

Université Cheikh Anta Diop de Dakar

**ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES**

Département du Génie Civil

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

GC.0124

## PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre

**ETUDE DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES  
DES SOLS DE THYSSE KAYMOR PAR LA  
METHODE DE L'INFILTROMETRE TRIMS**

Auteur : Nogaye SAVARE:

Directeur interne : Babacar N'DIAYE

Directeur externe : Michel ESTEVES (I. R. D)

Juin 1999

## DEDICACES

Par la grâce de Dieu le tout puissant  
et de son illustre Prophète Mouhamed (PSL),  
A ma regrettée cousine et amie, Ndèye Fatou SAMB  
Que Dieu l'accueille dans son Paradis  
A mes très chers parents,  
A mes frères et sœurs,  
A tous ceux qui me sont chers.

« Vous êtes arrivés à cette conclusion par voie scientifique ou par expérience ? »

Tchekov

## REMERCIEMENTS

Je tiens, à travers ces quelques lignes, à remercier de vive voix Messieurs Babacar N'DIAYE, directeur interne, et Michel ESTEVES directeur externe de ce projet, pour leur disponibilité et leur collaboration.

Ces remerciements s'adressent aussi à certaines personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour contribuer à l'aboutissement de ce projet, parmi lesquelles :

- Mr Jean Marc LAPETITE (I. R. D. ex ORSTOM) pour son hospitalité et pour m'avoir permis d'occuper son bureau et d'utiliser son ordinateur pour la réalisation de l'essentiel de ce travail,
- Mr Kokou ABOTSI (I. R. D. ex ORSTOM) pour sa gentillesse et son hospitalité,
- Mr Papa Moussa DIOP (élève ingénieur) pour avoir mis à ma disposition son ordinateur personnel.

Je remercie également et très sincèrement l'ensemble des professeurs de l'Ecole Polytechnique de Thiès, pour la bonne formation qu'ils m'ont dispensée.

Qu'ils trouvent à travers ces mots l'expression de toute ma gratitude.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
TABLE DES MATIERES	II
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	VI
INTRODUCTION	1
Chapitre1 : <b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>2</b>
<b>1.1 PLAN DE SITUATION DU SITE EXPERIMENTAL</b>	<b>2</b>
<b>1.2 LA PARCELLE EXPERIMENTALE</b>	<b>4</b>
1.2.1 Description et définition	4
1.2.2 Représentativité de la parcelle expérimentale	4
<b>1.3 LE SIMULATEUR DE PLUIE</b>	<b>5</b>
1.3.1 Historique	5
1.3.2 Pertinence de la technique de simulation de pluie	6
1.3.3 Description	6
1.3.4 Représentativité des pluies simulées	6
<b>1.4 LA METHODE DE L'INFILTROMETRE TRIMS</b>	<b>9</b>
1.4.1 Objectifs	9
1.4.2 Historique	9
1.4.3 Méthodologie	10
1.4.4 Hypothèses de calcul	11
1.4.5 Description de l'appareil TRIMS	11
<b>1.5 VARIABLES ET EQUATIONS DE BASE</b>	<b>14</b>

<b>1.5</b>	<b>VARIABLES ET EQUATIONS DE BASE</b>	<b>14</b>
1.5.1	Equation de transfert	15
1.5.2	La solution de Philip	16
1.5.3	La méthode Mono – Test utilisant le régime permanent	17
<b>1.6</b>	<b>EVOLUTION ATTENDUE DES ETATS DE SURFACE DU SOL</b>	<b>18</b>
1.6.1	Les principaux mécanismes	19
1.6.2	Les types de croûtes de surface	19
<b>1.7</b>	<b>QUELQUES TRAVAUX DEJA EFFECTUES SUR LE SUJET</b>	<b>20</b>
 <b>Chapitre 2 : ETUDE EXPERIMENTALE IN SITU</b>		 <b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>MATERIEL DE MESURE</b>	<b>22</b>
2.1.1	Aménagement du site expérimental	22
2.1.2	Matériel utilisé	22
<b>2.2</b>	<b>DEROULEMENT DES ESSAIS</b>	<b>24</b>
2.2.1	Le simulateur de pluie	24
2.2.2	Les cylindres d'écoulement	24
2.2.3	Le sable de contact	25
2.2.4	L'essai TRIMS	26
 <b>Chapitre 3 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS</b>		 <b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>LES ETATS DE SURFACE</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>CALCUL DE LA PERMEABILITE AVEC LA LOI DE DARCY</b>	<b>31</b>
3.2.1	Le calcul des flux permanents	31
3.2.2	Calcul des perméabilités	34

<b>3.3</b>	<b>CALCUL DE LA PERMEABILITE AVEC LA METHODE MONO – TEST UTILISANT LE REGIME PERMANENT</b>	<b>43</b>
<b>3.4</b>	<b>ETUDE COMPARATIVE DES DEUX METHODES</b>	<b>47</b>
	<b>CONCLUSION</b>	<b>48</b>
	Références Bibliographiques	
	Annexes	

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Cumuls des pluies

Tableau 3.1 : flux permanents en mm / h pour chaque essai et pour chaque parcelle

Tableau 3.2 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm / h), parcelles A

Tableau 3.2.1 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm / h) positives, parcelles A

Tableau 3.3 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm / h), parcelles B

Tableau 3.3.1 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm / h) positives, parcelles B

Tableau 3.4 : Tableau récapitulatif des valeurs extrêmes de K (mm / h), parcelles A

Tableau 3.5 : Tableau récapitulatif valeurs extrêmes de K (mm / h), parcelles B

Tableau 3.6 : Les valeurs de sorptivité,  $S$  (mm / s<sup>1/2</sup>), parcelles A

Tableau 3.7 : Les valeurs de sorptivité,  $S$  (mm / s<sup>1/2</sup>), parcelles B

Tableau 3.8 : Les valeurs extrêmes de K calculées suivant la méthode mono-test , parcelles A

Tableau 3.9 : Les valeurs extrêmes de K calculées suivant la méthode mono-test, parcelles B

Tableau 3.10 : Tableau comparatif des K obtenues avec les deux méthodes

## LISTE DES FIGURES

**Figure 1 1** : Plan de situation du site expérimental

**Figure 1 2** : La parcelle expérimentale

**Figure 1 3** : Schéma du mini – simulateur de pluie

**Figure 1 4** : L'infiltromètre TRIMS

**Figure 1 5** : Schéma de montage des tensiomètres

**Figure 2.1** : Représentation schématique de l'aménagement du site

**Figure 2.2** : Installation des cylindres d'écoulement

**Figure 2.3** : Mise en place du sable de contact

✓ **Figure 2.4** : Installation des tensiomètre

**Figure 3.1** : Flux permanents en fonction de la lame d'eau précipitée– Parcelles A

**Figure 3.2** : Flux permanents en fonction de la lame d'eau précipitée– Parcelles B

**Figure 3.3** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche supérieure parcelles A

**Figure 3.4** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche intermédiaire Parcelles A

**Figure 3.5** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche inférieure Parcelles A

**Figure 3.6** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche entre surface du sol et T<sub>3</sub> Parcelles A

**Figure 3.7** : Evolution de la perméabilité en fonction du nombre de pluies - tranche entre T<sub>1</sub> et T<sub>3</sub> Parcelles A

**Figure 3.8** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche supérieure Parcelles B

**Figure 3.9** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche intermédiaire Parcelles B

**Figure 3.10** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche inférieure Parcelles B

**Figure 3.11** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche entre surface du sol et T<sub>3</sub> Parcelles B

**Figure 3.12** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - tranche entre T<sub>1</sub> et T<sub>3</sub> Parcelles B

**Figure 3.13** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - parcelles A – méthode mono – test

**Figure 3.4** : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée - parcelles B – méthode mono - test

# INTRODUCTION

Dans un contexte général de rareté des sols de culture, de plus en plus affectés à la construction d'habitats, il est nécessaire de connaître, à défaut de pouvoir maîtriser, les propriétés des sols et leur interaction avec le milieu extérieur (pluie, vent...). C'est ainsi que des chercheurs se sont intéressés aux états de surface des sols, à leurs propriétés hydrodynamiques ainsi qu'à l'interaction des deux. Nous pouvons citer en exemple les travaux de A. CASENAVE et C. VALENTIN (1989) sur les sols en zone sahélienne, de P. PEREZ sur les sols cultivés du Sud – Saloum (1994), et de J. P. VANDERVAERE (1995) sur la caractérisation hydrodynamique du sol in situ.

Ainsi dans un souci de contribuer à faire progresser les connaissances dans ce domaine, ce projet de fin d'études se propose de caractériser à l'aide de l'appareil TRIMS (Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions) les propriétés hydrodynamiques des sols, avec croûte de surface, de Thyse Kaymor (Sénégal). L'objectif de cette étude est la détermination de caractéristiques hydrodynamiques fiables en vue du calage du modèle d'infiltration retenu dans le projet EMIRE de l'Institut de Recherche et de Développement (I.R.D ex ORSTOM).

Le premier chapitre de ce rapport présente succinctement la situation géographique du site expérimental, la méthode de l'infiltromètre TRIMS, et les équations mathématiques utilisées. Le deuxième chapitre décrit l'étude expérimentale. Le troisième et dernier chapitre résume les résultats obtenus et expose l'analyse dont ils ont fait l'objet.

## Chapitre 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette partie du rapport fait une récapitulation des informations nécessaires à la compréhension du travail accompli. Le site expérimental y est d'abord situé, ensuite la théorie sur la parcelle expérimentale, le simulateur de pluie, l'appareil de mesure TRIMS, les variables et équations de base permettant l'interprétation des résultats et les états de surface, y est résumée. Enfin quelques travaux sur le sujet du travail sont présentés.

### **1.1 PLAN DE SITUATION DU SITE EXPERIMENTAL**

Tous les essais in situ ont été menés à Keur Dianko, l'un des 23 villages de la communauté rurale de Kaymor. Kaymor est située dans le département de Nioro du Rip, dans la région de Kaolack (figure 1.1). La population villageoise est composée essentiellement de wolofs avec une densité de 62 habitants / Km<sup>2</sup> (1992). L'activité dominante est la culture de l'arachide et du mil. La zone est caractérisée par une forte variabilité du régime pluviométrique (1000 mm en année décennale humide et 550 mm en année décennale sèche, entre 1932 et 1992, (M. DIATTA , 1994)). Le bas fond de Keur Dianko est situé sur les formations sédimentaires du continental terminal mises en place au Paléocène. Le sol est de type ferrugineux appauvri avec une épaisseur de la couche sableuse de 20 cm en moyenne. Les taux d'argiles sont très faibles (2 à 4% jusqu'à 30cm). Le sol est très filtrant et encroûté à la surface.

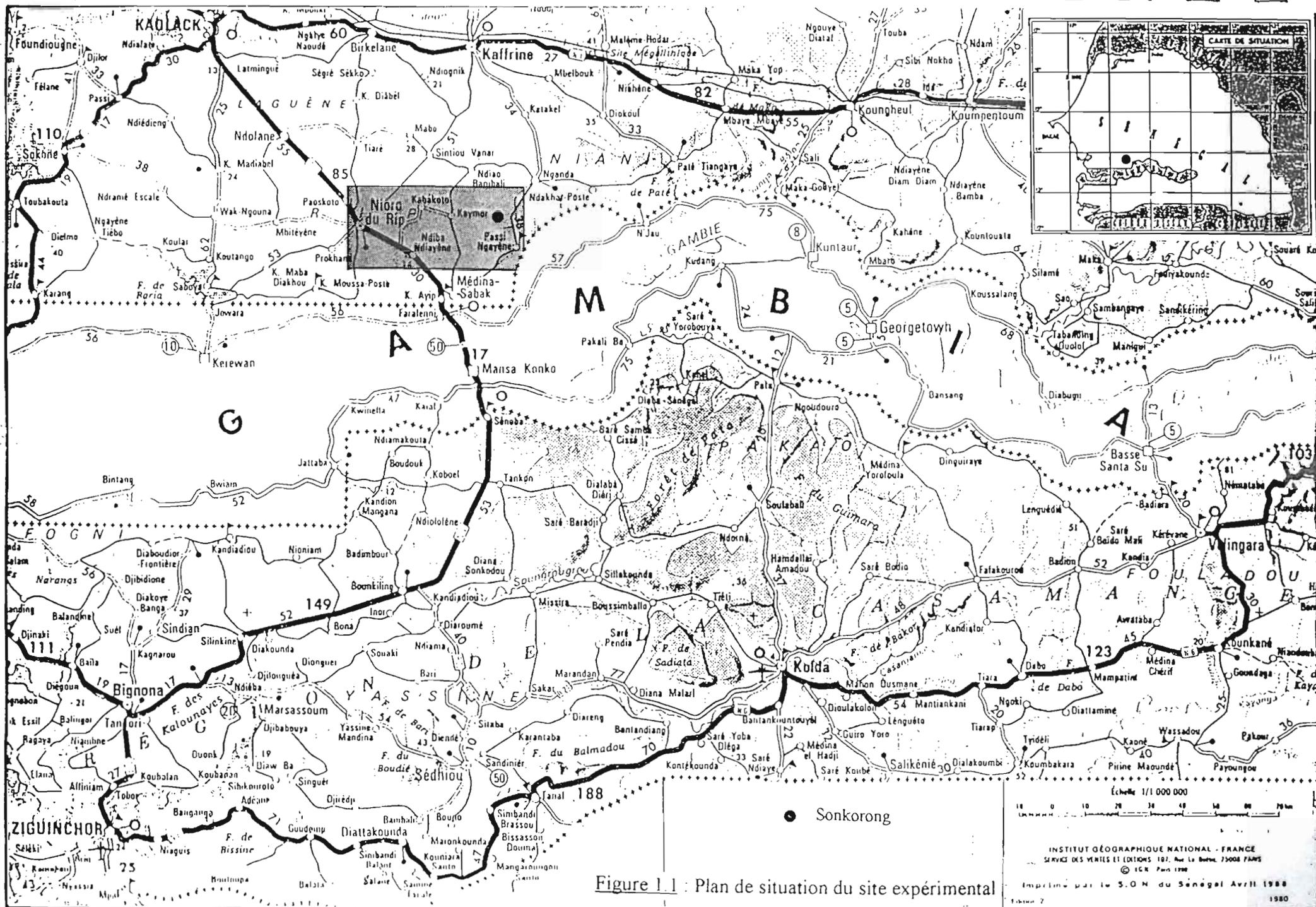
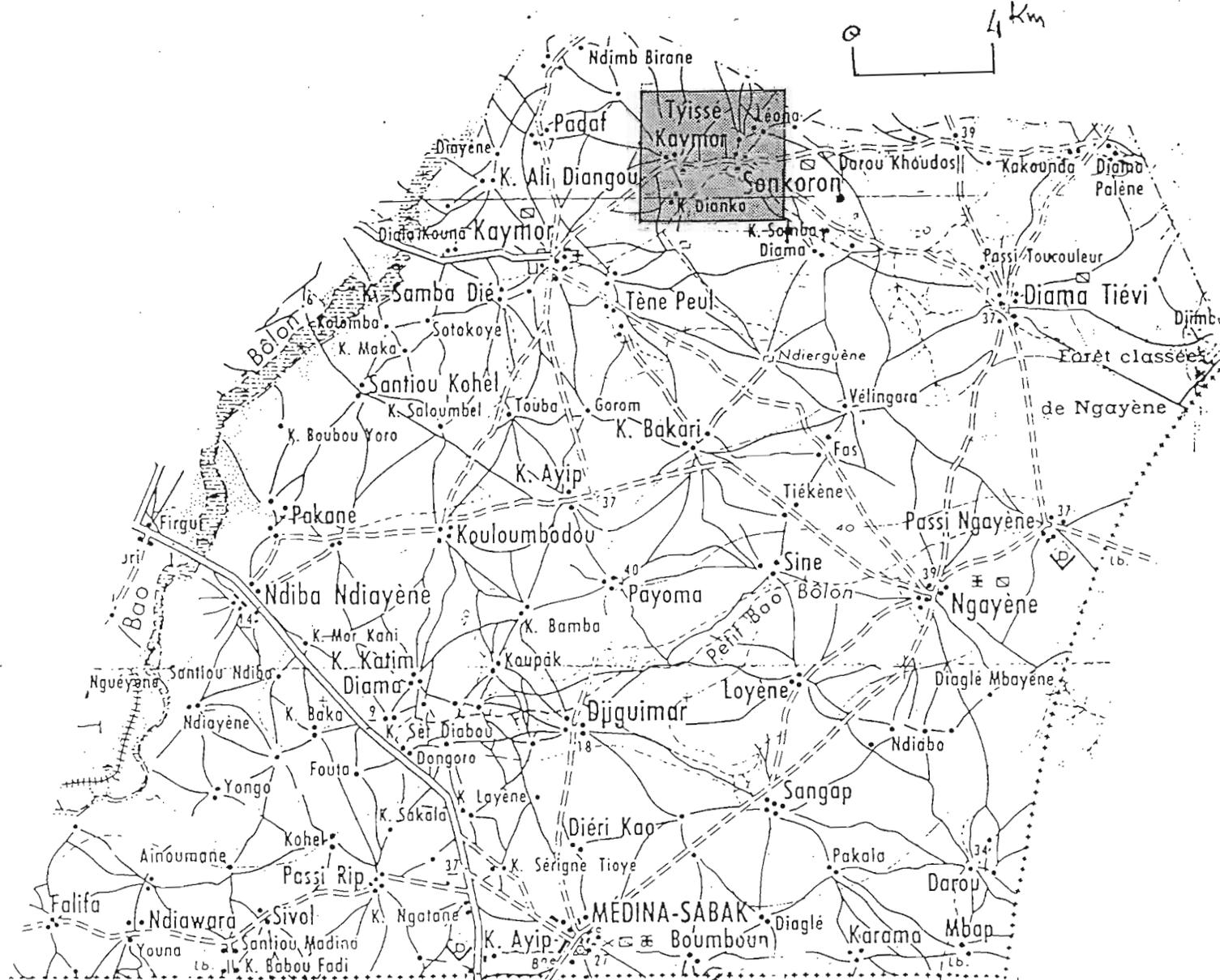


Figure 1.1 : Plan de situation du site expérimental

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL - FRANCE  
 SERVICE DES VENTES ET DISTRIBUTIONS 181, Rue de Bercy, 75004 PARIS  
 © ICR Paris 1988  
 Imprimé par le S.O.M. du Sénégal Avril 1988  
 Figure 7 1980



Communautés rurales de Kaymor (source I. R. D.)

## **1.2 LA PARCELLE EXPERIMENTALE**

Un problème d'échelle d'étude se pose souvent lorsqu'il s'agit d'étudier les propriétés d'un sol. A l'échelle du  $m^2$  où cette étude est faite le couvert végétal est herbacé ( cultural) et des observations de terrains sont facilement menées.

### **1.2.1 Description et Définition**

La parcelle a  $1m^2$  de superficie. Elle est délimitée par un cadre en tôle enfoncé dans le sol sur environ 5 cm. Pour y recueillir le ruissellement, un canal collecteur en PVC est posé à même le sol le long de la face du cadre interceptant la pente de la parcelle. Ce canal débouche dans une cuve équipée d'un capteur de pression permettant d'enregistrer les volumes ruisselés. La cuve est couverte pour que les eaux parasites n'y pénètrent pas ( figure 1.2).

La parcelle est donc une surface élémentaire d'étude pouvant être soumise à des conditions pluviométriques contrôlées.

### **1.2.2 Représentativité de la parcelle expérimentale**

Il a été établi que le dispositif décrit ci-dessus ne perturbe pas le bilan hydrique local (PEREZ Pascal, 1994). De plus la surface élémentaire est un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivant :

- le couvert végétal,
- la surface du sol,
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations (A. CASENAVE, C. VALENTIN, 1989).

La zone ainsi délimitée peut de ce fait être considérée comme un micro bassin versant caractérisé par des propriétés hydrodynamiques spécifiques. La combinaison de ces propriétés pour plusieurs

parcelles expérimentales permet de définir, à une échelle plus grande, celles d'un type de sol donné.

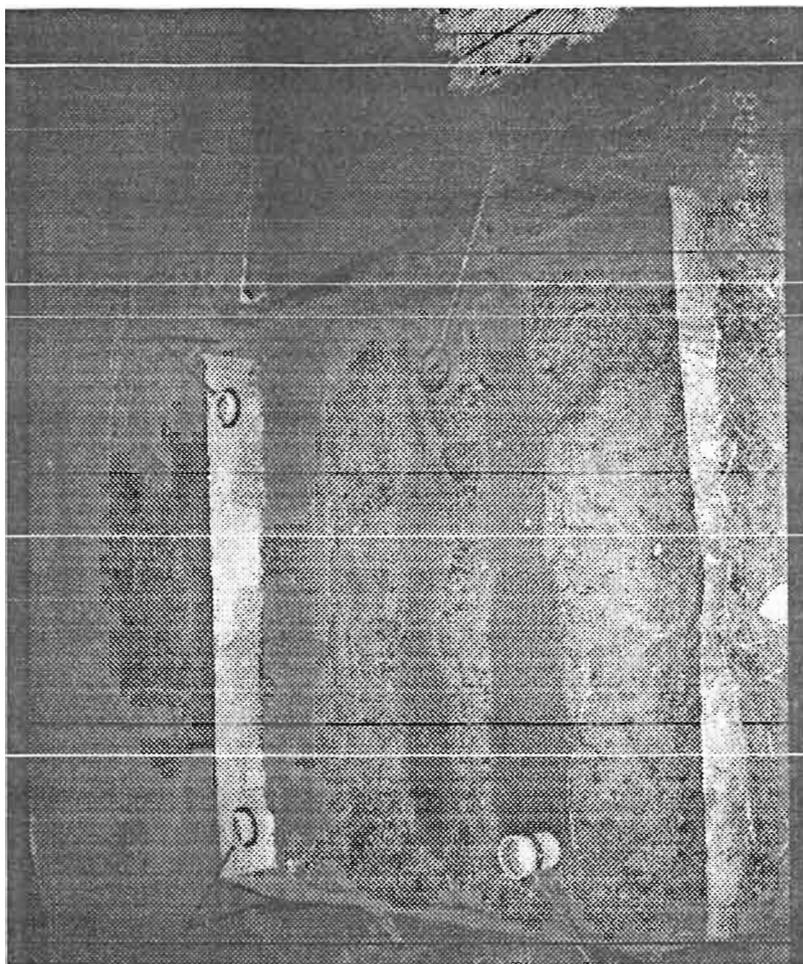


Figure 1.2 : La parcelle expérimentale

## **1.3 LE SIMULATEUR DE PLUIE**

### **1.3.1 Historique**

Le mini simulateur que nous avons utilisé a été mis au point par l'ORSTOM en 1977. Sa fiabilité pour l'étude des parcelles de 1 m<sup>2</sup> a été établie après une étude comparative des résultats

qu'il permet d'obtenir avec ceux obtenus grâce au simulateur de type SWANSON (A. CASENAVE, C. VALENTIN, 1989).

### **1.3.2 Pertinence de la technique de simulation de pluies**

De nombreuses études des propriétés des sols en relation avec la pluviométrie ont été rendues difficiles par la rareté et l'irrégularité des pluies naturelles en zone sahélienne.

De plus le nombre et l'interaction des paramètres influençant les propriétés hydrodynamiques des sols rendent difficile la mise en évidence de leur action respective sous pluies naturelles. Ainsi, la technique de simulation de pluies est adéquate pour s'affranchir des aléas des précipitations naturelles. Les caractéristiques des averses ainsi que leur fréquence sont contrôlées de même qu'il est maintenant possible de faire un nombre assez important de mesures vu la durée limitée de leur réalisation.

### **1.3.3 Description**

Le simulateur est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour pyramidale de 4 mètres de haut (figure 1.3). Une bâche fixée sur cette tour permet de protéger la pluie simulée de l'action du vent. Un gicleur, calibré et alimenté en eau à débit constant par une moto pompe, représente le système d'arrosage. Un manomètre permet de contrôler la pression d'admission de l'eau au gicleur et donc la constance du débit. Le gicleur est centré sur l'axe de la parcelles de 1 m<sup>2</sup>.

### **1.3.4 Représentativité des pluies simulées**

L'intensité de l'averse simulée est celle de l'averse fréquemment observée au niveau de la zone d'étude. L'équivalence entre l'énergie cinétique de la pluie simulée et celle de la pluie naturelle, pour une même intensité de pluie, est recherchée. En effet cette énergie cinétique, fonction de la taille et de la vitesse des gouttes de pluies, est l'un des facteurs clés influençant la

réorganisation superficielle des sols. Une étude détaillée a montré que l'énergie cinétique des pluies simulées est du même ordre de grandeur que celle des pluies naturelles, et qu'elle en est d'autant plus proche que les intensités sont élevées (A. CASENAVE, C. VALENTIN, 1989).

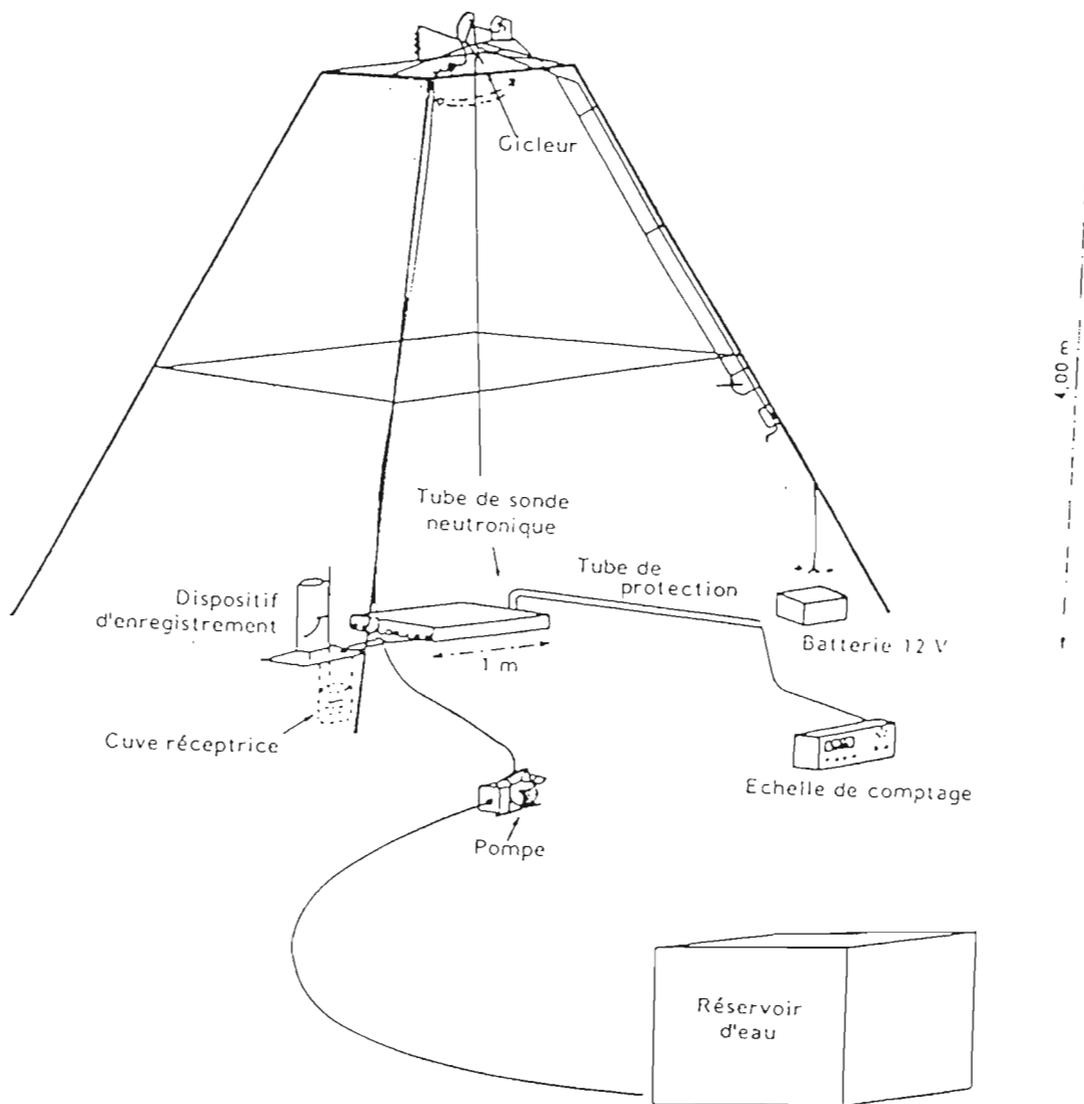


Figure 1.3 : Schéma du mini - simulateur de pluie

## **1.4 LA METHODE DE L'INFILTROMETRE TRIMS**

### **1.4.1 Objectifs**

Le milieu poreux qu'est le sol est supposé triphasique. Nous y avons la coexistence d'une matrice solide rigide constituée de particules ou grains, d'une phase gazeuse (air) et d'une phase liquide (eau). Les mouvements des fluides se font à l'intérieur de la matrice solide. Ces mouvements en particulier l'infiltration de l'eau, sont dus aux propriétés hydrodynamiques des sols (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 129). Cependant cette infiltration est susceptible d'être influencée par l'existence d'une croûte de surface. L'objectif de cette méthode est donc de déterminer, par infiltrométrie TRIMS (Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions), Les différentes propriétés hydrodynamiques des sols avec croûte de surface.

### **1.4.2 Historique**

Le dispositif appelé "anneau de Muntz" a été utilisé pour réaliser les premiers essais d'infiltration in situ, avec condition de potentiel hydrique imposé à la surface du sol (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 29). L'eau s'infiltré à l'intérieur d'une enceinte étanche alimentée par un réservoir gradué. Les volumes apportés sont notés à intervalles réguliers jusqu'à l'obtention d'un régime quasi permanent. L'intérêt de l'expérimentateur était de pouvoir analyser ce régime permanent d'infiltration indispensable pour pouvoir assimiler le flux unidirectionnel à la conductivité hydraulique (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 29).

L'infiltromètre actuellement utilisé pour les essais d'infiltration a été récemment développé au Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) en collaboration avec B.E. Clothier (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 32). La seringue hypodermique jadis utilisée pour le système de dépressurisation est remplacée par un vase de Mariotte. Les divers

modèles actuellement répandus se différencient essentiellement par le type de matériau utilisé pour le contact avec le sol (membrane poreuse ou plaque céramique), et par l'existence ou non d'un anneau dépassant légèrement le pourtour de l'embase.

L'infiltromètre permet, contrairement à l'anneau de Muntz, de travailler en conditions non saturées. Cependant, il ne permet d'opérer que dans une gamme de potentiels assez réduite (0 à 200 mm d'eau), ce qui le met d'ailleurs dans une position avantageuse par rapport aux autres appareils de mesure de la conductivité hydraulique du sol in situ (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 30).

### **1.4.3 Méthodologie**

La méthode consiste à permettre un apport d'eau contrôlé au niveau des couches superficielles du sol, sous une succion imposée à la surface du sol et maintenue constante durant toute la mesure, et à suivre l'évolution du potentiel matriciel,  $h$  (cmH<sub>2</sub>O), à des profondeurs,  $z$ , données ainsi que l'évolution de la lame d'eau infiltrée,  $I$ [L]. Le flux d'infiltration  $q$  [LT<sup>-1</sup>], et le gradient hydraulique,  $i$ , peuvent donc être déterminés de même que, toute chose étant égale par ailleurs, la conductivité hydraulique,  $K$ [LT<sup>-1</sup>] :

$$gradH = \frac{\Delta(h-z)}{\Delta L} \quad (1.1)$$

$$q(t) = \frac{dI}{dt} = -KgradH \quad (1.2)$$

$\Delta L$  : épaisseur de la couche de sable.

La sorptivité capillaire,  $S$ [LT<sup>-1/2</sup>] peut également être déterminée, et servir à calculer la conductivité hydraulique.

#### **1.4.4 Hypothèses de calcul**

Les hypothèses suivantes ont été admises :

- la phase solide est indéformable et elle est également considérée comme homogène, isotrope, et correctement décrite par des variables d'état moyennes,
- la phase liquide est constituée d'eau pure incompressible et elle est continue dans tous le domaine poreux. L'énergie cinétique de son mouvement au sein de la matrice solide est négligeable par rapport à son énergie totale. Enfin son état énergétique n'est composé que de deux termes, une pression matricielle,  $h$ , et une énergie potentielle,  $-z$ ,
- la phase gazeuse est continue et sa pression,  $P_a$ , est constante et égale à la pression atmosphérique,
- les concentrations d'eau mises en jeu sont suffisamment importantes et les transferts suffisamment lents pour que ces derniers puissent être correctement décrits par la loi de Darcy généralisée,
- le régime permanent est atteint et l'écoulement dans la matrice solide est unidirectionnel (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 19).

#### **1.4.5 Description de l'appareil TRIMS**

L'infiltromètre se compose de deux parties (Figure 1.4).

1°) une embase sur laquelle se trouvent deux réservoirs gradués transparents :

- l'un servant de réservoir d'alimentation en eau est hermétiquement fermé à son sommet par un bouchon en caoutchouc,
- l'autre permettant de créer une dépression est appelé vase de Mariotte. Il est partiellement rempli d'eau et un tube capillaire d'aération, muni d'un tuyau souple et d'une pince de Mohr, peut y coulisser.

Un second tube met en communication les deux réservoirs.

2°) un disque d'infiltration sous lequel est tendue une membrane en Nylon (diamètre de pore : 20  $\mu\text{m}$ ) grâce à un bracelet en caoutchouc.

Le disque est relié au réservoir d'alimentation par un tuyau.

Le capillaire d'aération enfoncé d'une hauteur connue dans le vase de Mariotte permet de créer la dépression ( $h_0$ ) au niveau de la membrane. L'air entre dans le capillaire d'aération à la pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ) et y ressort à la pression  $P_1$ . Il transite ensuite à travers le tube reliant les deux réservoirs d'où il ressort à la pression  $P_2$ . Les pressions d'entrée et de sortie du capillaire d'aération d'une part, d'entrée et de sortie du tube reliant les deux réservoirs d'autre part, étant identiques (on néglige la masse volumique de l'air devant celle de l'eau), la pression à la base du disque ( $P$ ) nous est donnée par :

$$P = P_{atm} + \rho_w * g (h_2 - h_1) \quad (1.3)$$

$\rho_w$  = masse volumique de l'eau,

$g$  = accélération de la pesanteur,

$h_1$  = hauteur d'eau entre le niveau de l'eau et celui du capillaire coulissant dans le vase de Mariotte,

$h_2$  = différence de niveau entre la base du disque et l'extrémité du tube, reliant les deux réservoirs, dans le réservoir d'alimentation.

La dépression ( $h_0$ ) en hauteur d'eau, imposée à la base du disque, est de :

$$h_0 = h_2 - h_1 \quad (1.4)$$

Les mesures des potentiels matriciels dans le sol ont été automatisées à l'aide des tensiomètres constitués essentiellement de bougies poreuses collées à des tubes capillaires (figure 1.5).

Ces tubes sont connectés à des capteurs de pression alimentés par une alimentation stabilisée (10V).

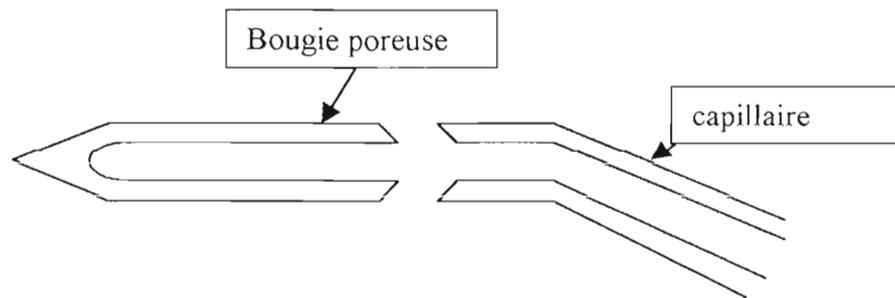


Figure 1.5 : Schéma de montage des tensiomètres



Figure 1.4 : L'infiltromètre TRIMS

## 1.5 VARIABLES ET EQUATIONS DE BASE

Des prélèvements d'échantillons de sol nous donnent le volume et la masse des différentes phases, permettant de définir les valeurs suivantes :

- l'humidité pondérale :  $W \left( \frac{g}{g} \right) = \frac{M_w}{M_g}$  (1.5),  $M_w$  est la masse de l'eau et  $M_g$  la masse de

l'échantillon sec,

- la masse de l'eau :  $M_w (g) = M_h - M_g$  (1.6),  $M_h$  est la masse humide de l'échantillon,

- l'humidité volumique :  $\theta \left( \frac{cm^3}{cm^3} \right) = \frac{V_w}{V_t} = (\rho_s * \rho_w^{-1}) * W = \gamma_d * W$  (1.7),

Où  $V_w$  et  $\rho_w$  sont respectivement le volume et la masse volumique de l'eau,  $\gamma_d$  est la densité apparente sèche.

L'interaction des phases liquides et gazeuses, non miscibles, crée une pression aux interfaces due aux effets de la capillarité et caractérisée par la tension superficielle,  $\sigma$ , du liquide.

Cette tension est liée à la pression capillaire,  $P_c$ , de l'eau par la relation :

$$P_c = P_a - P_w = \frac{2 * \sigma}{r_p} \quad (1.8)$$

$P_a$  : pression de l'air,

$P_w$  : Pression de l'eau,

$r_p$  : rayon du pore ou sa dimension caractéristique.

Cette pression capillaire est variable suivant le degré de saturation du milieu. Nous pouvons l'exprimer non pas en unité de pression mais en hauteur d'eau,  $h$ , équivalent par :

$$h = \frac{P_c}{\rho_w * g} \quad (1.9)$$

Si la pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ) est prise égale à 0,  $h$  varie des valeurs négatives à 0, ou à des valeurs positives, au fur et à mesure que le milieu gagne en humidité.

En présence de force de gravité, l'état énergétique de l'eau est également fonction d'un terme potentiel donné par son altitude par rapport à un niveau zéro de référence, généralement assimilé à la surface du sol. En orientant l'axe vertical positivement vers le bas, une particule d'eau située à la profondeur  $z$  aura une énergie potentielle  $-z$  (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 15). Sa charge hydraulique,  $H$  (cmH<sub>2</sub>O), est la somme des termes matriciels et gravitaires :

$$H = h - z \quad (1.10)$$

La conductivité hydraulique,  $K$  [ $LT^{-1}$ ], est le coefficient de proportionnalité entre le débit volumique par unité de surface,  $q$  [ $LT^{-1}$ ], et le gradient de charge hydraulique :

$$\vec{q} = -K(\theta)\overrightarrow{gradH} \quad (1.11)$$

Cette équation est appelée loi de Darcy généralisée. Elle indique que la capacité d'infiltration du sol dépend non seulement de sa conductivité hydraulique mais aussi du gradient de potentiel au voisinage de la surface (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 223).

### 1.5.1 Equation de Transfert

La loi de Darcy généralisée couplée avec l'équation de continuité suivante :

$$div q = - \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.13)$$

donne, dans le cas d'un écoulement unidirectionnel vertical, l'équation générale des transferts d'eau :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (1.14)$$

Cette équation fait intervenir deux variables d'état non indépendantes,  $\theta$  et  $h$ . Elle s'exprime en fonction de  $\theta$  par l'équation de Fokker - Planck :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K \right] \quad (1.15)$$

D : diffusivité capillaire

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1.16)$$

### 1.5.2 La solution de Philip

Philip (1957) a obtenu une solution pour l'équation de Fokker - Planck (équation 1.15) dans le cas particulier d'un milieu homogène semi - infini satisfaisant aux conditions :

$$\left\{ \begin{array}{l} t \leq 0 ; z \geq 0 : \theta = \theta_i \\ t \geq 0 ; z = 0 : \theta = \theta_o \end{array} \right.$$

avec  $\theta_i$  est la teneur en eau initiale à la surface,

$\theta_o$  est la teneur en eau finale à la surface .

La forme généralisée de cette solution est de :

$$I(t) = K_i t + \sum_{j=1}^{\infty} S_j(\theta_i, \theta_o) * t^{1/2} \quad (1.17)$$

Où  $I$  [ L ] est la lame d'eau infiltrée par unité de surface,

$K_i$  [ L / T ] est la conductivité pour  $\theta = \theta_i$ ,

$$S_j(\theta_i, \theta_o) = \int_{\theta_i}^{\theta_o} f_j(\theta) d\theta \quad (1.18)$$

les  $f_j(\theta)$  sont des solutions d'équations différentielles ordinaires :

$$Z(\theta, t) = \sum_{j=1}^{\infty} f_j(\theta) * t^{j/2} \quad (1.19)$$

Le coefficient,  $S_1$ , du premier terme de la série dans l'équation (1.17) est la sorptivité capillaire  $S [LT^{-1/2}]$ .

Elle traduit la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité.

Pour une infiltration verticale et des temps suffisamment courts, Philip propose une réduction de l'équation (1.17) à deux termes :

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad (1.20)$$

où A est une constante qui rend compte des effets gravitaires, et qui appartient à l'intervalle  $[K/3 ; 2*K/3]$  (J. P. VANDERVAERE, 1995, page). K étant la perméabilité.

### **1.5.3 La Méthode Mono - Test utilisant le régime permanent (MTP)**

La méthode mono - test permet de calculer la conductivité en estimant la sorptivité, S, et en utilisant conjointement le potentiel d'écoulement,  $\phi$ , et le flux du régime permanent,  $q_{\infty}$  :

$$\phi = \frac{b * S^2}{(\Delta\theta)_o} \quad (1.21)$$

$$q_{\infty} = K + \frac{4 * \phi}{\pi * r} \quad (1.22)$$

b est généralement prise égale à 0.55,

r est le rayon du disque d'infiltration,

$$(\Delta\theta)_O = (\theta_o - \theta_i)$$

C'est une méthode qui requiert la mesure de l'humidité du sol avant et après essai. L'humidité volumique est déterminée avec l'équation (1.7). Très sensible aux imprécisions d'origine expérimentale, cette méthode peut fournir des estimations biaisées de K si la sorptivité est déterminée de manière incorrecte (J. P. VANDERVAERER, 1995, page58).

Il existe plusieurs méthodes de détermination de S, mais la plus correcte est celle que nous présentons ci – après (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 61).

- La détermination de la sorptivité:

Dans la pratique la courbe  $\frac{dI}{dt^{1/2}} = f(t^{1/2})$  est tracée à partir des mesures d'infiltration. Une droite est normalement obtenue. Une régression linéaire est faite sur cette courbe. La sorptivité est définie comme étant égale à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression :

$$S = \lim_{t \rightarrow 0} \left[ \frac{dI}{dt^{1/2}} \right]$$

Cependant, à cause de la couche de sable, la pente de la courbe est très forte au début. Ensuite elle diminue au fur et à mesure que le sable se sature et que l'infiltration devient effective dans le sol. Aussi les premiers points sur la courbe, correspondant à la durée de saturation du sable de contact, sont éliminés. Thony et al. (1991) ont estimé cette durée à 240 secondes (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 60).

Cette méthode est préférée aux autres parce que, la forme linéaire  $\frac{dI}{dt^{1/2}} = S + 2A * t^{1/2}$ , dérivée de la solution de Philip (équation 1.20), reste valable au cas où l'écoulement supposé monodirectionnel ne l'est plus. De plus, elle est adaptée si les incréments  $\Delta t$  ne sont pas réguliers.

## **1.6 EVOLUTIONS ATTENDUES DES ETATS DE SURFACE DU SOL**

L'hypothèse que nous utilisons comme postulat de départ et dont nous cherchons à mesurer les conséquences dans cette étude est qu'en fonction du nombre de pluies, il se forme une croûte de surface qui affecte les propriétés hydrodynamiques des sols. Pour une meilleure compréhension du phénomène nous essayons de donner les processus et facteurs mis en jeu lors de la formation des croûtes ainsi que les types de croûte.

### **1.6.1 Les principaux mécanismes**

Plusieurs mécanismes peuvent se succéder ou intervenir simultanément lors de la formation des croûtes de surface. A cet effet nous distinguons plusieurs phases au cours d'une pluie :

- La mobilisation des particules par humectation due à leur disjonction, laquelle résulte de :
  - \* l'éclatement de l'agrégat plongé dans l'eau dû à la pression de l'air emprisonné,
  - \* la dispersion due à la réduction des forces de liaisons entre particules,
  - \* la fissuration imputée au gonflement du matériau,
- l'arrachement mécanique qui peut dépendre de la vitesse du ruissellement ou de l'impact des gouttes de pluies,
- le transport des particules par charriage de fond, pour les particules grossières comme les sables, ou par suspension pour les particules fines,
- le dépôt sous l'effet soit des gouttes de pluies (les particules sont ainsi bien tassées), soit de l'écoulement de l'eau (avec un bon tri des particules), soit d'une sédimentation dans un liquide au repos (avec un tri - granulométrique très marqué),
- après dessèchement de la surface, le vent peut à son tour provoquer arrachement, transport et dépôt de certaines fractions.

Au bilan, l'ensemble de ces processus conduit à une redistribution à la fois verticale et latérale des constituants.

### **1.6.2 Les Types de croûtes de surface**

Nous pouvons distinguer plusieurs types de croûtes selon la phase (parmi celles présentées précédemment) qui a causé sa formation :

- la croûte structurale (ST) due à la mobilisation et au rejaillissement de particules,
- la croûte de ruissellement formée par les sédiments déposés lors du ruissellement. Elle recouvre souvent une croûte structurale,

- la croûte d'érosion (ERO) due à l'arrachement des particules par l'eau et par le vent,
- la croûte de dépôts éoliens formée lorsque le vent, transportant un sable fin, vient heurter un obstacle,
- la croûte de décantation (DEC) formée après sédimentation de particules,
- la croûte de dessiccation (DES) due aux cycles d'humectation dessiccation, phénomènes particulièrement accentués à la surface du sol.

Une description plus détaillée de ces croûtes est donnée par A. CASENAVE et C. VALENTIN dans l'ouvrage "LES ETATS DE LA SURFACE DE LA ZONE SAHELIENNE : INFLUENCE SUR L'INFILTRATION" (A. CASENAVE et C. VALENTIN, 1989).

## **1.7 QUELQUES TRAVAUX DÉJÀ EFFECTUÉS SUR LE SUJET**

La méthode de détermination des propriétés hydrodynamiques, utilisant l'infiltromètre TRIMS, a déjà donné des résultats pour différentes conditions de travail. En effet elle a déjà été utilisée par :

- Xavier CARON étudiant à L'E.N.S.H.M.G, durant l'été 1996; sur le sujet "Evolution saisonnière des paramètres hydrodynamiques d'un versant sahélien." Il a utilisé le même site que nous mais a travaillé sous les conditions de pluies naturelles. Donc son travail été fortement influencé par les

aléas des précipitations naturelles. De plus la forme linéaire,  $\left( \frac{\Delta I_{3D}}{\Delta t^{1/2}} = f(t^{1/2}) \right)$ , qu'il a utilisé pour

le calcul de la sorptivité est valable pour une infiltration gouvernée essentiellement par la capillarité dans des conditions monodirectionnelles (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 58). Ce qui n'a pas été son cas.

- Jean Pierre VANDERVAERE dans sa thèse "caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltromètre à disque. Analyse critique des régimes pseudo – permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. " a fait une présentation et une utilisation très poussées de la méthode. La méthode a été améliorée, par rapport à la première étude, par l'utilisation de tensiomètres pour la lecture de potentiels matriciels dans le sol. Toutefois, toutes les interprétations ou presque sont celles des cas de régime transitoire et d'écoulement tridimensionnel.

Par rapport à ces deux études, nous nous sommes mis dans des conditions de régime permanent et d'écoulement 1D et avons effectué une simulation de pluies sur de petites parcelles de  $1\text{m}^2$ . Nous avons également utilisé, comme J.P. VANDERVAERE, des tensiomètres.

## Chapitre 2 : **ETUDE EXPERIMENTALE IN SITU**

L'étude expérimentale in situ a constitué une partie importante de ce travail. Dans ce chapitre le matériel de mesure utilisé et le déroulement des essais sont exposés.

### **2.1 MATERIEL DE MESURE**

Le site expérimental peut être considéré comme faisant partie du matériel de mesure. Son aménagement a précédé l'installation du matériel

#### **2.1.1 Aménagement du site**

Deux types de parcelles ont été aménagés sur le site. Les parcelles A labourées perpendiculairement à la pente du terrain et les parcelles B labourées parallèlement à cette pente. Les chiffres 1 à 5 indiquent le nombre de pluies simulées sur la parcelle avant l'essai d'infiltration TRIMS (figure 2.1).

#### **2.1.2 Matériel utilisé**

L'essentiel du matériel utilisé peut se résumer à :

- un simulateur de pluie,
- des cylindres d'écoulement,
- L'infiltromètre TRIMS,
- un sable de contact,
- des tensiomètres,
- des boîtes tarées,
- un chronomètre.

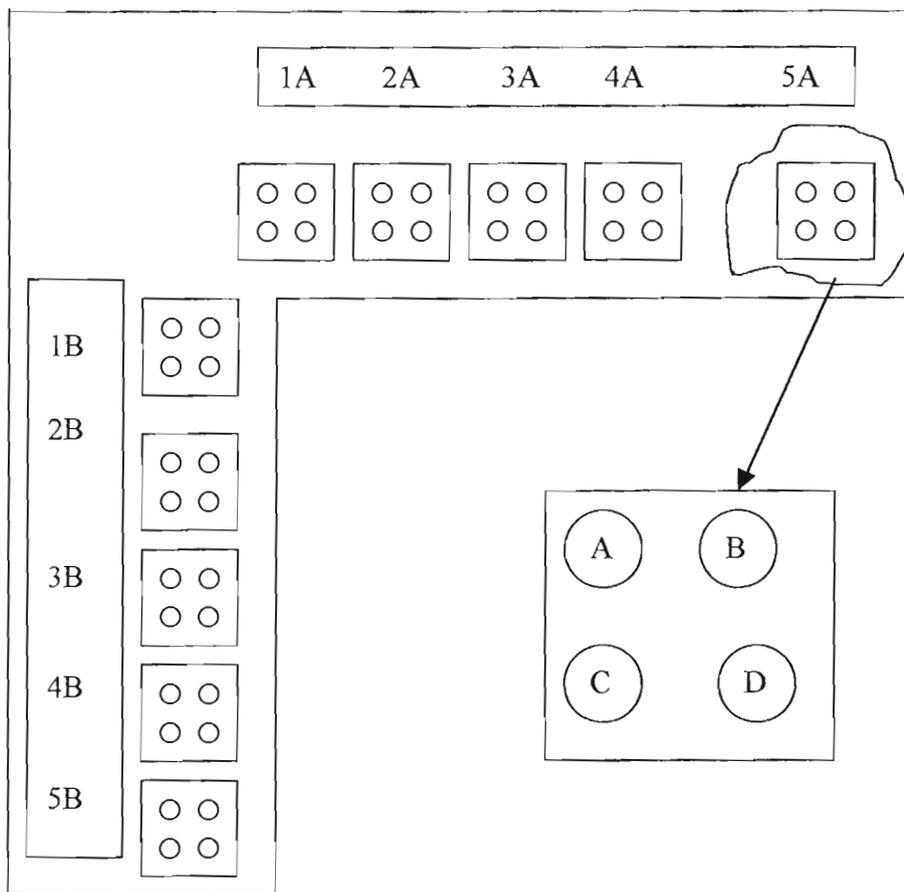


Figure 2.1 : Représentation schématique de l'aménagement du site

## **2.2 DEROULEMENT DES ESSAIS**

Cette partie du rapport a essayé de respecter l'ordre chronologique des manipulations.

### **2.2.1 Le simulateur de pluie**

Nous avons au total simulé cinq pluies d'environ 70 mm / h d'intensité pendant 30 minutes chacune; la pression de service étant maintenue à 0,4 bars au niveau du gicleur. L'intervalle de temps entre deux simulations était d'une semaine. Pour une première étape, nous avons simulé sur l'ensemble des dix parcelles (1A à 5A et 1B à 5B). La seconde simulation s'est faite sur huit parcelles (2A à 5A et 2B à 5B) et ainsi de suite jusqu'à la cinquième et dernière simulation qui n'a concerné que deux parcelles (5A et 5B). Les cumuls de la lame d'eau précipitée sont donnés au tableau 2.1. Notons que le total des pluies sur chaque parcelle n'a pas excédé la quantité habituellement précipitée avant chaque nouveau travail du sol, et que toutes les pluies n'ont pas été uniformes.

Tableau 2.1 : Cumul des pluies

Parcelles	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
Pluies (mm)	34.6	69.6	100.8	134.9	172.3	32.8	69.1	101.8	136.7	173.8

### **2.2.2 Les cylindres d'écoulement**

Les cylindres sont métalliques, de 23 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur. Ils sont entièrement enfoncés dans le sol (figure 2.2), et servent essentiellement à créer les conditions d'un écoulement unidirectionnel, lors de l'essai d'infiltration. Ils sont munis de 3, parfois 5 ou 6, trous devant loger les tensiomètres et situés à des profondeurs variables à partir de leur sommet. Le TRIMS est appliqué au moment de la mesure à la surface du sol. Après chaque simulation nous installons quatre cylindres nommés A,B,C et D (figure 2.1), dans chacune des deux parcelles expérimentales qui feront l'objet d'essais d'infiltration sept jours plus tard. Ce travail se fait, si possible, immédiatement après la simulation. Ceci pour éviter que le terrain ne s'assèche.

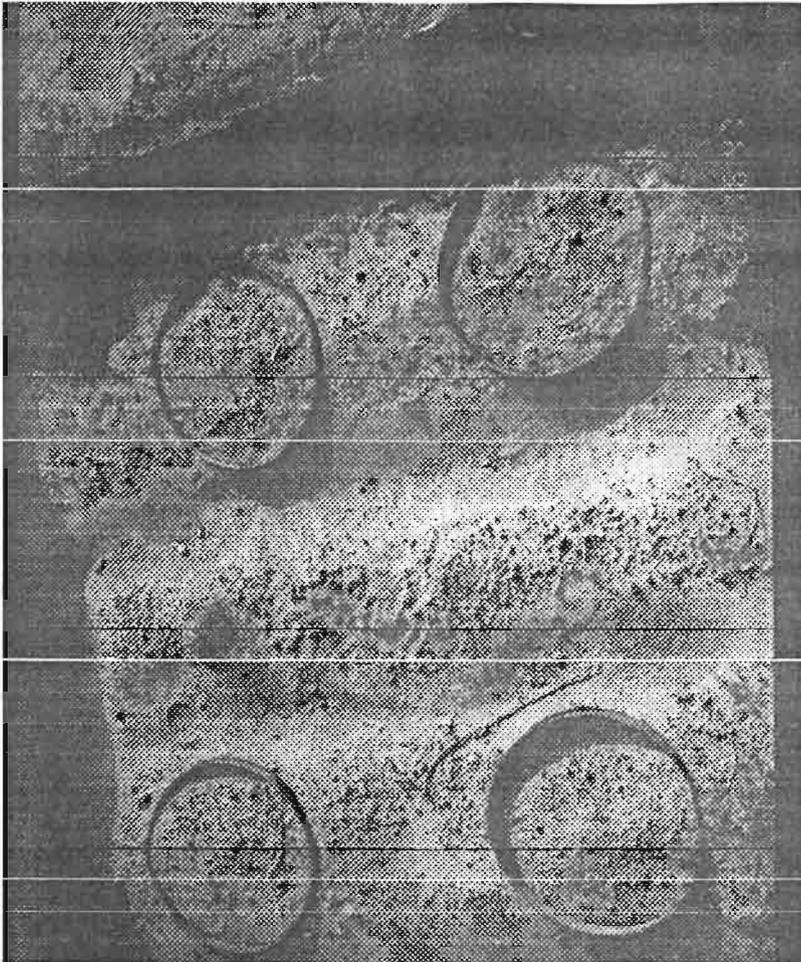


Figure 2.2 : Installation des cylindres d'écoulement

### **2.2.3 Le sable de contact**

Une couche de sable de quelques millimètres d'épaisseur, au dessus du cylindre d'écoulement (figure 2.3), assure un contact hydraulique entre le disque de l'infiltromètre et le sol dont la surface est rarement parfaitement plane. Avant de verser le sable à l'intérieur du cylindre, nous débarrassons la surface de l'herbe et des gravillons susceptibles d'altérer la membrane poreuse du disque. De même nous colmatons les trous et les fissures à la surface du sol avec du sable de termitière, pour ne pas favoriser les écoulements préférentiels. La quantité de sable de contact est mesurée, minutieusement étalée et nivelée au dessus du cylindre. Sa granulométrie est fine et sa conductivité très supérieure à celle du sol à caractériser. Ceci pour ne pas perturber l'écoulement.

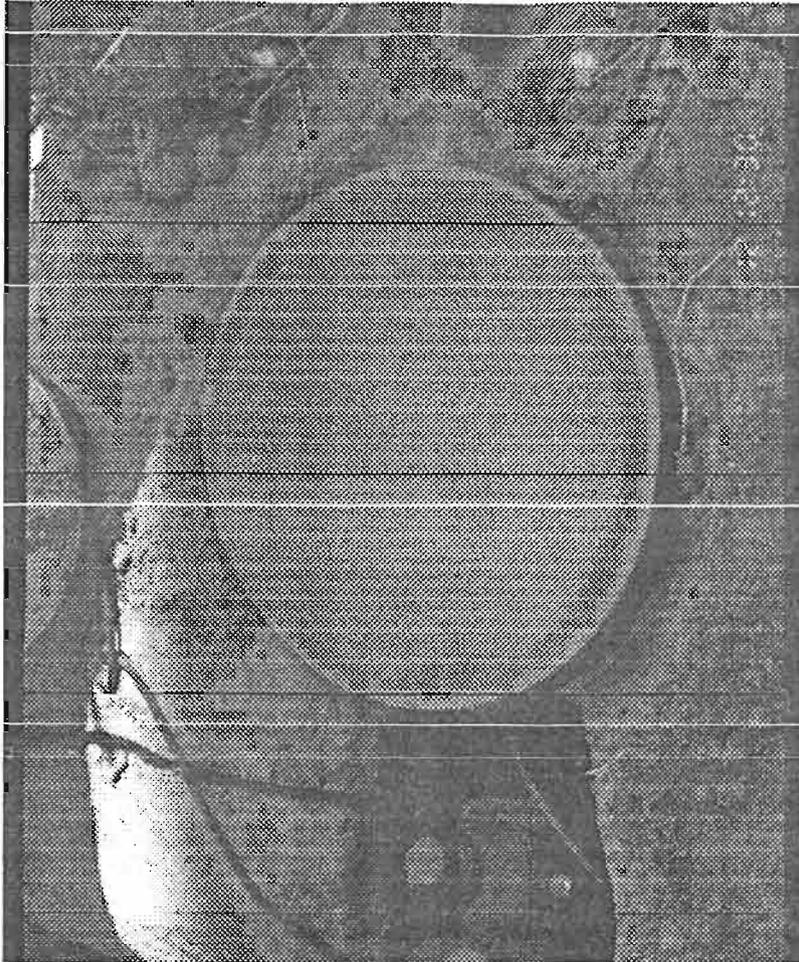


Figure 2.3 : Mise en place du sable de contact

#### **2.2.4 L'essai TRIMS**

Nous avons utilisé deux appareils TRIMS nommés A et B. Pour les deux, la détermination de la succion nulle au niveau de la membrane poreuse c'est faite au laboratoire. Cette membrane est fixée proprement sur le disque d'infiltration à l'aide d'un bracelet en caoutchouc. Il ne doit pas y avoir de grains de sable coincés entre la membrane et le support plastique, ni de plis à la périphérie. Le numéro de chaque essai correspond au numéro du cylindre d'écoulement concerné.

##### **- La détermination de la succion nulle**

Une fois les éléments du TRIMS assemblés, le vase de Mariotte ainsi que le réservoir d'alimentation sont remplis d'eau. Le réservoir est ensuite hermétiquement fermé. Le capillaire

coulissant, préalablement plongé dans le vase, est remonté progressivement jusqu'à l'apparition de bulles d'air en régime régulier. Il est alors réintroduit et les bulles s'estompent petit à petit. Nous nous arrêtons à l'apparition de la dernière bulle et relevons sur la graduation du vase, le niveau correspondant à l'extrémité inférieure du capillaire coulissant. La pression au niveau de la membrane est alors égale à la pression atmosphérique (suction nulle).

Pour le TRIMS A, le capillaire est au niveau 4,4 cm. Il est au niveau 5,0 cm pour le TRIMS B.

#### - Les mesures d'infiltration

La valeur de la suction imposée ( $h_0 = -5\text{mm}$ ) est obtenue en enfonçant le tube coulissant de 5 mm sous le niveau correspondant à la suction nulle. L'intérieur du vase est alors isolé à l'aide de la pince de Mohr appliquée à l'extrémité sortant du capillaire coulissant. D'abord le réservoir d'alimentation est rempli et les bulles d'air prisonnières, éventuellement sous la membrane ou bien dans la tuyauterie, sont éliminées à travers le tube reliant ce dernier au disque. L'embase est alors posée au même niveau que la couche de sable aplanie et le perméamètre (assemblage membrane-disque) plongé en attente dans une bassine remplie d'eau.

Puis nous passons à l'installation des tensiomètres. Une petite fosse d'accès est creusée à quelques centimètres de distance afin de procéder au forage des orifices tensiométriques à travers les trous prévus sur le cylindre d'écoulement (figures 2.4). Nous parvenons à creuser une orifice d'une dizaine de centimètre de longueur, sous la croûte et sans la perturber, à l'aide d'une mèche en forme de tarière du diamètre de la bougie. L'ensemble bougie - capillaire préalablement saturé en eau est connecté au capteur de pression avant d'être introduit dans son tunnel.

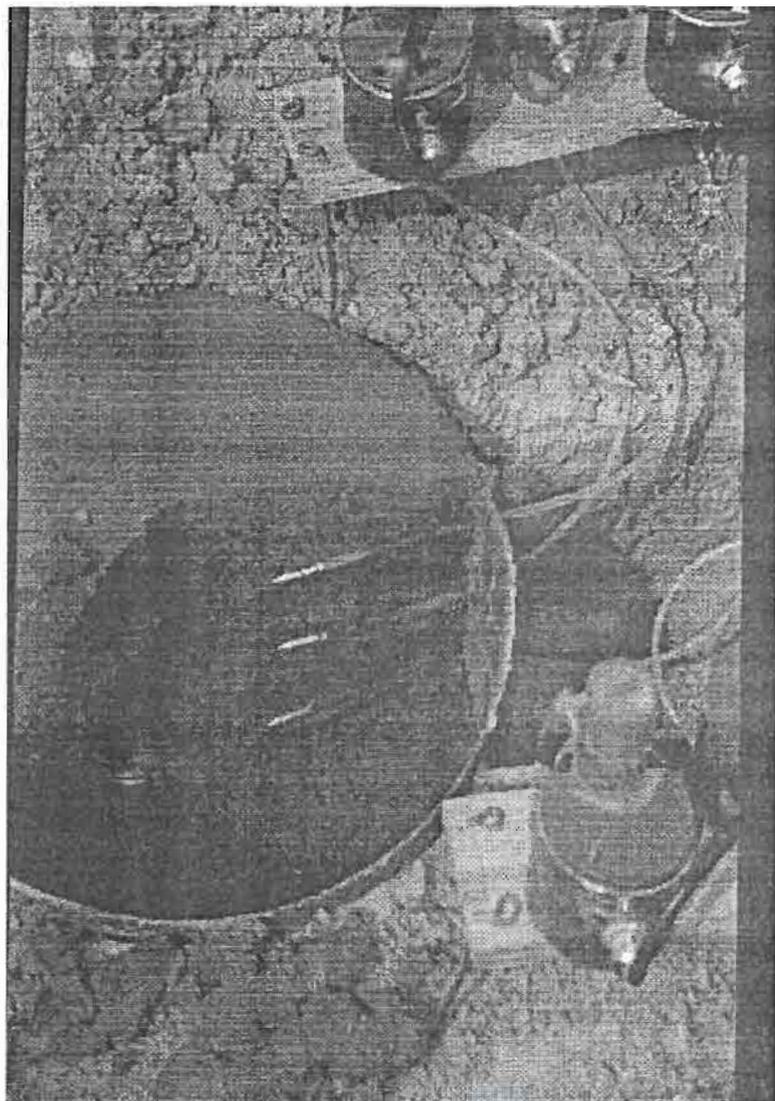


Figure 2.4 Installation des tensiomètres

La rapide montée en succion du système est le signe d'un bon contact hydraulique entre sol et bougie poreuse. L'essai d'infiltration doit être effectué assez rapidement pour éviter que le film d'eau entourant la bougie ne soit rompu. Notons que les capteurs fournissent des signaux en tension électrique. Tous les tensiomètres utilisés sont de ce fait numérotés et étalonnés au laboratoire, afin de pouvoir convertir en  $\text{cmH}_2\text{O}$  les lectures faites.

Nous effectuons ensuite un prélèvement d'une centaine de grammes de sol dans la parcelle expérimentale afin de déterminer l'humidité volumique avant infiltration. Les prélèvements sont

faits entre 0 et 5 cm puis entre 6 et 11 cm de profondeur.

Finalement le niveau initial de l'eau dans le réservoir est noté. Cette lecture correspond au zéro du chronomètre. La pince de Mohr au dessus du vase de Mariotte est également enlevée. Nous posons délicatement le perméamètre sur la couche de sable et déclenchons aussitôt le chronomètre. Le niveau d'eau dans le réservoir,  $h$  (cm), est lu régulièrement en fonction du temps. L'essai est prolongé jusqu'à l'obtention d'une pression quasi stable au niveau du tensiomètre le plus en profondeur (ceci a nécessité, à l'essai B de la parcelle 5A, un deuxième remplissage du réservoir). Le régime permanent est alors atteint. Le disque est enlevé du sable et replongé dans la bassine. Rapidement le sable de contact est décapé et du sol humide est prélevé dans le cylindre, aux mêmes profondeurs que précédemment. Ceci pour la détermination de l'humidité volumique en fin d'infiltration. Une dernière lecture du niveau d'eau dans le réservoir est faite et l'épaisseur du sable de contact,  $Z_{st}$  (cm), les profondeurs des tensiomètres,  $Z_t$  (cm), et les hauteurs des capteurs,  $Z_c$  (cm), sont mesurées par rapport au sommet du cylindre. L'utilité de ces dernières mesures sera vue dans l'analyse des résultats.

Ces mesures d'infiltration sont faites pour l'ensemble des cylindres installés, à l'exception du cylindre B de la parcelle 1A qui <sup>a</sup> été détérioré. Au total 39 essais ont été faits. Quelques tableaux de mesures sont représentés à l'annexe I.

## **OBTENUS**

L'essentiel de cette étude consiste en la détermination de la perméabilité et en l'établissement de relations entre elle et l'état de surface du sol. Notons que plusieurs dispositions ont été prise pour pouvoir déterminer la perméabilité de deux manières différentes : d'abord avec la loi de Darcy et ensuite avec la méthode mono – test utilisant le régime permanent.

### **3.1 LES ETATS DE SURFACE**

Les modifications d'états de surface en fonction du nombre de pluies n'ont pas été très importantes. Bien qu'elles aient eu effectivement lieu, nous n'allons pas dans ce rapport toutes les énumérer, ni faire leurs analyses. Nous avons, dans l'ensemble, noter une redistribution des particules superficielles du sol. Les particules les plus fines semblent être triées et déposées sur les bords des chemins du ruissellement de l'eau précipitée. Une mobilisation et un rejaillissement des particules, lors de la pluie, peuvent être à l'origine de ce phénomène. Les croûtes observées peuvent dans ce cas être des croûtes structurales.

## 3.2 CALCUL DE LA PERMEABILITE AVEC LA LOI DE DARCY

### 3.2.1 Le calcul des flux permanents

La variation de hauteur d'eau,  $\Delta h$  (cm), dans le réservoir d'alimentation et après une durée  $t$ (s) de l'essai, est obtenue en faisant la différence entre la hauteur d'eau,  $h$  (cm), lue au temps  $t$ (s) et la hauteur d'eau initiale,  $h(t = 0)$  (cm), dans le réservoir :

$$\Delta h(cm) = h(t)cm - h(t = 0)cm \quad (3.1)$$

Le rapport entre le diamètre du réservoir (8 cm) et celui du disque d'infiltration (23 cm), permet de transformer  $\Delta h$  en lame d'eau infiltrée,  $I$  (mm), après  $t$  secondes d'infiltration par le relation suivante :

$$I(mm) = 10 * \frac{8 * 8}{23 * 23} * \Delta h(cm) \quad (3.2)$$

Le flux infiltré,  $q$  (mm/s), sur l'intervalle de temps  $\Delta t$  (s) est obtenu par la relation :

$$q\left(\frac{mm}{s}\right) = \frac{\Delta I(mm)}{\Delta t(s)} \quad (3.3)$$

Quelques résultats de ces calculs sont consignés à l'annexe I, et l'annexe II montre leur évolution en fonction du temps.

L'essai est poursuivi jusqu'à l'obtention d'un régime quasi permanent matérialisé par un palier, parfois interrompu par des points pas très éloignés, sur la courbe du flux. Le flux permanent,  $q_{\infty}$ , est alors lu sur ce palier. Il est pris égal à la valeur qui revient le plus souvent sur au moins cinq mesures successives. Cependant les incréments  $\Delta t$  entre ces mesures étant assez grands (2, 3 ou 4 minutes), cette valeur est tout à fait discutable.

Sur l'ensemble des courbes nous constatons que le flux atteint sa valeur maximale au début de l'essai, et qu'il décroît rapidement sur les 250 premières secondes de l'essai. Ceci correspond à l'infiltration dans la couche de sable de contact. En effet sa conductivité très élevée

et le potentiel imposé (-5mm) à sa surface, font que l'appel d'eau y soit important avant saturation. Sa sorptivité, également élevée, permet de le saturer en un temps court et de mettre ainsi en contact l'eau avec le sol à caractériser. A partir de ce moment le rythme de progression du front d'humectation devient plus lent car la perméabilité a diminué. La variation du flux devient moins importante bien qu'il continue à être entretenu par la succion dans les couches de sol non encore saturées.

La seule exception à cette évolution de la courbe  $q(t)$  a été observée à l'essai B de la parcelle 5A (annexe II). La variation brusque et importante sur le palier est dans ce cas due au fait que nous avons eu à interrompre le flux après 3600s d'infiltration, pour un second remplissage du réservoir. Nous avons ainsi créé une désaturation de la couche superficielle du sol, d'où le fort appel d'eau au début de la reprise de l'essai.

De plus chaque parcelle représente un nombre de pluies bien défini et a fait l'objet de quatre essais TRIMS, sauf la parcelle 1A. Aussi nous estimons que le flux permanent de la parcelle peut être donné par la moyenne des flux permanents des essais de la parcelle. Les valeurs de ces flux sont résumées au tableau 3.1. Les courbes montrant leur évolution en fonction de la lame d'eau précipitée et pour chaque type de labour, sont représentées sur les figures 3.1 à 3.2.

Tableau 3.1 : Flux permanents en mm / h pour chaque essai et pour chaque parcelle

**PARCELLES A**

Lame d'eau (mm)	34.6	69.6	100.8	134.7	172.8
essai A	2.49E+01	2.42E+01	1.81E+01	2.46E+01	7.27E+00 ✓
essai B		3.27E+01 ✓	1.94E+01	2.42E+01	3.27E+01
essai C	2.48E+01	1.81E+01	2.91E+01	2.10E+01	1.94E+01
essai D	2.28E+01 ✓	2.42E+01	2.91E+01	1.45E+01	2.18E+01
q_permanents (mm/h)	<u>2.42E+01</u>	<u>2.48E+01</u>	<u>2.39E+01</u>	<u>2.11E+01</u>	<u>2.03E+01</u>

**PARCELLES B**

pluies (mm)	32.8	69.1	101.8	136.7	172.9
essai A	3.31E+01	2.18E+01	1.45E+01	9.07E+00 ✓	8.71E+00 ✓
essai B	1.89E+01	2.68E+01	1.63E+01	1.45E+01	3.63E+00 ✓
essai C	3.48E+01	1.94E+01	1.63E+01	5.44E+00 ✓	1.09E+01
essai D	2.66E+01	2.18E+01	7.26E+00	1.63E+01	5.08E+00 ✓
q_permanents (mm/h)	<u>2.84E+01</u>	<u>2.25E+01</u>	<u>1.36E+01</u>	<u>1.13E+01</u>	<u>7.08E+00</u>

Figure 3.1 : q\_permanents en fonction de la lame d'eau précipitée Parcelles A

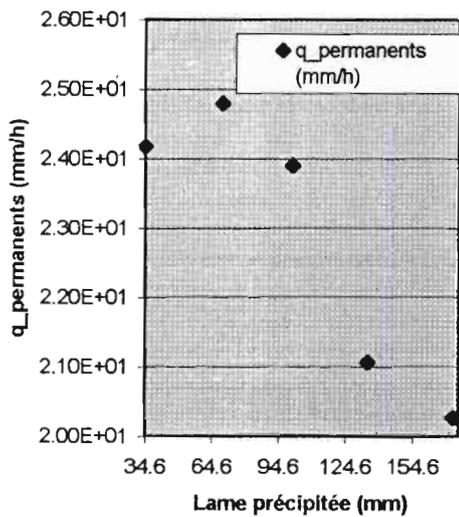
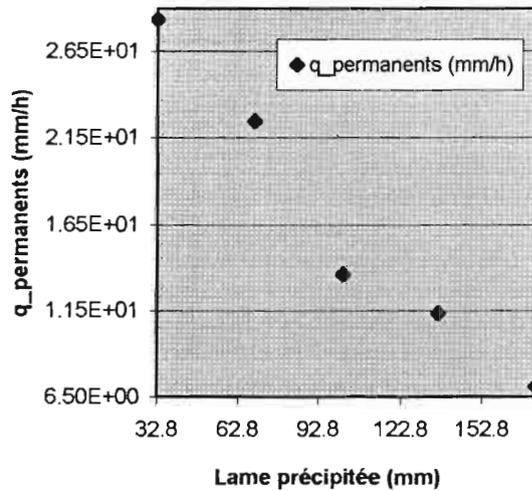


Figure 3.2 : q\_permanents en fonction de la lame d'eau précipitée Parcelles B



Sur ces courbes, il apparaît une décroissance du flux en fonction du nombre de pluies. L'existence d'une croûte de surface, qui diminue l'infiltration dans le sol et qui s'épaissit au fur et à mesure que la quantité de pluies augmente, est donc envisageable.

Cependant le flux décroît plus rapidement pour les parcelles B et y atteint sa valeur minimale après 5 pluies. Nous pensons alors que la croûte formée n'est pas la même pour les deux types de labour. En effet les parcelles B sont plus favorables au ruissellement que les parcelles A. Donc une croûte de ruissellement peut y couvrir une croûte structurale et même y cohabiter avec une croûte d'érosion, tandis que la parcelle A est plus propice à la formation d'une croûte structurale et / ou de décantation.

### **3.2.2 Le calcul des perméabilités**

L'application de la loi de Darcy nécessite également la détermination des gradients de charge hydraulique,  $i$  :

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (3.4)$$

$\Delta H$  (cm H<sub>2</sub>O) est la variation de la charge hydraulique entre deux points de l'écoulement, et  $\Delta L$  (cm) la distance qui les sépare.

Pour la détermination de  $\Delta H$ , trois tensiomètres T1, T2 et T3 sont installés en série respectivement aux profondeurs  $Z_{T_1}, Z_{T_2}, Z_{T_3}$  ( $Z_{T_1} \leq Z_{T_2} \leq Z_{T_3}$ ) par rapport au bords du cylindre. Les lectures de potentiels, en fonction de la durée de l'essai pour les parcelles et les essais de l'annexe I, sont consignées à l'annexe III.

Ces lectures sont ensuite converties en cmH<sub>2</sub>O selon la relation :

$$cmH_2O = (mV_{\pm} + a) * b \quad (3.5)$$

a et b sont des paramètres intrinsèques aux tensiomètres et déterminés par étalonnage. Ils sont représentés, ainsi que les numéros des tensiomètres utilisés pour chaque essai, à l'annexe IV. Les profondeurs  $Z_{T_i}$ , les hauteurs des capteurs  $Z_{C_i}$  de même que les épaisseurs de sable

correspondantes y sont également représentées.

Cependant les capteurs de pression n'étant pas placés aux points de mesures, une correction des pressions lues s'impose pour obtenir les potentiels matriciels réellement mesurés à ces points :

$$h(cmH_2O) = [(mv + a)xb] - Z_T + Z_C \quad (3.6)$$

L'axe vertical est orienté positivement vers le haut.

La charge hydraulique aux points de mesure est donnée par :

$$H_T(cmH_2O) = h_T(cmH_2O) + Z_T \quad (3.7)$$

La couche de sol est subdivisée en 3 tranches. Une tranche supérieure (0-1) comprise entre la surface du sol et  $T_1$ , une tranche intermédiaire (1-2) comprise entre  $T_1$  et  $T_2$  et une tranche inférieure (2-3) comprise entre  $T_2$  et  $T_3$ . Les gradients de charge,  $i$ , pour chaque tranche sont alors déterminés en fonction de la durée écoulée depuis le départ du chronomètre. Les flux de l'annexe I sont utilisés pour le calcul des perméabilités des tranches successives ( $K_{0-1}$ ,  $K_{1-2}$ ,  $K_{2-3}$ ) pour les mêmes durées  $t(s)$ . La perméabilité de la couche totale de sol est également calculée. La couche totale de sol est d'abord considérée comprise entre la surface du sol et  $T_3$ , puis entre  $T_1$  et  $T_3$ . Nous obtenons respectivement les perméabilités  $K_{0-3}$  et  $K_{1-3}$ .

Pour les cas où il n'y a que deux tensiomètres seules deux tranches de perméabilité  $K_{0-1}$  et  $K_{1-2}$  existent. La perméabilité de la couche totale est dans ce cas donnée par  $K_{0-2}$  et  $K_{1-2}$  correspondant respectivement à  $K_{0-3}$  et  $K_{1-3}$  déjà définies.

Par application de l'équation (1.11) et vu que le flux est déterminé par intervalle de temps, nous montrons que la perméabilité s'exprime par :

$$K(t) = \frac{q(t)}{\left( \frac{i(t) + i(t-1)}{2} \right)} \quad (3.8)$$

Les gradients de charge des parcelles et essais de l'annexe I, calculés pour les tranches supérieure (gradH<sub>0-1</sub>), intermédiaire, (gradH<sub>1-2</sub>), inférieure (gradH<sub>2-3</sub>) et totale (gradH<sub>0-3</sub> et gradH<sub>1-3</sub>), ainsi que les perméabilités correspondantes sont présentés à l'annexe V.

Nous approximations la perméabilité de chaque tranche d'un essai, à la moyenne des six dernières valeurs de perméabilité obtenues lors de l'essai. En effet nous pensons que le régime permanent, nécessaire pour l'application de la forme linéaire de la loi de Darcy, est atteint bien avant les 6 dernières mesures. Le nombre de points observés sur les paliers des figures de l'annexe II nous conforte dans cette position. Ces valeurs de perméabilités sont consignées aux tableaux 3.2 et 3.3 respectivement pour les parcelles A et B, de même que les profondeurs des tranches considérées. Notons que pour les essais où un seul tensiomètre a normalement fonctionné, une seule valeur de perméabilité a été déterminée.

Tableau 3.2 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm/h), parcelle A

		1ère pluie		2ème pluie		3ème pluie		4ème pluie		5ème pluie	
		Pr. (cm)	K (mm / h)	Pr. (cm)	K (mm / h)	Pr. (cm)	K (mm / h)	Pr. (cm)	K (mm / h)	Pr. (cm)	K (mm / h)
essai A	tranche sup.	0 - 2.3	-1.42E+01	0 - 5.4	4.43E+00	0 - 2.2	-2.81E+00	0 - 2.6	-5.00E+00	0 - 3	1.89E-01
	tranche int.:	2.3 - 5.6	-1.00E+01		$7,54 \cdot 10^{-2}$	2.2 - 6.3	4.14E+00	2.6 - 6.2	3.25E+00	3 - 6.1	5.90E+00
	tranche inf.:	5.6 - 10.8	2.18E+00	5.4 - 10.8	-5.08E+00	6.3 - 9.7	-1.45E+01	6.2 - 9.2	-2.76E+00	6.1 - 10.0	-1.82E+00
	tranche tot.:	0 - 10.8	8.93E+00	0 - 10.8	-3.05E+01	0 - 9.7	1.50E+01	0 - 9.2	-3.57E+01	0 - 10.0	1.05E+02
	tranche tot1:	2.3 - 108	6.19E+00		$7,46 \cdot 10^{-2}$	2.2 - 9.7	1.04E+01	2.6 - 9.2	7.13E+02	3 - 10.0	-6.88E+01
essai B	tranche sup.		$169 \cdot 10^{-2}$	0 - 6.1	-2.25E+01	0 - 2.7	-2.47E+01	0 - 2.8	-5.29E+00	0 - 2.7	-1.43E+01
	tranche int.:				$6,99 \cdot 10^{-3}$	2.7 - 6	-5.58E+00	2.8 - 5.9	3.64E+00	2.7 - 6.2	2.39E+01
	tranche inf.:					6 - 9.5	2.04E+00	5.9 - 9.7	-3.32E+00	6.2 - 10.1	4.72E+00
	tranche tot.:					0 - 9.5	8.35E+00	0 - 9.7	-1.49E+01	0 - 10.1	1.23E+01
	tranche tot1:					2.7 - 9.5	6.08E+00	2.8 - 9.7	-2.36E+01	2.7 - 10.1	7.81E+00
essai C	tranche sup.	0 - 1.7	-1.26E+00	0 - 5.8	9.94E+00	0 - 2.8	-1.20E+01	0 - 1.8	2.86E-01	0 - 2.8	-6.01E+01
	tranche int.:				$1,84 \cdot 10^{-3}$	2.8 - 6.5	5.29E+00	1.8 - 6.5	-4.86E+00	2.8 - 6.5	2.53E+00
	tranche inf.:			5.8 - 11	-7.09E+00	6.5 - 9.6	-3.43E+00	6 - 11.7	3.55E+00	6.5 - 9.8	3.52E+00
	tranche tot.:	0 - 11.5	7.45E+00	0 - 11	-2.11E+01	0 - 9.6	-2.43E+01	0 - 11.7	7.24E+00	0 - 9.8	4.43E+00
	tranche tot1:	1.7 - 11.5	4.39E+00		$9,84 \cdot 10^{-3}$	2.8 - 9.6	-3.96E+01	1.8 - 11.7	1.47E+01	2.8 - 9.8	2.93E+00
essai D	tranche sup.	0 - 6.8	-4.00E+01	0 - 5.6	-8.17E+00	0 - 3.2	-3.05E+01	0 - 3.4	-1.69E+01	0 - 2.5	-5.83E+00
	tranche int.:				$1,65 \cdot 10^{-3}$	3.2 - 6	4.75E+00	3 - 5.9	-4.32E-01	2.5 - 5.8	2.99E+00
	tranche inf.:			5.6 - 10.3	6.48E+00	6 - 9.8	-5.72E+00	5.9 - 9.2	1.34E+00	5.8 - 9.4	-8.60E+00
	tranche tot.:			0 - 10.3	2.52E+01	0 - 9.8	-1.59E+01	0 - 9.2	4.82E+00	0 - 9.4	2.06E+01
	tranche tot1:					3.2 - 9.8	-1.88E+01	3 - 9.2	3.45E+00	2.5 - 9.4	9.61E+00

$4,19 \cdot 10^{-3}$   
 $7,02 \cdot 10^{-3}$

$8,42 \cdot 10^{-4}$   
 $1,79 \cdot 10^{-2}$   
 $1,49 \cdot 10^{-3}$

$7,86 \cdot 10^{-3}$

$3,45 \cdot 10^{-3}$   
 $4,44 \cdot 10^{-2}$

$1,2 \cdot 10^{-2}$   
 $3,74 \cdot 10^{-2}$   
 $2,41 \cdot 10^{-3}$   
 $4,26 \cdot 10^{-3}$

**Tableau 3.3 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm/h), parcelle B**

		1ère pluie		2ème pluie		3ème pluie		4ème pluie		5ème pluie	
		Pr. (cm)	K (mm / h)								
<b>essai A</b>	tranche sup.			0 - 6.1	6.48E+01	0 - 3.2	-7.27E+00	0 - 2.4	4.14E-01	0 - 3	7.78E-01
	tranche int.:					3.2 - 6	1.93E+00	2.4 - 5.9	3.74E+01	3 - 6.3	1.66E+04
	tranche inf.:			6.1 - 11.4	8.57E+01	6 - 9.6	-2.05E+00	5.9 - 9.9	2.28E+00	6.3 - 9.7	-2.82E+00
	tranche tot.:	0 - 12.2	1.12E+01	0 - 11.4	-2.23E+01	0 - 9.6	-1.49E+01	0 - 9.9	2.18E+00	0 - 9.7	9.61E+00
	tranche tot1.:					3.2 - 9.6	-2.13E+01	2.4 - 9.9	4.54E+00	3 - 6.7	-5.51E+00
<b>essai B</b>	tranche sup.			0 - 5.8	-6.84E-01	0 - 2.9	-4.93E+00	0 - 2.9	-9.50E-01	0 - 3.3	4.28E-01
	tranche int.:					2.9 - 6.6	2.21E+00	2.9 - 6.1	1.40E+00	3.3 - 7.5	6.05E-01
	tranche inf.:			5.8 - 10.6	9.25E-01	6.6 - 10.5	-3.45E+00	6.1 - 9.5	2.92E+00	7.5 - 10	-4.86E-01
	tranche tot.:	0 - 10.9	8.53E+00	0 - 10.6	8.06E+00	0 - 10.5	5.83E+01	0 - 9.5	4.03E+00	0 - 10	1.42E+00
	tranche tot1.:					2.9 - 10.5	1.54E+01	2.9 - 9.5	1.90E+00	3.3 - 10	3.78E+00
<b>essai C</b>	tranche sup.	0 - 1	2.61E+00	0 - 5.9	4.28E+00	0 - 3.3	-4.97E+00	0 - 2.1	7.24E-01	0 - 2.9	-1.97E+00
	tranche int.:					3.3 - 6	1.42E+00	2.1 - 6.2	2.52E+00	2.9 - 6.2	9.11E-01
	tranche inf.:			5.9 - 10.8	-5.76E+00	6 - 9.5	-1.82E+00	6.2 - 9.8	2.91E+00	6.2 - 9.2	-2.94E+00
	tranche tot.:	0 - 11.2	6.01E+00	0 - 10.8	8.24E+01	0 - 9.5	-2.20E+01	0 - 9.8	1.69E+00	0 - 9.2	6.16E+00
	tranche tot1.:	1 - 11.2	5.72E+00			3.3 - 9.5	-4.00E+01	2.1 - 9.8	2.52E+00	2.9 - 9.2	2.44E+00
<b>essai D</b>	tranche sup.	0 - 2.9	-1.20E+01	0 - 6.1	-2.49E+01			0 - 2.8	1.19E+01	0 - 3.3	1.32E+00
	tranche int.:	2.9 - 6.8	5.83E+00					2.8 - 6.2	3.39E+00	3.3 - 6.5	-4.86E-01
	tranche inf.:	6.8 - 10.3	-4.25E+00			6.7 - 10	2.75E+00	6.2 - 9.2	1.92E+00	6.5 - 10.3	-7.38E-01
	tranche tot.:	0 - 1.03	-3.67E+01			0 - 10	1.83E+00	0 - 9.2	3.48E+00	0 - 10.3	-9.97E-01
	tranche tot1.:	2.9 - 10.3	-1.02E+01					2.8 - 9.2	2.40E+00	3.3 - 10.3	-5.94E-01

Nous constatons que sur 156 valeurs de perméabilité calculées dans les tableaux 3.2 et 3.3, 66 sont négatives. Soit un pourcentage de 42%. Cette situation peut être due, entre autres, aux phénomènes suivants :

- un ou plusieurs des tensiomètres installés n'a pas très bien fonctionné, et a donné des lectures de potentiels aberrantes,
- l'existence d'une portion d'air, aussi minime soit - elle, dans la matrice solide du sol, et qui subit une remontée au fur et à mesure que le front d'humectation progresse. Ceci provoque une montée en tension des capteurs situés dans les zones saturées ou tendant vers la saturation,
- l'étalonnage des tensiomètres n'est pas correct. Les valeurs de a et b sont ainsi biaisées et ont affecté les calculs de potentiels,
- le régime permanent n'est pas réellement atteint.

Les valeurs positives des tableaux 3.2 et 3.3 sont résumées aux tableaux 3.2.1 et 3.3.1 respectivement. Les figures 3.3 à 3.12 montrent la variation des valeurs extrêmes des perméabilités calculées en fonction du nombre de pluies pour chaque tranche. Ces valeurs extrêmes sont résumées aux tableaux 3.4 et 3.5.

Tableau 3.2.1 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm/h) positive, parcelle A

		1ère pluie		2ème pluie		3ème pluie		4ème pluie		5ème pluie	
		Pr. (cm)	K (mm / h)								
<b>essai A</b>	tranche sup.			0 - 5.4	4.43E+00					0 - 3	1.89E-01
	tranche int.:					2.2 - 6.3	4.14E+00	2.6 - 6.2	3.25E+00	3 - 6.1	5.90E+00
	tranche inf :	5.6 - 10.8	2.18E+00								
	tranche tot :	0 - 10.8	8.93E+00			0 - 9.7	1.50E+01			0 - 10.0	1.05E+02
	tranche tot1 :	2.3 - 108	6.19E+00			2.2 - 9.7	1.04E+01	2.6 - 9.2	7.13E+02		
<b>essai B</b>	tranche sup.										
	tranche int.:							2.8 - 5.9	3.64E+00	2.7 - 6.2	2.39E+01
	tranche inf :					6 - 9.5	2.04E+00			6.2 - 10.1	4.72E+00
	tranche tot :					0 - 9.5	8.35E+00			0 - 10.1	1.23E+01
	tranche tot1 :					2.7 - 9.5	6.08E+00			2.7 - 10.1	7.81E+00
<b>essai C</b>	tranche sup.			0 - 5.8	9.94E+00						
	tranche int.:					2.8 - 6.5	5.29E+00	0 - 1.8	2.86E-01	2.8 - 6.5	2.53E+00
	tranche inf :							6 - 11.7	3.55E+00	6.5 - 9.8	3.52E+00
	tranche tot :	0 - 11.5	7.45E+00					0 - 11.7	7.24E+00	0 - 9.8	4.43E+00
	tranche tot1 :	1.7 - 11.5	4.39E+00					1.8 - 11.7	1.47E+01	2.8 - 9.8	2.93E+00
<b>essai D</b>	tranche sup.										
	tranche int.:					3.2 - 6	4.75E+00			2.5 - 5.8	2.99E+00
	tranche inf :			5.6 - 10.3	6.48E+00			5.9 - 9.2	1.34E+00		
	tranche tot :			0 - 10.3	2.52E+01			0 - 9.2	4.82E+00	0 - 9.4	2.06E+01
	tranche tot1 :							3 - 9.2	3.45E+00	2.5 - 9.4	9.61E+00

Tableau 3.3.1 : Moyennes des 6 dernières valeurs de K (mm/h) positives, parcelle B

		1ère pluie		2ème pluie		3ème pluie		4ème pluie		5ème pluie	
		Pr. (cm)	K (mm / h)								
<b>essai A</b>	tranche sup.			0 - 6.1	6.48E+01			0 - 2.4	4.14E-01	0 - 3	7.78E-01
	tranche int.:					3.2 - 6	1.93E+00	2.4 - 5.9	3.74E+01	3 - 6.3	1.66E+04
	tranche inf.:			6.1 - 11.4	8.57E+01			5.9 - 9.9	2.28E+00		
	tranche tot.:	0 - 12.2	1.12E+01					0 - 9.9	2.18E+00	0 - 9.7	9.61E+00
	tranche tot1.:							2.4 - 9.9	4.54E+00		
<b>essai B</b>	tranche sup.									0 - 3.3	4.28E-01
	tranche int.:					2.9 - 6.6	2.21E+00	2.9 - 6.1	1.40E+00	3.3 - 7.5	6.05E-01
	tranche inf.:			5.8 - 10.6	9.25E-01			6.1 - 9.5	2.92E+00		
	tranche tot.:	0 - 10.9	8.53E+00	0 - 10.6	8.06E+00	0 - 10.5	5.83E+01	0 - 9.5	4.03E+00	0 - 10	1.42E+00
	tranche tot1.:					2.9 - 10.5	1.54E+01	2.9 - 9.5	1.90E+00	3.3 - 10	3.78E+00
<b>essai C</b>	tranche sup.	0 - 1	2.61E+00	0 - 5.9	4.28E+00			0 - 2.1	7.24E-01		
	tranche int.:					3.3 - 6	1.42E+00	2.1 - 6.2	2.52E+00	2.9 - 6.2	9.11E-01
	tranche inf.:							6.2 - 9.8	2.91E+00		
	tranche tot.:	0 - 11.2	6.01E+00	0 - 10.8	8.24E+01			0 - 9.8	1.69E+00	0 - 9.2	6.16E+00
	tranche tot1.:	1 - 11.2	5.72E+00					2.1 - 9.8	2.52E+00	2.9 - 9.2	2.44E+00
<b>essai D</b>	tranche sup.							0 - 2.8	1.19E+01	0 - 3.3	1.32E+00
	tranche int.:	2.9 - 6.8	5.83E+00					2.8 - 6.2	3.39E+00		
	tranche inf.:					6.7 - 10	2.75E+00	6.2 - 9.2	1.92E+00		
	tranche tot.:					0 - 10	1.83E+00	0 - 9.2	3.48E+00		
	tranche tot1.:							2.8 - 9.2	2.40E+00		

**Tableau 3.4 :Tableau récapitulatif des valeurs extrêmes de K (mm/h) , parcelles A**

Pluies (mm)	tranche supérieure		tranche intermédiaire		tranche inférieure	
	val. min.	val.max	val. min.	val.max	val. min.	val.max
<b>34.6</b>					2.18E+00	2.18E+00
<b>69.6</b>	4.43E+00	9.94E+00			6.48E+00	6.48E+00
<b>100.8</b>			4.14E+00	5.29E+00	2.04E+00	2.04E+00
<b>134.9</b>	2.86E-01	2.86E-01	3.25E+00	3.64E+00	1.34E+00	3.55E+00
<b>172.3</b>	1.89E-01	1.89E-01	2.53E+00	2.39E+01	3.52E+00	4.72E+00

Pluies (mm)	tranche surface_3ème tens		tranche 1er tens._3ème tens.	
	val. min.	val.max	val. min.	val.max
<b>34.6</b>				
<b>69.6</b>	7.45E+00	8.93E+00	4.39E+00	6.19E+00
<b>100.8</b>	2.52E+01	2.52E+01		
<b>134.9</b>	8.35E+00	1.50E+01	6.08E+00	1.04E+01
<b>172.3</b>	4.82E+00	7.24E+00	3.45E+00	7.13E+02

**Tableau 3.5 :Tableau récapitulatif des valeurs extrêmes de K (mm/h), parcelles B**

pluies (mm)	tranche supérieure		tranche intermédiaire		tranche inférieure	
	val. min.	val.max	val. min.	val.max	val. min.	val.max
<b>32.8</b>	2.61E+00	2.61E+00	5.83E+00	5.83E+00		
<b>69.1</b>	4.28E+00	6.48E+01			9.25E-01	8.57E+01
<b>101.8</b>			1.42E+00	2.21E+00	2.75E+00	2.75E+00
<b>136.7</b>	4.14E-01	1.19E+01	1.40E+00	3.74E+01	1.92E+00	2.92E+00
<b>173.8</b>	4.28E-01	1.32E+00	6.05E-01	9.11E-01		

pluies (mm)	tranche surface_3ème tens		tranche 1er tens._3ème tens.	
	val. min.	val.max	val. min.	val.max
<b>32.8</b>				
<b>69.1</b>	6.01E+00	8.53E+00	5.72E+00	5.72E+00
<b>101.8</b>	8.06E+00	8.24E+01		
<b>136.7</b>	1.83E+00	5.83E+01	1.54E+01 ✓	1.54E+01 ✓
<b>173.8</b>	1.69E+00	4.03E+00	1.90E+00	4.54E+00

Parcelles A

Figure 3.3 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche supérieure

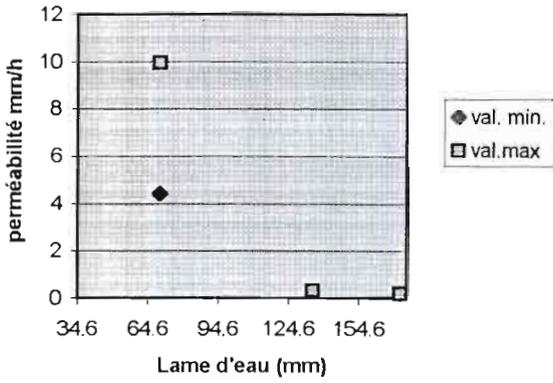


Figure 3.4 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche intermédiaire

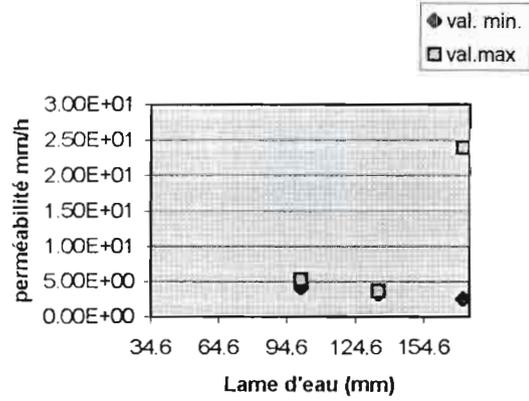


Figure 3.5 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche inférieure

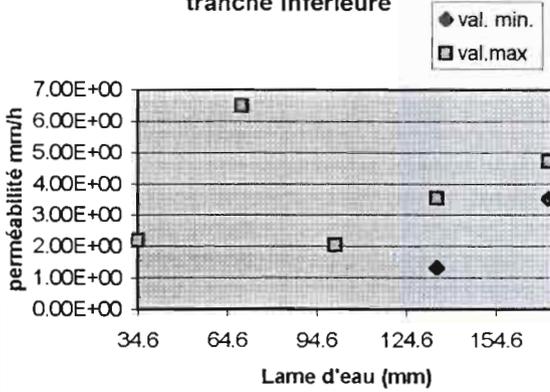


Figure 3.6 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche surface\_3ème tens.

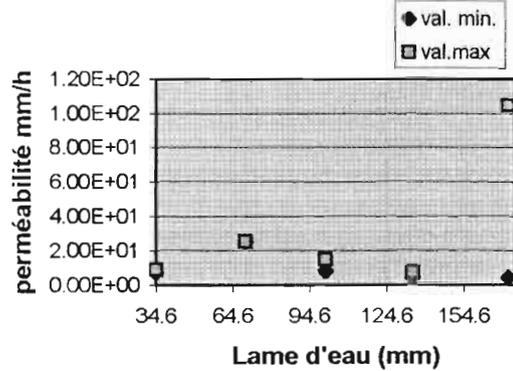
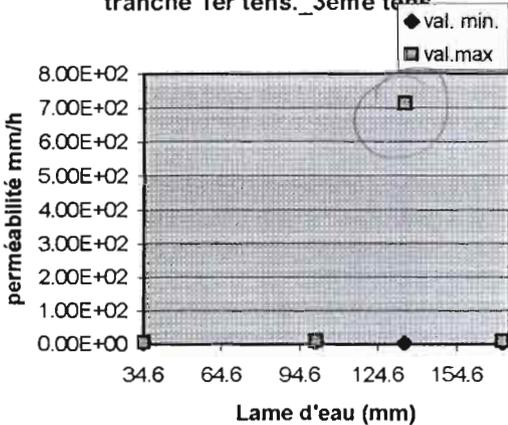


Figure 3.7 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche 1er tens.\_3ème tens



Parcelles B

Figure 3.8 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche supérieure

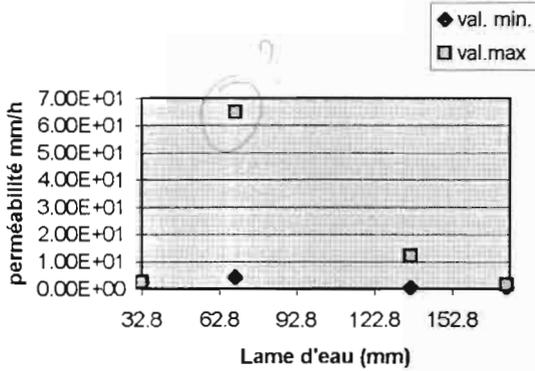


Figure 3.9 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche intermédiaire

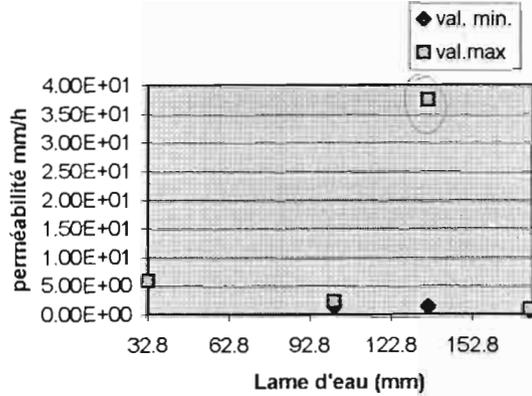


Figure 3.10 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche inférieure

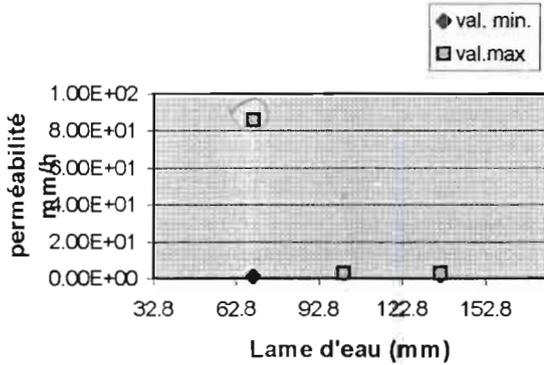


Figure 3.11 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche surface\_3ème tens.

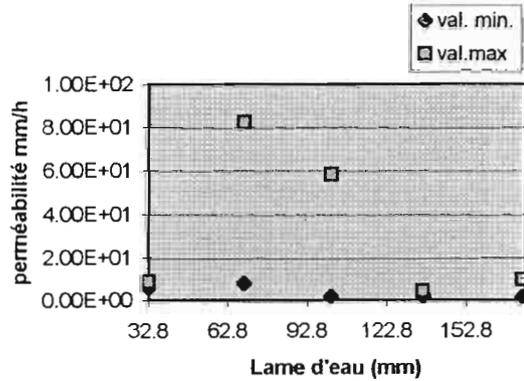
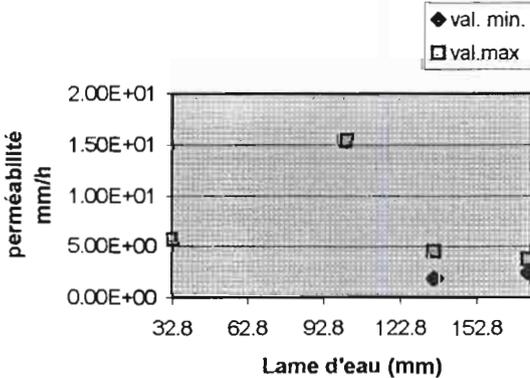


Figure 3.12 : Evolution de la perméabilité en fonction de la lame d'eau précipitée tranche 1er tens.\_3ème tens.



Hormis quelques valeurs, dont celles des premières pluies, nous constatons une décroissance des perméabilités en fonction du nombre de pluies. Ce résultat est valable pour l'ensemble des tranches des parcelles A et B. Cependant vu l'incertitude sur l'exactitude des valeurs de perméabilités des tableaux 3.4 et 3.5, nous ne pouvons ni confirmer, ni dédire la conclusion faite sur la variation de  $q_{\infty}$  en fonction du nombre de pluies. Notons également une augmentation de la perméabilité en fonction de la profondeur, pour l'essentiel des parcelles étudiées.

### **3.3 CALCUL DE LA PERMEABILITE AVEC LA METHODE MONO-TEST UTILISANT LE REGIME PERMANENT**

La méthode mono test est appliquée, dans cette étude, pour la détermination de la perméabilité de la couche du sol comprise entre 0 et 5 cm de profondeur. La perméabilité est calculée avec l'équation (1.22). Les flux permanents sont déjà déterminés et les sorptivités établies suivant la méthode présentée au paragraphe 1.5.3. Aux tableaux 3.6 et 3.7 sont consignées les valeurs de sorptivité trouvées, pour chaque essai et pour chaque parcelle. Les coefficients de régression  $y$  sont également présentés, tandis que les courbes  $f(t^{1/2}) = \frac{dI}{d(t^{1/2})}$  et les droites qui y sont ajustées sont présentées à l'annexe VI, pour les mêmes parcelles et essais que l'annexe I. Quelques valeurs de  $f(t^{1/2})$  et de  $t^{1/2}$  sont calculées à l'annexe I.

Des tableaux 3.6 et 3.7 nous tirons les valeurs extrêmes des sorptivités ( $S_{\max}$  et  $S_{\min}$ ), et calculons les valeurs de perméabilité correspondantes. Seules les ajustements donnant un coefficient de régression supérieur à 0.7 sont retenus. Les résultats sont présentés aux tableaux 3.8 et 3.9. Les variations d'humidité sont calculées à l'annexe VII.

**Tableau 3.6 : Les valeurs de sorptivités, S (mm/s<sup>1/2</sup>)**

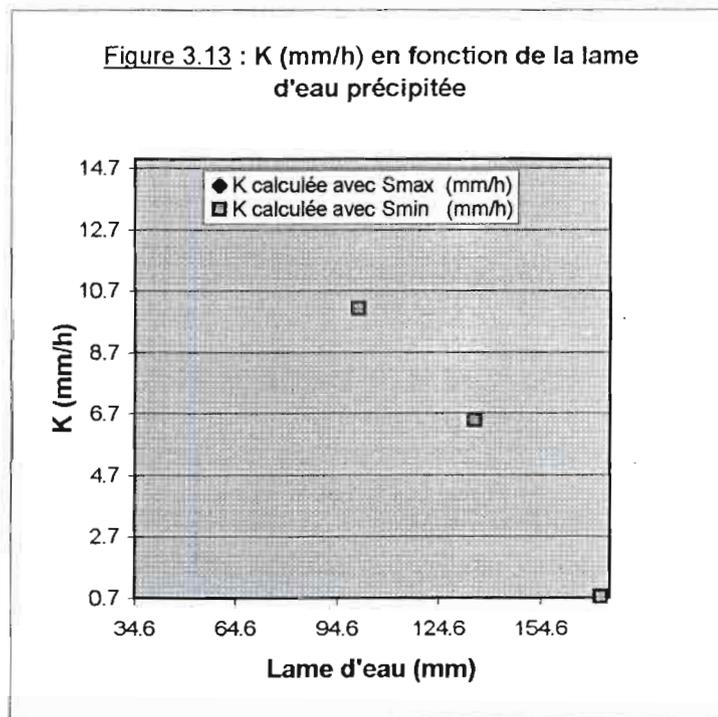
		<b>Parcelles A</b>			
		essai A	essai B	essai C	essai D
1ère pluie	R <sup>2</sup>	0.4757		0.675	0.7809
	S	0.2756		0.4207	0.3372
2ème pluie	R <sup>2</sup>	0.1037	0.8683	0.7635	0.8005
	S	0.6122	0.3712	0.327	0.2553
3ème pluie	R <sup>2</sup>	0.8956	0.8295	0.8536	0.8267
	S	0.218	0.1375	0.2213	0.1326
4ème pluie	R <sup>2</sup>	0.9371	0.7804	0.68	0.54
	S	0.1505	0.1602	0.3198	0.2542
5ème pluie	R <sup>2</sup>	0.289	0.8512	0.7412	0.9324
	S	0.2084	0.1413	0.2386	0.2115

**Tableau 3.7 : Les valeurs de sorptivités, S (mm/s<sup>1/2</sup>).**

		<b>Parcelles B</b>			
		essai A	essai B	essai C	essai D
1ère pluie	R <sup>2</sup>	0.7443	0.7374	0.9627	0.7905
	S	0.5359	0.3712	0.327	0.2553
2ème pluie	R <sup>2</sup>	0.6758	0.6407	0.5835	0.9709
	S	0.3861	0.4026	0.1775	0.0728
3ème pluie	R <sup>2</sup>	0.7045	0.5266	0.7098	0.1591
	S	0.1353	0.2674	0.1995	0.4554
4ème pluie	R <sup>2</sup>	0.4099	0.7783	0.234	0.8829
	S	0.1644	0.0828	0.383	0.0544
5ème pluie	R <sup>2</sup>	0.4288	0.5498	0.332	0.5313
	S	0.236	0.2849	0.2125	0.3848

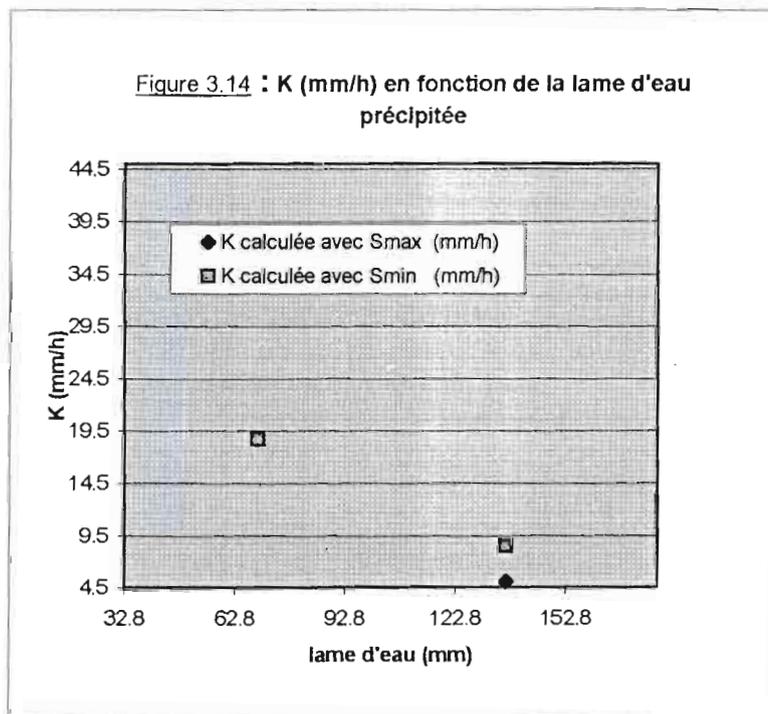
Tableau 3.8 : Les valeurs extrêmes de sorpt., Smax et Smin, et de perm., Kmax et Kmin

	Parcelles A				
Pluies (mm)	34.6	69.6	100.8	134.9	172.3
Smax (mm/h <sup>1/2</sup> )	20.232	22.272	13.278	9.612	14.316
Smin (mm/h <sup>1/2</sup> )	20.232	15.318	7.956	9.03	8.586
q_permanent (mm/h)	2.42E+01	2.48E+01	2.39E+01	2.11E+01	2.03E+01
Var. Humidité pour Smax	0.27	2.60E-01	3.00E-01	2.50E-01	1.50E-01
Var. Humidité pour Smin	0.27	2.80E-01	2.80E-01	3.40E-01	2.30E-01
K calculée avec Smax (mm/h)	-68.1733459	-9.14E+01	-1.19E+01	-1.42E+00	-6.30E+01
K calculée avec Smin (mm/h)	-68.1733459	-2.63E+01	1.01E+01	6.48E+00	7.40E-01



**Tableau 3.9 : les valeurs extrêmes de sorpt., Smax et Smin, et de perm., Kmax et Kmin.**

	Parcelles B				
Pluies (mm)	32.8	69.1	101.8	136.7	173.8
Smax (mm/h <sup>1/2</sup> )	19.62	4.368	11.97	4.968	
Smin (mm/h <sup>1/2</sup> )	15.318	4.368	11.97	3.264	
q_permanent (mm/h)	2.84E+01	2.25E+01	1.36E+01	1.13E+01	7.09E+01
Var. Humidité pour Smax	0.29	0.31	0.22	0.24	
Var. Humidité pour Smin	0.24	0.31	0.22	0.23	
K calculée avec Smax (mm/h)	-52.5034445	18.7142807	-26.0710086	5.074624204	
K calculée avec Smin (mm/h)	-31.1965796	18.7142807	-26.0710086	8.517930815	



Les valeurs de perméabilités négatives mettent en évidence les difficultés d'une bonne estimation de S. De même la valeur de 0.7 que nous avons retenue pour le coefficient  $R^2$  est discutable. Nous constatons cependant une diminution des valeurs positives en fonction de la lame d'eau précipitée (figures 3.13 à 3.14). Elles suivent la même évolution que les courbes de flux permanents, confirmant ainsi l'hypothèse de l'existence d'une croûte de surface qui diminue fortement l'infiltration dans le sol, et qui s'épaissit et / ou change en fonction du nombre de pluies.

### **3.4 ETUDE COMPARATIVE DES DEUX METHODES**

Alors que la loi de Darcy, dans sa forme linéaire, a été établie pour les écoulements permanents (G. de MARSILY, 1981, page 68), la méthode mono – test appartient à la fois au groupe des méthodes établies pour le régime permanent et à celui des méthodes établies pour le régime transitoire (J. P. VANDERVAERE, 1995, page 179). Aussi nous notons l'insuffisance de la loi de Darcy si le régime supposé permanent lors des six dernières mesures ne l'est pas. Ceci est l'une des causes probables de la différence entre les valeurs de perméabilités obtenues pour la tranche supérieure (tableau 3.10). Toutefois l'approximation arbitraire faite pour le calcul des perméabilités avec Darcy (page 36) nous amène à préférer les résultats obtenues avec la méthode mono – test.

Tableau 3.10 : Tableau comparatif des K obtenues avec les deux méthodes

	Loi de Darcy			
Parcelles	4A	5A	2B	4B
Profondeur de la couche de sol (cm)	0 - 1.8	0 - 3	0 - 5.9	0 - 2.4
K (mm/h)	0.286	0.189	4.28	0.414

	Méthode mono test			
Parcelles	4A	5A	2B	4B
Profondeur de la couche de sol (cm)	0 - 5	0 - 5	0 - 5	0 - 5
K (mm/h)	6.48E+00	7.10E-01	18.71	8.52 - 5.07

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce projet de fin d'études a tenté de caractériser les propriétés hydrodynamiques des sols de Thyse Kaymor par la méthode de l'infiltromètre TRIMS couplée à l'utilisation de tensiomètres. Il a également tenté d'établir l'influence des croûtes de surface sur ces caractéristiques. Une étude expérimentale sur le terrain a d'abord permis la détermination de tous les paramètres nécessaires au calcul de perméabilité. Ensuite une première approche a permis d'établir l'évolution du flux permanent d'infiltration en fonction du nombre de pluies. Puis la loi de Darcy, dans sa forme linéaire, et la méthode mono – test utilisant le régime permanent ont permis de calculer de deux manières différentes les perméabilités. Rappelons que la méthode mono – test a été développée par Smettem et Clothier (J. P. VANDERVAERE, 1995).

La caractérisation du flux permanent en fonction du nombre de pluies a permis de voir que ce dernier est fortement influencé par l'existence de la croûte de surface. En effet la courbe  $q_{\infty}$  (lambe d'eau) subit une forte variation entre la première et la cinquième pluie. De plus, cette variation est plus importante pour les parcelles labourées parallèlement à la pente du terrain que pour celles labourées perpendiculairement à la pente. Le flux passe de  $2.84 \cdot 10^{-1}$  mm / h à 7.08 mm / h pour les premières et de  $2.42 \cdot 10^{-1}$  mm / h à  $2.03 \cdot 10^{-1}$  mm / h pour les secondes.

Les mesures tensiométriques exploitées et utilisées, dans l'équation de Darcy, ont donné des valeurs acceptables de perméabilités qui, à défaut de confirmer n'ont pas infirmé la conclusion faite sur la variation des courbes  $q_{\infty}$  (lame d'eau) . Cependant les 42% des résultats non utilisables obtenus, montrent les difficultés d'utilisation, sur le terrain, des tensiomètres dont la mise en œuvre est très délicate. Les coefficients de régression obtenus lors de la détermination de la sorptivité sont assez bons. Il sont très souvent supérieurs à 0.7. Les perméabilités qu'ils ont permis de calculer ont un ordre de grandeur de  $10^{+1}$  mm / h, et elles confirment l'existence d'une croûte de surface qui influence fortement l'infiltration lors de la saison des pluies.

Aussi, nous pensons qu'une utilisation des propriétés hydrodynamiques caractérisées dans cette étude est possible, sous réserve de les vérifier par une étude analogue dont la phase expérimentale est faite au laboratoire. Si elle devrait encore se faire in situ, nous suggérons une maîtrise de l'ensemble des phénomènes énumérés à la page 39. Ces derniers nous semblent être, entre autres, à l'origine des valeurs de perméabilités non exploitables.

Pour terminer précisons que la démarche suivie dans cette étude et l'interprétation faite des résultats ne sont pas figées. Elles peuvent être améliorées.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), DACOSTA (H.), PEREZ (P.), SARR (P. S.), VALENTIN (C.), 1991 novembre. Programme CEE – CIRAD N° T52A 0017 FCD ; Rapport de synthèse : Morpho - pédologie Dakar.

CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1989. Les états de surface de la zone sahéenne : Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM Paris.

DIATTA (Malainy), novembre 1994. Mise en défens et techniques agro forestières au Sine Saloum (Sénégal), Effets sur la conservation de l'eau, du sol et sur la production primaire. Thèse de Doctorat de l'Université Scientifique L. Pasteur (Strasbourg I).

De MARSILY (G.), 1981. Hydrogéologie quantitative. Collection sciences de la terre. Masson Paris New York Barcelone Milan Mexico Rio de Janeiro

PEREZ (P.), 1994 mai. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum (Sénégal). Du diagnostic à l'aménagement de parcelle. Thèse présentée à l'E.N.S.A Montpellier.

SARR (D.), Février 1992. Programme CEE – CIRAD N° T52A 0017 FCD ; Rapport de synthèse : Socio – Economie. Dakar.

VANDERVAERE (Jean Pierre), 1995 octobre. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltromètre à disques. Analyse critique des régimes pseudo – permanents. Méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Thèse présentée à l'Université J. FOURIER, Grenoble I.

## LISTE DES ANNEXES

**Annexe I** : Exemple de lectures de niveaux d'eau,  $h$  (cm), des profondeurs et hauteurs de capteur,

calcul de  $I$  (mm), calcul de  $q$  (mm / s), calcul de  $\frac{dI}{dt^{1/2}}$ . Parcelles 3A (essai C), 2B (essai A) et 3B (essai A)

**Annexe II** : Courbes  $I(t)$  et  $q(t)$  pour les parcelles 3A (essai C), 2B (essai A), 3B (essai A) et 5A (essai B).

**Annexe III** : Lectures des potentiels matriciels pour les parcelles 3A (essai C), 2B (essai A) et 3B (essai A).

**Annexe IV** : Paramètres d'étalonnage des tensiomètres, profondeurs des tensiomètres et hauteur des capteurs.

**Annexe V** : Les valeurs de  $\text{grad}H$  et de  $K$  pour les parcelles 3A (essai C), 2B (essai A) et 3B (essai A).

**Annexe VI** : Les droites de régression de la méthode mono – test pour les parcelles 3A (essai C), 2B (essai A) et 3B (essai A).

**Annexe VII** : Le calcul des humidités utilisées dans la méthode mono – test.

## Parcelle 3A

## essai C

tps (s)	h (cm)	l (mm)	tps-centré	q (mm/s)	SQR(t)	dl/dSQR(t)
0	0.6	-0.97				
5	2	0.73	2.5	3.388E-01	1.58	0.76
10	3.1	2.06	7.5	2.662E-01	2.74	1.44
15	3.9	3.02	12.5	1.936E-01	3.54	1.36
20	4.8	4.11	17.5	2.178E-01	4.18	1.82
30	5.8	5.32	25	1.210E-01	5.00	1.20
40	6.5	6.17	35	8.469E-02	5.92	1.00
50	7.1	6.90	45	7.259E-02	6.71	0.97
75	8.1	8.11	62.5	4.839E-02	7.91	0.76
105	9.2	9.44	90	4.436E-02	9.49	0.84
120	9.5	9.80	112.5	2.420E-02	10.61	0.51
150	10.1	10.53	135	2.420E-02	11.62	0.56
180	10.7	11.25	165	2.420E-02	12.85	0.62
240	11.6	12.34	210	1.815E-02	14.49	0.52
300	12.4	13.31	270	1.613E-02	16.43	0.53
360	13.2	14.28	330	1.613E-02	18.17	0.59
420	13.8	15.00	390	1.210E-02	19.75	0.48
540	15	16.45	480	1.210E-02	21.91	0.53
660	16	17.66	600	1.008E-02	24.49	0.49
780	17	18.87	720	1.008E-02	26.83	0.54
900	17.9	19.96	840	9.074E-03	28.98	0.53
1020	18.7	20.93	960	8.066E-03	30.98	0.50
1140	19.5	21.90	1080	8.066E-03	32.86	0.53
1260	20.3	22.87	1200	8.066E-03	34.64	0.56
1380	21.1	23.83	1320	8.066E-03	36.33	0.59
1500	21.9	24.80	1440	8.066E-03	37.95	0.61
1620	22.8	25.89	1560	9.074E-03	39.50	0.72
1740	23.5	26.74	1680	7.057E-03	40.99	0.58
1860	24.3	27.71	1800	8.066E-03	42.43	0.68
2010	25.3	28.91	1935	8.066E-03	43.99	0.71
2100	25.9	29.64	2055	8.066E-03	45.33	0.73
2220	26.7	30.61	2160	8.066E-03	46.48	0.75
2340	27.5	31.58	2280	8.066E-03	47.75	0.77
2460	28.3	32.54	2400	8.066E-03	48.99	0.79
2520	28.7	33.03	2490	8.066E-03	49.90	0.80

## Parcelle 2B

## essai A

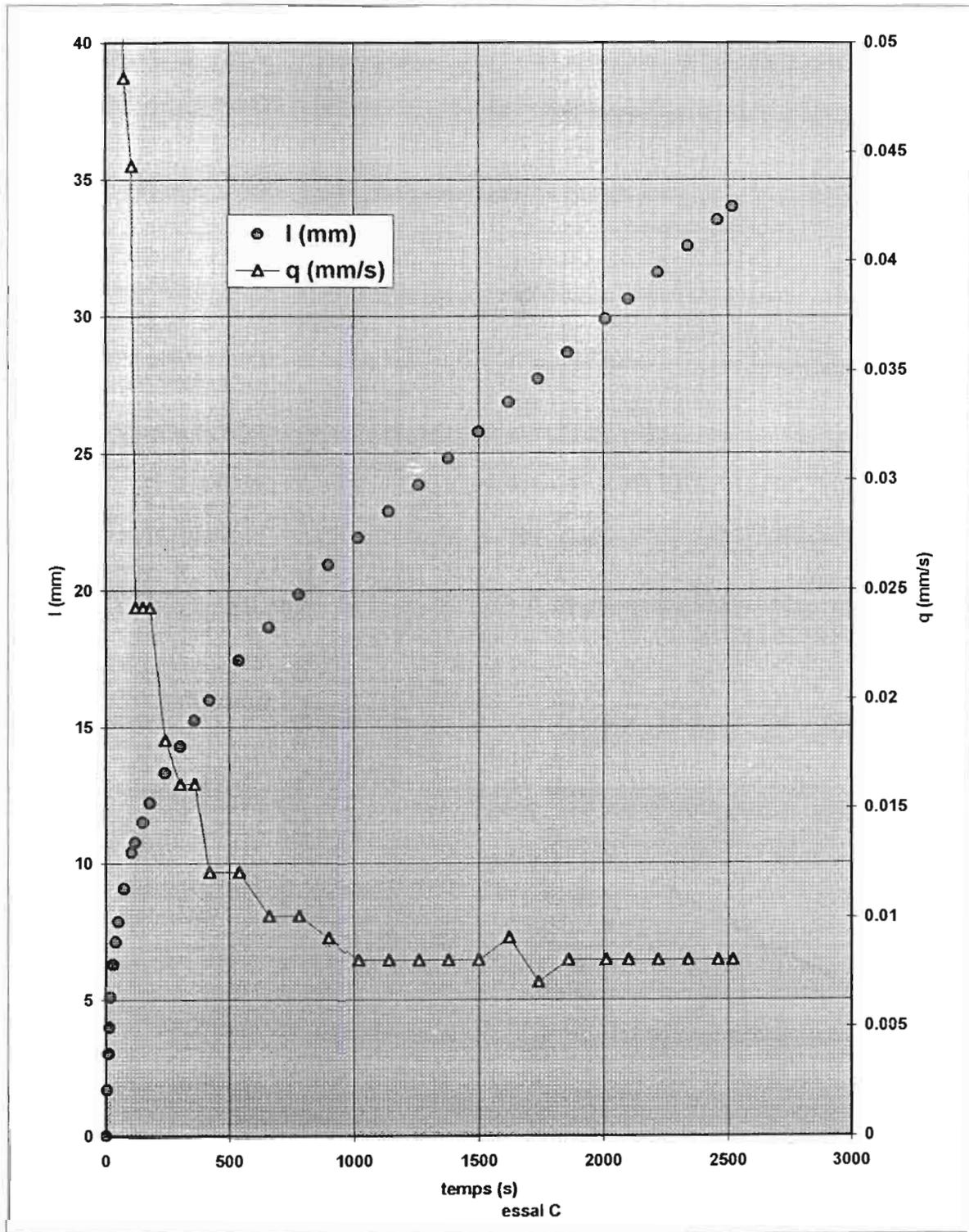
tps (s)	h (cm)	l (mm)	tps-centré	q (mm/s)	SQR(t)	dl/dSQR(t)
0	1	-0.48				
10	3.6	2.66	5	3.146E-01	2.24	0.99
15	4.9	4.23	12.5	3.146E-01	3.54	2.21
20	5.7	5.20	17.5	1.936E-01	4.18	1.62
30	7.1	6.90	25	1.694E-01	5.00	1.69
40	8.4	8.47	35	1.573E-01	5.92	1.86
50	9.1	9.32	45	8.469E-02	6.71	1.13
60	9.6	9.92	55	6.049E-02	7.42	0.90
75	10.3	10.77	67.5	5.646E-02	8.22	0.93
90	10.7	11.25	82.5	3.226E-02	9.08	0.59
105	11.2	11.86	97.5	4.033E-02	9.87	0.80
120	11.6	12.34	112.5	3.226E-02	10.61	0.68
150	12.2	13.07	135	2.420E-02	11.62	0.56
180	12.7	13.67	165	2.016E-02	12.85	0.52
240	13.6	14.76	210	1.815E-02	14.49	0.52
300	14.4	15.73	270	1.613E-02	16.43	0.53
360	15	16.45	330	1.210E-02	18.17	0.44
420	15.7	17.30	390	1.411E-02	19.75	0.56
480	16.3	18.03	450	1.210E-02	21.21	0.51
600	17.4	19.36	540	1.109E-02	23.24	0.51
720	18.3	20.45	660	9.074E-03	25.69	0.47
900	19.6	22.02	810	8.738E-03	28.46	0.50
1080	20.6	23.23	990	6.721E-03	31.46	0.42
1260	21.9	24.80	1170	8.738E-03	34.21	0.60
1440	29.8	34.36	1350	5.310E-02	36.74	3.90
1620	23.9	27.22	1530	-3.966E-02	39.12	-3.10
1800	24.9	28.43	1710	6.721E-03	41.35	0.56
1980	25.8	29.52	1890	6.049E-03	43.47	0.53
2160	26.8	30.73	2070	6.721E-03	45.50	0.61
2340	27.8	31.94	2250	6.721E-03	47.43	0.64
2520	28.8	33.15	2430	6.721E-03	49.30	0.66
2700	29.7	34.24	2610	6.049E-03	51.09	0.62
2880	30.6	35.33	2790	6.049E-03	52.82	0.64
3060	31.5	36.42	2970	6.049E-03	54.50	0.66
3240	32.4	37.50	3150	6.049E-03	56.12	0.68
3420	33.4	38.71	3330	6.721E-03	57.71	0.78
3600	34.3	39.80	3510	6.049E-03	59.25	0.72
3780	35.2	40.89	3690	6.049E-03	60.75	0.73
3960	36.1	41.98	3870	6.049E-03	62.21	0.75

## Parcelle 3B

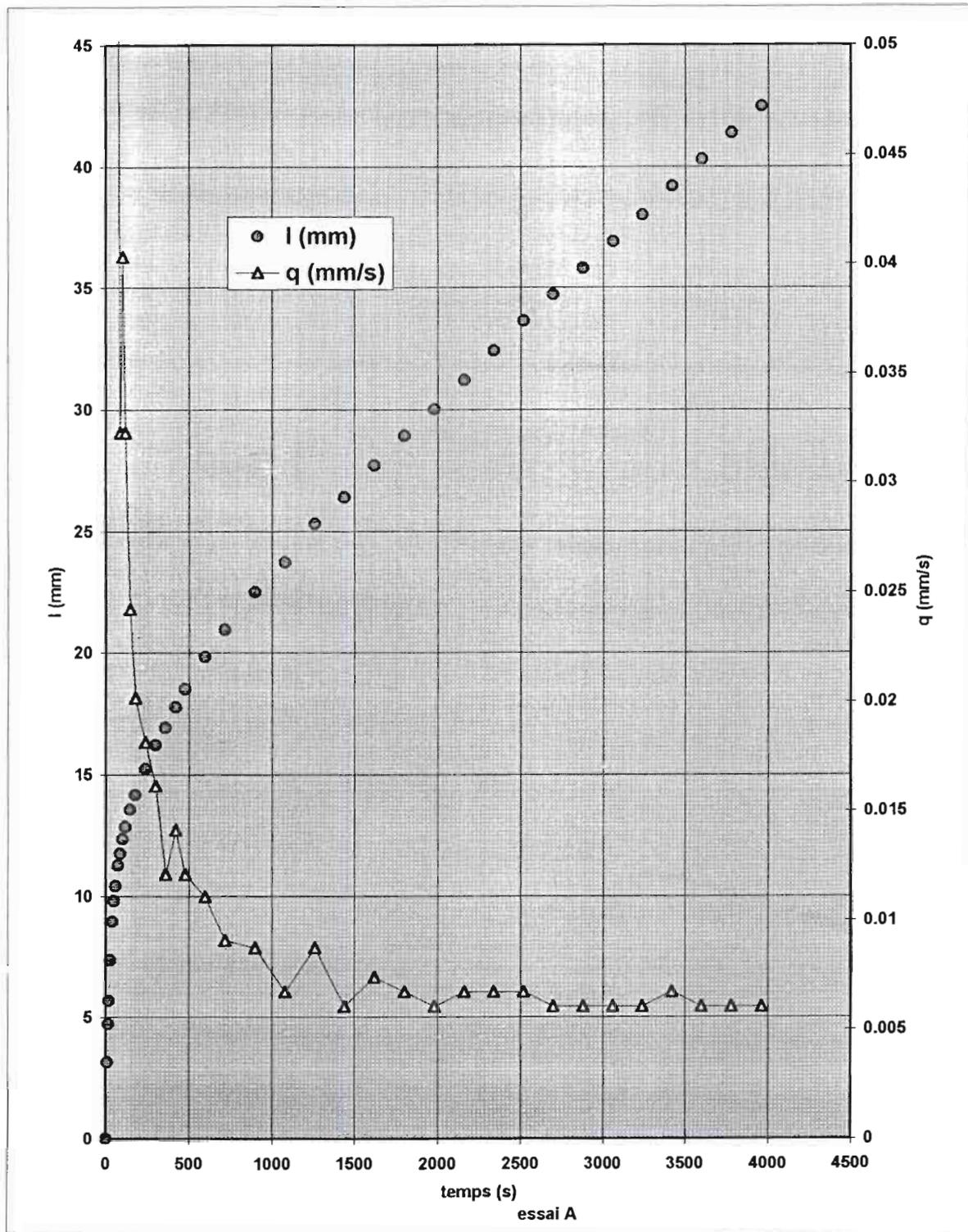
## essai A

tps (s)	h (cm)	l (mm)	tps-centré	q (mm/s)	SQR(t)	dl/dSQR(t)
0	2.3	1.09				
5	3.6	2.66	2.5	3.146E-01	1.58	0.70
10	4.6	3.87	7.5	2.420E-01	2.74	1.31
15	5.4	4.84	12.5	1.936E-01	3.54	1.36
20	6.3	5.93	17.5	2.178E-01	4.18	1.82
30	7.5	7.38	25	1.452E-01	5.00	1.44
40	8.4	8.47	35	1.089E-01	5.92	1.29
50	9.2	9.44	45	9.679E-02	6.71	1.30
60	9.6	9.92	55	4.839E-02	7.42	0.72
75	10.3	10.77	67.5	5.646E-02	8.22	0.93
90	11	11.61	82.5	5.646E-02	9.08	1.02
105	11.4	12.10	97.5	3.226E-02	9.87	0.64
120	11.8	12.58	112.5	3.226E-02	10.61	0.68
150	12.5	13.43	135	2.823E-02	11.62	0.65
180	13	14.03	165	2.016E-02	12.85	0.52
210	13.5	14.64	195	2.016E-02	13.96	0.56
240	13.95	15.18	225	1.815E-02	15.00	0.54
300	14.6	15.97	270	1.311E-02	16.43	0.43
360	15.2	16.70	330	1.210E-02	18.17	0.44
480	16.2	17.91	420	1.008E-02	20.49	0.41
600	17	18.87	540	8.066E-03	23.24	0.37
720	17.7	19.72	660	7.057E-03	25.69	0.36
900	18.6	20.81	810	6.049E-03	28.46	0.34
1080	19.4	21.78	990	5.377E-03	31.46	0.34
1320	20.4	22.99	1200	5.041E-03	34.64	0.35
1560	21.3	24.08	1440	4.537E-03	37.95	0.34
1800	22.05	24.98	1680	3.781E-03	40.99	0.31
2040	22.9	26.01	1920	4.285E-03	43.82	0.38
2280	23.5	26.74	2160	3.025E-03	46.48	0.28
2520	24.4	27.83	2400	4.537E-03	48.99	0.44
2760	25.3	28.91	2640	4.537E-03	51.38	0.47
3000	26	29.76	2880	3.529E-03	53.67	0.38
3240	26.8	30.73	3120	4.033E-03	55.86	0.45
3480	27.6	31.70	3360	4.033E-03	57.97	0.47
3720	28.4	32.67	3600	4.033E-03	60.00	0.48
3960	29.2	33.63	3840	4.033E-03	61.97	0.50
4200	30	34.60	4080	4.033E-03	63.87	0.52
4260	30.2	34.84	4230	4.033E-03	65.04	0.52

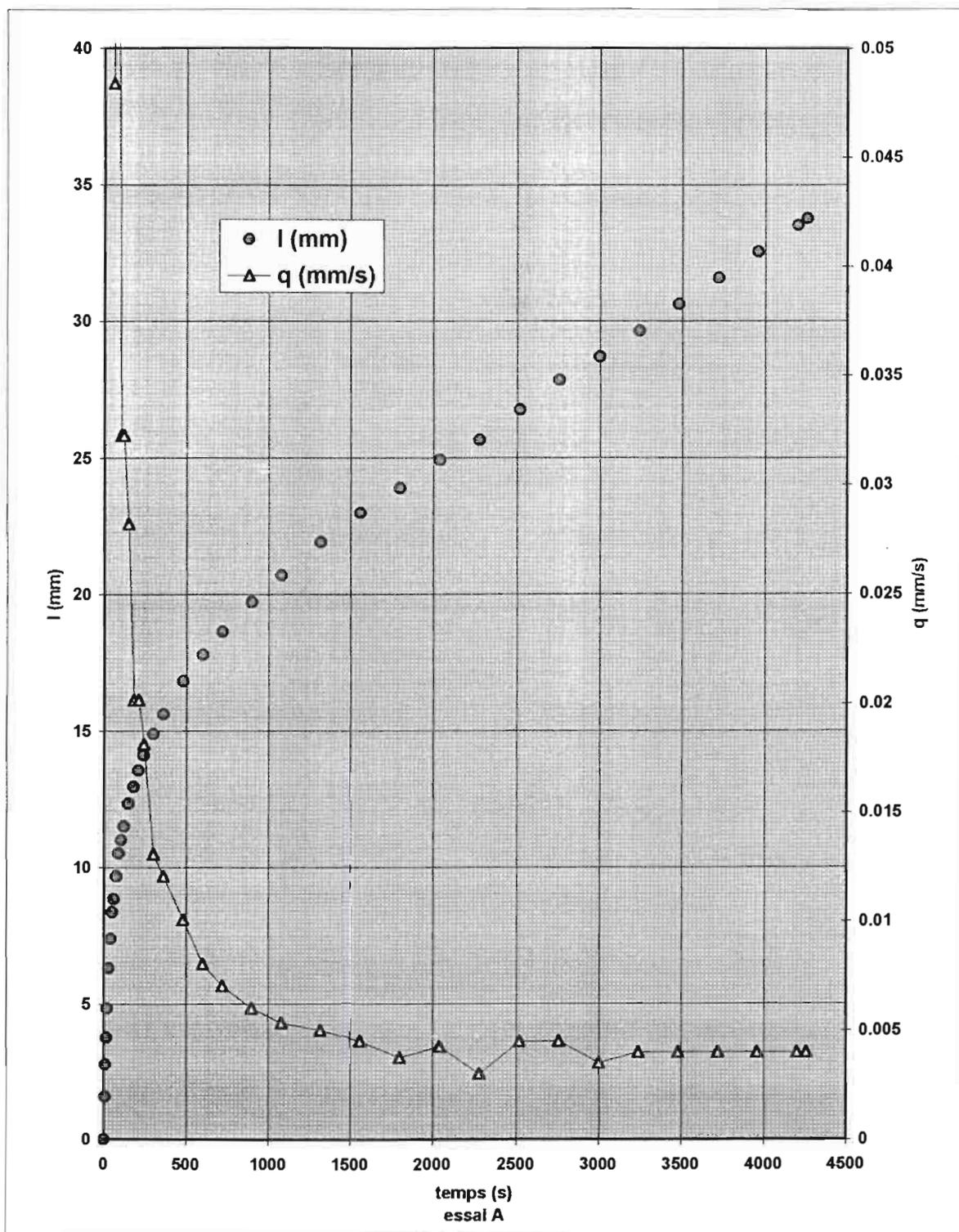
PARCELLE 3A



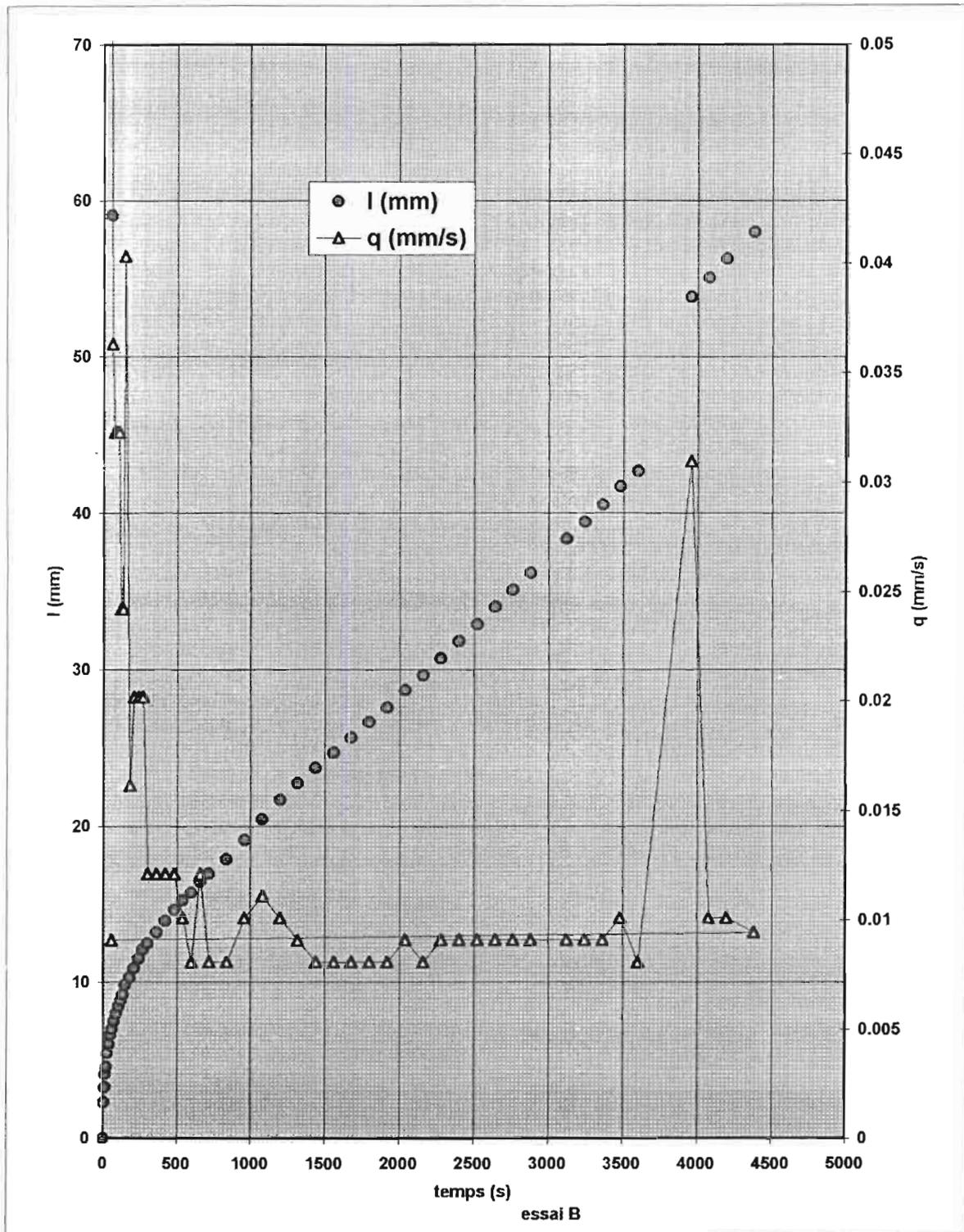
PARCELLE 2B



PARCELLE 3B



PARCELLE 5A



Parcelle 2B			Parcelle 3B				Parcelle 3A			
essai A			essai A				essai C			
Tens. N°			Tens. N°				Tens. N°			
tps (s)	1222	1285	tps (s)	1066	1069	1285	tps (s)	1066	1069	1285
0	-18.55	-13.68	0	-7.94	-15.18	-12.74	0	-20.67	-12.68	-14.11
10	-18.55	-13.74	5	-7.87	-15.21	-12.74	5	-20.71	-12.72	-14.11
15	-18.62	-13.74	10	-7.91	-15.21	-12.74	10	-20.71	-12.72	-14.11
20	-18.61	-13.74	15	-7.87	-15.21	-12.74	15	-20.71	-12.72	-14.15
30	-18.61	-13.81	20	-7.87	-15.21	-12.74	20	-20.71	-12.75	-14.18
40	-18.68	-13.88	30	-7.87	-15.24	-12.78	30	-20.77	-12.78	-14.21
50	-18.68	-13.91	40	-7.9	-15.28	-12.81	40	-20.81	-12.82	-14.21
60	-18.75	-13.94	50	-7.97	-15.31	-12.81	50	-20.84	-12.85	-14.25
75	-18.82	-14.04	60	-8	-15.34	-12.87	75	-20.91	-12.88	-14.31
90	-18.85	-14.11	75	-8	-15.34	-12.87	105	-20.94	-12.98	-14.45
105	-18.92	-14.18	90	-8	-15.41	-12.87	120	-20.97	-13.05	-14.48
120	-18.95	-14.28	105	-8	-15.44	-12.87	150	-20.41	-13.12	-14.58
150	-19.08	-14.41	120	-7.97	-15.44	-12.87	180	-18.78	-13.18	-14.68
180	-19.18	-14.61	150	-7.67	-15.48	-12.87	240	-11.65	-13.38	-14.91
240	-19.28	-14.78	180	-7.1	-15.54	-12.87	300	-3.995	-13.65	-15.15
300	-18.35	-14.98	210	-6.537	-15.64	-13.01	360	-1.498	-13.68	-15.21
360	-15.78	-15.15	240	-5.936	-15.81	-13.11	420	-0.932	-13.85	-15.38
420	-10.81	-15.28	300	-4.736	-16.07	-13.34	540	-0.566	-14.11	-15.71
480	-6.605	-15.48	360	-3.602	-16.31	-13.54	660	-0.366	-13.95	-16.11
600	-3.336	-15.74	480	-1.967	-15.44	-13.74	780	-0.366	-11.65	-16.41
720	-2.402	-16.04	600	-0.967	-12.74	-13.84	900	-0.233	-7.89	-16.54
900	-1.601	-16.44	720	-0.667	-9.4	-13.9	1020	-0.133	-4.694	-16.64
1080	-1.267	-16.88	900	-0.567	-5.035	-14.04	1140	-0.2	-2.696	-14.55
1260	-1.167	-17.41	1080	-0.567	-2.967	-14.2	1260	-0.033	-1.964	-9.69
1440	-1.067	-17.84	1320	-0.5	-1.934	-11.8	1380	-0.033	-1.598	-4.826
1620	-0.9	-17.37	1560	-0.433	-1.733	-3.6	1500	0.067	-1.398	-2.03
1800	-0.967	-16.04	1800	-0.367	-1.6	-1.667	1620	0.033	-1.231	-1.032
1980	-0.867	-13.2	2040	-0.333	-1.5	-1.166	1740	0.067	-1.298	-0.666
2160	-0.767	-9.77	2280	-0.367	-1.466	-0.866	1860	0	-1.132	-0.3
2340	-0.8	-6.735	2520	-0.267	-1.366	-0.633	2010	0	-0.998	-0.033
2520	-0.767	-4.568	2760	-0.333	-1.333	-0.533	2100	0.033	-0.932	0.133
2700	-0.867	-3.067	3000	-0.2	-1.333	-0.433	2220	-0.067	-0.932	0.2
2880	-0.767	-1.834	3240	-0.233	-1.333	-0.366	2340	0	-0.699	0.399
3060	-0.733	-1.133	3480	-0.2	-1.266	-0.3	2460	0.067	-0.899	0.399
3240	-0.8	-0.8	3720	-0.2	-1.333	-0.267	2520	0.067	-0.932	0.433
3420	-0.733	-0.467	3960	-0.267	-1.266	-0.2				
3600	-0.733	-0.1	4200	-0.167	-1.266	-0.2				
3780	-0.733	-0.1	4260	-0.233	-1.332	-0.233				
3960	-0.8	-0.2								

Paramètres d'étalonnage\_ Parcelles A

n° de la parcelle	n° de l'essai	n° du tensiomètre	a	b	Zt	Zc	Zts
1A	A	1066	0	10.336	-2.3	1.5	-1.25
		1224	0.05	10.38	-5.6	-4.8	
		1285	0.5	10.209	-10.8	-3	
	C	1222	0.4	10.424	-1.7	6.6	-0.72
		<del>1218</del>	0.25	10.38	-6.3	0	
		1070	-1	9.655	-11.5	-4.1	
	D	1066	0	10.336	-6.8	0	-1.03
<del>1230</del>		0.05	10.421	-11.4	-2.8		
2A	A	1069	-0.9	10.567	-5.4	-10.2	-2
		1285	0.5	10.209	-10.8	-8.6	
	B	1220	0.1	10.594	-6.1	-4.8	-0.5
		<del>1230</del>	0.05	10.421	-11.1	-3.1	
	C	1222	0.4	10.424	-5.8	3.4	-2.5
		1285	0.5	10.209	-11	3.5	
	D	1226	0.3	10.356	-5.6	4.6	-1.2
1220		0.1	10.594	-10.3	3.8		
3A	A	1066	0	10.336	-2.2	6.7	-1.5
		1069	-0.9	10.567	-6.3	7.3	
		1285	0.5	10.209	-9.7	6	
	B	1066	0	10.336	-2.7	6.5	-0.8
		1285	0.5	10.209	-6	6.5	
		1069	-0.9	10.567	-9.5	6.7	
	C	1066	0	10.336	-2.8	4.5	-0.7
		1069	-0.9	10.567	-6.5	3.5	
		1285	0.5	10.209	-9.6	3.5	
	D	1066	0	10.336	-3.2	6	-0.9
		1069	-0.9	10.567	-6	5.8	
		1285	0.5	10.209	-9.8	5.5	
4A	A	1066	0	10.336	-2.6	5.6	-1.4
		1069	-0.9	10.567	-6.2	5.5	
		1285	0.5	10.209	-9.2	5.7	
	B	1066	0	10.336	-2.8	5.7	-1.4
		1069	-0.9	10.567	-5.9	6.4	
		1285	0.5	10.209	-9.7	6.9	
	C	1072	-0.9	10.566	-1.8	8	-1.6
		1220	0.1	10.594	-6	7.7	
		1057	-1.1	10.535	-11.4	6	
	D	1066	0	10.336	-3	4.6	-1.1
		1285	0.5	10.209	-5.9	5	
		1068	-0.7	10.35	-9.2	4	
5A	A	1065	-1	10.5	-3	3.9	-2.5
		1057	-1.1	10.535	-6.1	3.8	
		1285	0.5	10.209	-10	1.5	
	B	1285	0.5	10.209	-2.7	6.3	-0.5
		1066	0	10.336	-6.2	6	
		1065	-1	10.5	-10.1	6	
	C	1219	0.2	10.383	-2.8	6.7	-0.8
		1065	-1	10.5	-6.5	6.8	
		1057	-1.1	10.535	-9.8	6.4	
	D	1226	0.3	10.356	-2.5	2.2	-0.8
		1069	-0.9	10.567	-5.8	2	
		1220	0.1	10.594	-9.4	2.3	

Paramètres d'étalonnage\_ Parcelles B

n° de la parcelle	n° de l'essai	n° du tensiomètre	a	b	Zt	Zc	Zst	
1B	A	<u>1218</u>	0.25	10.38	-6.8	0.9	-1.44	
		1072	-0.9	10.566	-12.2	-5		
	B	<u>1222</u>	0.4	10.424	-2.6	7.7	-1.49	
		<u>1230</u>	0.05	10.421	-5.9	0		
		1226	0.3	10.356	-10.9	-6.2		
	C	1066	0	10.336	-1	0	-1.35	
		<u>1218</u>	0.25	10.38	-6.4	3.4		
		1072	-0.9	10.566	-11.2	1.2		
	D	1066	0	10.336	-2.9	5	0.8	
		1069	-0.9	10.567	-6.8	5		
		1285	0.5	10.209	-10.3	5.2		
	2B	A	1222	0.4	10.424	-6.1	-1.55	-1.4
1285			0.5	10.209	-11.4	-2.3		
B		1219	0.2	10.383	-5.8	-4.3	-2.1	
		1068	-0.7	10.35	-10.6	-5.3		
C		1069	-0.9	10.567	-5.9	4	-1.1	
		1285	0.5	10.209	-10.8	4		
D		1219	0.2	10.383	-6.1	3.8	-0.8	
		<u>1227</u>	0.25	10.405	-11.2	3.1		
3B	A	1066	0	10.336	-3.2	5.3	-1.4	
		1069	-0.9	10.567	-6	5.3		
		1285	0.5	10.209	-9.6	5.3		
	B	1066	0	10.336	-2.9	7.9	-1.4	
		1069	-0.9	10.567	-6.6	7.9		
	C	1285	0.5	10.209	-10.5	7.9	-1.6	
		1066	0	10.336	-3.3	5.3		
		1069	-0.9	10.567	-6	5.3		
	D	<u>1219</u>	0.2	10.383	-2.9	8.8	-1.9	
		1065	-1	10.5	-6.7	8.5		
		1057	-1.1	10.535	-10	8.4		
		1065	-1	10.5	-2.4	9.5		
	4B	A	1067	-0.7	12.038	-5.9	7.5	-1.5
			1057	-1.1	10.535	-9.9	7.7	
1222			0.4	10.424	-2.9	7.2		
B		1056	-0.6	10.457	-6.1	6.5	-1.5	
		1064	-0.9	10.979	-9.5	7.5		
C		1067	-0.7	12.038	-2.1	6	-0.3	
		1057	-1.1	10.535	-6.2	6		
D		1065	-1	10.5	-9.8	7	-0.5	
		1222	0.4	10.424	-2.8	8.5		
		1056	-0.6	10.457	-6.2	8.5		
5B	A	1064	-0.9	10.979	-9.2	8.7	-0.4	
		1057	-1.1	10.535	-3	6.7		
		1065	-1	10.5	-6.3	6.6		
	B	1219	0.2	10.383	-9.7	6.6	-0.8	
		1219	0.2	10.383	-3.3	8		
		1069	-0.9	10.567	-7.5	8.2		
	C	1285	0.5	10.209	-10	5.6	-0.8	
		1219	0.2	10.383	-2.9	6.4		
		1065	-1	10.5	-6.2	6.2		
	D	1057	-1.1	10.535	-9.2	6.4	-1.3	
		1219	0.2	10.383	-3.3	5.2		
1065		-1	10.5	-6.5	4.5			
		1057	-1.1	10.535	-10.3	4.9		

Parcelle 3A

essai C

grad H 0-1 K 0-1	grad H 1-2 K 1-2	grad H 2-3 K 2-3	grad H 0-3 K 0-3	grad H 1-3 k 1-3
99.35	-18.69	-1.47	15.1623	-10.83833
99.55 3.41E-03	-18.69 -1.81E-02	-1.61 -2.20E-01	15.1623 0.022	-10.89913 -0.0312
99.55 2.67E-03	-18.69 -1.42E-02	-1.61 -1.66E-01	15.1623 0.018	-10.89913 -0.0244
99.55 1.94E-03	-18.69 -1.04E-02	-1.47 -1.26E-01	15.20819 0.013	-10.83908 -0.0178
99.55 2.19E-03	-18.6 -1.17E-02	-1.48 -1.48E-01	15.2426 0.014	-10.79404 -0.0201
99.85 1.21E-03	-18.68 -6.49E-03	-1.48 -8.18E-02	15.27701 0.008	-10.8402 -0.0112
100.04 8.47E-04	-18.68 -4.53E-03	-1.62 -5.47E-02	15.27701 0.006	-10.901 -0.0078
100.19 7.25E-04	-18.68 -3.89E-03	-1.59 -4.53E-02	15.32289 0.005	-10.88654 -0.0067
100.54 4.82E-04	-18.79 -2.58E-03	-1.49 -3.14E-02	15.39172 0.003	-10.90286 -0.0044
100.68 4.41E-04	-18.59 -2.37E-03	-1.37 -3.10E-02	15.55231 0.003	-10.73828 -0.0041
100.83 2.40E-04	-18.47 -1.31E-03	-1.51 -1.68E-02	15.58672 0.002	-10.73884 -0.0023
98.08 2.43E-04	-16.7 -1.38E-03	-1.42 -1.65E-02	15.70143 0.002	-9.737506 -0.0024
90.05 2.57E-04	-11.98 -1.69E-03	-1.3 -1.78E-02	15.81614 0.002	-7.109774 -0.0029
54.96 2.50E-04	8.51 -1.05E-02	-1.22 -1.44E-02	16.07997 0.001	4.073131 -0.012
17.28 4.47E-04	30.66 8.24E-04	-1.35 -1.25E-02	16.35526 1E-03	16.06905 0.0016
4.99 1.45E-03	37.73 4.72E-04	-1.26 -1.24E-02	16.42409 1E-03	19.95457 0.0009
2.21 3.36E-03	39.79 3.12E-04	-1.28 -9.56E-03	16.61909 7E-04	21.07011 0.0006
0.4 9.27E-03	41.56 2.97E-04	-1.07 -1.03E-02	16.99763 7E-04	22.12187 0.0006
-0.58 -1.15E-01	41.66 2.42E-04	0.79 -7.03E-02	17.45646 6E-04	23.0264 0.0004
-0.58 -1.74E-02	35.09 2.63E-04	9.62 1.94E-03	17.80058 6E-04	23.4768 0.0004
-1.23 -1.00E-02	24.72 3.03E-04	22.86 5.59E-04	17.9497 5E-04	23.87413 0.0004
-1.73 -5.45E-03	15.87 3.97E-04	34.08 2.83E-04	18.06441 4E-04	24.17626 0.0003
-1.4 -5.17E-03	9.98 6.24E-04	34.01 2.37E-04	15.66702 5E-04	20.93665 0.0004
-2.22 -4.46E-03	8.36 8.80E-04	20.5 2.96E-04	10.09221 6E-04	13.89406 0.0005
-2.22 -3.64E-03	7.31 1.03E-03	5.73 6.15E-04	4.512824 0.001	6.591624 0.0008
-2.71 -3.27E-03	7.02 1.13E-03	-2.79 5.49E-03	1.305592 0.003	2.545924 0.0018
-2.54 -3.45E-03	6.45 1.35E-03	-5.51 -2.18E-03	0.160808 0.012	0.995923 0.0051
-2.71 -2.69E-03	6.73 1.07E-03	-6.95 -1.13E-03	-0.25902 -0.144	0.498119 0.0094
-2.38 -3.17E-03	6.07 1.26E-03	-7.59 -1.11E-03	-0.67885 -0.017	-0.153206 0.0468
-2.38 -3.39E-03	5.69 1.37E-03	-8.01 -1.03E-03	-0.98512 -0.01	-0.554059 -0.0228
-2.54 -3.28E-03	5.59 1.43E-03	-8.33 -9.87E-04	-1.17554 -0.007	-0.753119 -0.0123
-2.05 -3.51E-03	5.32 1.48E-03	-8.55 -9.56E-04	-1.25239 -0.007	-1.005708 -0.0092
-2.38 -3.64E-03	4.84 1.59E-03	-8.41 -9.51E-04	-1.48066 -0.006	-1.202631 -0.0073
-2.71 -3.17E-03	5.6 1.55E-03	-9.09 -9.22E-04	-1.48066 -0.005	-1.100791 -0.007
-2.71 -2.98E-03	5.69 1.43E-03	-9.32 -8.76E-04	-1.51966 -0.005	-1.151836 -0.0072

## Parcelle 2B

essai A

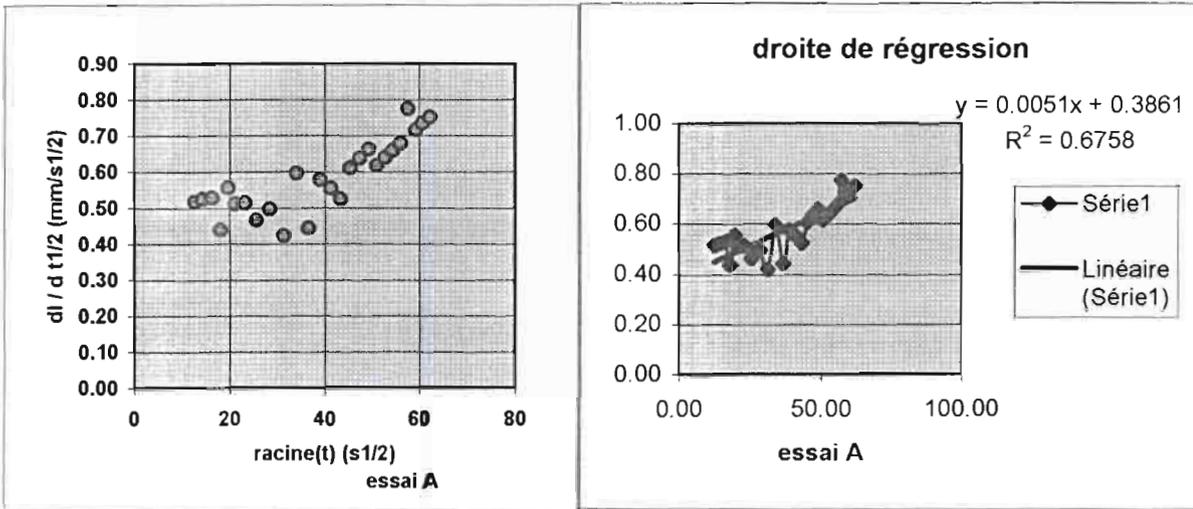
grad H 0-1	K 0-1	grad H 1-2	K 1-2	grad H 0-2	K 0-2
39.82		-10.86		13.44	
39.82	7.90E-03	-10.74	-2.91E-02	13.51	2.33E-02
39.97	7.88E-03	-10.88	-2.91E-02	13.51	2.33E-02
39.95	4.84E-03	-10.86	-1.78E-02	13.51	1.43E-02
39.95	4.24E-03	-10.72	-1.57E-02	13.58	1.25E-02
40.11	3.93E-03	-10.73	-1.47E-02	13.65	1.16E-02
40.11	2.11E-03	-10.67	-7.92E-03	13.68	6.20E-03
40.26	1.51E-03	-10.75	-5.65E-03	13.72	4.42E-03
40.42	1.40E-03	-10.69	-5.27E-03	13.82	4.10E-03
40.48	7.98E-04	-10.61	-3.03E-03	13.89	2.33E-03
40.64	9.94E-04	-10.62	-3.80E-03	13.97	2.90E-03
40.71	7.93E-04	-10.48	-3.06E-03	14.07	2.30E-03
40.99	5.92E-04	-10.48	-2.31E-03	14.2	1.71E-03
41.22	4.91E-04	-10.29	-1.94E-03	14.41	1.41E-03
41.44	4.39E-04	-10.15	-1.78E-03	14.59	1.25E-03
40.04	3.96E-04	-8.46	-1.73E-03	14.8	1.10E-03
33.67	3.28E-04	-2.26	-2.26E-03	14.98	8.13E-04
22.65	5.01E-04	8.16	4.78E-03	15.11	9.38E-04
13.33	6.73E-04	17.16	9.56E-04	15.32	7.95E-04
6.08	1.14E-03	24.36	5.34E-04	15.59	7.18E-04
4	1.80E-03	26.87	3.54E-04	15.9	5.76E-04
2.23	2.80E-03	29.31	3.11E-04	16.32	5.42E-04
1.49	3.62E-03	30.87	2.23E-04	16.78	4.06E-04
1.26	6.35E-03	32.14	2.77E-04	17.33	5.12E-04
1.04	5.24E-03	33.2	1.85E-04	17.78	3.45E-04
0.67	8.62E-03	32.6	2.25E-04	17.29	4.22E-04
0.82	9.00E-03	29.8	2.15E-04	15.9	4.05E-04
0.6	8.51E-03	24.32	2.24E-04	12.94	4.19E-04
0.38	1.38E-02	17.66	3.20E-04	9.37	6.02E-04
0.45	1.62E-02	11.52	4.61E-04	6.21	8.63E-04
0.38	1.62E-02	7.25	7.16E-04	3.95	1.32E-03
0.6	1.24E-02	4.04	1.07E-03	2.39	1.91E-03
0.38	1.24E-02	1.77	2.08E-03	1.1	3.46E-03
0.3	1.78E-02	0.44	5.47E-03	0.37	8.19E-03
0.45	1.61E-02	-0.36	1.61E-01	0.03	3.02E-02
0.3	1.78E-02	-0.89	-1.07E-02	-0.32	-4.58E-02
0.3	2.00E-02	-1.63	-4.80E-03	-0.7	-1.18E-02
0.3	2.00E-02	-1.63	-3.71E-03	-0.7	-8.61E-03
0.45	1.61E-02	-1.57	-3.79E-03	-0.6	-9.30E-03

Parcelle 3B

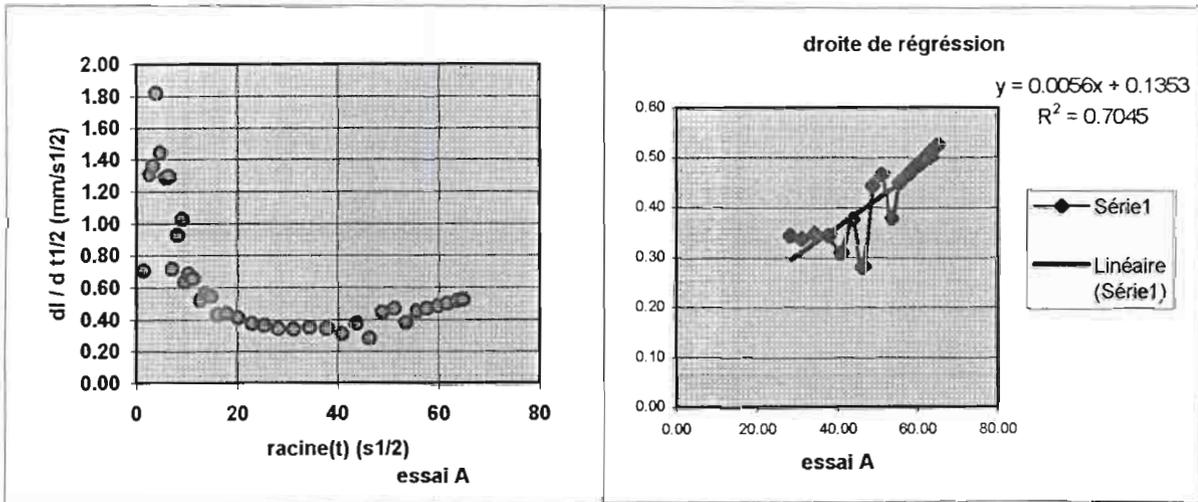
essai A

grad H 0-1 K 0-1	grad H 1-2 K 1-2	grad H 2-3 K 2-3	grad H 0-3 K 0-3	grad H 1-3 k 1-3
42.37	31.37	-12.49	14.53148	6.701613
41.97 7.46E-03	31.75 9.97E-03	-12.58 -2.51E-02	14.53148 0.022	6.814663 0.0465
42.2 5.75E-03	31.6 7.64E-03	-12.58 -1.92E-02	14.53148 0.017	6.750063 0.0357
41.97 4.60E-03	31.75 6.11E-03	-12.58 -1.54E-02	14.53148 0.013	6.814663 0.0285
41.97 5.19E-03	31.75 6.86E-03	-12.58 -1.73E-02	14.53148 0.015	6.814663 0.032
41.97 3.46E-03	31.86 4.56E-03	-12.55 -1.16E-02	14.58128 0.01	6.878469 0.0212
42.14 2.59E-03	31.9 3.42E-03	-12.58 -8.66E-03	14.61863 0.007	6.877873 0.0158
42.54 2.29E-03	31.75 3.04E-03	-12.67 -7.66E-03	14.61863 0.007	6.764823 0.0142
42.72 1.14E-03	31.76 1.52E-03	-12.59 -3.83E-03	14.69333 0.003	6.812083 0.0071
42.72 1.32E-03	31.76 1.78E-03	-12.59 -4.48E-03	14.69333 0.004	6.812083 0.0083
42.72 1.32E-03	32.02 1.77E-03	-12.8 -4.45E-03	14.69333 0.004	6.812083 0.0083
42.72 7.55E-04	32.13 1.01E-03	-12.88 -2.51E-03	14.69333 0.002	6.812083 0.0047
42.54 7.57E-04	32.25 1.00E-03	-12.88 -2.50E-03	14.69333 0.002	6.860533 0.0047
40.82 6.77E-04	33.5 8.59E-04	-13 -2.18E-03	14.69333 0.002	7.345033 0.004
37.55 5.15E-04	35.83 5.82E-04	-13.18 -1.54E-03	14.69333 0.001	8.265583 0.0026
34.31 5.61E-04	38.29 5.44E-04	-13.07 -1.54E-03	14.86763 0.001	9.39815 0.0023
30.86 5.57E-04	41.15 4.57E-04	-13.29 -1.38E-03	14.99213 0.001	10.52828 0.0018
23.97 4.78E-04	46.56 2.99E-04	-13.4 -9.82E-04	15.27848 9E-04	12.83317 0.0011
17.46 5.84E-04	51.65 2.46E-04	-13.54 -8.98E-04	15.52748 8E-04	14.98361 0.0009
8.07 7.90E-04	54.4 1.90E-04	-10.42 -8.42E-04	15.77648 6E-04	17.94316 0.0006
2.33 1.55E-03	47.91 1.58E-04	-2.21 -1.28E-03	15.90098 5E-04	19.71768 0.0004
0.61 4.80E-03	36.41 1.67E-04	7.77 2.54E-03	15.97568 4E-04	20.29789 0.0004
0.03 1.89E-02	20.31 2.13E-04	20.98 4.21E-04	16.14998 4E-04	20.68271 0.0003
0.03 1.60E-01	12.5 3.28E-04	27.5 2.22E-04	16.34918 3E-04	20.93794 0.0003
-0.35 -3.18E-02	8.85 4.72E-04	23.73 1.97E-04	13.36118 3E-04	17.21777 0.0003
-0.74 -8.35E-03	8.34 5.28E-04	1.06 3.66E-04	3.152183 5E-04	4.245689 0.0004
-1.11 -4.09E-03	8.08 4.61E-04	-4.03 -2.55E-03	0.745598 0.002	1.268842 0.0014
-1.31 -3.53E-03	7.83 5.39E-04	-5.16 -9.33E-04	0.121853 0.01	0.524579 0.0048
-1.11 -2.49E-03	7.57 3.93E-04	-5.91 -5.47E-04	-0.25165 -0.047	-0.008878 0.0117
-1.69 -3.24E-03	7.57 5.99E-04	-6.27 -7.45E-04	-0.54173 -0.011	-0.219049 -0.0398
-1.31 -3.03E-03	7.2 6.15E-04	-6.46 -7.12E-04	-0.66623 -0.008	-0.485155 -0.0129
-2.07 -2.09E-03	7.69 4.74E-04	-6.74 -5.34E-04	-0.79073 -0.005	-0.429875 -0.0077
-1.88 -2.04E-03	7.57 5.29E-04	-6.93 -5.90E-04	-0.87415 -0.005	-0.590046 -0.0079
-2.07 -2.04E-03	7.44 5.38E-04	-6.92 -5.82E-04	-0.95632 -0.004	-0.642031 -0.0065
-2.07 -1.94E-03	7.69 5.33E-04	-7.22 -5.70E-04	-0.9974 -0.004	-0.694671 -0.006
-1.69 -2.14E-03	7.19 5.42E-04	-7.21 -5.59E-04	-1.08082 -0.004	-0.909752 -0.005
-2.26 -2.04E-03	7.56 5.47E-04	-7.21 -5.59E-04	-1.08082 -0.004	-0.748252 -0.0049
-1.88 -1.94E-03	7.56 5.33E-04	-7.31 -5.56E-04	-1.03973 -0.004	-0.802202 -0.0052

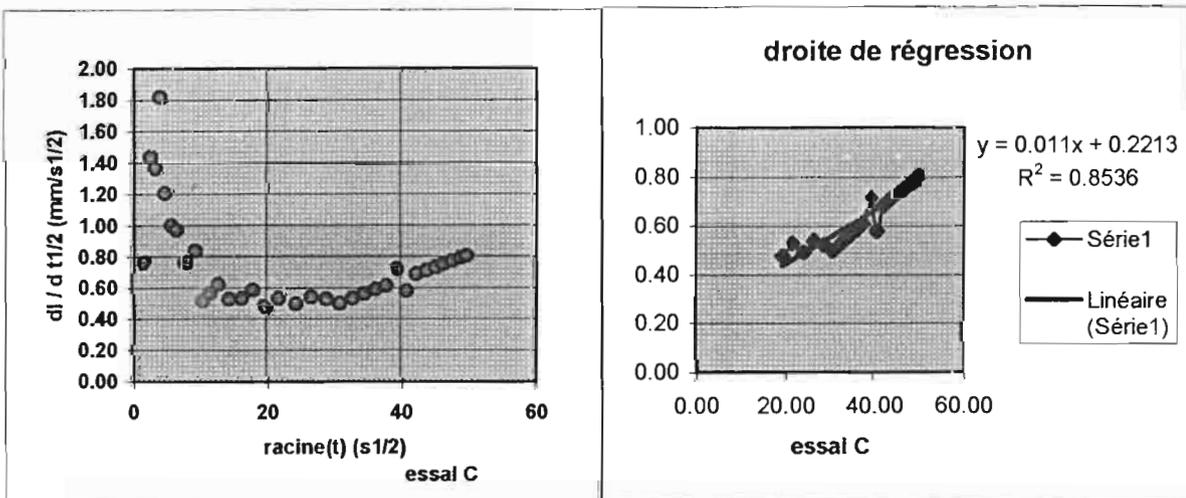
Parcelle 2B



Parcelle 3B



Parcelle 3A



Parcelle	Essai	Prof. (cm)	Avant TRIMS			Après TRIMS			Var. Humidite Volumique
			Hum. Rel pondérale	Densité apparente	Hum. Volumique	Hum. Rel pondérale	Densité apparente	Hum. Volumique	
1A	A	0 - 5	0.004	1.53	0.01	0.163	1.53	0.25	0.24
		5 - 10	0.025	1.52	0.04	0.144	1.52	0.22	0.18
	B	0 - 5	<b>Pas de mesure TRIMS</b>						
		5 - 10	<b>Pas de mesure TRIMS</b>						
	C	0 - 5	0.000	1.46	0.00	0.167	1.46	0.24	0.24
		5 - 10				0.150	1.52	0.23	0.23
	D	0 - 5				0.176	1.53	0.27	0.27
		5 - 10				0.155	1.52	0.24	<u>0.24</u>
1B	A	0 - 5	0.004	1.55	0.01	0.168	1.55	0.26	0.25
		5 - 10	0.026	1.34	0.04	0.182	1.34	0.25	0.21
	B	0 - 5				0.164	1.56	0.26	0.26
		5 - 10				0.127	1.60	0.20	0.20
	C	0 - 5				0.184	1.56	0.29	0.29
		5 - 10				0.144	1.60	0.23	<u>0.23</u>
	D	0 - 5	0.016	1.56	0.03	0.168	1.56	0.26	0.24
		5 - 10	0.002	1.60	0.00	0.145	1.60	0.23	<u>0.23</u>

2A	A	0 - 5	0.027	1.46	0.04	0.196	1.46	0.29	0.25
		5 - 10	0.055	1.54	0.08	0.161	1.54	0.25	0.16
	B	0 - 5				0.180	1.46	0.26	<u>0.26</u>
		5 - 10				0.174	1.54	0.27	0.27
	C	0 - 5	0.016	1.52	0.02	0.204	1.52	0.31	0.29
		5 - 10	0.061	1.52	0.09	0.176	1.52	0.27	0.17
	D	0 - 5				0.187	1.52	0.28	<u>0.28</u>
		5 - 10				0.168	1.52	0.25	0.25
2B	A	0 - 5	0.019	1.25	0.02	0.171	1.25	0.21	0.19
		5 - 10	0.041	1.43	0.06	0.162	1.43	0.23	0.17
	B	0 - 5				0.181	1.25	0.23	0.23
		5 - 10				0.151	1.43	0.22	0.22
	C	0 - 5	0.009	1.61	0.02	0.187	1.61	0.30	0.29
		5 - 10	0.043	1.55	0.07	0.182	1.55	0.28	0.22
	D	0 - 5				0.191	1.61	0.31	<u>0.31</u>
		5 - 10				0.150	1.55	0.23	0.23
3A	A	0 - 5	0.017	1.53	0.03	0.180	1.53	0.28	0.25
		5 - 10	0.055	1.44	0.08	0.278	1.44	0.40	0.32
	B	0 - 5	0.021	1.46	0.03	0.200	1.46	0.29	0.26
		5 - 10	0.052	1.46	0.08	0.145	1.46	0.21	0.14
	C	0 - 5				0.203	1.46	0.30	<u>0.30</u>
		5 - 10				0.171	1.57	0.27	0.27
	D	0 - 5	0.017	1.46	0.03	0.209	1.46	0.30	<u>0.28</u>
		5 - 10	0.046	1.57	0.07	0.166	1.57	0.26	0.19

3B	A	0 - 5				0.184	1.49	0.27	0.27
		5 - 10				0.155	1.55	0.24	0.24
	B	0 - 5	0.028	1.49	0.04	0.160	1.49	0.24	0.20
		5 - 10	0.055	1.55	0.09	0.159	1.55	0.25	0.16
	C	0 - 5	0.035	1.51	0.05	0.179	1.51	0.27	0.22
		5 - 10	0.053	1.56	0.08	0.162	1.56	0.25	<u>0.17</u>
	D	0 - 5				0.149	1.51	0.22	0.22
		5 - 10				0.155	1.56	0.24	0.24
4A	A	0 - 5				0.209	1.61	0.34	0.34
		5 - 10				0.159	1.50	0.24	<u>0.24</u>
	B	0 - 5	0.017	1.61	0.03	0.175	1.61	0.28	0.25
		5 - 10	0.052	1.50	0.08	0.154	1.50	0.23	<u>0.15</u>
	C	0 - 5				0.210	1.38	0.29	0.29
		5 - 10				0.185	1.45	0.27	0.27
	D	0 - 5	0.015	1.38	0.02	0.186	1.38	0.26	0.24
		5 - 10	0.050	1.45	0.07	0.166	1.45	0.24	0.17
4B	A	0 - 5				0.165	1.51	0.25	0.25
		5 - 10				0.145	1.44	0.21	0.21
	B	0 - 5	0.018	1.51	0.03	0.176	1.51	0.27	0.24
		5 - 10	0.050	1.44	0.07	0.156	1.44	0.22	<u>0.15</u>
	C	0 - 5				0.174	1.47	0.26	0.26
		5 - 10				0.134	1.50	0.20	0.20
	D	0 - 5	0.007	1.47	0.01	0.167	1.47	0.25	0.23
		5 - 10	0.050	1.50	0.08	0.159	1.50	0.24	<u>0.16</u>

5A	A	0 - 5	0.025	1.59	0.04	0.161	1.59	0.26	0.22
		5 - 10	0.059	1.59	0.09	0.137	1.59	0.22	0.12
	B	0 - 5			0.038	0.172	1.58	0.27	<u>0.23</u>
		5 - 10				0.162	1.57		
	C	0 - 5			0.038	0.184		0.18	<u>0.15</u>
		5 - 10				0.155			
	D	0 - 5	0.038	1.58	0.06	0.191	1.58	0.30	0.24
		5 - 10	0.056	1.57	0.09	0.161	1.57	0.25	0.17
5B	A	0 - 5	0.016	1.55	0.03	0.177	1.55	0.27	0.25
		5 - 10	0.051	1.43	0.07	0.160	1.43	0.23	0.16
	B	0 - 5				0.166			
		5 - 10				0.147			
	C	0 - 5	0.027	1.53	0.04	0.179	1.53	0.27	0.23
		5 - 10	0.050	1.52	0.08	0.150	1.52	0.23	0.15
	D	0 - 5	0.027	1.53	0.04	0.166	1.53	0.25	<u>0.21</u>
		5 - 10	0.050	1.52	0.08	0.134	1.52	0.20	0.13