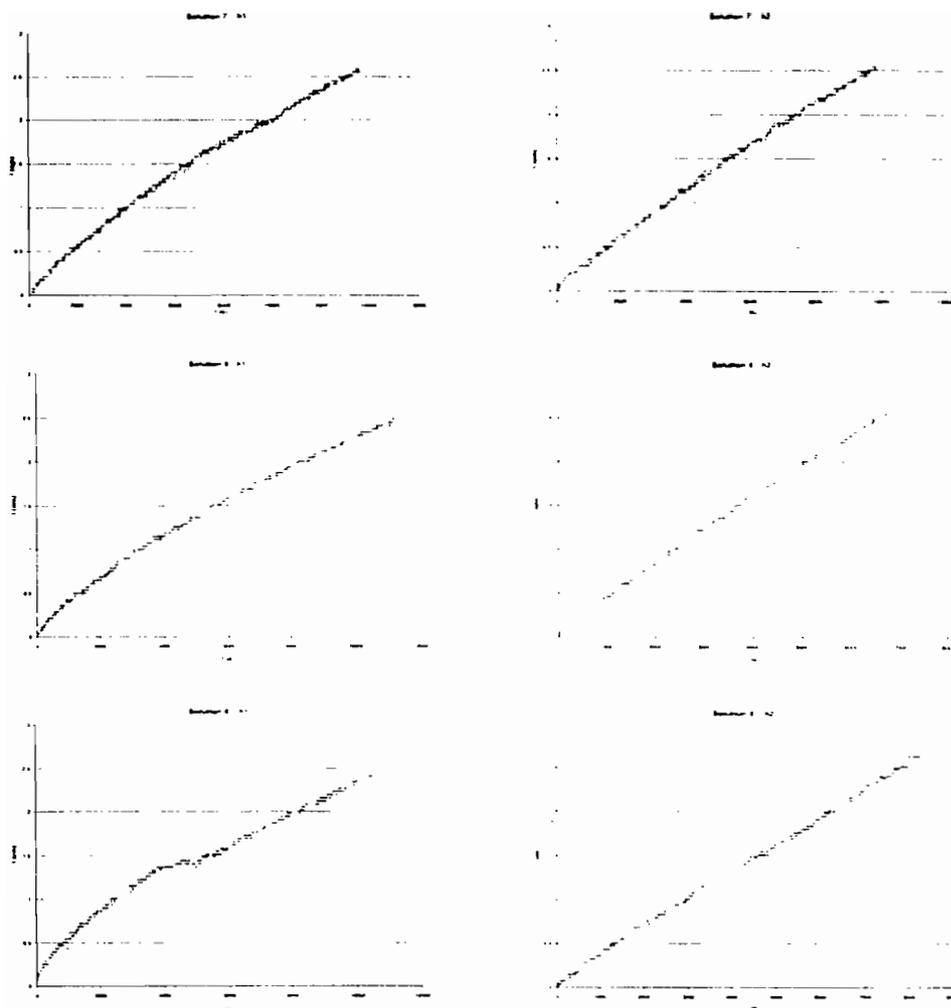
Famille 1



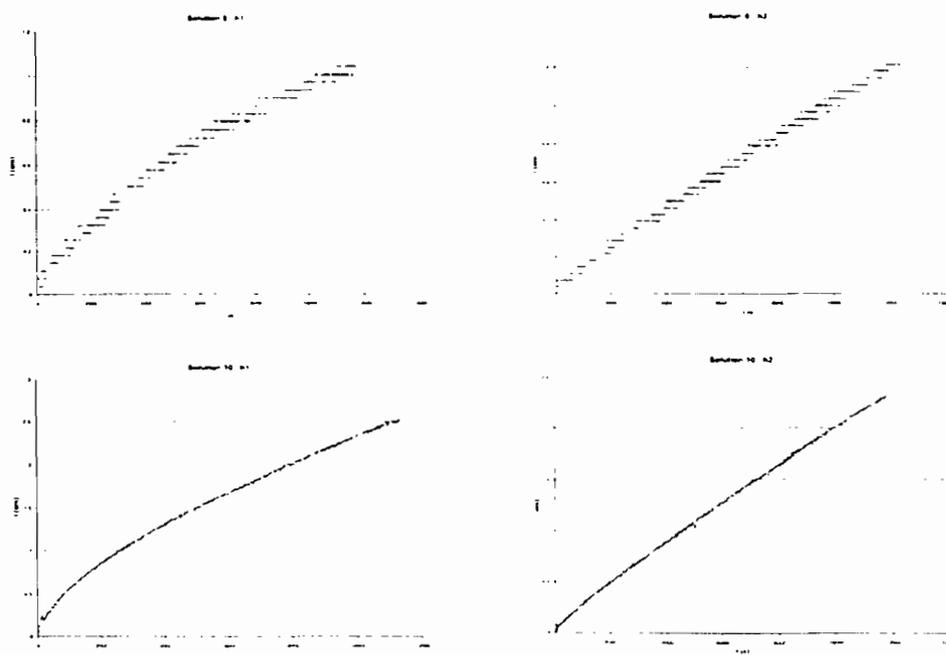


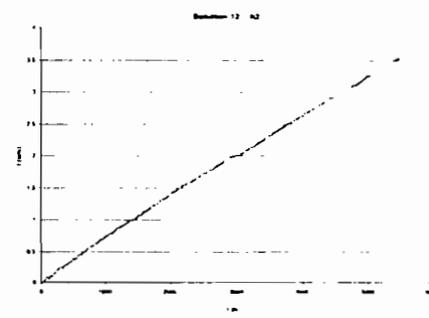
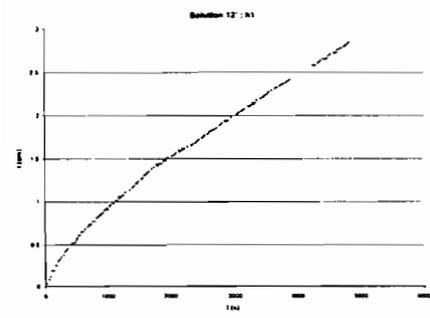
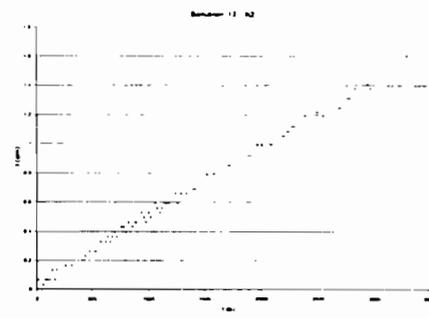
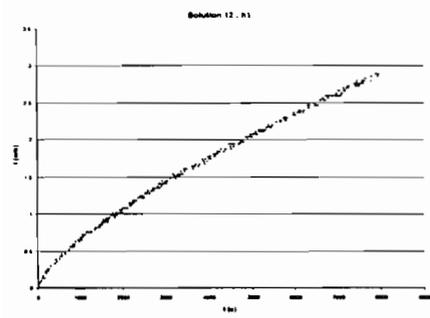
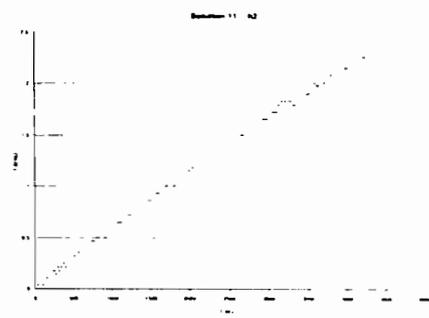
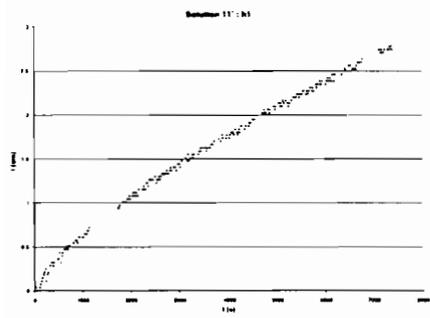
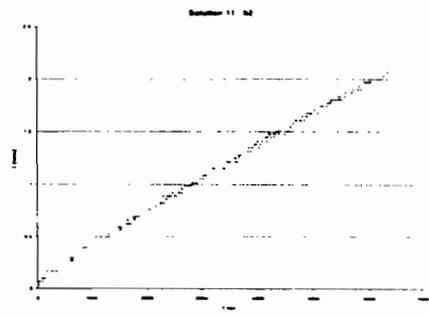
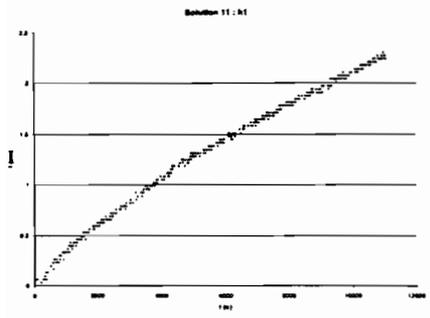
Famille 2





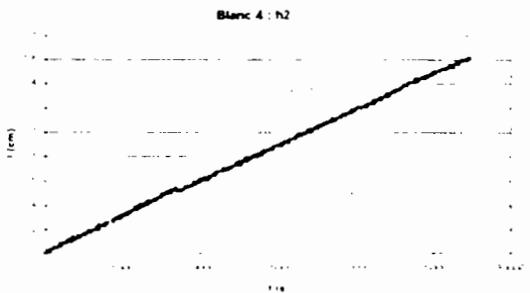
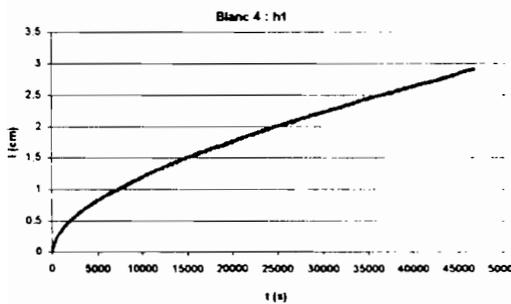
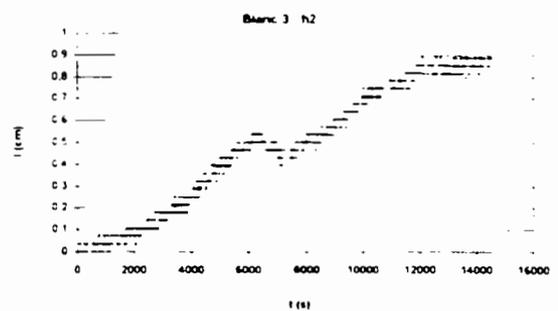
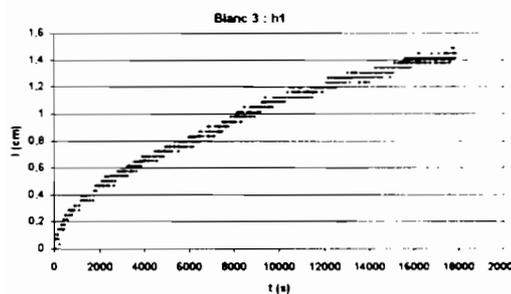
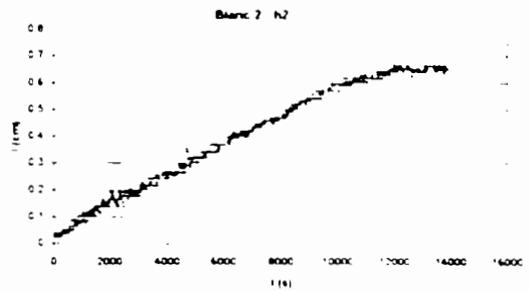
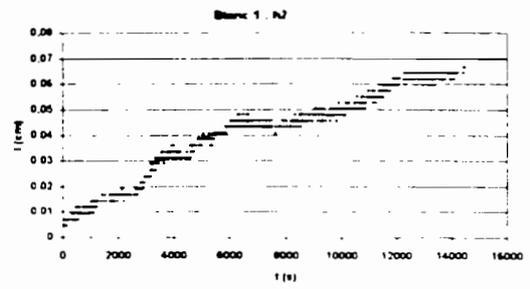
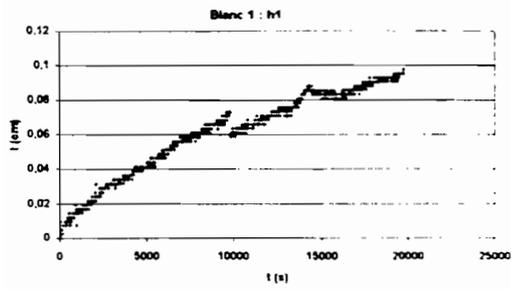
Famille 3



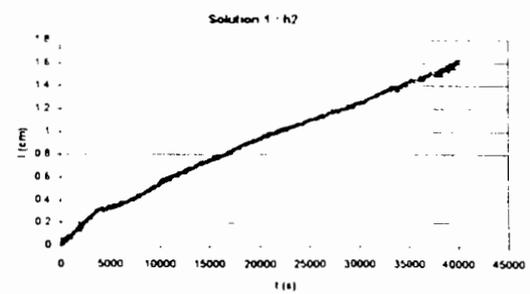
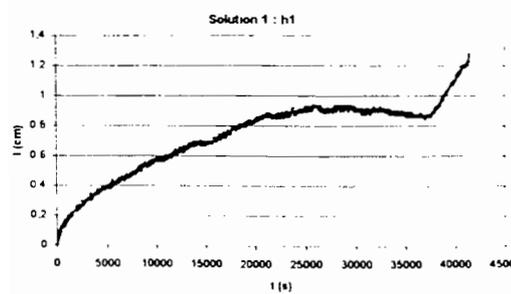


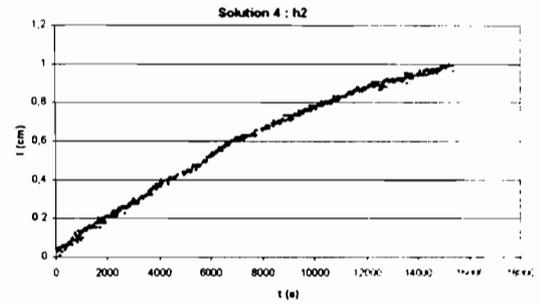
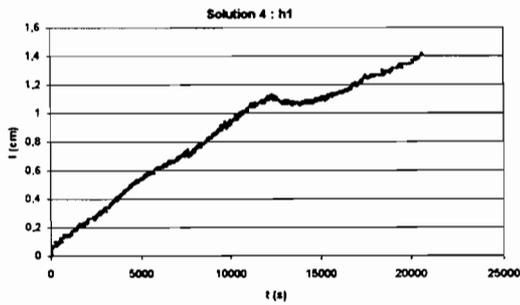
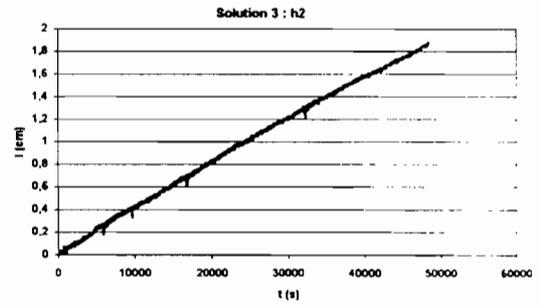
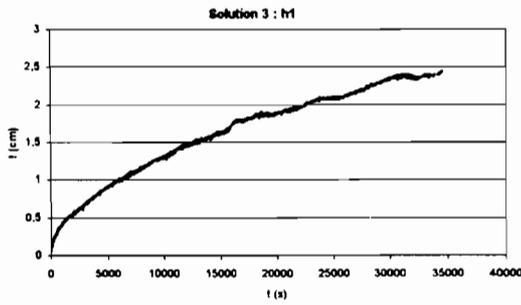
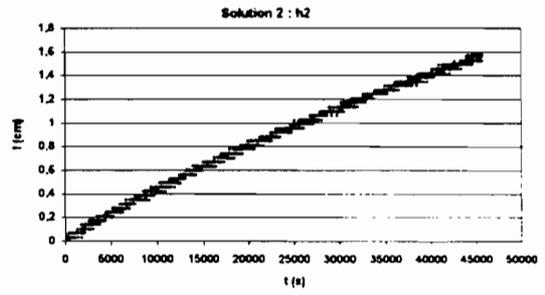
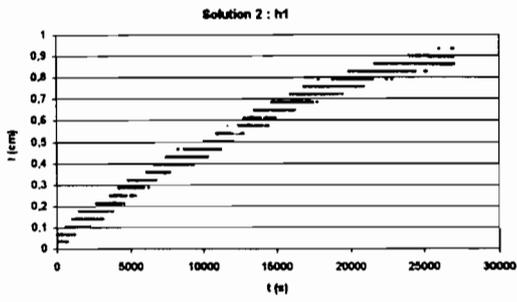
Annexe 8 : Courbes d'infiltration de Guia 4

Blancs

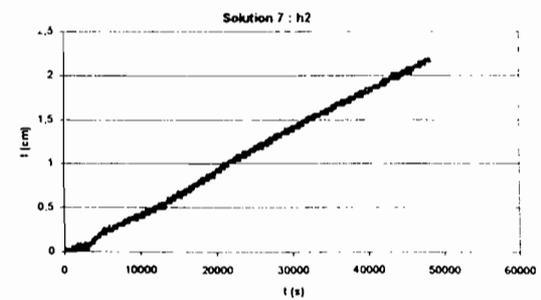
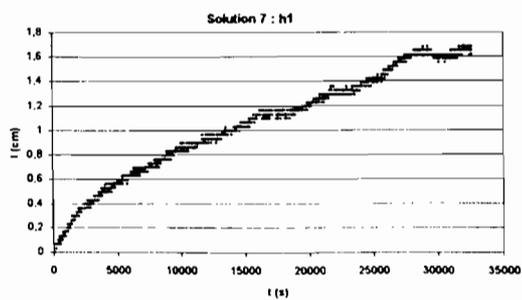
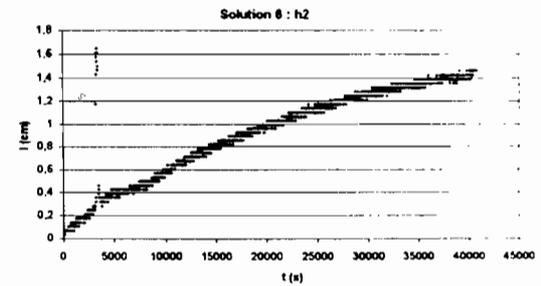
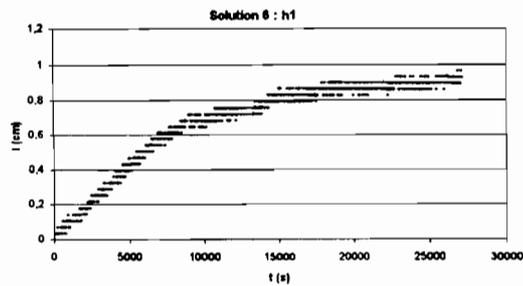


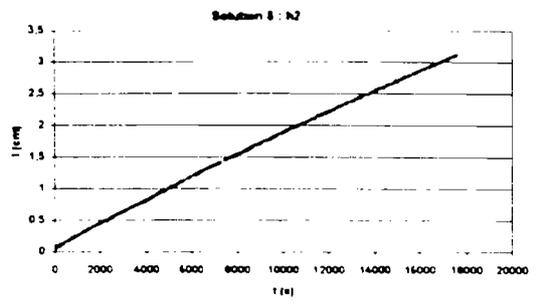
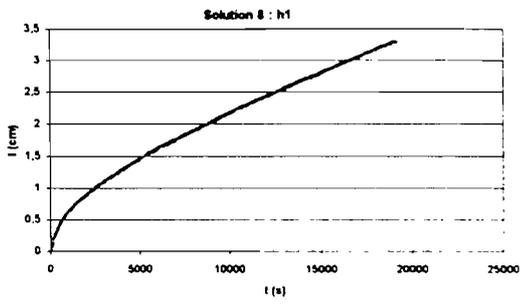
Famille 1



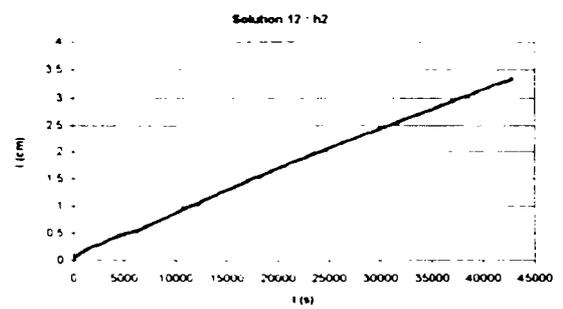
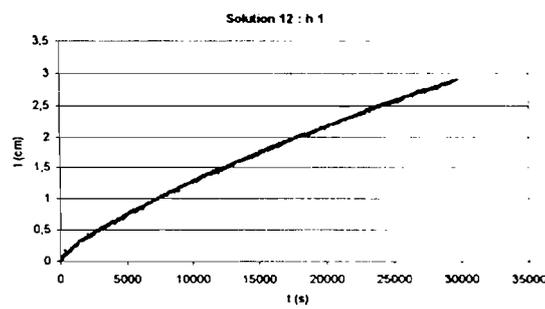
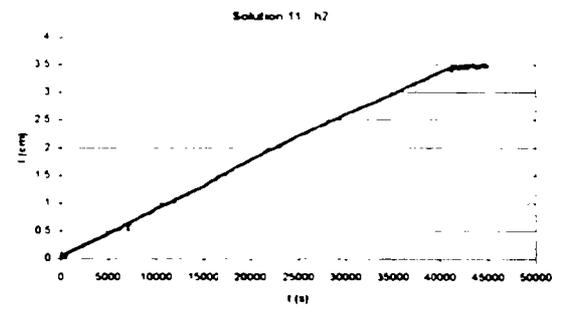
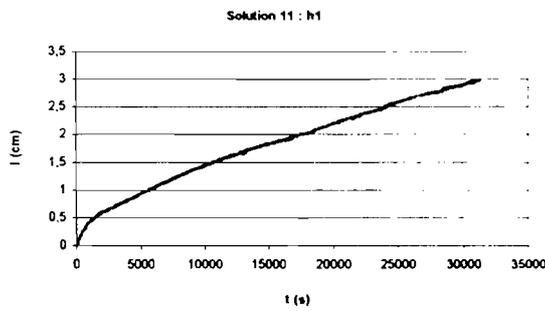
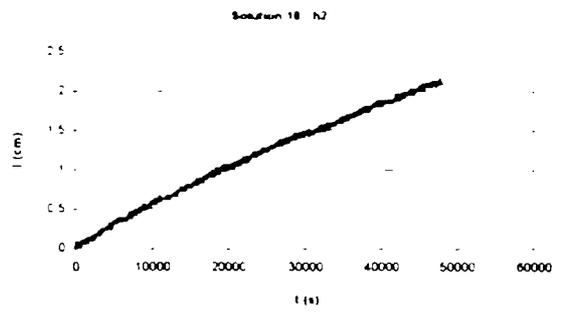
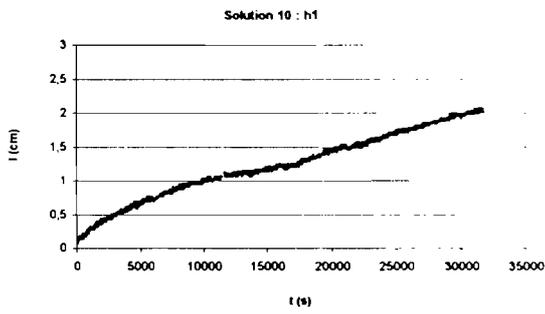


Famille 2





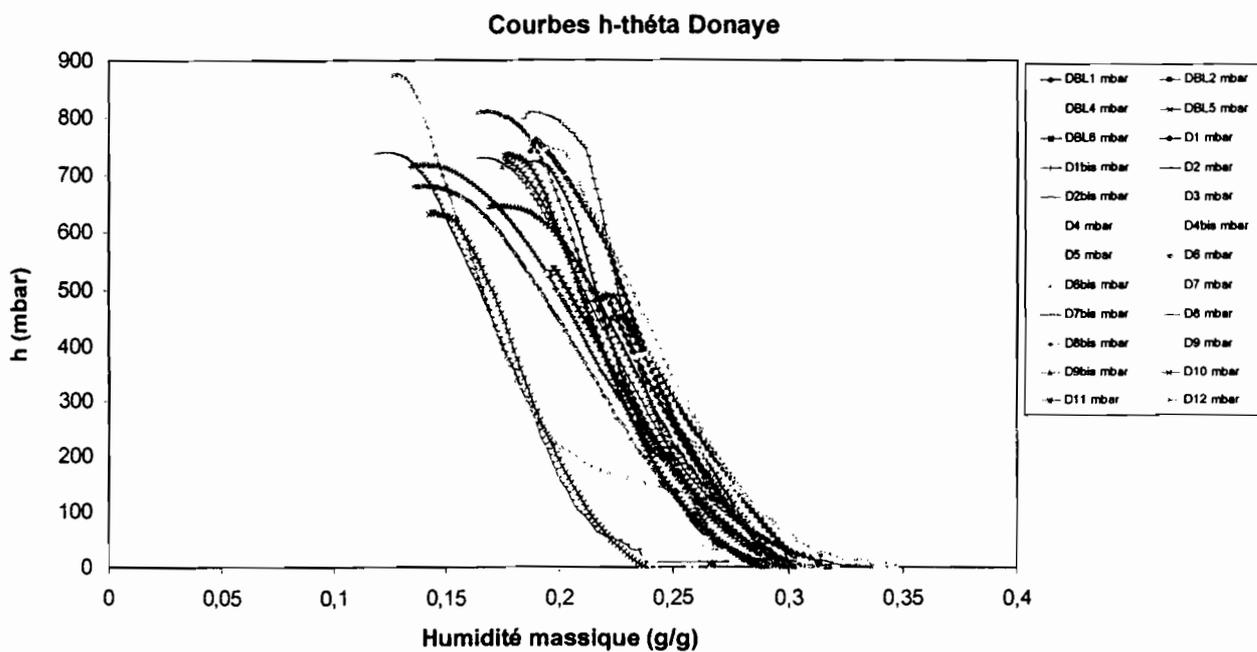
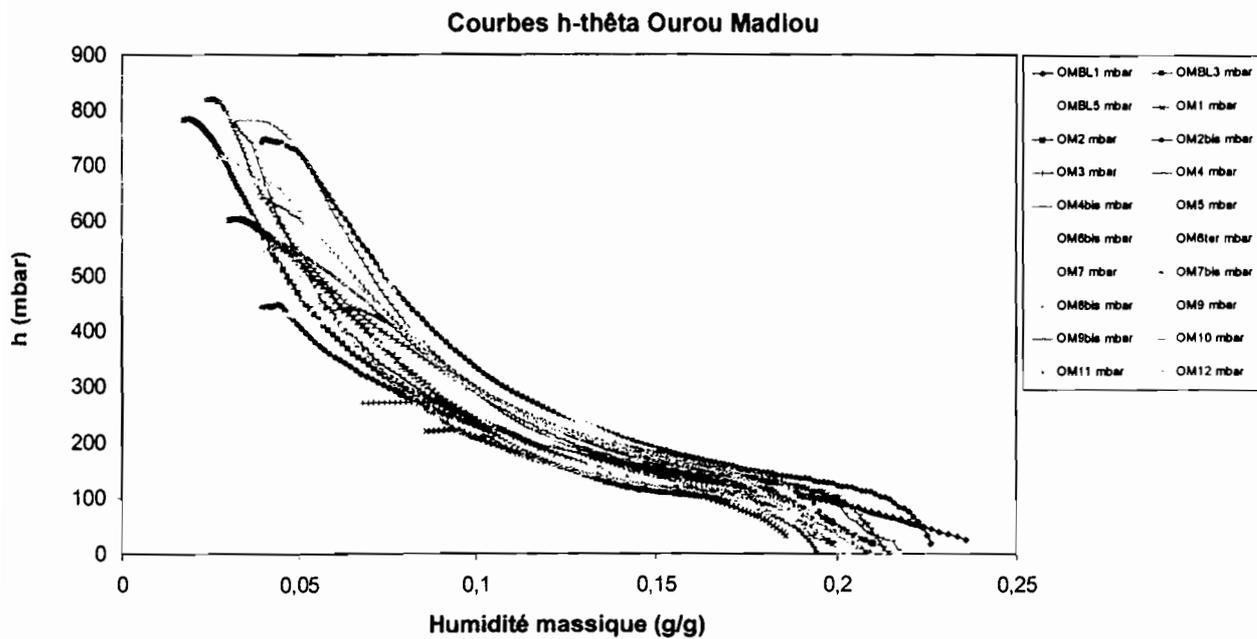
Famille 3



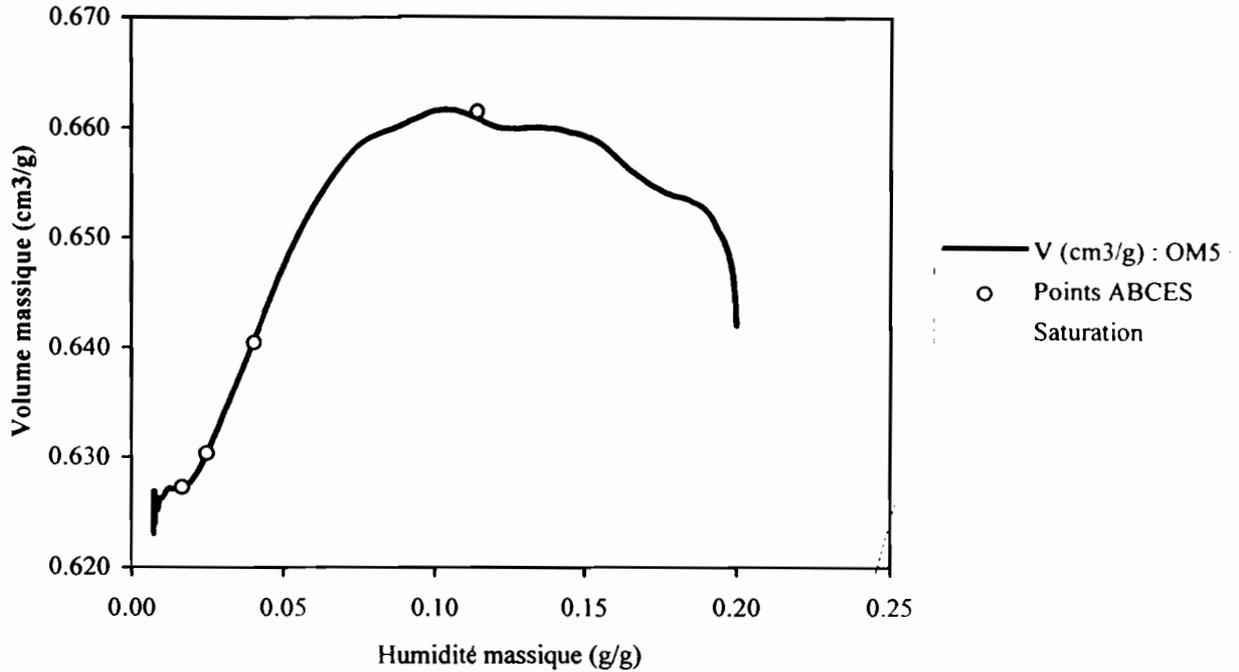
Annexe 10 : Tableau récapitulatif des résultats

Ouru Madiou							
	ESP (mmole/l) ^{1/2}	ESPP (mmole/l) ^{1/2}	S cm/s ^{1/2}	Ks cm/s	α m ⁻¹	n	Kr cm ³ /g
Blancs							
1	8,04E-01	6,11E+00	3,03E-02	4,45E-04			2,91E-01
2	1,56E+00	1,18E+01	1,82E-02	3,27E-04	6,11E-03	2,63E+00	1,16E-01
3	5,29E-01	5,82E+00	6,75E-03	1,06E-04	7,74E-03	2,45E+00	
Famille 1							
1	1,00E+00	5,69E+00	2,42E-02	5,03E-05	7,35E-03	3,78E+00	9,01E-02
2	2,09E+00	6,40E+00	3,89E-02	7,76E-05	5,52E-03	2,48E+00	6,61E-02
3	8,40E+00	1,59E+01	2,74E-02	4,07E-04	5,21E-03	3,26E+00	1,08E+00
3'	1,00E+01	1,87E+01	2,53E-02	3,72E-04	5,50E-03	2,42E+00	9,04E-02
4	2,06E+01	3,20E+01	7,83E-03	9,70E-05	8,20E-03	2,06E+00	5,26E-01
4'	2,61E+01	3,72E+01	1,71E-02	3,13E-04	5,93E-03	2,63E+00	7,34E-02
Famille 2							
5	1,53E+00	7,66E+00	1,49E-02	3,85E-05	6,71E-03	3,49E+00	9,42E-02
6	1,22E+00	6,89E+00	3,56E-02	6,74E-04	5,05E-03	2,91E+00	3,53E-02
7	5,69E+00	1,44E+01	2,58E-02	5,99E-04	7,48E-03	2,87E+00	8,28E-02
8	1,56E+01	6,41E+01	4,94E-02	3,08E-04	7,21E-03	2,34E+00	1,40E-01
8'	1,75E+01	4,24E+01	1,67E-02	1,61E-04	6,06E-03	2,68E+00	8,64E-02
Famille 3							
9	7,31E-01	6,14E+00	2,59E-02	4,15E-05	7,43E-03	2,34E+00	6,40E-01
10	1,32E+00	7,46E+00	3,58E-02	7,38E-04	4,95E-03	2,66E+00	4,90E-01
11	4,95E+00	1,26E+01	2,69E-02	3,11E-04	5,16E-03	3,79E+00	4,87E-01
11'	5,32E+00	1,35E+01	2,87E-02	2,59E-04	6,16E-03	3,51E+00	7,02E-02
12	2,31E+01	4,00E+01	2,68E-02	2,83E-04	5,19E-03	2,66E+00	7,76E-02
12'	1,39E+01	3,02E+01	2,59E-02	4,71E-04	8,13E-03	2,65E+00	8,54E-02
Donaye							
	ESP (mmole/l) ^{1/2}	ESPP (mmole/l) ^{1/2}	S cm/s ^{1/2}	Ks cm/s	α m ⁻¹	n	Kr cm ³ /g
Blancs							
1	2,61E+00	5,66E+00	2,25E-02	4,94E-05	1,44E-02	1,16E+00	7,81E-01
2	2,14E+00	4,90E+00	2,32E-03	9,41E-05	3,46E-03	1,36E+00	8,09E-01
3	2,59E+00	5,38E+00	5,13E-03	5,49E-05	2,61E-03	1,59E+00	9,10E-01
4	1,90E+00	4,96E+00	3,49E-02	3,12E-05	2,52E-03	1,42E+00	8,60E-01
5	2,71E+00	5,18E+00	1,75E-02	1,37E-04	4,79E-03	1,32E+00	7,68E-01
Famille 1							
1	2,87E+00	5,46E+00	1,84E-02	2,40E-05	7,15E-03	1,19E+00	9,57E-01
1'	2,39E+00	5,23E+00	1,54E-02	2,32E-05	5,66E-03	1,33E+00	8,79E-01
2	3,35E+00	5,65E+00	1,31E-02	9,12E-05	9,25E-03	1,18E+00	7,46E-01
3	5,39E+00	7,71E+00	2,11E-02	4,84E-05	1,35E-02	1,17E+00	8,36E-01
3'	6,19E+00	9,47E+00	9,78E-03	8,53E-05	1,86E-02	1,20E+00	7,44E-01
4	1,43E+01	1,85E+01	4,56E-03	2,79E-05	9,75E-03	1,15E+00	7,43E-01
4'	1,83E+01	2,33E+01	4,54E-03	1,61E-05	3,89E-03	1,37E+00	6,85E-01
Famille 2							
5	2,41E+00	5,45E+00	5,15E-02	1,04E-04	4,86E-03	1,18E+00	6,57E-01
6	2,94E+00	5,52E+00	1,43E-02	3,71E-05	8,11E-03	1,20E+00	8,07E-01
7	4,49E+00	8,21E+00	2,36E-02	4,14E-05	1,63E-02	1,20E+00	8,86E-01
7'	3,98E+00	6,74E+00	1,05E-02	3,10E-05	5,66E-03	1,33E+00	9,26E-01
8	1,13E+01	1,74E+01	1,60E-02	2,02E-04	2,24E-02	1,15E+00	8,10E-01
8'	1,26E+01	1,93E+01	1,85E-02	1,85E-04			7,59E-01
Famille 3							
9	2,31E+00	5,11E+00	1,64E-02	6,73E-05	2,19E-02	2,32E+00	4,30E-01
10	2,65E+00	5,01E+00	4,42E-02	9,66E-05	9,91E-03	1,20E+00	8,62E-01
11	4,08E+00	7,44E+00	2,12E-02	1,64E-04	3,05E-02	1,13E+00	9,10E-01
11'	4,69E+00	8,82E+00	2,75E-02	2,94E-04	5,49E-03	1,27E+00	1,11E+00
12	1,13E+01	1,91E+01	3,77E-02	3,22E-04	7,27E-03	1,24E+00	8,58E-01
12'	1,23E+01	1,91E+01	3,09E-02	2,96E-04	6,72E-03	2,86E+00	9,33E-01

Annexe 11 : Courbes de rétention des échantillons de sol d'Ouru Madiou et Donaye



Annexe 12 : Analyse rétractométrique des échantillons d'Ouru Madiou et de Donaye



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 2.56
 Modélisé (point de saturation théorique) : 6.27

PENTES CALCULEES Ko = 0.0213 Kr = 0.6471 Kres = 0.2097

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 131.70
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.597
 Vm des particules (cm³/g) : 0.374 => inverse : Densité du solide : 2.671

POINTS CARACTERISTIQUES :

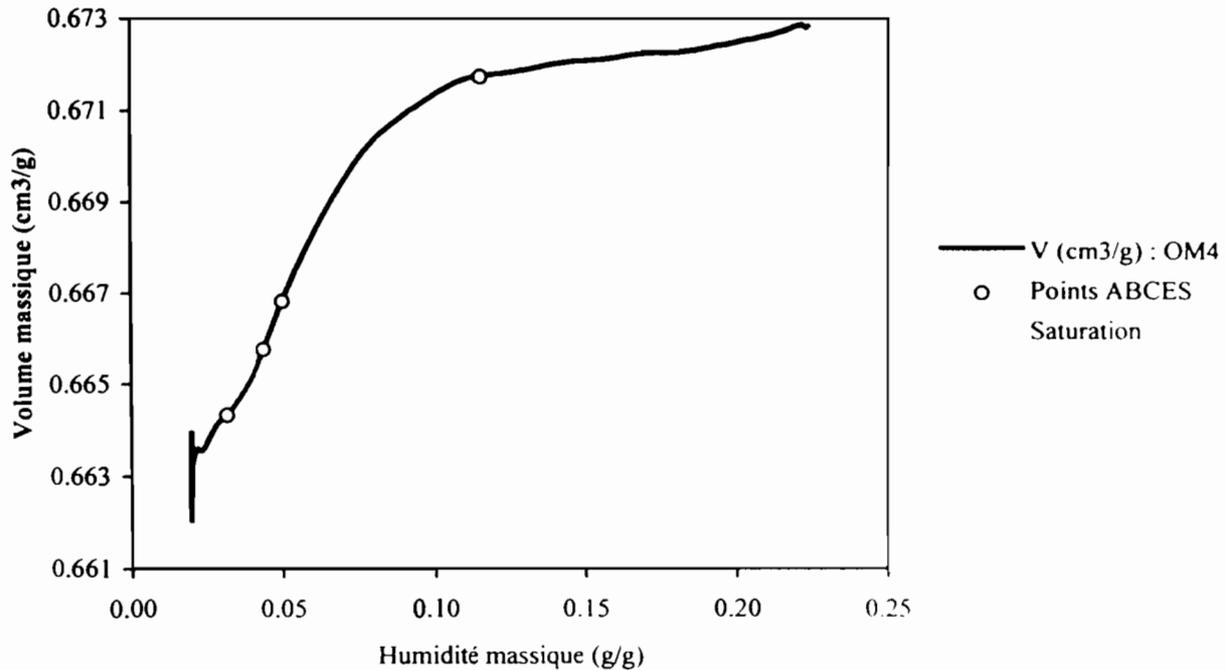
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.594	Vm A = 0.627	w A = 0.017	w A = 0.027
Point B :	Mv B = 1.586	Vm B = 0.630	w B = 0.025	w B = 0.039
Point C :	Mv C = 1.561	Vm C = 0.640	w C = 0.040	w C = 0.063
Point E :	Mv E = 1.512	Vm E = 0.662	w E = 0.115	w E = 0.173
Début d'analyse :	Mv l = 1.558	Vm l = 0.642	w l = 0.200	w l = 0.312
Saturation théorique :	Mv S = 1.503	Vm S = 0.665	w S = 0.291	w S = 0.437

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	28.71	43.40	25.29	40.31
Macroporosité % :	21.58	32.63	23.16	36.92
Microporosité % :	7.13	10.78	2.13	3.39

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	4.33	6.55
Eau intra-agrégats :	4.67	7.07
Capacité à l'air :	17.25	26.08



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 1.49
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.63

PENTES CALCULEES Ko = 0.0111 Kr = 0.1642 Kres = 0.0807

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 104.20
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.663 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.508
 Vm des particules (cm³/g) : 0.368 => inverse : Densité du solide : 2.719

POINTS CARACTERISTIQUES :

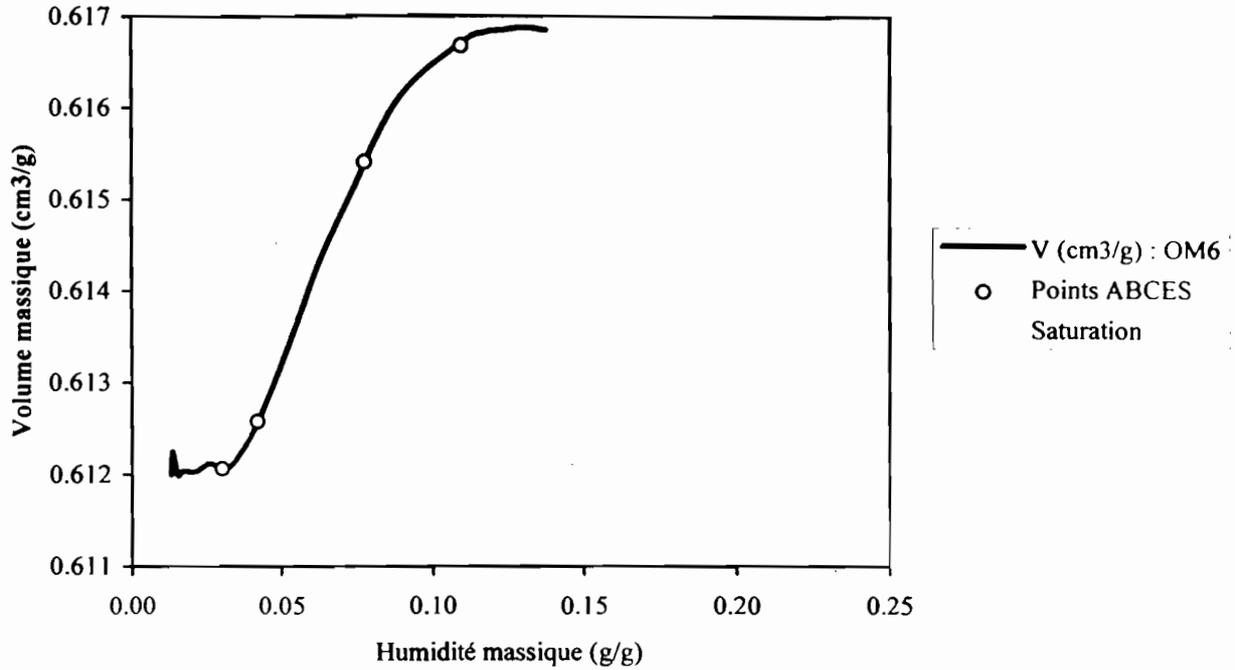
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.505	Vm A = 0.664	w A = 0.031	w A = 0.047
Point B :	Mv B = 1.502	Vm B = 0.666	w B = 0.044	w B = 0.066
Point C :	Mv C = 1.500	Vm C = 0.667	w C = 0.050	w C = 0.075
Point E :	Mv E = 1.489	Vm E = 0.672	w E = 0.115	w E = 0.172
Début d'analyse :	Mv l = 1.486	Vm l = 0.673	w l = 0.224	w l = 0.332
Saturation théorique :	Mv S = 1.484	Vm S = 0.674	w S = 0.306	w S = 0.454

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	30.39	45.25	29.65	44.64
Macroporosité % :	22.64	33.71	25.80	38.83
Microporosité % :	7.75	11.54	3.86	5.81

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	3.80	5.65
Eau intra-agrégats :	3.37	5.02
Capacité à l'air :	18.85	28.06



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.79
Modélisé (point de saturation théorique) : 1.03

PENTES CALCULEES Ko = 0.0120 Kr = 0.0797 Kres = 0.0146

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
Masse échantillon sec (g) : 134.14
Vm apparent sec (cm³/g) : 0.612 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.634
Vm des particules (cm³/g) : 0.377 => inverse : Densité du solide : 2.655

POINTS CARACTERISTIQUES :

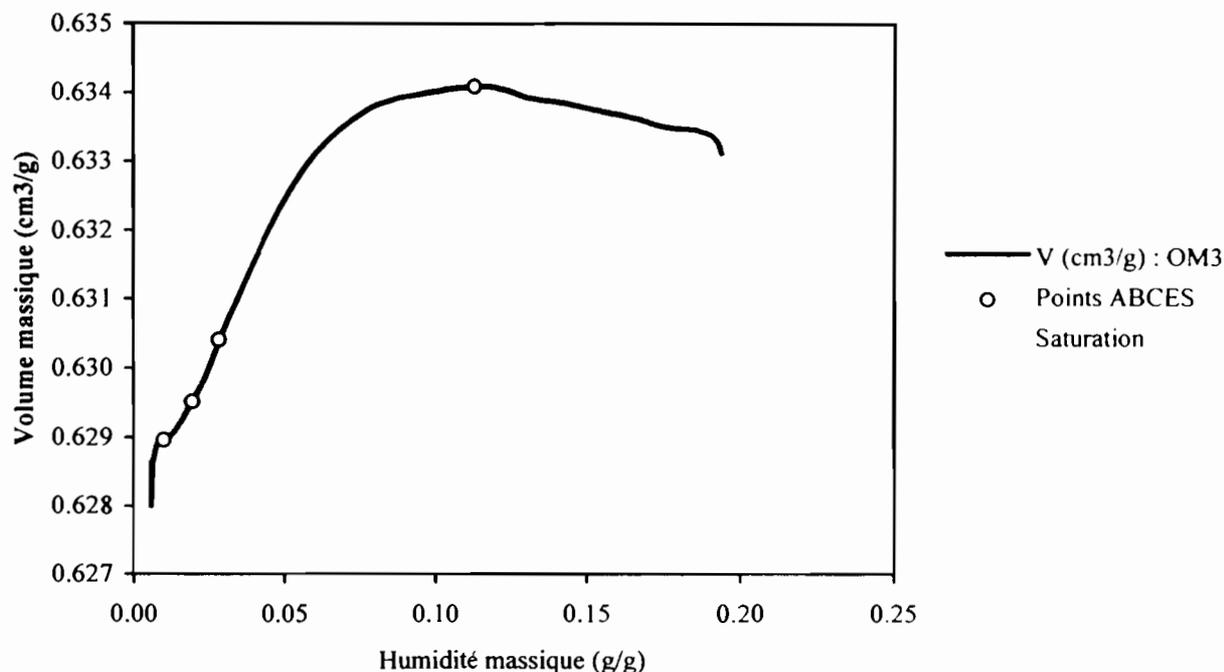
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.634	Vm A = 0.612	w A = 0.030	w A = 0.048
Point B :	Mv B = 1.632	Vm B = 0.613	w B = 0.042	w B = 0.069
Point C :	Mv C = 1.625	Vm C = 0.615	w C = 0.077	w C = 0.126
Point E :	Mv E = 1.622	Vm E = 0.617	w E = 0.109	w E = 0.177
Début d'analyse :	Mv I = 1.621	Vm I = 0.617	w I = 0.137	w I = 0.222
Saturation théorique :	Mv S = 1.617	Vm S = 0.618	w S = 0.242	w S = 0.391

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	24.00	38.92	23.54	38.46
Macroporosité % :	14.94	24.22	19.86	32.44
Microporosité % :	9.07	14.70	3.68	6.02

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.84	2.98
Eau intra-agrégats :	4.87	7.89
Capacité à l'air :	13.10	21.24



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.81
 Modélisé (point de saturation théorique) : 0.97

PENTES CALCULEES Ko = 0.0001 Kr = 0.1026 Kres = 0.0280

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 138.65
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.628 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.592
 Vm des particules (cm³/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.703

POINTS CARACTERISTIQUES :

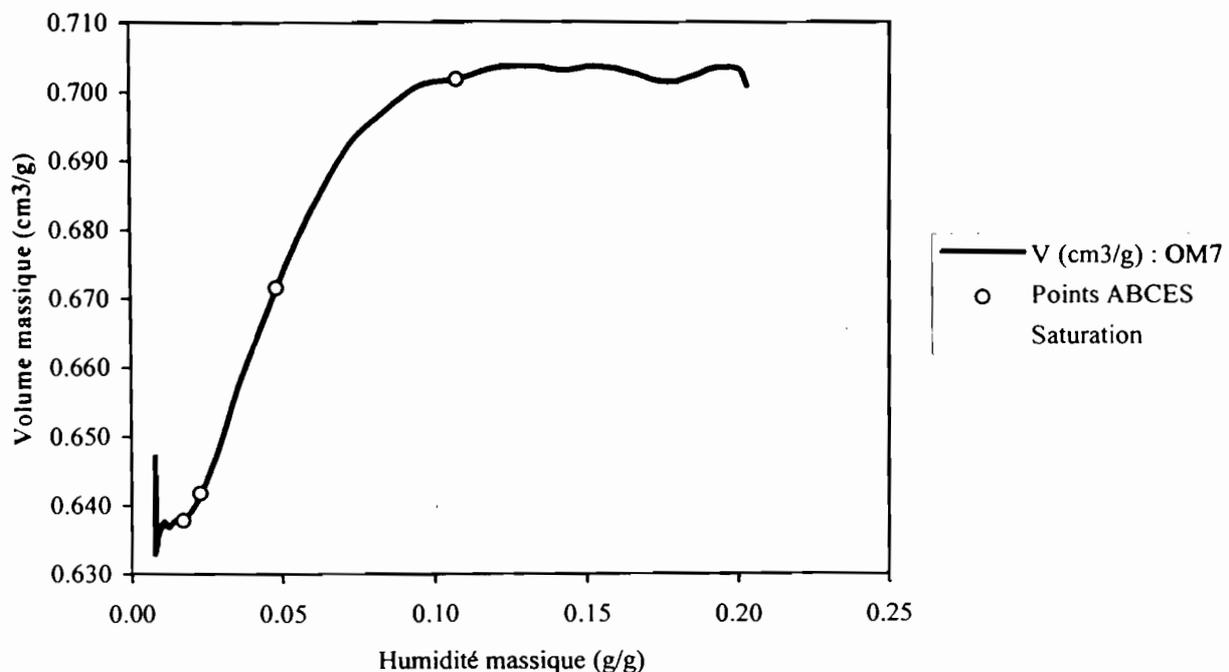
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.590	Vm A = 0.629	w A = 0.010	w A = 0.016
Point B :	Mv B = 1.589	Vm B = 0.630	w B = 0.019	w B = 0.031
Point C :	Mv C = 1.586	Vm C = 0.630	w C = 0.028	w C = 0.045
Point E :	Mv E = 1.577	Vm E = 0.634	w E = 0.113	w E = 0.179
Début d'analyse :	Mv l = 1.579	Vm l = 0.633	w l = 0.194	w l = 0.307
Saturation théorique :	Mv S = 1.577	Vm S = 0.634	w S = 0.264	w S = 0.417

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	26.41	41.65	25.90	41.18
Macroporosité % :	20.03	31.59	24.35	38.72
Microporosité % :	6.38	10.06	1.55	2.46

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	4.97	7.84
Eau intra-agrégats :	4.44	7.01
Capacité à l'air :	15.06	23.75



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10' Expérimental (début d'analyse) : 10.22
Modélisé (point de saturation théorique) : 11.95

PENTES CALCULEES $K_o = 0.0440$ $K_r = 1.1635$ $K_{res} = 0.3353$

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
Masse échantillon sec (g) : 119.85
Vm apparent sec (cm³/g) : 0.636 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.572
Vm des particules (cm³/g) : 0.373 => inverse : Densité du solide : 2.680

POINTS CARACTERISTIQUES :

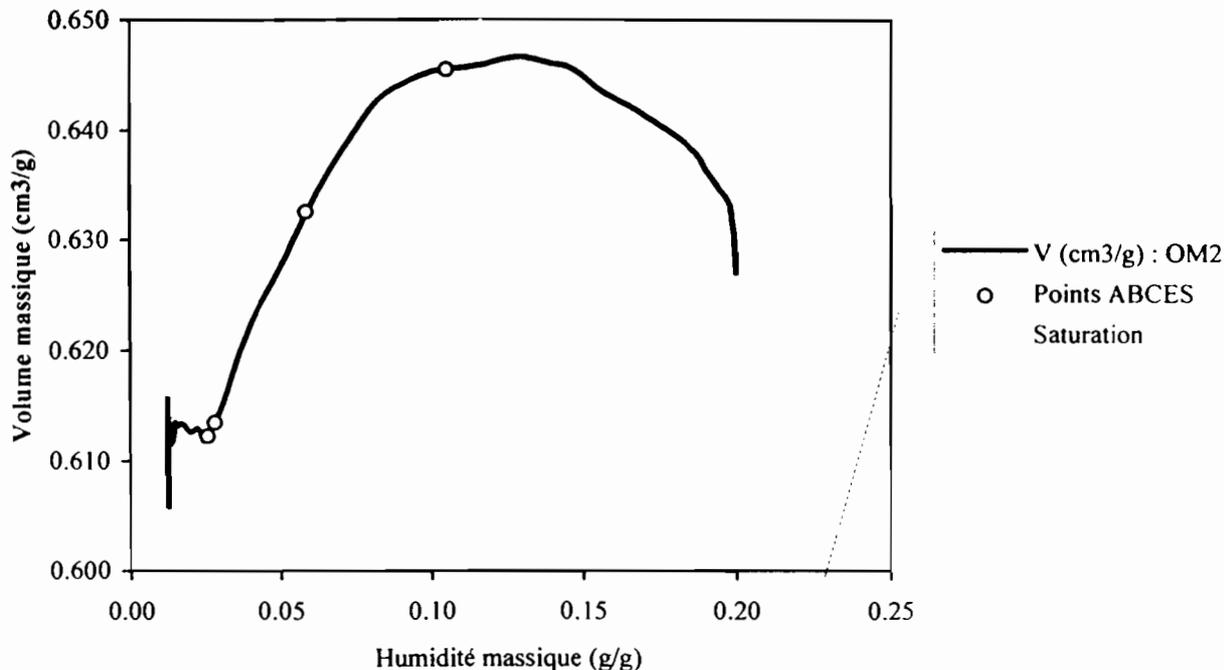
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.568	Vm A = 0.638	w A = 0.017	w A = 0.027
Point B :	Mv B = 1.558	Vm B = 0.642	w B = 0.023	w B = 0.036
Point C :	Mv C = 1.489	Vm C = 0.672	w C = 0.049	w C = 0.072
Point E :	Mv E = 1.425	Vm E = 0.702	w E = 0.108	w E = 0.154
Début d'analyse :	Mv I = 1.427	Vm I = 0.701	w I = 0.203	w I = 0.290
Saturation théorique :	Mv S = 1.404	Vm S = 0.712	w S = 0.339	w S = 0.476

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	32.87	46.83	26.47	41.50
Macroporosité % :	25.54	36.39	24.41	38.27
Microporosité % :	7.33	10.44	2.06	3.22

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	3.44	4.91
Eau intra-agrégats :	5.03	7.17
Capacité à l'air :	22.10	31.48



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10' Expérimental (début d'analyse) : 2.79
 Modélisé (point de saturation théorique) : 6.71

PENTES CALCULEES Ko = 0.0307 Kr = 0.6283 Kres = 0.4243

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 126.34
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.610 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.639
 Vm des particules (cm³/g) : 0.371 => inverse : Densité du solide : 2.695

POINTS CARACTERISTIQUES :

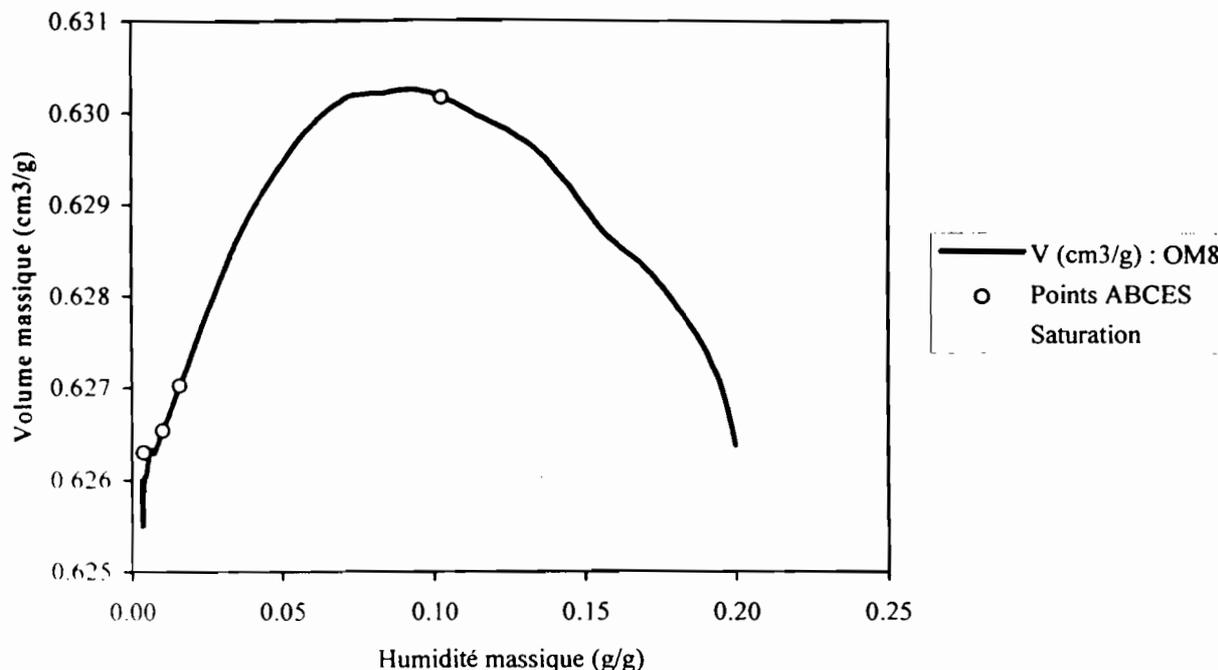
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.633	Vm A = 0.612	w A = 0.026	w A = 0.042
Point B :	Mv B = 1.630	Vm B = 0.614	w B = 0.028	w B = 0.046
Point C :	Mv C = 1.581	Vm C = 0.633	w C = 0.058	w C = 0.092
Point E :	Mv E = 1.549	Vm E = 0.646	w E = 0.105	w E = 0.162
Début d'analyse :	Mv l = 1.595	Vm l = 0.627	w l = 0.200	w l = 0.318
Saturation théorique :	Mv S = 1.536	Vm S = 0.651	w S = 0.280	w S = 0.430

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	27.45	42.52	24.12	39.40
Macroporosité % :	19.68	30.49	21.42	34.99
Microporosité % :	7.77	12.03	2.70	4.41

RESERVES EN EAÜ DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.70	4.18
Eau intra-agrégats :	4.97	7.70
Capacité à l'air :	16.98	26.31



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.06
 Modélisé (point de saturation théorique) : 0.67

PENTES CALCULEES Ko = 0.0002 Kr = 0.0869 Kres = 0.0000

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 109.93
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.597
 Vm des particules (cm³/g) : 0.371 => inverse : Densité du solide : 2.696

POINTS CARACTERISTIQUES :

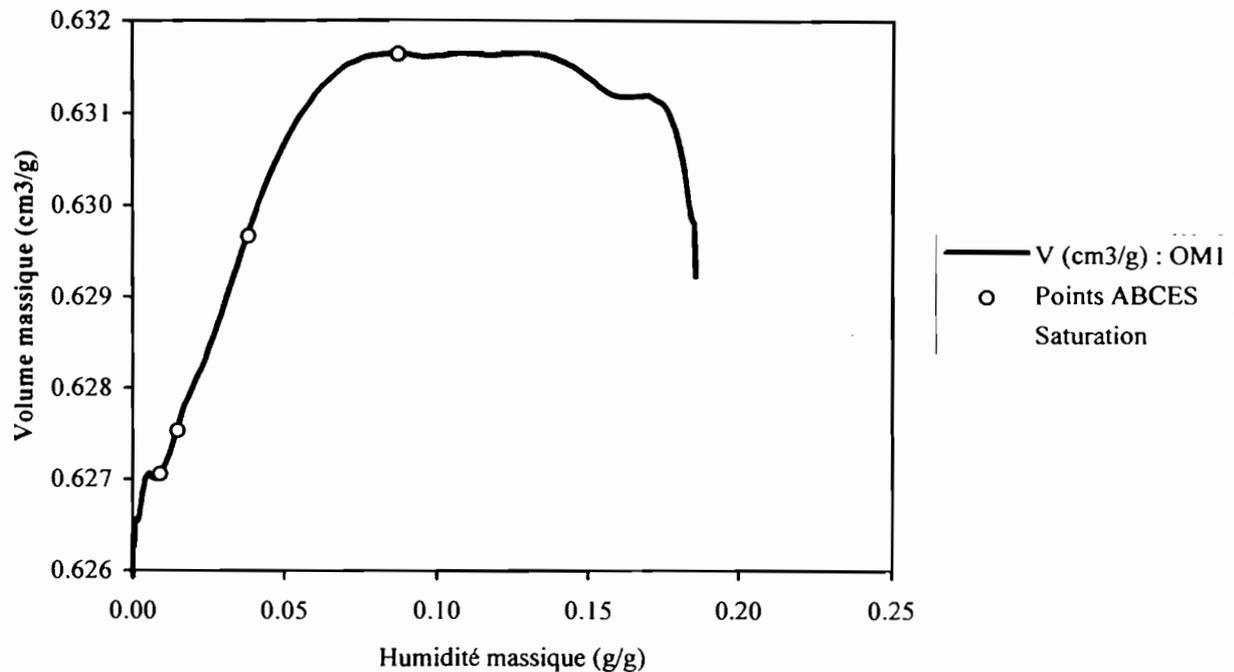
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.597	Vm A = 0.626	w A = 0.004	w A = 0.006
Point B :	Mv B = 1.596	Vm B = 0.627	w B = 0.010	w B = 0.016
Point C :	Mv C = 1.595	Vm C = 0.627	w C = 0.016	w C = 0.025
Point E :	Mv E = 1.587	Vm E = 0.630	w E = 0.102	w E = 0.162
Début d'analyse :	Mv I = 1.596	Vm I = 0.626	w I = 0.200	w I = 0.319
Saturation théorique :	Mv S = 1.587	Vm S = 0.630	w S = 0.259	w S = 0.411

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec	
Porosite totale % :	25.93	41.14	25.54	40.78
Macroporosité % :	20.72	32.89	24.78	39.56
Microporosité % :	5.20	8.25	0.76	1.21

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	5.03	7.98
Eau intra-agrégats :	4.17	6.62
Capacité à l'air :	15.70	24.91



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.52
 Modélisé (point de saturation théorique) : 0.98

PENTES CALCULEES Ko = 0.0029 Kr = 0.0917 Kres = 0.0747

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) :	0.00			
Masse échantillon sec (g) :	122.11			
Vm apparent sec (cm ³ /g) :	0.626	=> inverse :	Masse volumique sec (g/cm ³) :	1.597
Vm des particules (cm ³ /g) :	0.367	=> inverse :	Densité du solide :	2.726

POINTS CARACTERISTIQUES :

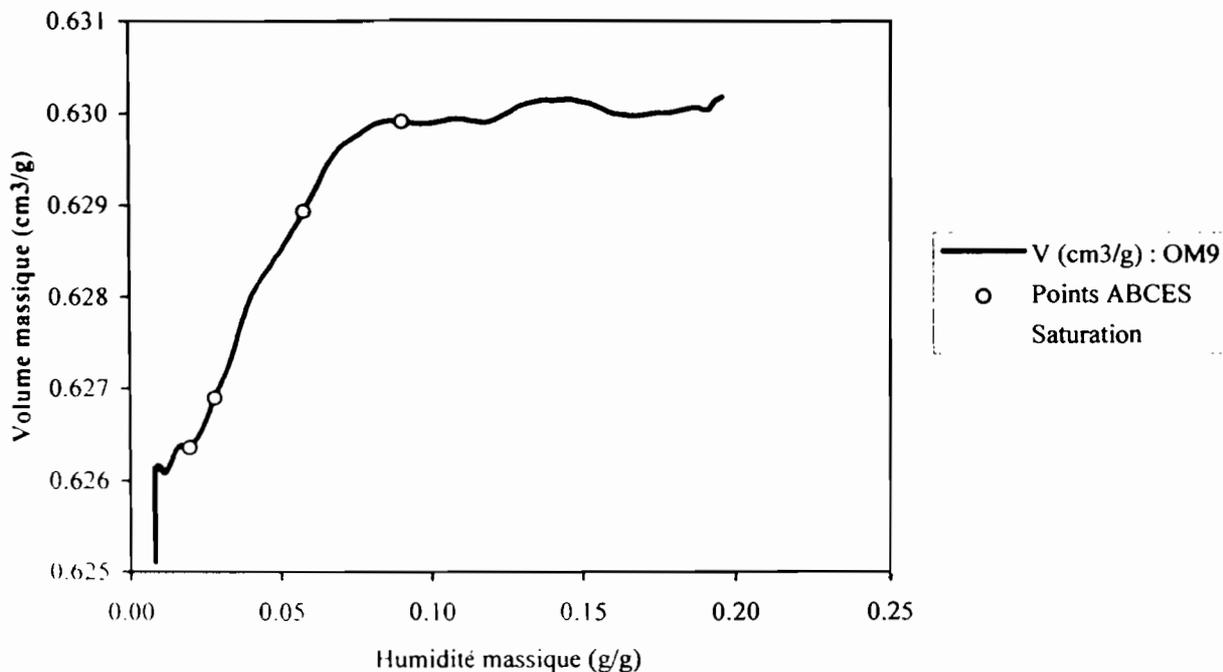
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.595	Vm A = 0.627	w A = 0.009	w A = 0.015
Point B :	Mv B = 1.594	Vm B = 0.628	w B = 0.015	w B = 0.024
Point C :	Mv C = 1.588	Vm C = 0.630	w C = 0.038	w C = 0.061
Point E :	Mv E = 1.583	Vm E = 0.632	w E = 0.088	w E = 0.139
Début d'analyse :	Mv I = 1.589	Vm I = 0.629	w I = 0.186	w I = 0.295
Saturation théorique :	Mv S = 1.582	Vm S = 0.632	w S = 0.265	w S = 0.420

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	26.48	41.92	26.02	41.50
Macroporosité % :	20.59	32.60	24.77	39.50
Microporosité % :	5.89	9.33	1.25	2.00

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.88	4.56
Eau intra-agrégats :	4.40	6.96
Capacité à l'air :	17.71	28.04



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.67
 Modélisé (point de saturation théorique) : 0.69

PENTES CALCULEES Ko 0.0025 Kr = 0.0682 Kres = 0.0639

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprene (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 125.28
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.597
 Vm des particules (cm³/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.700

POINTS CARACTERISTIQUES :

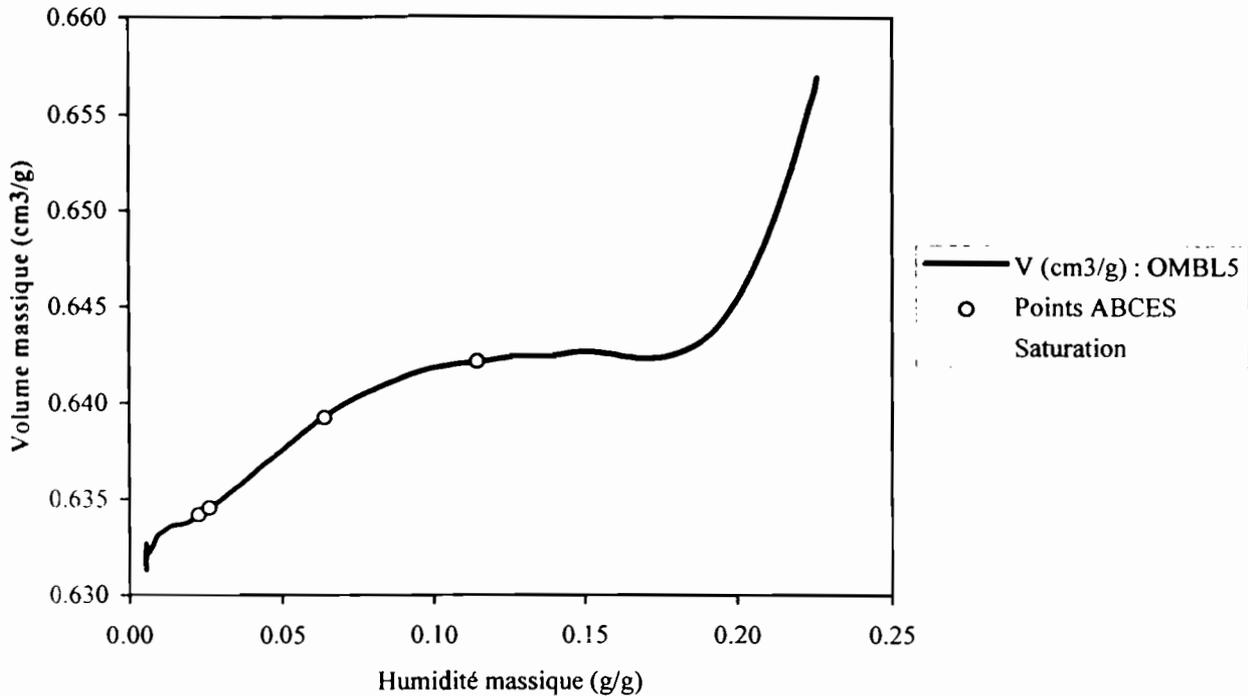
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.597	Vm A = 0.626	w A = 0.020	w A = 0.031
Point B :	Mv B = 1.595	Vm B = 0.627	w B = 0.028	w B = 0.045
Point C :	Mv C = 1.590	Vm C = 0.629	w C = 0.058	w C = 0.092
Point E :	Mv E = 1.588	Vm E = 0.630	w E = 0.090	w E = 0.144
Début d'analyse :	Mv I = 1.587	Vm I = 0.630	w I = 0.196	w I = 0.311
Saturation théorique :	Mv S = 1.586	Vm S = 0.630	w S = 0.260	w S = 0.412

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	25.95	41.20	25.60	40.87
Macroporosité % :	18.81	29.86	23.15	36.96
Microporosité % :	7.15	11.34	2.45	3.91

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	1.90	3.02
Eau intra-agrégats :	4.35	6.91
Capacité à l'air :	16.91	26.84



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 3.96
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.89

PENTES CALCULEES Ko = 0.0114 Kr = 0.1240 Kres = 0.0917

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 115.82
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.632 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.582
 Vm des particules (cm³/g) : 0.374 => inverse : Densité du solide : 2.674

POINTS CARACTERISTIQUES :

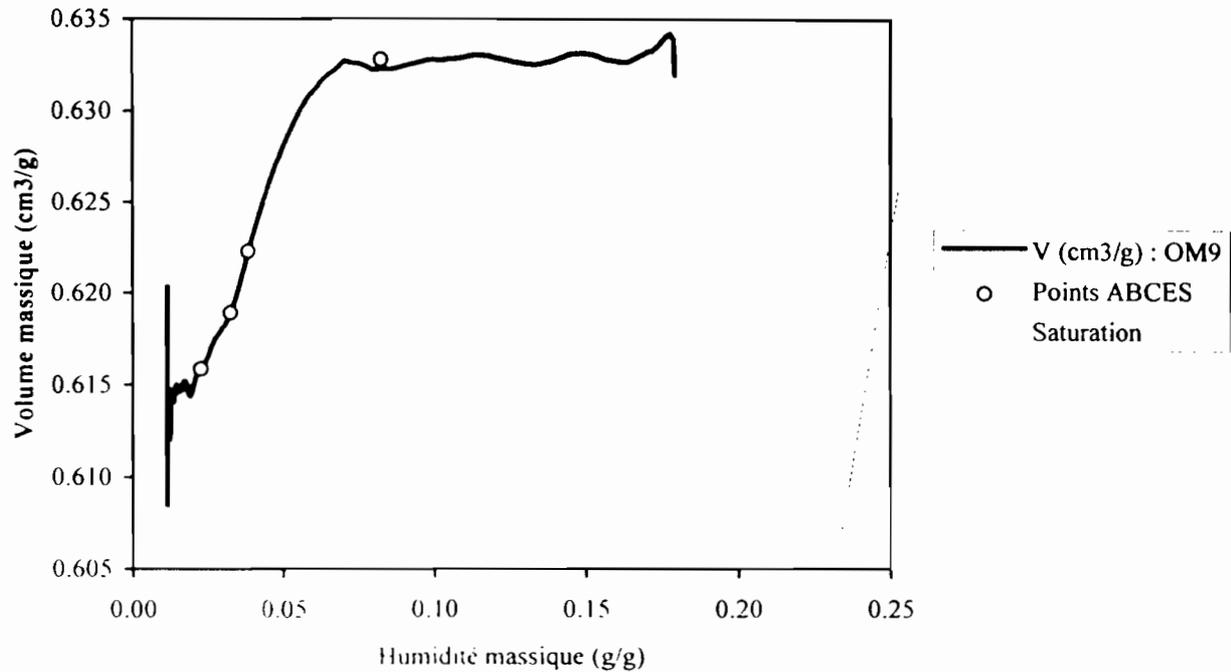
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.577	Vm A = 0.634	w A = 0.022	w A = 0.035
Point B :	Mv B = 1.576	Vm B = 0.635	w B = 0.026	w B = 0.041
Point C :	Mv C = 1.564	Vm C = 0.639	w C = 0.064	w C = 0.100
Point E :	Mv E = 1.557	Vm E = 0.642	w E = 0.114	w E = 0.178
Début d'analyse :	Mv l = 1.522	Vm l = 0.657	w l = 0.226	w l = 0.344
Saturation théorique :	Mv S = 1.553	Vm S = 0.644	w S = 0.270	w S = 0.419

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec	
Porosité totale % :	26.82	41.77	26.02	41.03
Macroporosité % :	18.34	28.56	23.58	37.18
Microporosité % :	8.48	13.21	2.45	3.86

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.93	4.56
Eau intra-agrégats :	5.89	9.18
Capacité à l'air :	15.41	24.00



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 2.93
 Modélisé (point de saturation théorique) : 3.23

PENTES CALCULEES Ko = 0.0058 Kr = 0.5549 Kres = 0.1433

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 122.91
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.614 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.629
 Vm des particules (cm3/g) : 0.373 => inverse : Densité du solide : 2.680

POINTS CARACTERISTIQUES :

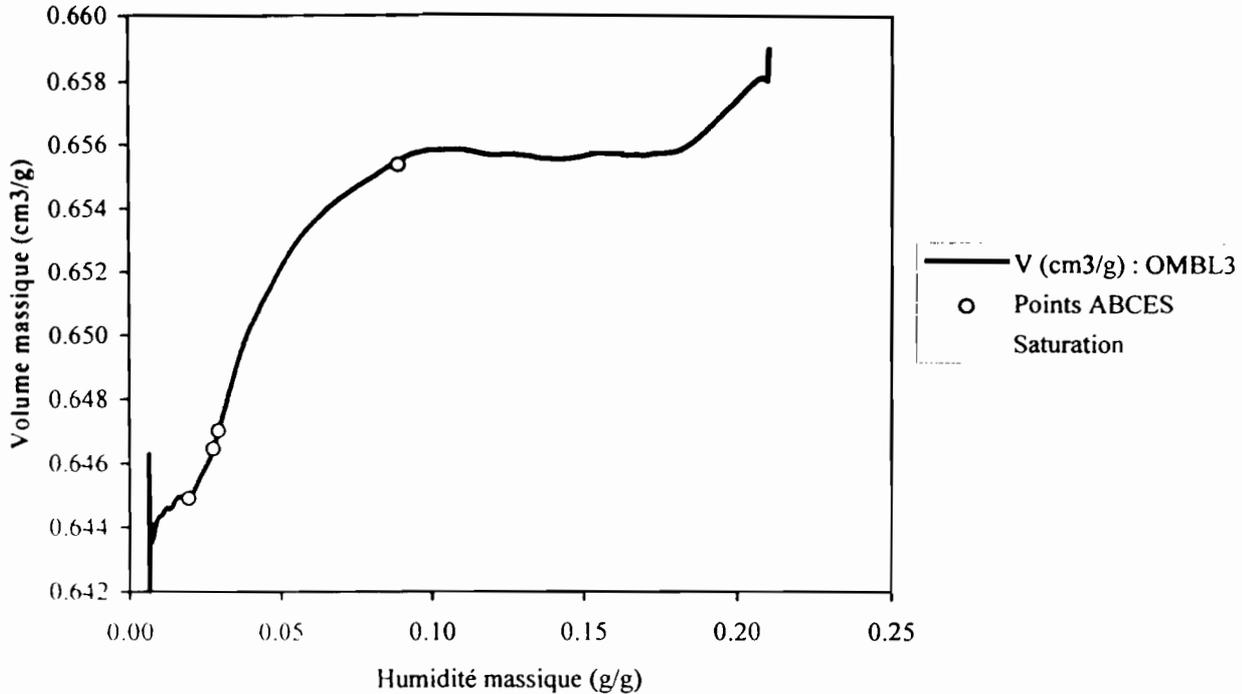
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.624	Vm A = 0.616	w A = 0.022	w A = 0.036
Point B :	Mv B = 1.616	Vm B = 0.619	w B = 0.032	w B = 0.052
Point C :	Mv C = 1.607	Vm C = 0.622	w C = 0.038	w C = 0.061
Point E :	Mv E = 1.580	Vm E = 0.633	w E = 0.083	w E = 0.131
Début d'analyse :	Mv I = 1.582	Vm I = 0.632	w I = 0.180	w I = 0.284
Saturation théorique :	Mv S = 1.578	Vm S = 0.634	w S = 0.261	w S = 0.411

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)	
Porosité totale % :	25.97	41.03	24.27	39.41
Macroporosité % :	20.29	32.07	21.48	34.88
Microporosité % :	5.67	8.97	2.79	4.54

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	2.60	4.11
Eau intra-agrégats :	2.48	3.91
Capacité à l'air :	17.69	27.96



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 2.65
 Modélisé (point de saturation théorique) : 2.37

PENTES CALCULEES Ko = 0.0094 Kr = 0.3207 Kres = 0.0947

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 131.49
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.642 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.558
 Vm des particules (cm³/g) : 0.374 => inverse : Densité du solide : 2.676

POINTS CARACTERISTIQUES :

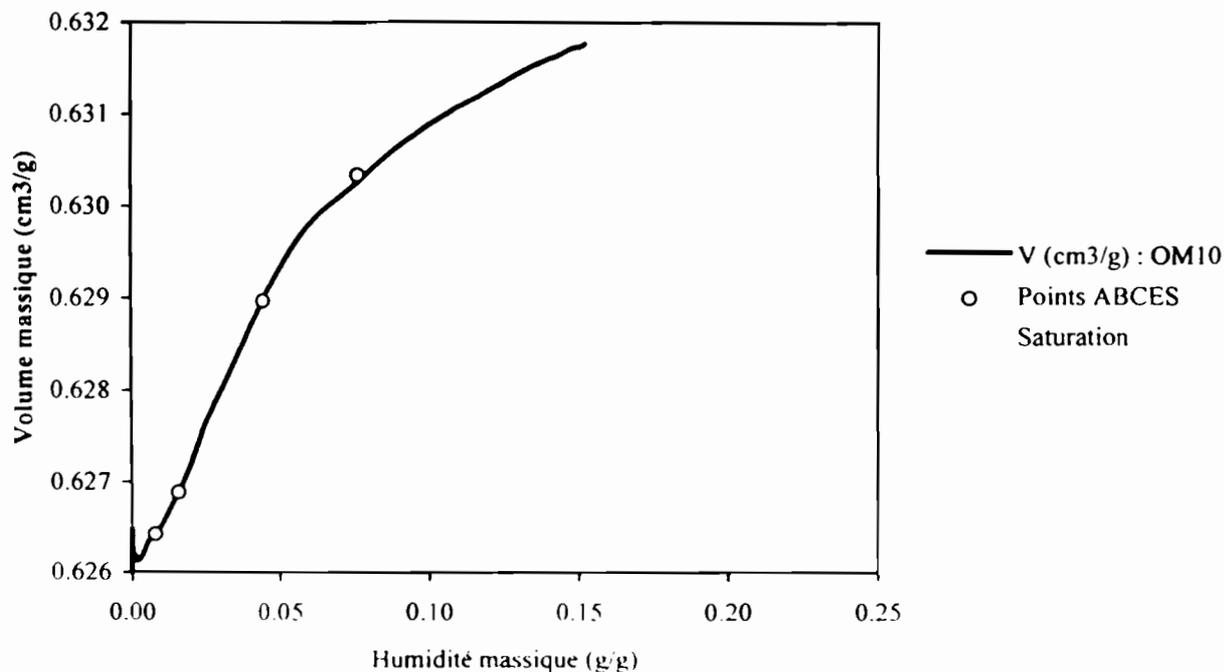
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.551	Vm A = 0.645	w A = 0.019	w A = 0.030
Point B :	Mv B = 1.547	Vm B = 0.646	w B = 0.028	w B = 0.043
Point C :	Mv C = 1.546	Vm C = 0.647	w C = 0.029	w C = 0.045
Point E :	Mv E = 1.526	Vm E = 0.655	w E = 0.089	w E = 0.136
Début d'analyse :	Mv l = 1.517	Vm l = 0.659	w l = 0.210	w l = 0.319
Saturation théorique :	Mv S = 1.522	Vm S = 0.657	w S = 0.283	w S = 0.431

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	28.17	42.98	27.12	42.05
Macroporosité % :	22.73	34.68	24.70	38.30
Microporosité % :	5.44	8.30	2.42	3.75

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	3.49	5.32
Eau intra-agrégats :	2.68	4.09
Capacité à l'air :	19.24	29.36



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 0.92
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.34

PENTES CALCULEES Ko = 0.0215 Kr = 0.0730 Kres = 0.0488

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 132.44
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.597
 Vm des particules (cm3/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.700

POINTS CARACTERISTIQUES :

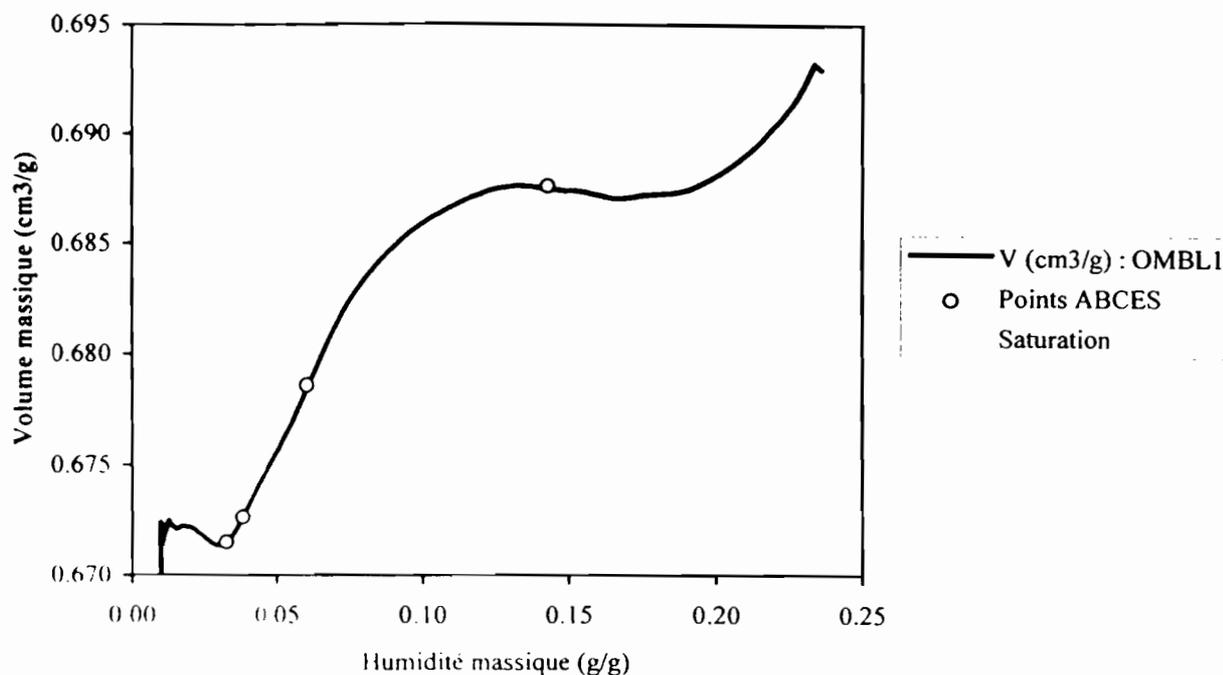
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.596	Vm A = 0.626	w A = 0.008	w A = 0.013
Point B :	Mv B = 1.595	Vm B = 0.627	w B = 0.016	w B = 0.025
Point C :	Mv C = 1.590	Vm C = 0.629	w C = 0.044	w C = 0.070
Point E :	Mv E = 1.586	Vm E = 0.630	w E = 0.076	w E = 0.121
Début d'analyse :	Mv I = 1.583	Vm I = 0.632	w I = 0.152	w I = 0.240
Saturation théorique :	Mv S = 1.576	Vm S = 0.634	w S = 0.264	w S = 0.416

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)	ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Porosité totale % :	26.00	41.24	25.61	40.88
Macroporosité % :	20.24	32.11	24.36	38.88
Microporosité % :	5.75	9.13	1.25	2.00

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Eau inter-agrégats :	1.86	2.94
Eau intra-agrégats :	4.18	6.62
Capacité à l'air :	18.39	29.17



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Experimental (début d'analyse) : 3.12
 Modélisé (point de saturation théorique) : 2.32

PENTES CALCULEES Ko 0.0000 Kr = 0.2633 Kres = 0.1581

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 92.14
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.672 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.488
 Vm des particules (cm3/g) : 0.381 => inverse : Densité du solide : 2.625

POINTS CARACTERISTIQUES :

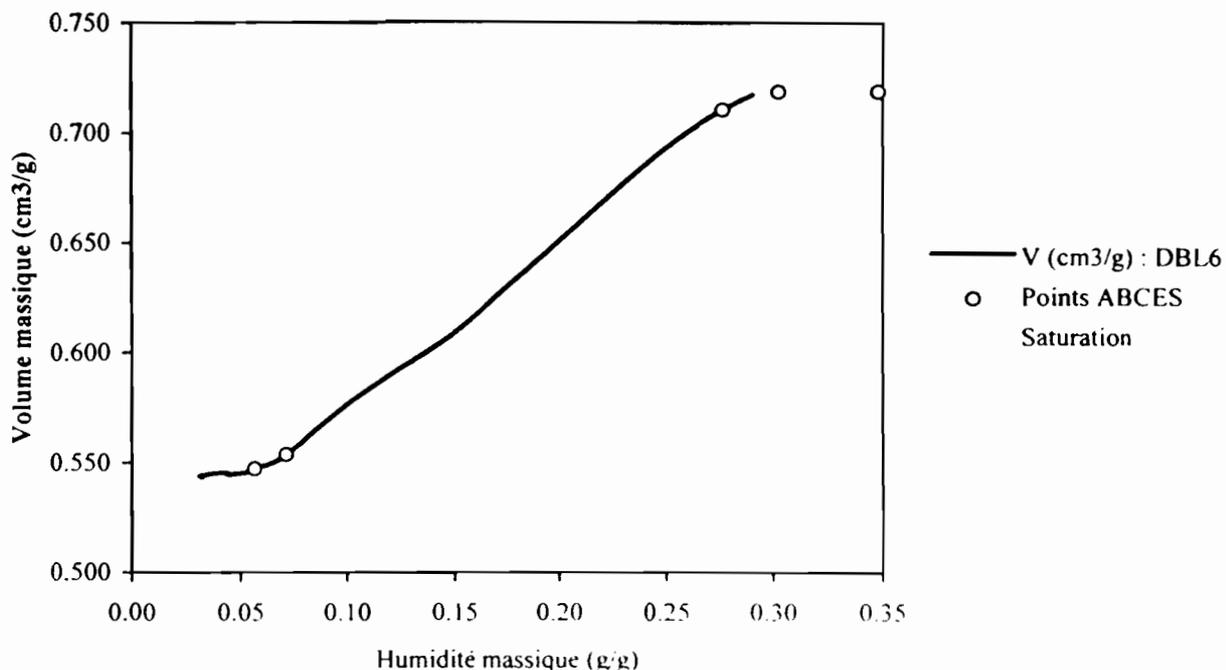
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.489	Vm A = 0.672	w A = 0.032	w A = 0.048
Point B :	Mv B = 1.487	Vm B = 0.673	w B = 0.038	w B = 0.056
Point C :	Mv C = 1.474	Vm C = 0.679	w C = 0.060	w C = 0.089
Point E :	Mv E = 1.454	Vm E = 0.688	w E = 0.142	w E = 0.207
Début d'analyse :	Mv I = 1.443	Vm I = 0.693	w I = 0.236	w I = 0.341
Saturation théorique :	Mv S = 1.454	Vm S = 0.688	w S = 0.307	w S = 0.446

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm3/100g de sol sec) x (cm3/100cm3 de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)	
Porosité totale % :	30.67	44.60	29.06	43.27
Macroporosité % :	21.20	30.82	25.50	37.98
Microporosité % :	9.47	13.77	3.55	5.29

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Eau inter-agrégats :	4.78	6.95
Eau intra-agrégats :	5.69	8.27
Capacité à l'air :	16.42	23.88



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 31.99
 Modélisé (point de saturation théorique) : 32.20

PENTES CALCULEES Ko = 0.0000 Kr = 0.7681 Kres = 0.1766

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 111.46
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.544 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.838
 Vm des particules (cm³/g) : 0.371 => inverse : Densité du solide : 2.693

POINTS CARACTERISTIQUES :

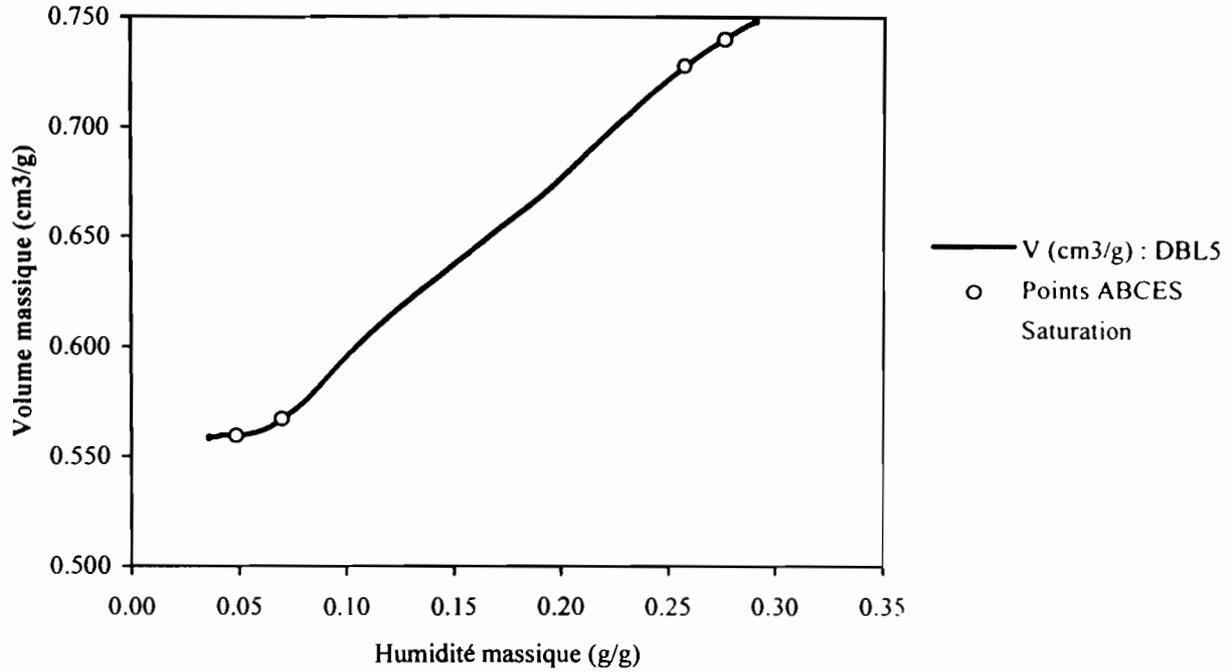
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.828	Vm A = 0.547	w A = 0.057	w A = 0.104
Point B :	Mv B = 1.806	Vm B = 0.554	w B = 0.072	w B = 0.130
Point C :	Mv C = 1.407	Vm C = 0.711	w C = 0.277	w C = 0.389
Point E :	Mv E = 1.390	Vm E = 0.719	w E = 0.303	w E = 0.421
Début d'analyse :	Mv l = 1.393	Vm l = 0.718	w l = 0.291	w l = 0.405
Saturation théorique :	Mv S = 1.390	Vm S = 0.719	w S = 0.348	w S = 0.484

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	34.78	48.37	17.58	32.13
Macroporosité % :	6.04	8.40	11.03	20.16
Microporosité % :	28.75	39.97	6.55	11.98

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.51	2.09
Eau intra-agrégats :	21.55	29.97
Capacité à l'air :	4.53	6.30



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 34.05
 Modélisé (point de saturation théorique) : 47.13

PENTES CALCULEES Ko = 0.4793 Kr = 0.8603 Kres = 0.0000

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 118.73
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.558 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.792
 Vm des particules (cm³/g) : 0.376 => inverse : Densité du solide : 2.658

POINTS CARACTERISTIQUES :

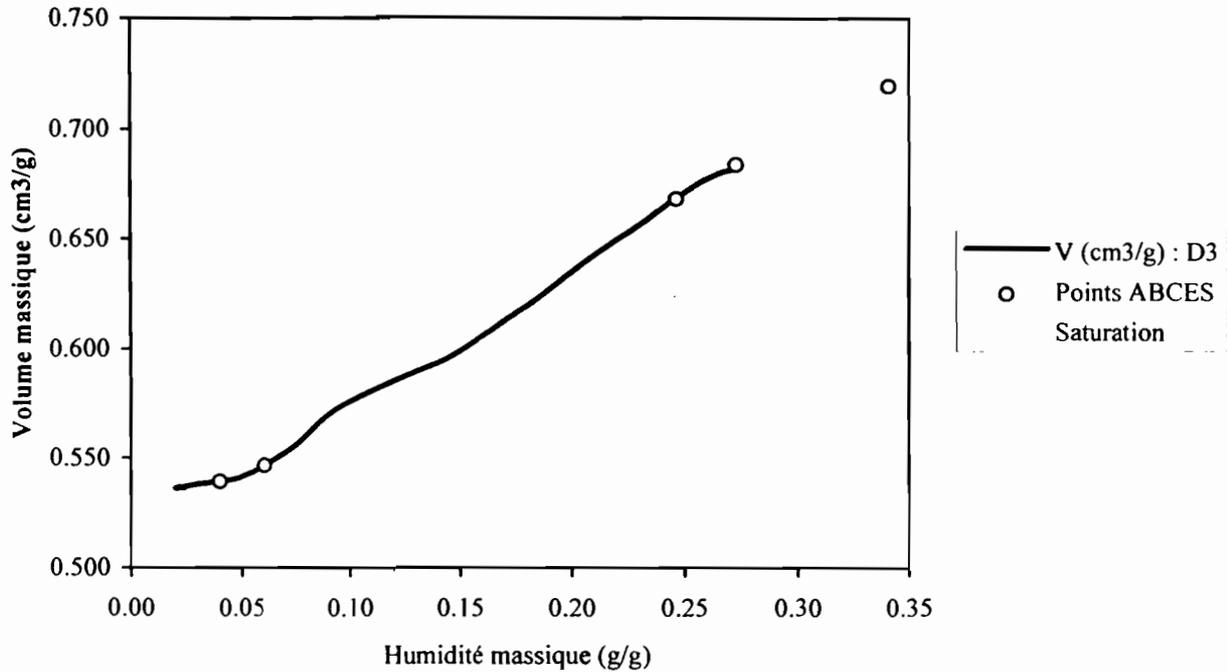
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.788	Vm A = 0.559	w A = 0.049	w A = 0.087
Point B :	Mv B = 1.763	Vm B = 0.567	w B = 0.070	w B = 0.124
Point C :	Mv C = 1.373	Vm C = 0.728	w C = 0.257	w C = 0.353
Point E :	Mv E = 1.351	Vm E = 0.740	w E = 0.276	w E = 0.373
Début d'analyse :	Mv I = 1.337	Vm I = 0.748	w I = 0.291	w I = 0.389
Saturation théorique :	Mv S = 1.218	Vm S = 0.821	w S = 0.445	w S = 0.542

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	36.40	49.17	18.32	32.75
Macroporosité % :	9.87	13.34	12.20	21.80
Microporosité % :	26.53	35.84	6.12	10.95

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.10	1.49
Eau intra-agrégats :	19.51	26.35
Capacité à l'air :	8.77	11.85



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 27.00
 Modélisé (point de saturation théorique) : 34.03

PENTES CALCULEES Ko = 0.5247 Kr = 0.6573 Kres = 0.1343

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 107.15
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.537 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.862
 Vm des particules (cm³/g) : 0.379 => inverse : Densité du solide : 2.638

POINTS CARACTERISTIQUES :

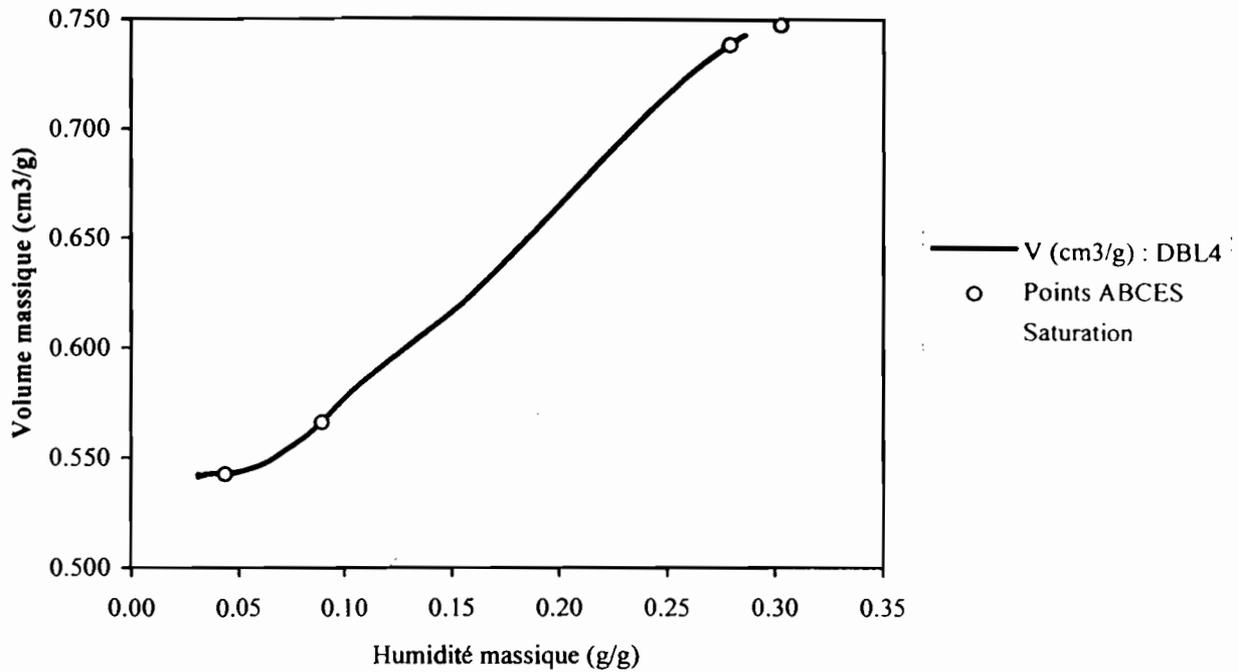
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.854	Vm A = 0.539	w A = 0.040	w A = 0.074
Point B :	Mv B = 1.830	Vm B = 0.547	w B = 0.060	w B = 0.110
Point C :	Mv C = 1.496	Vm C = 0.668	w C = 0.246	w C = 0.368
Point E :	Mv E = 1.462	Vm E = 0.684	w E = 0.273	w E = 0.399
Début d'analyse :	Mv I = 1.466	Vm I = 0.682	w I = 0.272	w I = 0.399
Saturation théorique :	Mv S = 1.389	Vm S = 0.720	w S = 0.341	w S = 0.473

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	30.50	44.59	16.03	29.71
Macroporosité % :	4.79	7.00	10.85	20.11
Microporosité % :	25.71	37.58	5.18	9.60

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.56	2.29
Eau intra-agrégats :	19.68	28.76
Capacité à l'air :	3.23	4.72



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 37.08
 Modélisé (point de saturation théorique) : 37.92

PENTES CALCULEES Ko = 0.0000 Kr = 0.9100 Kres = 0.2264

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 113.89
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.542 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.845
 Vm des particules (cm³/g) : 0.380 => inverse : Densité du solide : 2.633

POINTS CARACTERISTIQUES :

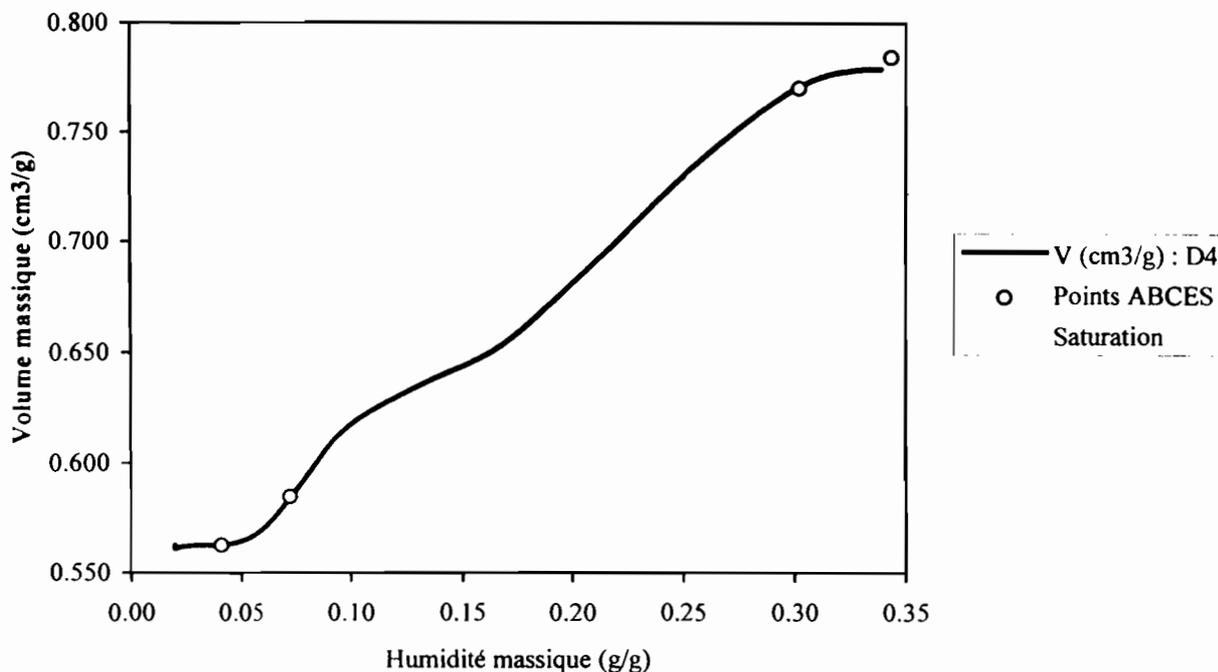
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.844	Vm A = 0.542	w A = 0.044	w A = 0.080
Point B :	Mv B = 1.767	Vm B = 0.566	w B = 0.090	w B = 0.158
Point C :	Mv C = 1.354	Vm C = 0.739	w C = 0.279	w C = 0.378
Point E :	Mv E = 1.338	Vm E = 0.748	w E = 0.303	w E = 0.405
Début d'analyse :	Mv l = 1.346	Vm l = 0.743	w l = 0.286	w l = 0.385
Saturation théorique :	Mv S = 1.338	Vm S = 0.748	w S = 0.368	w S = 0.492

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	36.77	49.19	16.26	29.98
Macroporosité % :	7.86	10.52	9.23	17.01
Microporosité % :	28.91	38.67	7.04	12.97

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	1.37	1.83
Eau intra-agrégats :	19.95	26.69
Capacité à l'air :	6.49	8.69



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 38.86
 Modélisé (point de saturation théorique) : 39.82

PENTES CALCULEES Ko = 0.0000 Kr = 0.8097 Kres = 0.5993

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 100.22
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.561 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.783
 Vm des particules (cm³/g) : 0.371 => inverse : Densité du solide : 2.695

POINTS CARACTERISTIQUES :

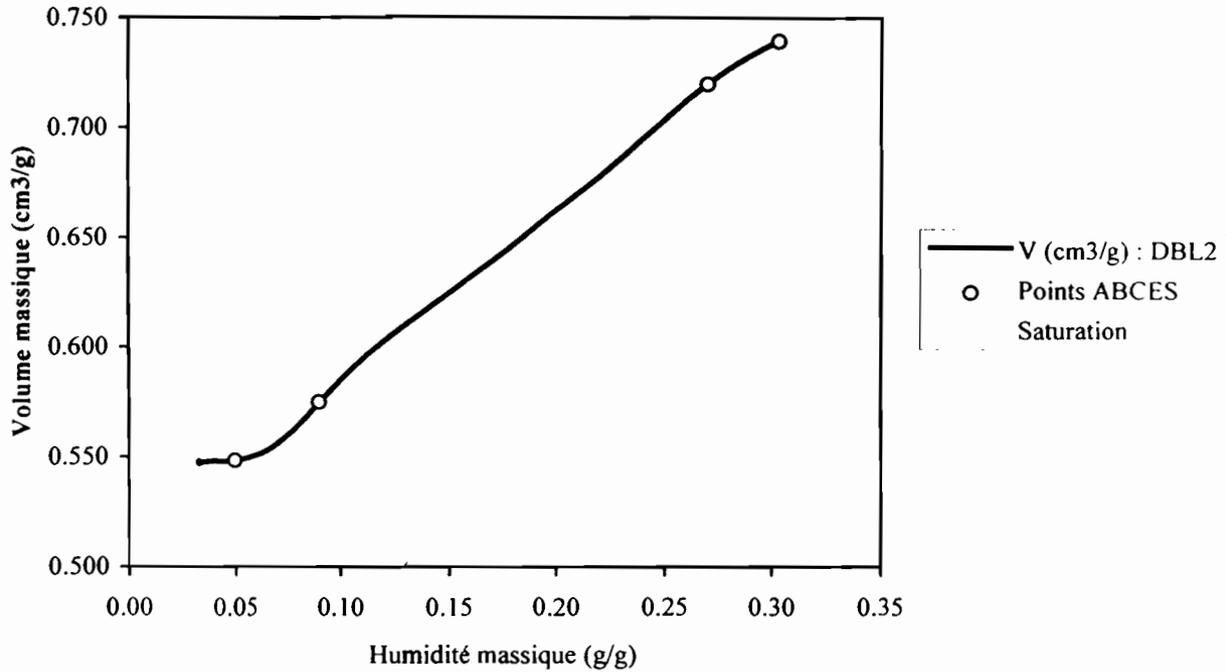
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.777	Vm A = 0.563	w A = 0.041	w A = 0.072
Point B :	Mv B = 1.710	Vm B = 0.585	w B = 0.073	w B = 0.124
Point C :	Mv C = 1.298	Vm C = 0.771	w C = 0.302	w C = 0.392
Point E :	Mv E = 1.275	Vm E = 0.784	w E = 0.343	w E = 0.438
Début d'analyse :	Mv I = 1.284	Vm I = 0.779	w I = 0.338	w I = 0.434
Saturation théorique :	Mv S = 1.275	Vm S = 0.784	w S = 0.413	w S = 0.527

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	41.33	52.69	19.15	34.05
Macroporosité % :	9.40	11.98	13.22	23.51
Microporosité % :	31.94	40.72	5.93	10.54

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.38	3.04
Eau intra-agrégats :	24.66	31.44
Capacité à l'air :	7.01	8.94



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 35.28
 Modélisé (point de saturation théorique) : 44.00

PENTES CALCULEES Ko = 0.4245 Kr = 0.8086 Kres = 0.5527

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 110.37
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.547 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.828
 Vm des particules (cm³/g) : 0.372 => inverse : Densité du solide : 2.691

POINTS CARACTERISTIQUES :

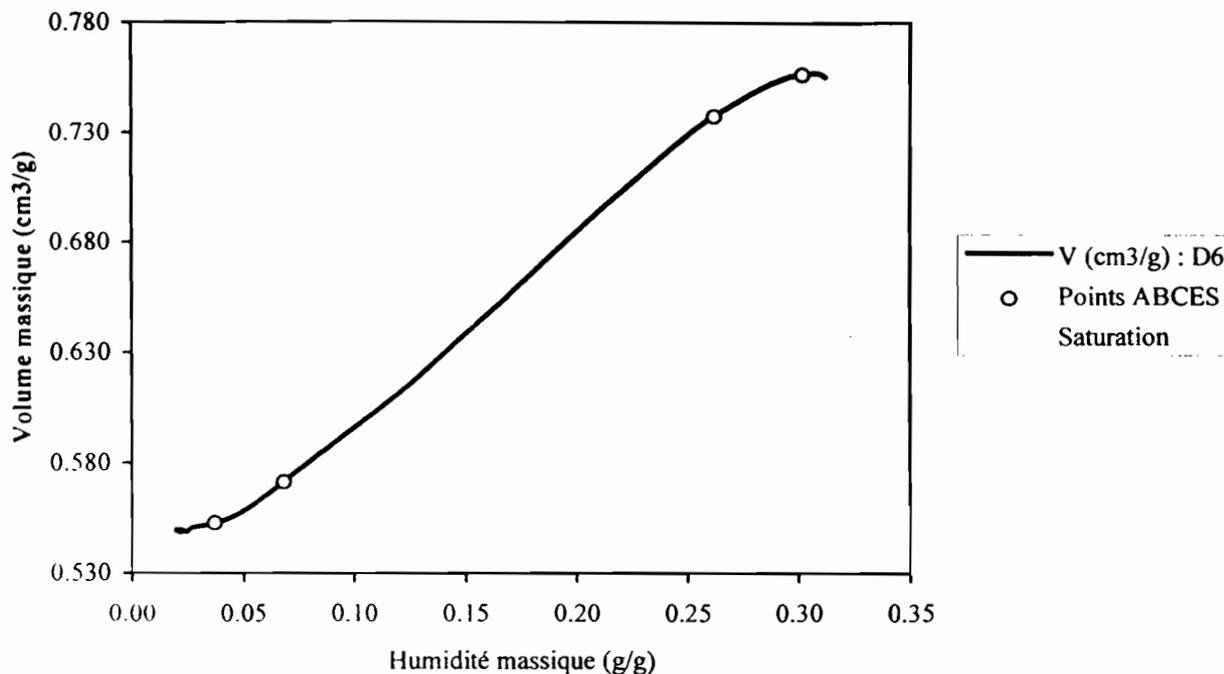
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.824	Vm A = 0.548	w A = 0.050	w A = 0.091
Point B :	Mv B = 1.739	Vm B = 0.575	w B = 0.090	w B = 0.157
Point C :	Mv C = 1.388	Vm C = 0.720	w C = 0.270	w C = 0.375
Point E :	Mv E = 1.352	Vm E = 0.740	w E = 0.303	w E = 0.410
Début d'analyse :	Mv l = 1.351	Vm l = 0.740	w l = 0.304	w l = 0.411
Saturation théorique :	Mv S = 1.270	Vm S = 0.788	w S = 0.416	w S = 0.528

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E		ECHANTILLON SECHE A 105°C	
	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Porosité totale % :	36.81	49.76	17.67	32.22
Macroporosité % :	8.43	11.40	10.35	18.87
Microporosité % :	28.37	38.36	7.32	13.35

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	1.92	2.60
Eau intra-agrégats :	19.37	26.18
Capacité à l'air :	6.51	8.80



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 37.45
 Modélisé (point de saturation théorique) : 41.20

PENTES CALCULEES Ko = 0.2121 Kr = 0.8578 Kres = 0.4020

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 103.33
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.550 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.818
 Vm des particules (cm³/g) : 0.382 => inverse : Densité du solide : 2.620

POINTS CARACTERISTIQUES :

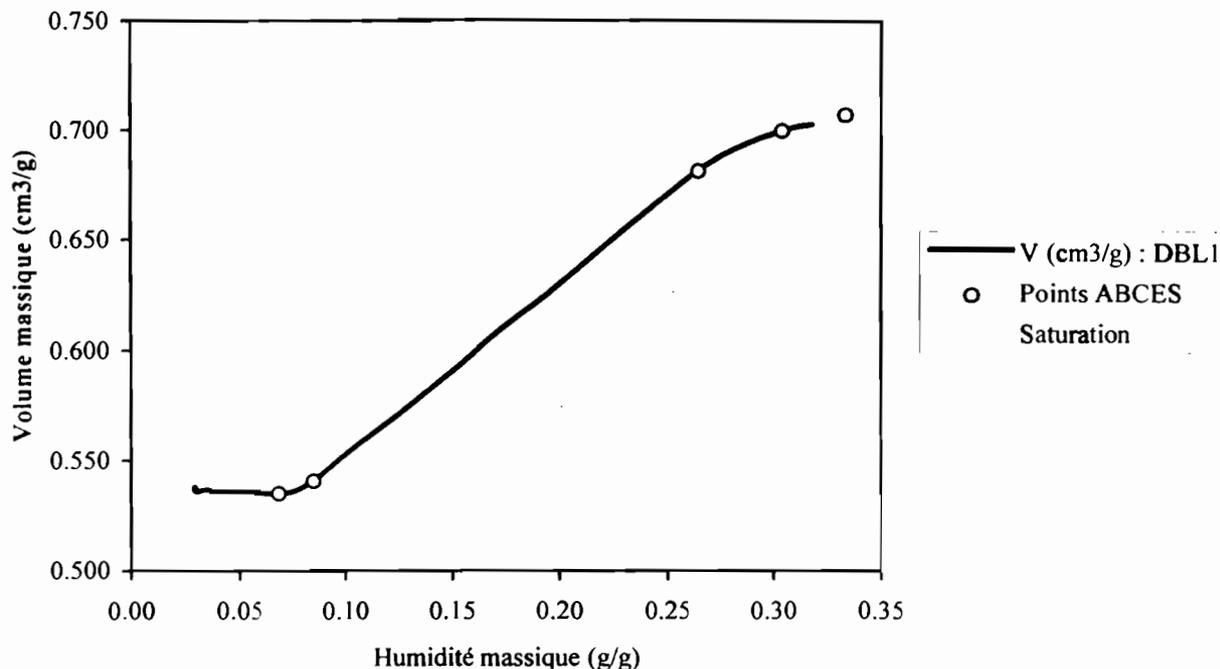
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.809	Vm A = 0.553	w A = 0.037	w A = 0.067
Point B :	Mv B = 1.750	Vm B = 0.571	w B = 0.068	w B = 0.120
Point C :	Mv C = 1.355	Vm C = 0.738	w C = 0.262	w C = 0.356
Point E :	Mv E = 1.321	Vm E = 0.757	w E = 0.302	w E = 0.399
Début d'analyse :	Mv l = 1.323	Vm l = 0.756	w l = 0.312	w l = 0.413
Saturation théorique :	Mv S = 1.288	Vm S = 0.777	w S = 0.395	w S = 0.509

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	37.52	49.57	17.10	30.94
Macroporosité % :	9.63	12.72	11.58	20.96
Microporosité % :	27.90	36.85	5.52	9.98

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	2.31	3.05
Eau intra-agrégats :	21.06	27.82
Capacité à l'air :	7.32	9.67



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 31.16
 Modélisé (point de saturation théorique) : 31.92

PENTES CALCULEES Ko = 0.2467 Kr = 0.7814 Kres = 0.0457

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 109.66
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.536 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.866
 Vm des particules (cm³/g) : 0.374 => inverse : Densité du solide : 2.677

POINTS CARACTERISTIQUES :

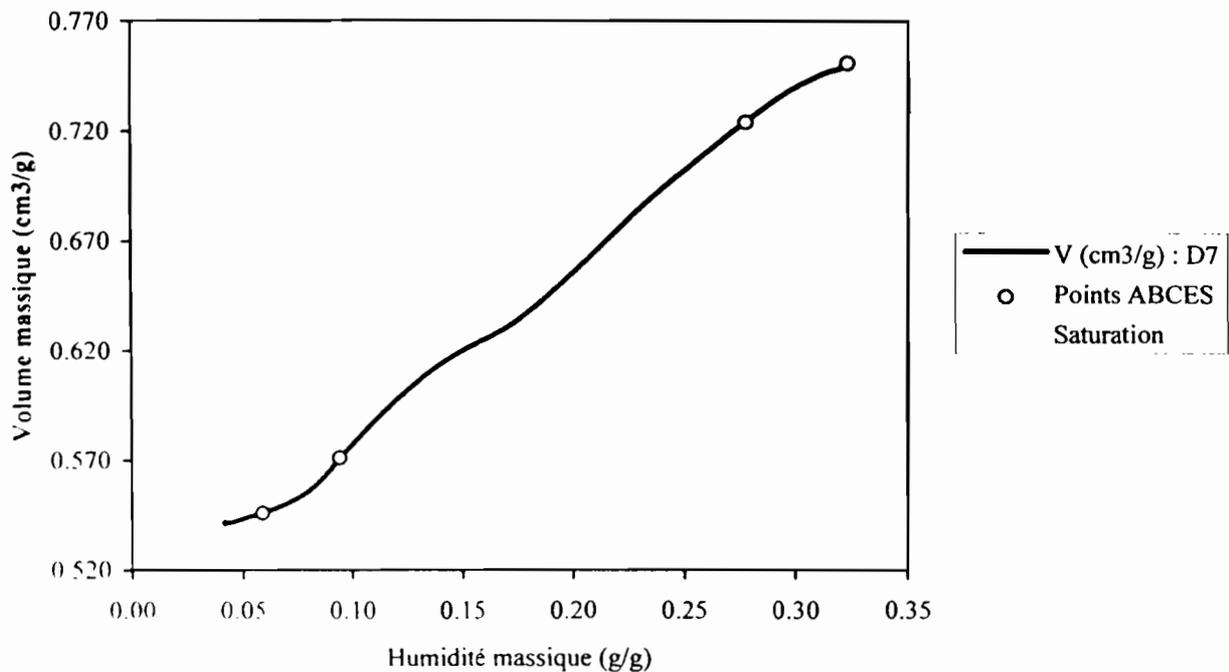
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.870	Vm A = 0.535	w A = 0.069	w A = 0.128
Point B :	Mv B = 1.850	Vm B = 0.541	w B = 0.085	w B = 0.157
Point C :	Mv C = 1.467	Vm C = 0.681	w C = 0.265	w C = 0.389
Point E :	Mv E = 1.429	Vm E = 0.700	w E = 0.305	w E = 0.435
Début d'analyse :	Mv I = 1.422	Vm I = 0.703	w I = 0.318	w I = 0.453
Saturation théorique :	Mv S = 1.414	Vm S = 0.707	w S = 0.334	w S = 0.472

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E		ECHANTILLON SECHE A 105°C	
	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Porosité totale % :	32.64	46.63	16.13	30.16
Macroporosité % :	4.47	6.39	8.31	15.54
Microporosité % :	28.17	40.24	7.82	14.62

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.29	3.27
Eau intra-agrégats :	19.67	28.10
Capacité à l'air :	2.19	3.12



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 38.63
 Modélisé (point de saturation théorique) : 45.96

PENTES CALCULEES Ko = 0.4305 Kr = 0.8357 Kres = 0.6207

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 109.59
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.541 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.848
 Vm des particules (cm³/g) : 0.378 => inverse : Densité du solide : 2.646

POINTS CARACTERISTIQUES :

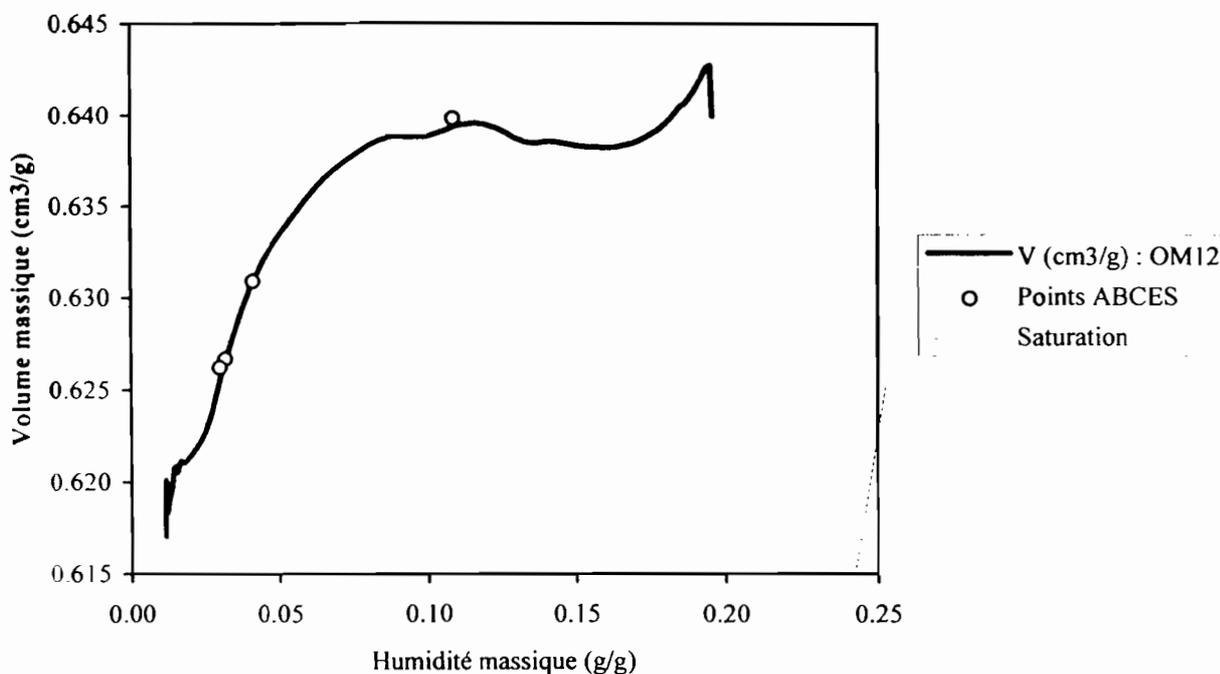
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.832	Vm A = 0.546	w A = 0.059	w A = 0.108
Point B :	Mv B = 1.751	Vm B = 0.571	w B = 0.094	w B = 0.165
Point C :	Mv C = 1.381	Vm C = 0.724	w C = 0.278	w C = 0.383
Point E :	Mv E = 1.331	Vm E = 0.751	w E = 0.323	w E = 0.429
Début d'analyse :	Mv I = 1.333	Vm I = 0.750	w I = 0.321	w I = 0.428
Saturation théorique :	Mv S = 1.266	Vm S = 0.790	w S = 0.412	w S = 0.521

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec	
Porosité totale % :	37.34	49.70	16.81	30.78
Macroporosité % :	7.69	10.23	8.85	16.21
Microporosité % :	29.65	39.46	7.95	14.57

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.62	3.48
Eau intra-agrégats :	20.22	26.91
Capacité à l'air :	5.07	6.75



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 3.56
 Modélisé (point de saturation théorique) : 3.53

PENTES CALCULEES Ko = 0.0000 Kr = 0.4146 Kres = 0.4627

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 130.16
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.618 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.618
 Vm des particules (cm³/g) : 0.373 => inverse : Densité du solide : 2.683

POINTS CARACTERISTIQUES :

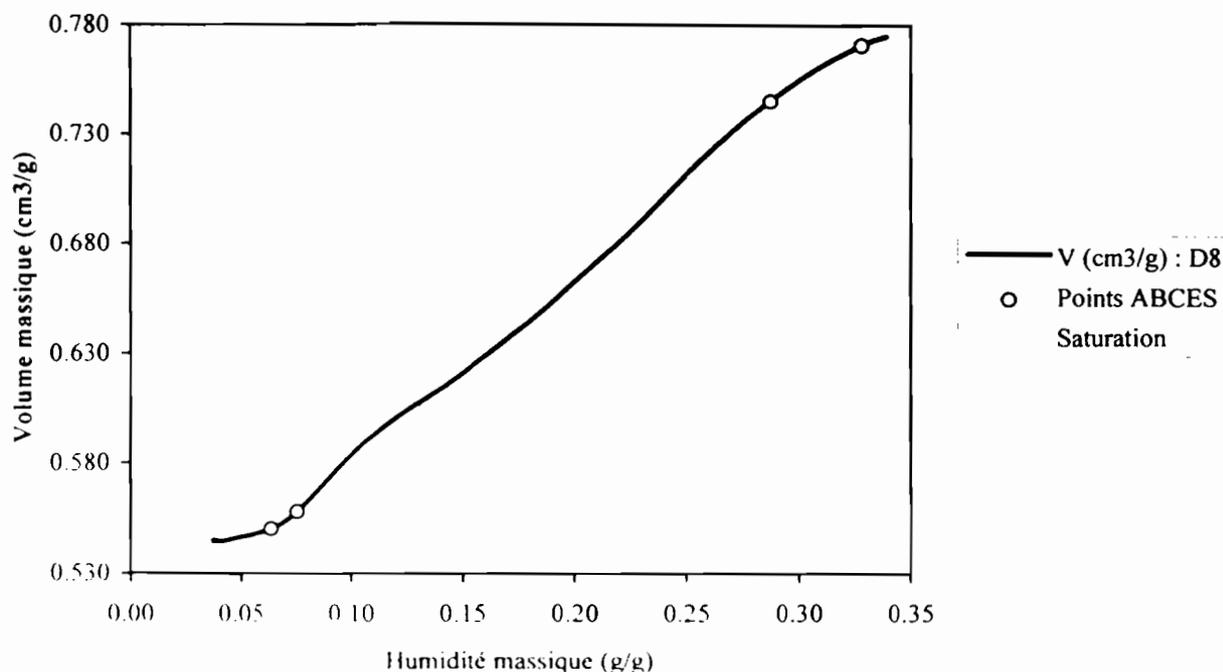
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.596	Vm A = 0.627	w A = 0.031	w A = 0.050
Point B :	Mv B = 1.585	Vm B = 0.631	w B = 0.041	w B = 0.065
Point C :	Mv C = 1.597	Vm C = 0.626	w C = 0.030	w C = 0.047
Point E :	Mv E = 1.563	Vm E = 0.640	w E = 0.108	w E = 0.169
Début d'analyse :	Mv I = 1.563	Vm I = 0.640	w I = 0.196	w I = 0.306
Saturation théorique :	Mv S = 1.563	Vm S = 0.640	w S = 0.267	w S = 0.417

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Porosité totale % :	26.71	41.75	25.40	40.53
Macroporosité % :	20.47	32.00	21.71	34.64
Microporosité % :	6.24	9.75	3.69	5.89

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	4.56	7.13
Eau intra-agrégats :	2.15	3.36
Capacité à l'air :	15.91	24.86



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 42.20
 Modélisé (point de saturation théorique) : 50.42

PENTES CALCULEES Ko = 0.4474 Kr = 0.8859 Kres = 0.4763

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 98.26
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.545 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.835
 Vm des particules (cm3/g) : 0.383 => inverse : Densité du solide : 2.612

POINTS CARACTERISTIQUES :

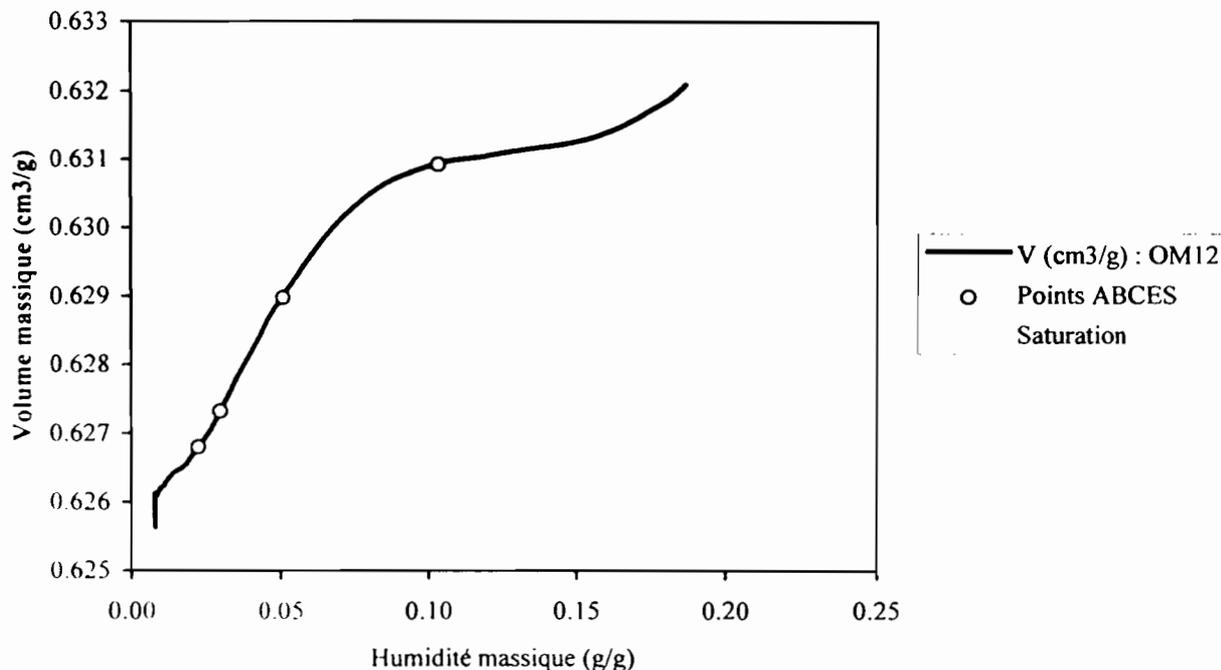
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.817	Vm A = 0.550	w A = 0.064	w A = 0.116
Point B :	Mv B = 1.792	Vm B = 0.558	w B = 0.076	w B = 0.136
Point C :	Mv C = 1.341	Vm C = 0.746	w C = 0.288	w C = 0.386
Point E :	Mv E = 1.297	Vm E = 0.771	w E = 0.328	w E = 0.425
Début d'analyse :	Mv I = 1.290	Vm I = 0.775	w I = 0.339	w I = 0.437
Saturation théorique :	Mv S = 1.220	Vm S = 0.820	w S = 0.437	w S = 0.533

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm3 100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm3/100cm3 de sol sec)	
Porosité totale % :	38.81	50.34	16.74	30.42
Macroporosité % :	8.36	10.85	9.66	17.56
Microporosité % :	30.44	39.49	7.08	12.87

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3 100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.33	3.02
Eau intra-agrégats :	22.87	29.66
Capacité à l'air :	6.04	7.83



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Experimental (début d'analyse) : 0.97
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.00

PENTES CALCULEES Ko = 0.0084 Kr = 0.0771 Kres = 0.0666

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 131.62
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.597
 Vm des particules (cm³/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.700

POINTS CARACTERISTIQUES :

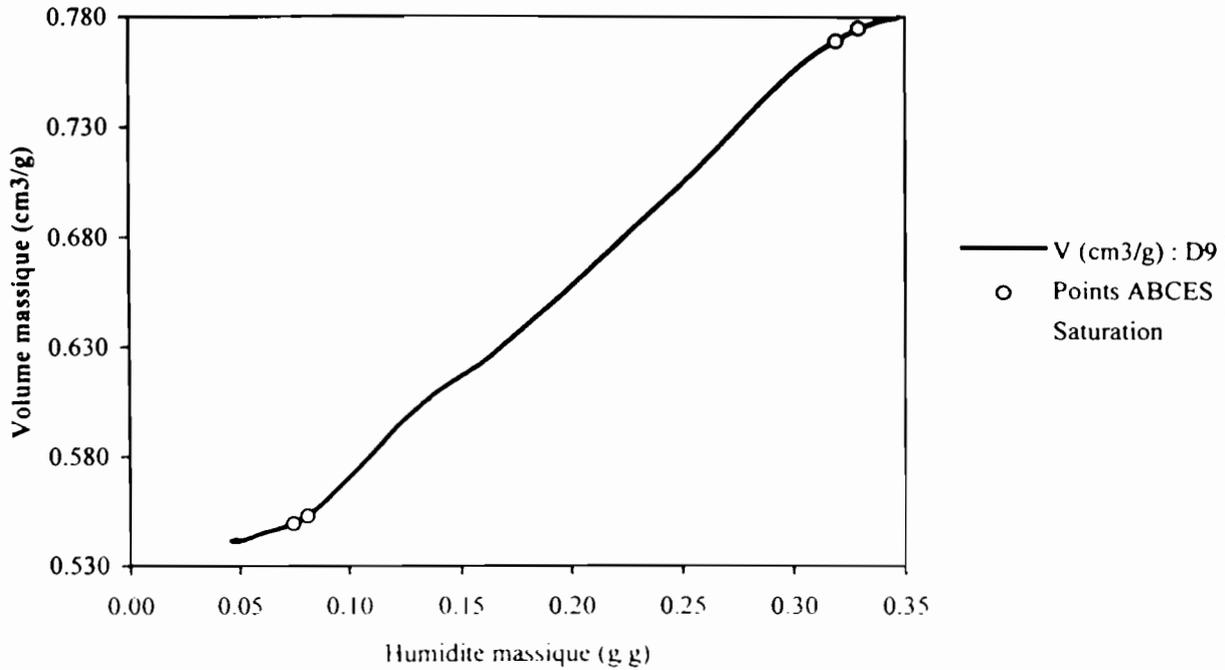
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.595	Vm A = 0.627	w A = 0.022	w A = 0.035
Point B :	Mv B = 1.594	Vm B = 0.627	w B = 0.030	w B = 0.047
Point C :	Mv C = 1.590	Vm C = 0.629	w C = 0.051	w C = 0.081
Point E :	Mv E = 1.585	Vm E = 0.631	w E = 0.103	w E = 0.164
Début d'analyse :	Mv l = 1.582	Vm l = 0.632	w l = 0.187	w l = 0.295
Saturation théorique :	Mv S = 1.582	Vm S = 0.632	w S = 0.262	w S = 0.414

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	26.06	41.30	25.64	40.91
Macroporosité % :	18.76	29.74	23.00	36.69
Microporosité % :	7.29	11.56	2.65	4.22

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	3.05	4.84
Eau intra-agrégats :	4.34	6.88
Capacité à l'air :	15.71	24.90



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 44.18
 Modélisé (point de saturation théorique) : 48.87

PENTES CALCULEES Ko = 0.3237 Kr 0.9101 Kres = 0.3127

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 108.87
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.541 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.848
 Vm des particules (cm3/g) : 0.382 => inverse : Densité du solide : 2.615

POINTS CARACTERISTIQUES :

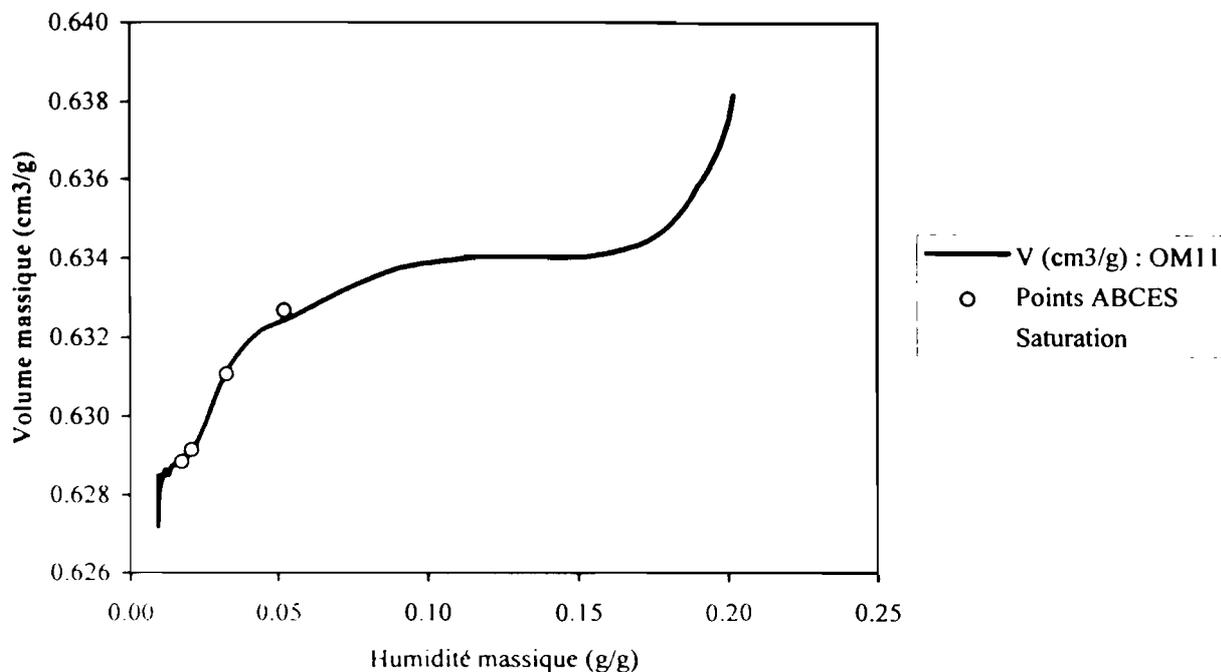
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.820	Vm A = 0.549	w A = 0.075	w A = 0.136
Point B :	Mv B = 1.809	Vm B = 0.553	w B = 0.081	w B = 0.147
Point C :	Mv C = 1.300	Vm C = 0.769	w C = 0.319	w C = 0.414
Point E :	Mv E = 1.291	Vm E = 0.775	w E = 0.329	w E = 0.424
Début d'analyse :	Mv I = 1.282	Vm I = 0.780	w I = 0.347	w I = 0.445
Saturation théorique :	Mv S = 1.242	Vm S = 0.805	w S = 0.423	w S = 0.525

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E		ECHANTILLON SECHE A 105°C	
	(cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)	(cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Porosité totale % :	39.24	50.65	16.69	30.39
Macroporosité % :	6.96	8.99	8.86	16.12
Microporosité % :	32.28	41.66	7.84	14.27

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3/100g de sol sec)	(cm3/100cm3 de sol sec)
Eau inter-agrégats :	0.58	0.75
Eau intra-agrégats :	24.18	31.20
Capacité à l'air :	6.38	8.23



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 1.62
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.43

PENTES CALCULEES Ko = 0.0207 Kr = 0.1667 Kres = 0.0396

PARAMETRES MESURES :

Masse de neoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 106.60
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.628 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.592
 Vm des particules (cm³/g) : 0.377 => inverse : Densité du solide : 2.656

POINTS CARACTERISTIQUES :

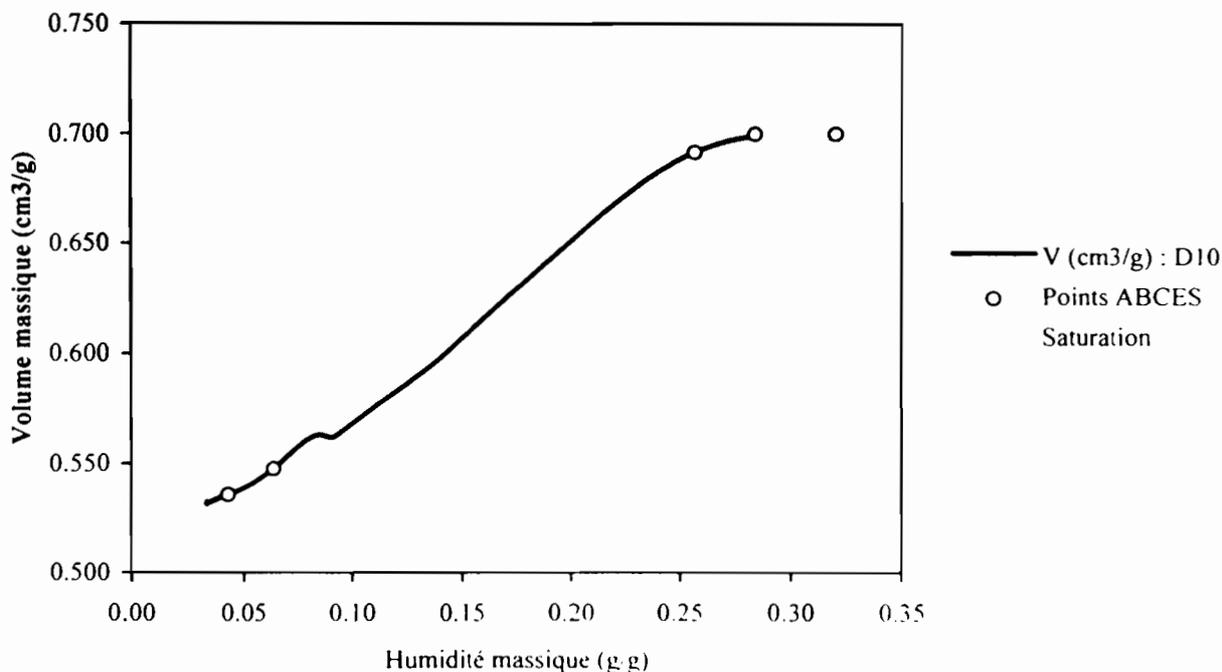
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.590	Vm A = 0.629	w A = 0.017	w A = 0.028
Point B :	Mv B = 1.589	Vm B = 0.629	w B = 0.021	w B = 0.033
Point C :	Mv C = 1.585	Vm C = 0.631	w C = 0.032	w C = 0.051
Point E :	Mv E = 1.581	Vm E = 0.633	w E = 0.052	w E = 0.082
Début d'analyse :	Mv I = 1.567	Vm I = 0.638	w I = 0.202	w I = 0.317
Saturation théorique :	Mv S = 1.570	Vm S = 0.637	w S = 0.260	w S = 0.409

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	25.62	40.49	25.23	40.13
Macroporosité % :	21.58	34.10	23.31	37.07
Microporosité % :	4.04	6.39	1.92	3.06

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100g de sol sec)
Eau inter-agrégats :	1.15	1.82
Eau intra-agrégats :	1.98	3.13
Capacité à l'air :	20.43	32.28



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 31.39
 Modélisé (point de saturation théorique) : 31.58

PENTES CALCULEES Ko = 0.0000 Kr = 0.7461 Kres = 0.4076

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 128.33
 Vm apparent sec (cm3/g) : 0.532 => inverse : Masse volumique sec (g/cm3) : 1.880
 Vm des particules (cm3/g) : 0.380 => inverse : Densité du solide : 2.632

POINTS CARACTERISTIQUES :

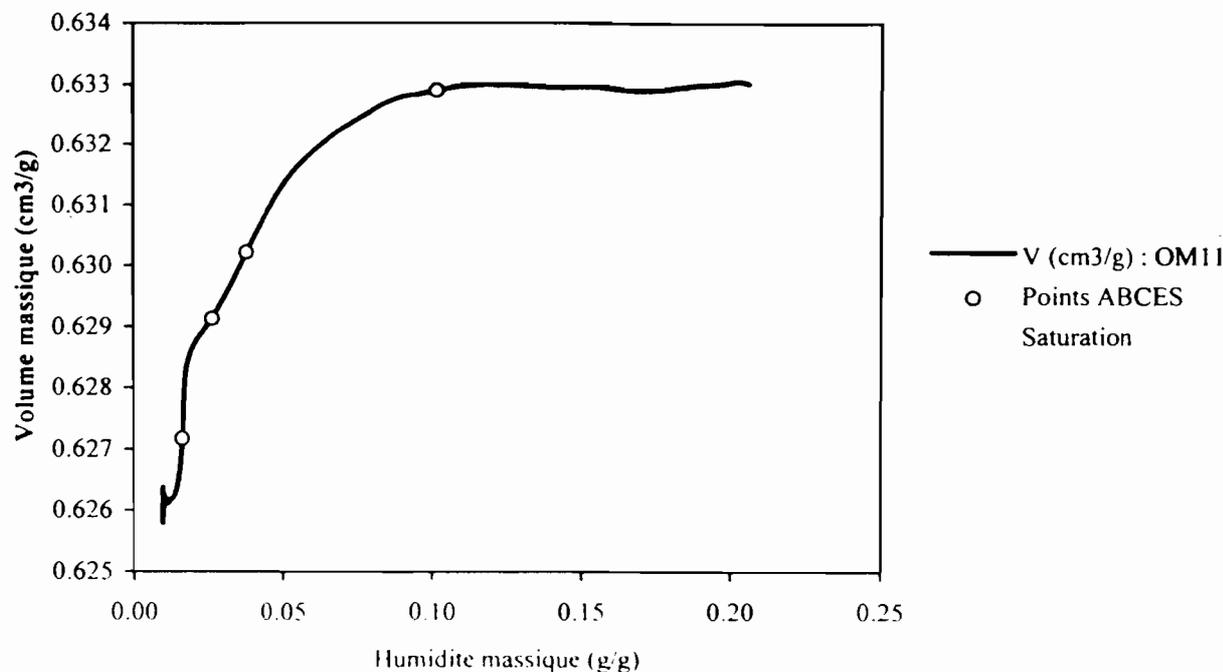
	Masse volumique (g de sol sec/cm3)	Volume massique (cm3/g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm3/cm3 de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.866	Vm A = 0.536	w A = 0.043	w A = 0.080
Point B :	Mv B = 1.826	Vm B = 0.548	w B = 0.064	w B = 0.117
Point C :	Mv C = 1.446	Vm C = 0.692	w C = 0.257	w C = 0.372
Point E :	Mv E = 1.429	Vm E = 0.700	w E = 0.284	w E = 0.406
Début d'analyse :	Mv I = 1.431	Vm I = 0.699	w I = 0.283	w I = 0.406
Saturation théorique :	Mv S = 1.429	Vm S = 0.700	w S = 0.320	w S = 0.457

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)	
Porosité totale % :	32.01	45.73	15.59	29.09
Macroporosité % :	5.15	7.36	10.06	18.78
Microporosité % :	26.86	38.37	5.52	10.31

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm3/100g de sol sec)(cm3/100cm3 de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.56	2.23
Eau intra-agrégats :	20.44	29.20
Capacité à l'air :	3.59	5.13



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 1.12
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.19

PENTES CALCULEES Ko = 0.0036 Kr = 0.0950 Kres = 0.2688

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 107.14
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.626 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.597
 Vm des particules (cm³/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.700

POINTS CARACTERISTIQUES :

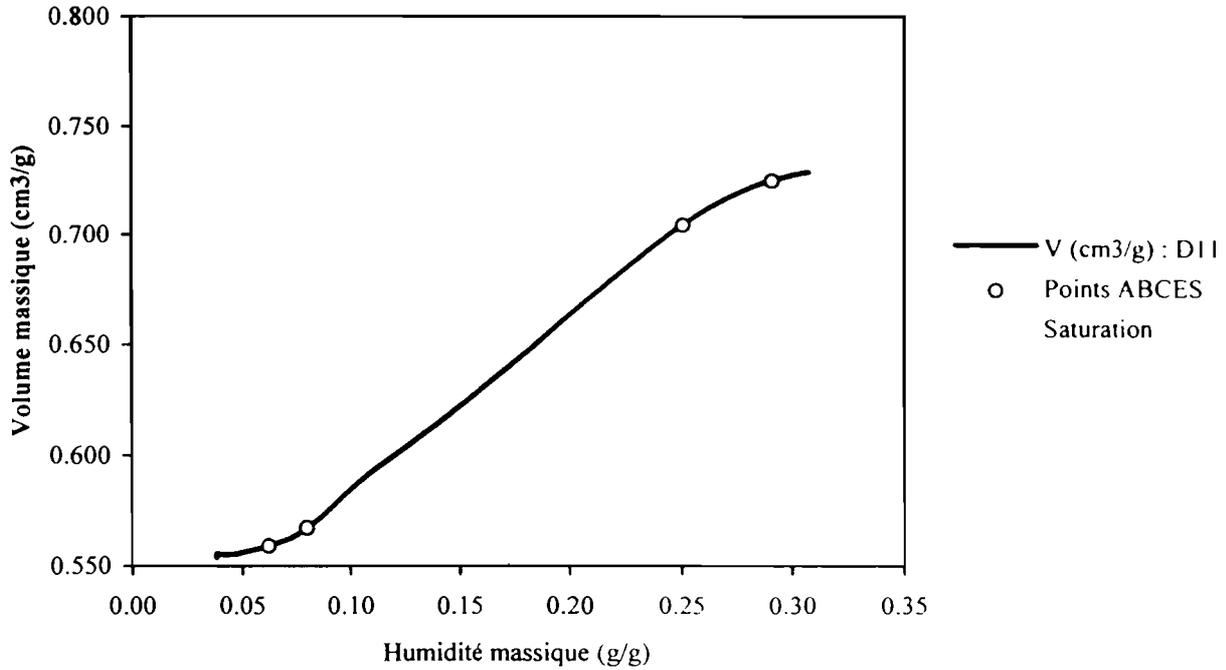
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.594	Vm A = 0.627	w A = 0.016	w A = 0.026
Point B :	Mv B = 1.589	Vm B = 0.629	w B = 0.026	w B = 0.042
Point C :	Mv C = 1.587	Vm C = 0.630	w C = 0.038	w C = 0.060
Point E :	Mv E = 1.580	Vm E = 0.633	w E = 0.102	w E = 0.161
Début d'analyse :	Mv I = 1.580	Vm I = 0.633	w I = 0.206	w I = 0.325
Saturation théorique :	Mv S = 1.579	Vm S = 0.633	w S = 0.263	w S = 0.415

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	26.25	41.48	25.68	40.95
Macroporosité % :	19.80	31.29	23.47	37.42
Microporosité % :	6.45	10.19	2.21	3.53

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	3.71	5.87
Eau intra-agrégats :	3.82	6.03
Capacité à l'air :	16.09	25.42



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Experimental (début d'analyse) : 31.35
 Modélisé (point de saturation théorique) : 34.57

PENTES CALCULEES Ko = 0.2838 Kr = 0.8067 Kres = 0.2195

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 122.32
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.555 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.802
 Vm des particules (cm³/g) : 0.379 => inverse : Densité du solide : 2.638

POINTS CARACTERISTIQUES :

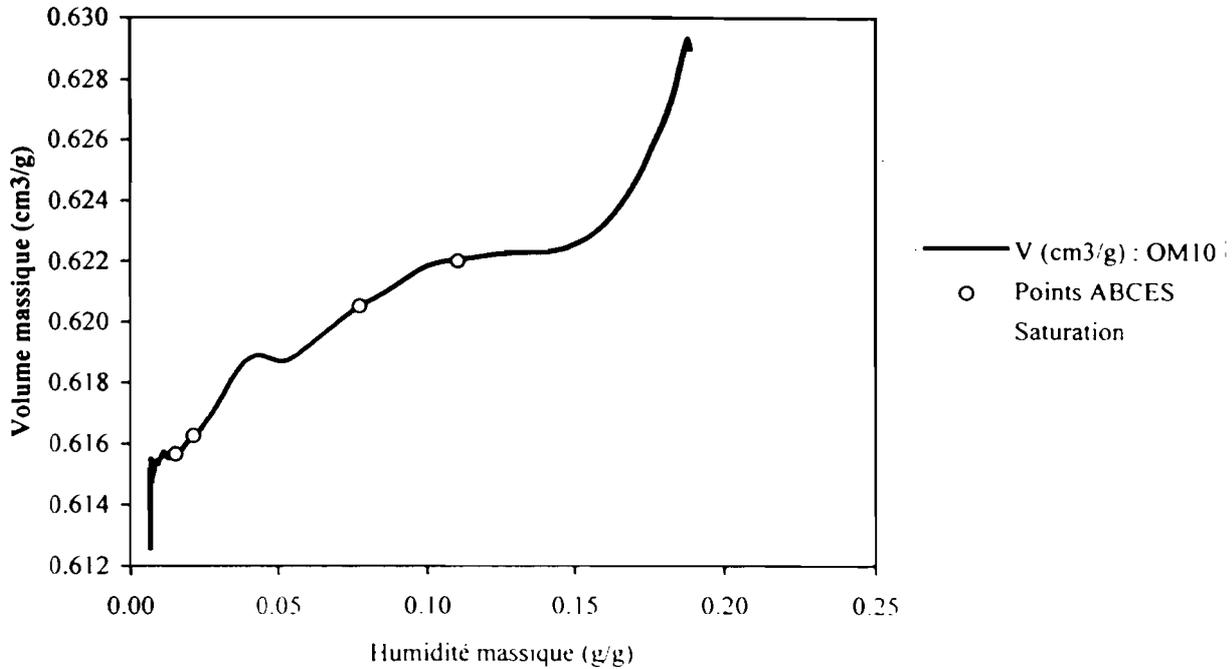
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.789	Vm A = 0.559	w A = 0.062	w A = 0.112
Point B :	Mv B = 1.763	Vm B = 0.567	w B = 0.080	w B = 0.141
Point C :	Mv C = 1.419	Vm C = 0.705	w C = 0.250	w C = 0.355
Point E :	Mv E = 1.379	Vm E = 0.725	w E = 0.291	w E = 0.401
Début d'analyse :	Mv l = 1.372	Vm l = 0.729	w l = 0.307	w l = 0.421
Saturation théorique :	Mv S = 1.339	Vm S = 0.747	w S = 0.368	w S = 0.492

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	34.59	47.72	17.99	32.19
Macroporosité % :	7.87	10.85	10.74	19.21
Microporosité % :	26.72	36.86	7.25	12.98

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	(cm ³ /100cm ³ de sol sec)
Eau inter-agrégats :	2.36	3.25
Eau intra-agrégats :	18.74	25.85
Capacité à l'air :	5.51	7.60



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 2.28
 Modélisé (point de saturation théorique) : 1.68

PENTES CALCULEES Ko = 0.0230 Kr = 0.0756 Kres 0.1190

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 130.24
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.615 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.626
 Vm des particules (cm³/g) : 0.370 => inverse : Densité du solide : 2.701

POINTS CARACTERISTIQUES :

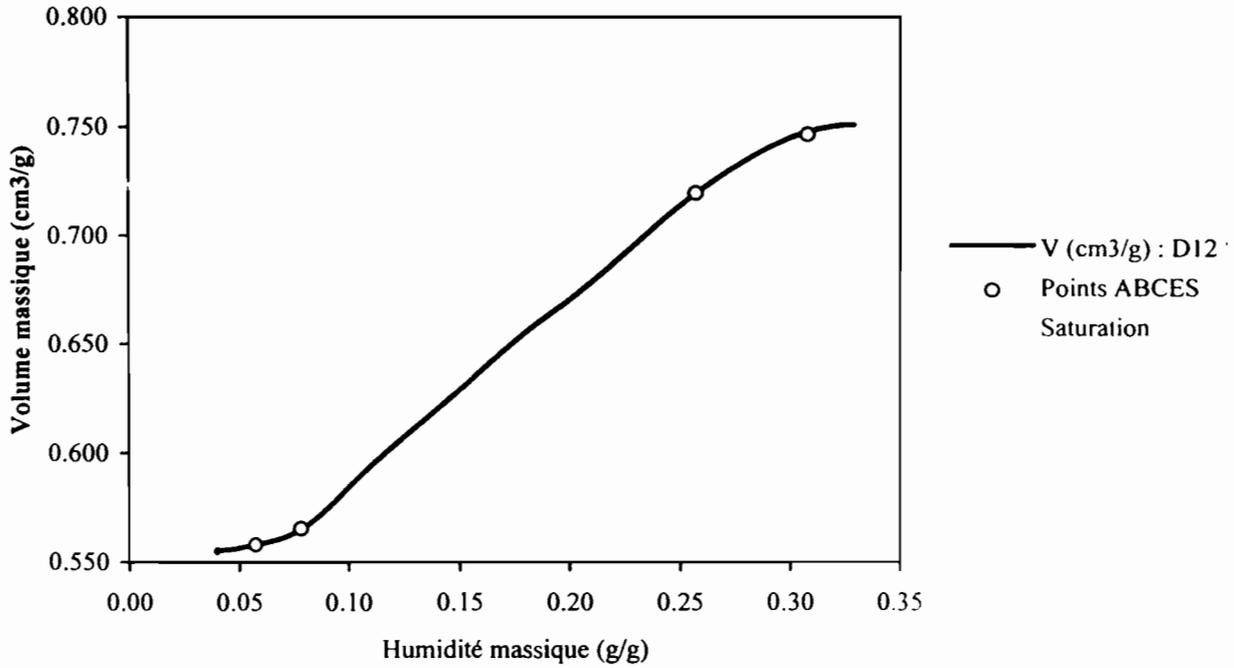
	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.624	Vm A = 0.616	w A = 0.015	w A 0.025
Point B :	Mv B = 1.623	Vm B = 0.616	w B = 0.021	w B 0.034
Point C :	Mv C = 1.612	Vm C = 0.621	w C = 0.077	w C 0.125
Point E :	Mv E = 1.608	Vm E = 0.622	w E = 0.110	w E 0.177
Début d'analyse :	Mv I = 1.590	Vm I = 0.629	w I = 0.189	w I 0.300
Saturation théorique :	Mv S = 1.599	Vm S = 0.625	w S = 0.255	w S 0.408

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)	
Porosité totale % :	25.18	40.48	24.54	39.86
Macroporosité % :	16.06	25.82	22.68	36.84
Microporosité % :	9.12	14.66	1.86	3.02

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	1.92	3.09
Eau intra-agrégats :	7.01	11.27
Capacité à l'air :	14.14	22.73



RETRAIT GLOBAL EN % DE L'ECHANTILLON SEC 10: Expérimental (début d'analyse) : 35.32
 Modélisé (point de saturation théorique) : 38.75

PENTES CALCULEES Ko = 0.2979 Kr = 0.8617 Kres = 0.0000

PARAMETRES MESURES :

Masse de néoprène (g) : 0.00
 Masse échantillon sec (g) : 100.92
 Vm apparent sec (cm³/g) : 0.555 => inverse : Masse volumique sec (g/cm³) : 1.802
 Vm des particules (cm³/g) : 0.384 => inverse : Densité du solide : 2.607

POINTS CARACTERISTIQUES :

	Masse volumique (g de sol sec/cm ³)	Volume massique (cm ³ /g de sol sec)	Humidité massique (g/g de sol sec)	Humidité volumique (cm ³ /cm ³ de sol sec)
Point A :	Mv A = 1.792	Vm A = 0.558	w A = 0.058	w A = 0.103
Point B :	Mv B = 1.768	Vm B = 0.566	w B = 0.078	w B = 0.139
Point C :	Mv C = 1.390	Vm C = 0.720	w C = 0.257	w C = 0.357
Point E :	Mv E = 1.339	Vm E = 0.747	w E = 0.308	w E = 0.412
Début d'analyse :	Mv I = 1.332	Vm I = 0.751	w I = 0.328	w I = 0.437
Saturation théorique :	Mv S = 1.299	Vm S = 0.770	w S = 0.386	w S = 0.502

POROSITE DE L'ECHANTILLON :

	AU POINT E (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec		ECHANTILLON SECHE A 105°C (cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec	
Porosité totale % :	36.30	48.62	17.44	31.26
Macroporosité % :	8.47	11.34	10.48	18.77
Microporosité % :	27.84	37.28	6.97	12.48

RESERVES EN EAU DE LA FRACTION ARGILLEUSE :

	(cm ³ /100g de sol sec)(cm ³ /100cm ³ de sol sec)	
Eau inter-agrégats :	2.93	3.93
Eau intra-agrégats :	20.00	26.78
Capacité à l'air :	5.53	7.41