



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Travail pratique de diplôme EPFL  
Département de Génie Rural  
IATE-Pédologie

Mars 1995

---

**Etude du ruissellement et de l'infiltration d'une  
toposéquence de sols vertiques de la moyenne vallée  
du fleuve Sénégal**

---

Fabienne Favre

Pascal Boivin, ORSTOM  
Philippe de Pury, EPFL  
Jean-Claude Védy, EPFL

## Remerciements

Ce travail n'aurait pu se réaliser sans la participation de près ou de loin de nombreuses personnes, nommément citées ou non, que je tiens à remercier.

Ces remerciements s'adressent tout particulièrement à Pascal Boivin, chargé de recherche en pédologie à l'ORSTOM de Dakar, pour son accueil et son encadrement tout au long de ce stage. Je tiens à remercier Alain Bernard, ingénieur à l'ORSTOM de Dakar pour la qualité de son travail accompli sur le terrain.

Je remercie le professeur Jean-Claude Védý de l'EPFL pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer mon travail de diplôme au Sénégal, ainsi que Philippe de Pury qui m'a mise en rapport avec l'ORSTOM de Dakar.

Je remercie également Badiane, Balla et Gaspard pour leur aide précieuse sur le terrain, Faye pour sa disponibilité au laboratoire et Augustin pour son efficacité à la documentation.

# 1. INTRODUCTION GENERALE

Ce mémoire porte sur l'étude du fonctionnement hydrique d'une toposéquence de sol à caractère verticale. Il a pour cadre général le problème de la culture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal. En effet, après la construction et la mise en eau des barrages de Manantali (1990) et de Diama (1986) sur le cours du fleuve Sénégal, la culture irriguée s'est largement développée dans la vallée du Fleuve. En particulier, de nombreux périmètres villageois ont vu le jour. L'irrigation de ces périmètres soulève les questions de l'économie de l'eau, de la conservation du sol à long terme : le programme de recherche « Fleuve Sénégal », réalisé conjointement par l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) et l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherche Agricole) a été conçu en partie pour répondre à ces questions. Il compte un volet pédologique, dont l'un des objectifs est de mieux connaître les sols non aménagés et leur fonctionnement. Il s'agit essentiellement de sols verticaux, et c'est dans ce cadre que se situe notre intervention. A partir de cette problématique centrale se sont développés des thèmes de recherche plus fondamentale portant sur la caractérisation, la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrique et physique des sols déformables et gonflants. Ce travail, centré sur la compréhension du fonctionnement hydrique d'une séquence de vertisols, peut donc apporter une contribution à certains de ces objectifs.

Ce mémoire s'organise de la façon suivante : nous essayerons dans un premier temps de situer le problème et de décrire le contexte scientifique dans lequel il s'inscrit. Dans un second temps, nous décrirons le protocole de nos recherches et enfin, nous présenterons nos résultats et nous les discuterons.

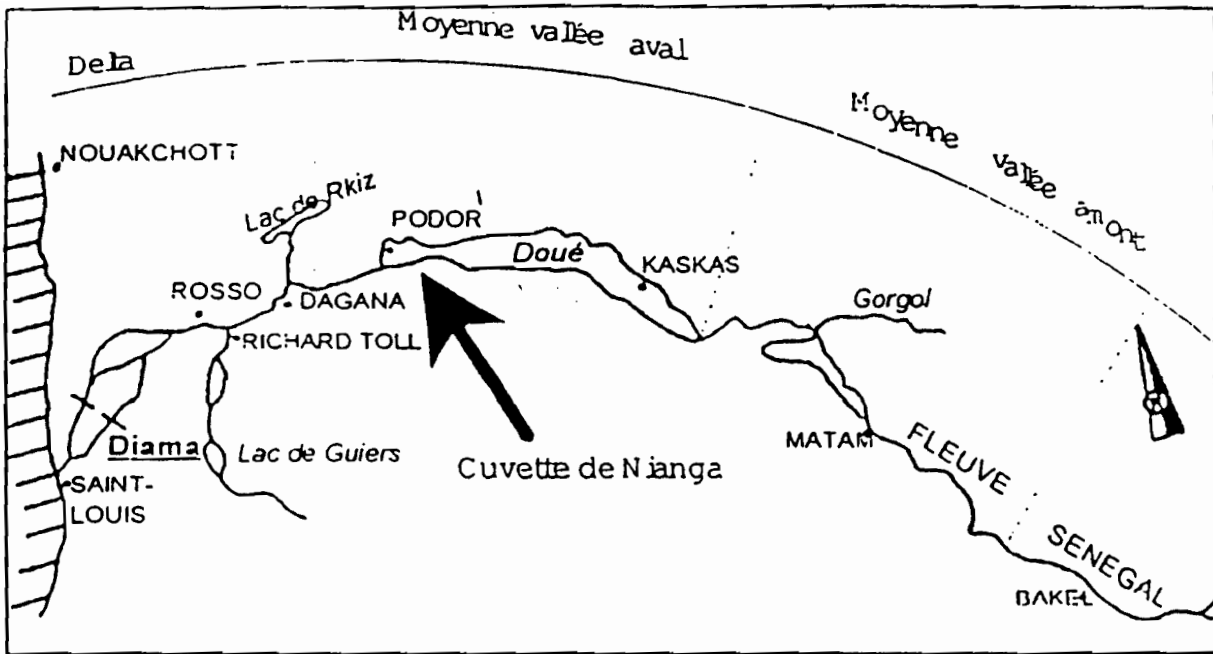


Figure 1 : Carte de situation de la région de Podor

## 2. SITUATION DU PROBLEME

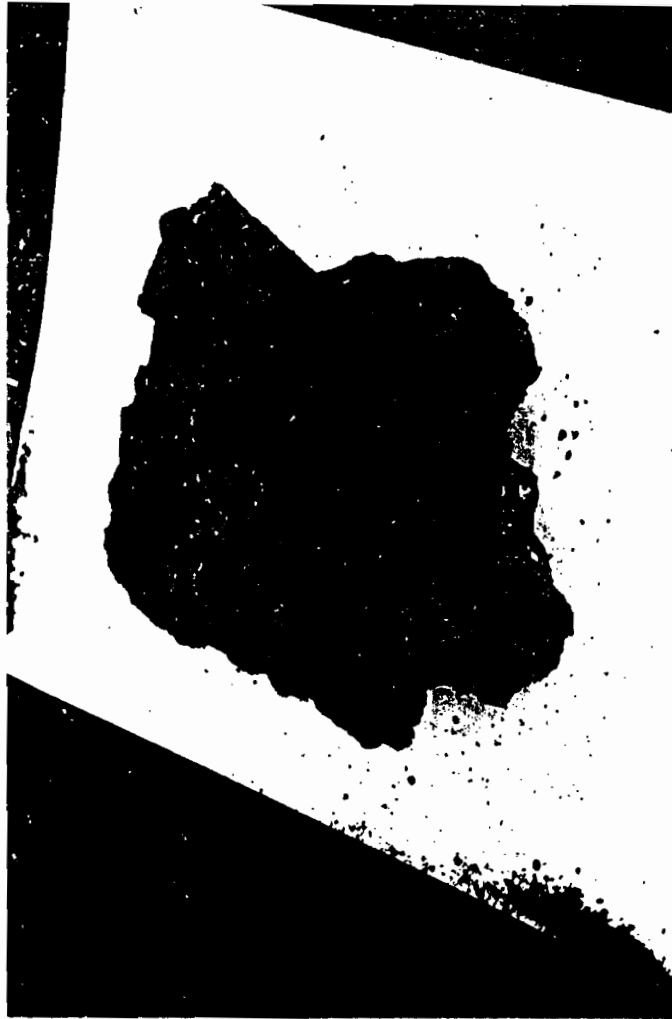
### 2-1. Justification de l'étude

Le site d'investigation du programme Fleuve se trouve dans la cuvette de Nianga, dans la région de Podor (voir figure 1), qui a l'avantage de présenter en un espace restreint toutes les situations tant pédologiques que sociologiques que l'on peut rencontrer dans la moyenne vallée du Fleuve (cf. Boivin et al., 1995).

Pour pouvoir décrire et prévoir l'évolution des sols sous culture, il fallait posséder un référentiel sur les sols non cultivés. L'une des activités du programme a donc été l'établissement de ce référentiel, à partir de l'étude d'un vaste secteur non aménagé. Un effort particulier a été apporté à l'étude des sols argileux à vocation rizicole principalement. Ces sols recouvrent 75 % des surfaces cultivables et sont travaillés essentiellement en riziculture inondée. Des travaux menés par Luc Seguis (1990) dans la cuvette ont permis de délimiter les différentes unités géomorphologiques correspondant à des sols relativement différenciés, et donc de repérer les fonds argileux. L'étude de ces sols argileux a montré qu'il s'agissait de sols à argiles gonflantes, dont la teneur en argile varie de 49 à 90 %. La teneur en smectites et interstratifiées de l'argile est de l'ordre de 60 %. Ce gradient de teneur en argile détermine des séquences de sols dont les caractères vertiques sont plus ou moins prononcés. A une échelle d'observation plus restreinte, Karine Coconnier (1992) et Laure Guillierme (1993) ont observé des toposéquences à forte différenciation morphologique. Ces différenciations laissent supposer un comportement hydrique très contrasté entre les divers endroits d'une toposéquence. C'est un des points que nous avons voulu vérifier.

De plus, la maîtrise des sols et de leur évolution passe par la compréhension du fonctionnement hydrophysique du sol. L'étude de ce fonctionnement sur une toposéquence est donc également susceptible d'apporter des informations pour une meilleure gestion de l'irrigation. Pour répondre à ces questions nous avons décidé d'étudier le comportement hydrique des sols d'une toposéquence de sol vertique de la cuvette de Nianga sous simulation de pluie ou sous irrigation.

Nous avons limité nos investigations à quatre aspects : le ruissellement et l'infiltration en différents points de la toposéquence, la cinétique de réhumectation des sols, la cinétique de gonflement du sol fissuré et la répartition de la fissuration à l'échelle de la cuvette. Tous ces domaines ont déjà été abordés par de nombreux auteurs et un survol de l'état des connaissances actuelles est proposé au paragraphe suivant.



*Figure 2 : Face de glissement*

## 2-2. Contexte scientifique

### 2-2-1. *Les vertisols*

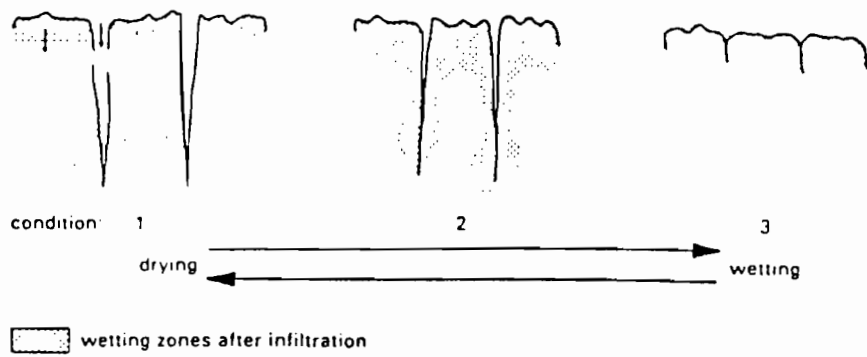
Ce sont des sols composés d'argiles gonflantes, dont la propriété est de changer de volume au cours de leur hydratation et de leur déshydratation. Ces modifications de volume se répercutent inégalement au niveau de l'agrégat, puis du sol. Leur déformation liée à la variation de leur teneur en eau se traduit par un changement de la porosité. On passe d'une porosité fissurale importante à l'état sec à une macroporosité quasiment nulle à l'état humecté. A l'état sec, le sol est extrêmement dur. Il est plastique lorsqu'il est réhumecté. Le passage d'un état à l'autre provoque des pressions et des tensions dans le sol qui se traduisent par des faces de glissement visibles à l'état sec (voir figure 2). Durant la période sèche, les fissures sont comblées petit à petit par la végétation ou par du matériel qui tombe depuis la surface. Le volume disponible pour le sol à l'état hydraté devient donc insuffisant. Lorsque les fissures se referment, elles provoquent le soulèvement des prismes environnants. Un relief composé d'une succession de légères dépressions et de petits monticules apparaît. C'est ce qu'on appelle le gilgai. Une autre conséquence des cycles de dessiccation et de réhumectation est la formation d'horizons très peu différenciés parce que le sol est sans cesse homogénéisé.

### 2-2-2. *La déformation des sols*

L'hydrodynamique des sols s'appuie sur l'hypothèse que le sol est indéformable. Les observations et les développements sont peu nombreux ou pas opérationnels sur des sols gonflants macroscopiquement (notons qu'ils sont tous microscopiquement déformables dès qu'ils contiennent un peu d'argiles (Boivin, 1991)).

#### *a) La question du gonflement des sols*

Le premier problème qu'elle soulève est celui de la mesure du gonflement. Les méthodes de mesure ont été développées pour le laboratoire ou pour l'expérimentation in situ. Comme il est difficile de mesurer le mouvement du sol en plus d'une dimension à la fois, la plupart des auteurs ont défini leur méthode pour mesurer un déplacement vertical. Dans sa thèse, Yves Coquet (1995) présente les différentes méthodes mises au point. Les travaux menés par Yaan Cheng et Pettry (1993) se distinguent des autres. En effet, on observe et mesure un mouvement horizontal et vertical in situ. Cependant, pour pouvoir caractériser le comportement du sol entier, il faut considérer son évolution dans les trois dimensions de l'espace. Partant d'une mesure linéaire, il faut pour passer à une mesure volumique admettre que le déplacement est identique dans toutes les directions. En d'autres termes, il faut



*Figure 3 : Chronologie du gonflement des prismes, tiré de Bouma et Loveday (1988)*



faire l'hypothèse que le retrait linéaire d'un sol est isotrope. C'est la deuxième question délicate posée par l'étude de la déformation des sols gonflants.

#### *b) L'isotropie ou l'anisotropie du gonflement ou du retrait*

Ce débat est encore loin d'être épuisé. Il est rendu encore plus ardu par la quantité de niveaux d'observation possibles : isotropie ou anisotropie à l'échelle de l'agrégat, de la couche de sol, du sol entier, à quelle profondeur... Coquet (1995) explique dans sa thèse l'évolution des tendances et l'état de la recherche actuel. Connaissant le retrait linéaire du sol et en supposant le comportement isotropique ou anisotropique admis, une modélisation du retrait est possible. Nous citerons pour mémoire le modèle de Braudeau (1988 a, b, d, cité par Coquet 1995).

#### *c) Chronologie du gonflement*

C'est la dernière question touchant au problème des sols gonflants. Quelle partie du sol subit une transformation de volume avant quelle autre partie ? Le schéma observé sur un cycle de dessiccation et réhumectation par Bouma et Loveday (1988) est le suivant. L'eau gagne par ruissellement le fond des fissures et réhumecte les prismes par la base dès que le débit appliqué dépasse la capacité d'infiltration de la couche supérieure du sol. Les parois des prismes gonflent à leur base et provoquent la fermeture de la fissure par le bas. L'eau monte ainsi petit à petit vers la surface jusqu'à ce que la fissure soit totalement fermée. (voir figure 3).

### *2-2-3. La question de l'infiltration dans un milieu non homogène*

Le phénomène de bypass flow ou écoulement préférentiel a particulièrement retenu l'attention des auteurs dans la question de l'infiltration de l'eau en milieu non homogène. On appelle ainsi l'écoulement qui se produit préférentiellement dans la macroporosité du sol avant de saturer le sol lui-même. Ce type d'écoulement pose problème vis à vis de l'hydrodynamique classique qui conceptualise le sol comme un milieu poreux uniforme dans lequel se produisent des écoulements suivant les lois de Darcy (Hillel, 1980).

#### *a) Description et quantification du phénomène*

Plusieurs travaux se sont déroulés sur des sols non gonflants et ont pour propos de mesurer le bypass flow en laboratoire ou in situ et le rôle des fissures dans l'infiltration. On citera les publications de Bootink et Bouma (1991) sur des sols non déformables, de Radulovich et al. (1992) sur des échantillons de sols tropicaux, de Bouma et Dekker (1978) sur des échantillons de sols argileux secs, de Van Stiphout et al. (1987) sur un sol de prairie argileux, de Kneal et White (1984) sur des échantillons de sol limono-argileux et de Blake et al. (1973) sur la réhumectation du sol par les fissures.

Par contre très peu d'auteurs ont suivi l'infiltration d'un sol fortement gonflant ou ont pris en compte ce gonflement. On trouve quand même les travaux de Talsma et van der Lelij (1976) effectués in situ. Ces auteurs ont cherché à quantifier l'infiltration, l'hydrodynamique et le gonflement vertical d'un vertisol sous riziculture. Des essais de modélisation de l'infiltration dans un sol fissuré de rizière ont été réalisés par Hisazoshi Inoue (1993). D'autres auteurs ont dirigé leurs recherches vers un aspect plus appliqué, celui d'une meilleure gestion de l'eau.

#### *b) Application à l'agronomie*

Il s'agit de travaux exécutés le plus souvent pour la riziculture à des pas de temps très larges (au minimum un cycle de culture) et dont l'objet principal est de limiter les pertes d'eau lors de l'irrigation des parcelles. M. C. Wopereis et al. (1994) ont mené leurs recherches sur des sols des Philippines, Mitchell et van Genuchten (1993) se sont intéressés à deux types de culture, la luzerne et le froment. Dans notre cas, puisque nous souhaitons observer la dynamique fissurale, le suivi de l'infiltration dans le sol se fera à un pas de temps très court.

Cependant, les travaux portant sur la dynamique fissurale en relation avec la variation de l'humidité du sol et sur des pas de temps courts font défaut. C'est un problème qui est intéressant à plusieurs points de vue. Premièrement, le fonctionnement des fissures est un facteur de genèse des vertisols. Il convient donc de connaître ce phénomène. Deuxièmement, la fissuration conditionne le régime hydrique du sol et en particulier les transferts de solutés. Or, à la mise en eau d'une parcelle, s'effectuent des transferts salins dont la vitesse est de l'ordre de l'heure plutôt que de l'année tandis qu'une fois le sol saturé, les transferts se font uniquement par diffusion, soit très lentement. Enfin, la modélisation du comportement des sols gonflants passe par la connaissance de leur dynamique fissurale.

Il est donc nécessaire d'affiner les observations en utilisant des pas de temps beaucoup plus courts. Cette exigence entraîne des difficultés techniques qui peuvent expliquer le manque actuel de données. Le paragraphe suivant décrit les dispositions techniques que nous avons adoptées pour recueillir nos observations.

# Cuvette de Nianga

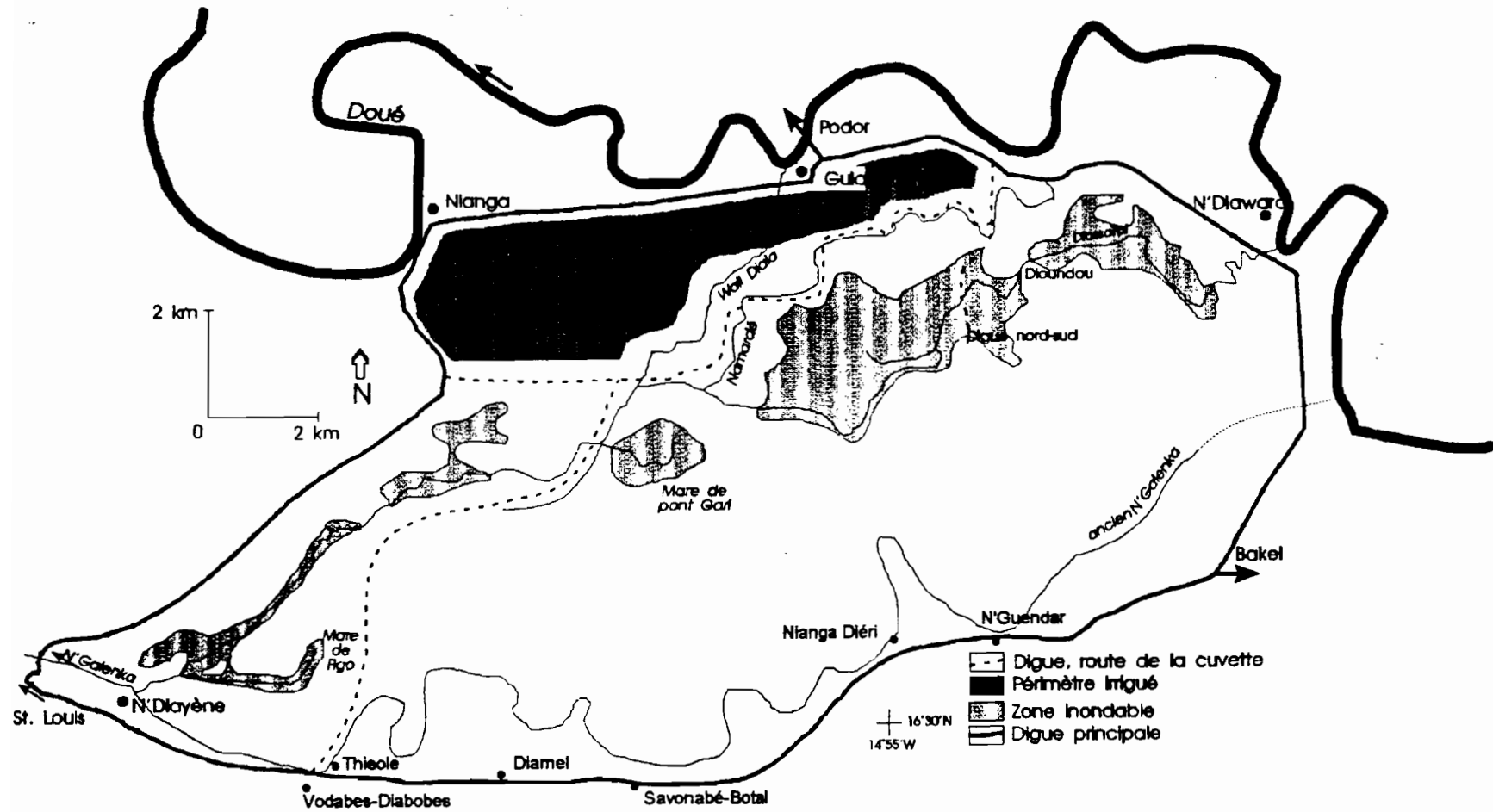


Figure 4 : Carte de la région de Nianga

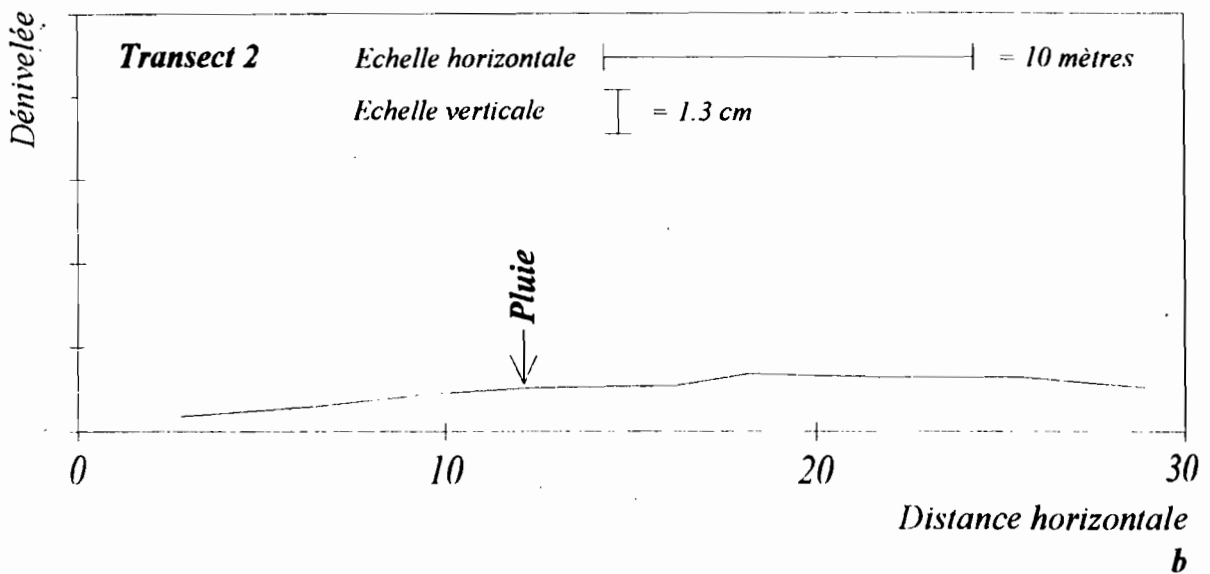
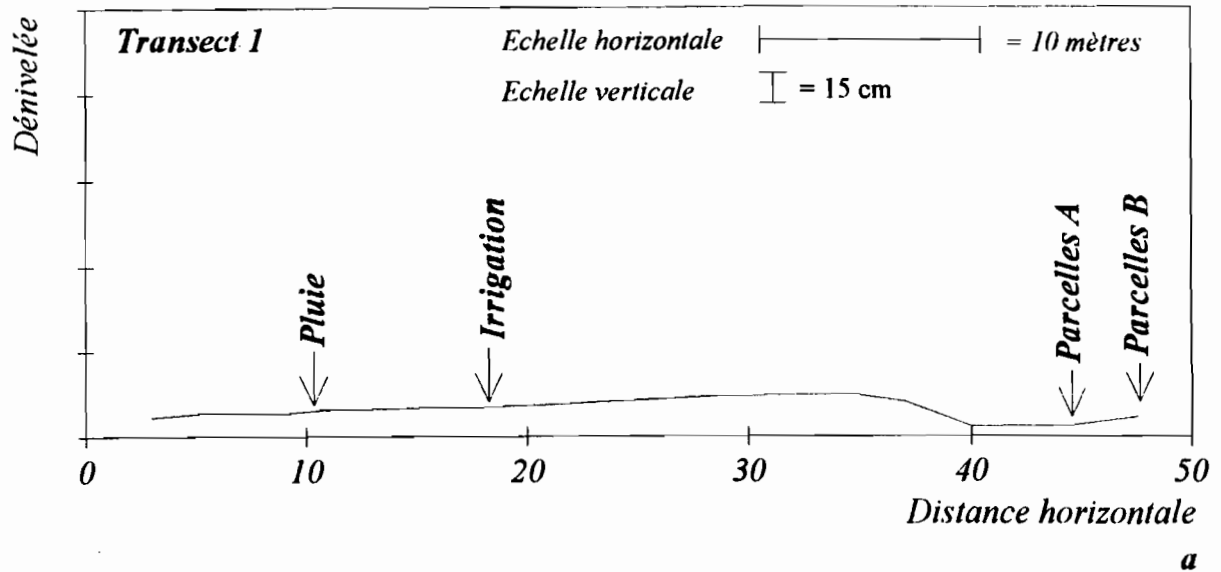


Figure 5 : Transect topographique 1 (a)  
 Transect topographique 2 (b)  
 Situation des parcelles expérimentales  
 Parcelles A et B de ruissellement  
 Parcelle Pluie de simulation de pluie  
 Parcelle Irrigation de simulation d'irrigation

### **III. PROTOCOLE D'ETUDE**

Nous avons commencé par choisir une toposéquence puis par déterminer le mode d'apport d'eau que nous allions appliquer pour suivre son comportement hydrique.

#### **3-1. Choix de la toposéquence.**

Nous avons opté pour une séquence située dans la région de Nianga au lieu dit Pont-Gary (voir figure 4). Les critères de choix de la toposéquence étaient les suivants : premièrement, il fallait une zone fissurée à cette période de l'année. Les points les plus bas de la cuvette étant encore recouverts d'eau à cause de la crue exceptionnelle causée par la vidange du barrage de Manantali, nous avons choisi une séquence représentative des parties moyennes de la cuvette. Les caractères vertiques du sol sont donc moins marqués que dans ses fonds. Deuxièmement, il fallait un sol dont la fissuration n'était pas trop importante pour pouvoir satisfaire assez rapidement à sa demande en eau. Ces conditions se rencontrent dans les parties moyennes des cuvettes. Enfin, la zone de Pont-Gary avait déjà fait l'objet d'études antérieures et on était donc en possession d'analyses chimiques, granulométriques et de courbes de retraits. Un autre critère de choix sera expliqué plus bas dans le texte.

La toposéquence se présente ainsi (voir figure 5) : Elle s'étend sur une quarantaine de mètres pour une dénivelée maximale de 15 centimètres. On distingue trois types de sols, identiques du point de vue de leur granulométrie mais différents du point de vue de leur morphologie. Les sols en position les plus hautes ne présentent aucune fissure, la structure est polyédrique et montre des faces structurales rugueuses. Dans les sols en zone basse de la séquence, de nombreuses fissures apparaissent. La structure est prismatique de taille décimétrique et se débite en lentilles de tailles variables (millimètre au décimètre) qui présentent des faces de glissement lisses. Les zones médianes montrent des caractéristiques intermédiaires, à savoir : un horizon de surface sans fissure mais des microfissures sous-jacentes, une structure polyédrique laissant apparaître quelques lentilles de taille unique (centimétriques) et quelques faces de glissement rugueuses. On trouvera plus loin dans le texte une description complète de deux fosses.

#### **3-2. Choix du mode d'apport d'eau**

On supposait que les points hauts d'une toposéquence de vertisols ont des coefficients de ruissellement très importants contrairement aux points bas qui grâce à leurs fissures commencent par infiltrer beaucoup d'eau. On ignorait par contre l'évolution des coefficients de ruissellement dans le temps et dans l'espace et l'origine de ces grands coefficients. De même, on ne connaissait pas la cinétique de fermeture des fissures et le mode de réhumectation des prismes qu'elles déterminent. Nous avons donc séparé le problème en deux parties : Premièrement, pratiquer une simulation de pluie sur les parties hautes et médianes de la séquence pour déterminer l'évolution des coefficients de ruissellement et déterminer leur origine en suivant la progression de front d'humectation.

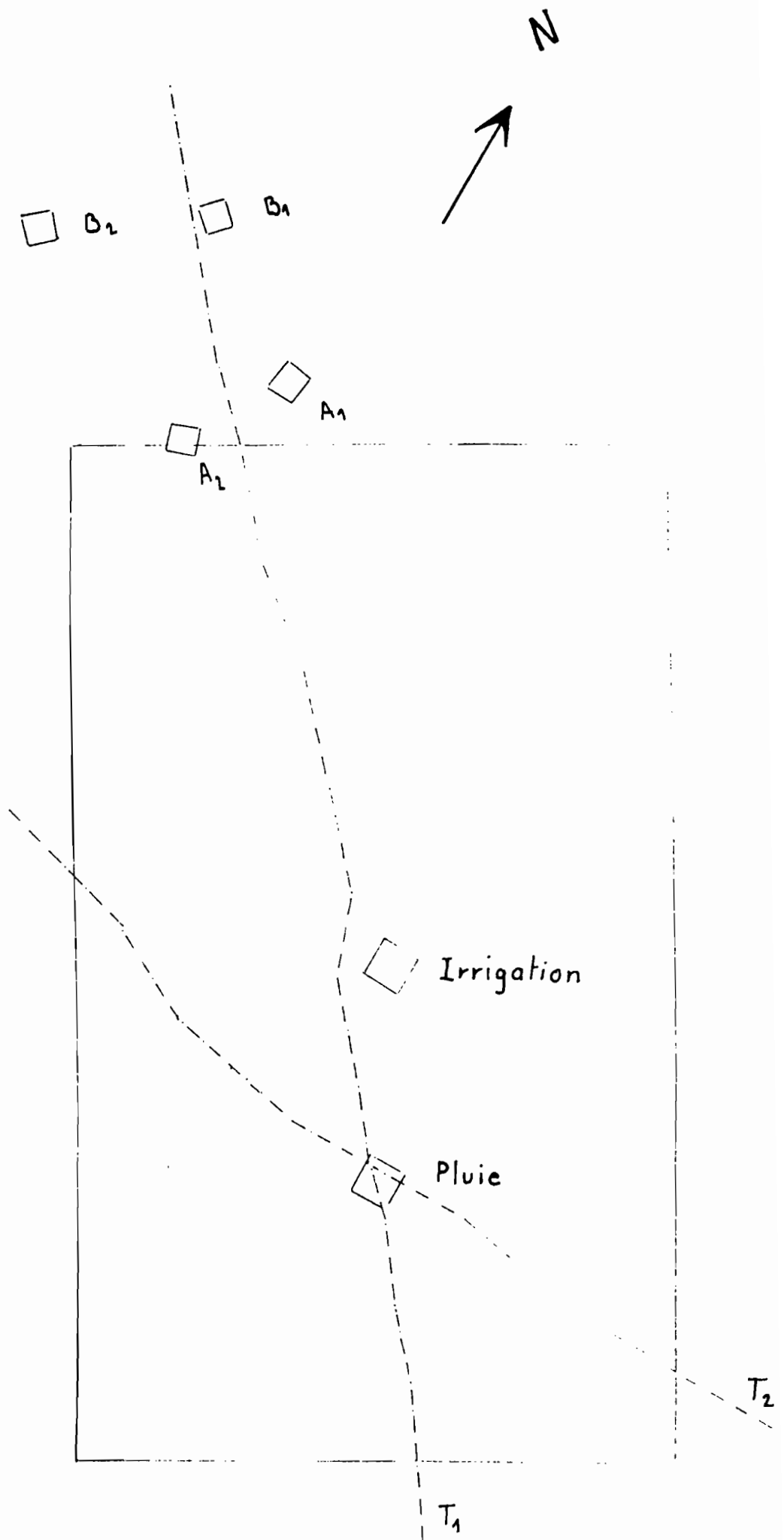
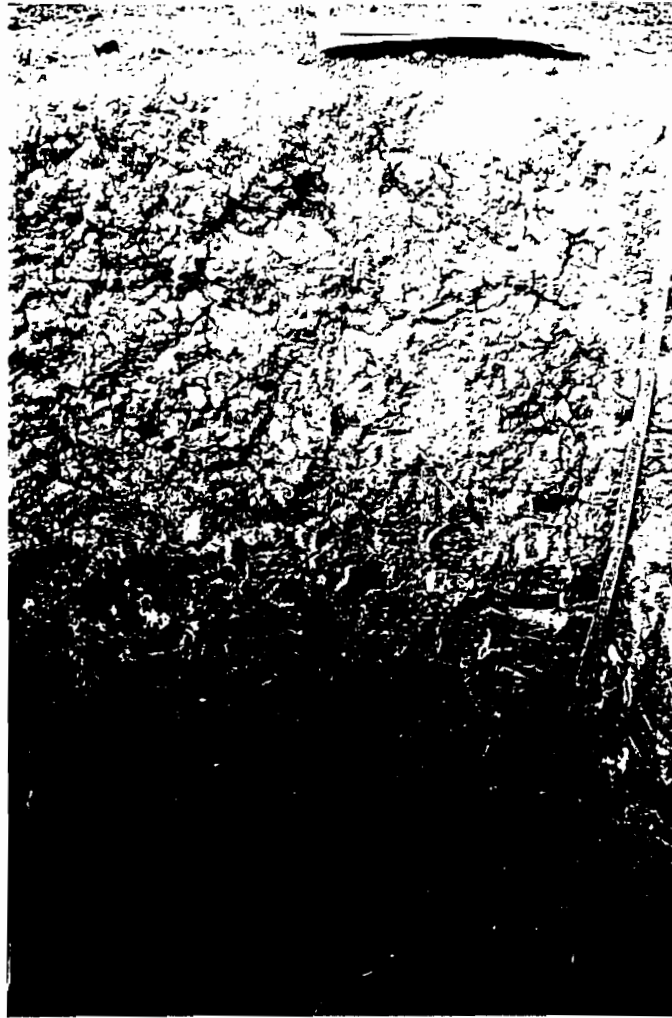


Figure 6 : Plan topographique  
de la zone étudiée  
Echelle : 1:2000  
T1 : transect 1  
T2 : transect 2  
A1, A2, B1, B2 :  
parcelles de  
ruissellement  
Pluie : parcelle de  
simulation de pluie  
Irrigation : parcelle  
de simulation  
d'irrigation



*Figure 7 : Profil de la fosse en position basse*

Deuxièmement, soumettre les parties fissurées du sol aux deux modes de réalimentation en eau possibles, l'aspersion et la submersion. Nous avons pour cela pratiqué une simulation de pluie et d'irrigation tout en suivant la progression du front d'humectation.

### 3-3. Choix des sites d'observations

Six sites sont installés dans la toposéquence. On en place deux au sommet, en zone non fissurée et deux à mi-pente tout proche de la zone fissurée. On observera les variations des coefficients de ruissellement des différents sites. Les deux derniers sont situés dans le fond de la séquence, en zone fissurée. On y observera la dynamique fissurale et la progression du front d'humectation (voir figures 5 et 6).

Une description des sols et de la granulométrie de la toposéquence se trouve dans les tableaux 4 et 5. La figure 7 représente le profil de la fosse en position basse.

#### 3-3-1. Description du profil de la fosse en position haute

Renseignements sur le site : Topographie presque plane

0 - 3 cm	texture structure couleur	argileuse, dépôts de limons éoliens et de sables mulch à structure particulière et petits agrégats 10 YR 5/4 (réf. code Münsell)
3 - 20 cm	texture structure porosité couleur	argileuse taille centimétrique polyédrique subanguleux macroporosité importante, porosité interne très faible 7.5 YR 5/4 taches d'oxydoréduction et revêtement de sable
20 - 60 cm	texture structure  porosité  couleur	argileuse taille décimétrique polyédrique anguleux, débit polyédrique anguleux et lenticulaire taille centimétrique macroporosité jusqu'à 30 cm, porosité interne très faible 7.5 YR 5/4 taches d'oxydoréduction, revêtement sableux
60 - 110 cm	texture structure  porosité couleur	argileuse massive, débit polyédrique centimétrique, faces de glissement décimétriques, à 60 cm cristaux de gypse en amas d'aiguilles. très faible 10 YR 7/6

Tableau 4 : profil en position haute



### 3-3-2. Description du profil de la fosse en position basse

Renseignements sur le site : Topographie presque plane, microtopographie : fentes.

0 - 1 cm	texture structure couleur	argileuse, dépôts de limons éoliens et de sables mulch à structure particulière et petits agrégats 10 YR 5/4
1 - 20 cm	texture structure porosité couleur	argileuse prismatique anguleux de taille décimétrique macroporosité importante, porosité intragrégat très faible 7.5 YR 5/4 taches d'oxydoréduction et revêtement sableux
20 - 35 cm	texture structure porosité couleur	argileuse prismatique anguleux de taille décimétrique, débit en petites lentilles centimétriques à faces rugueuses macroporosité moins importante, porosité interne très faible 7.5 YR 5/4 revêtement sableux
35 - 110 cm	texture structure porosité couleur	argileuse massive, débit en lentilles de toutes les tailles à faces ± lisses très faible 10 YR 7/6

Tableau 5 : profil en position basse

### 3-3-3. Granulométrie de la topséquence :

Une analyse granulométrique réalisée à proximité du site a donné les résultats suivants : 0.1 % de sables grossiers, 12 % de sables fins, 25 % de limons grossiers, 13 % de limons fins, 50 % d'argiles (dont 60 % d'argiles gonflantes (smectites et interstratifiées), 30 % de kaolinite, 5 % d'illite et 5 % de chlorite).

La réalisation des observations du ruissellement, de l'infiltration et du gonflement a demandé la mise en place d'un certain nombre d'appareillages et de techniques dont voici le descriptif.

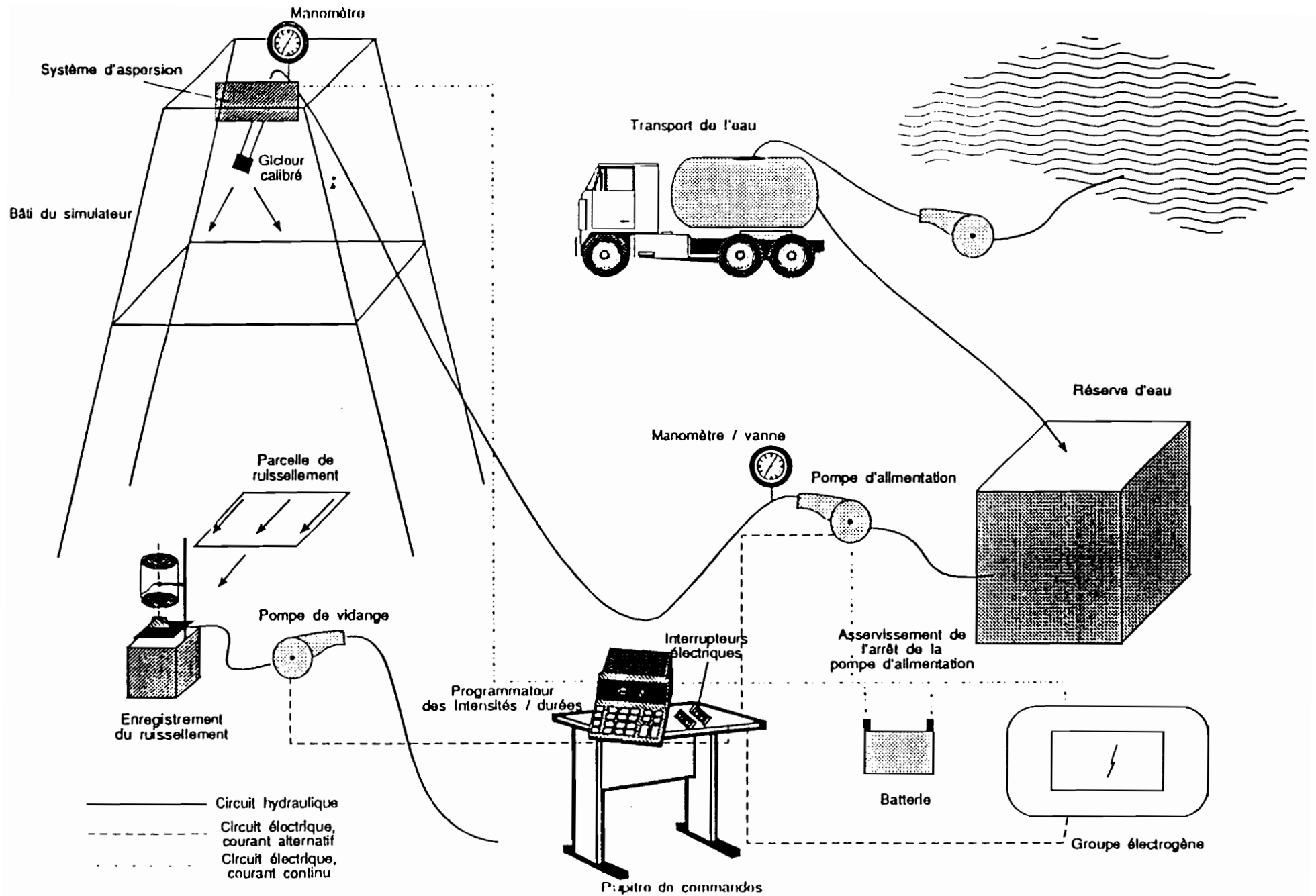


Figure 8 : Schéma de fonctionnement du simulateur de pluie  
Publié par l'INRA, 1993

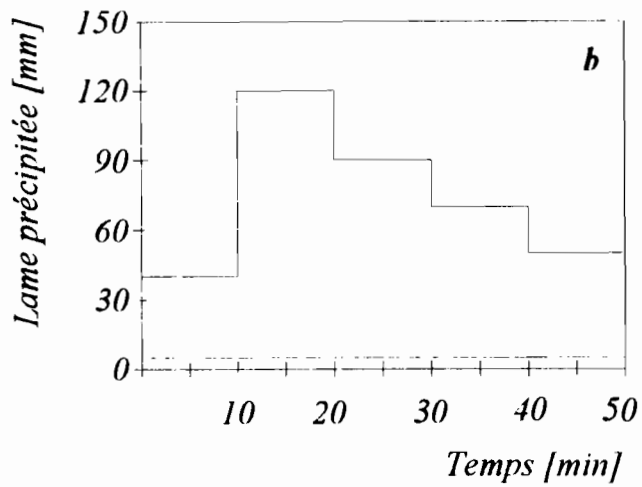
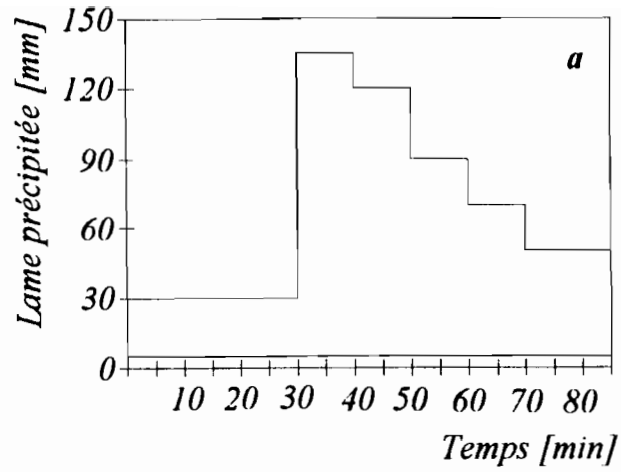


Figure 9 : hyétogramme des pluies  
 pluies 1 et 5 (a)  
 pluies 2, 3 et 4 (b)

Temps de ressuyage : entre 1 et 2 : 72 heures  
 entre 2 et 3 : 12 heures  
 entre 3 et 4 : 48 heures  
 entre 4 et 5 : 12 heures

## IV. MATERIEL ET METHODE

### 4-1. La simulation de pluie

Elle se pratique sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup> placées sur les sites que nous avons choisis. Les parcelles A1 et A2 sont en position intermédiaire dans la séquence et les parcelles B1 et B2 sont au sommet de la toposéquence (voir figure 6). Elle s'effectue avec le mini-simulateur de pluie ORSTOM (voir figure 8).

Au sommet d'une tour est fixé un système d'aspersion composé d'un bras oscillant, piloté par un microprocesseur. Sur le bras est fixé un gicleur dont la buse est calibrée. En modifiant l'angle de balayage du gicleur, on fait varier la surface de sol arrosée et donc l'intensité reçue par la parcelle expérimentale de 1 m<sup>2</sup>. La parcelle est limitée par un cadre métallique enfoncé dans le sol d'environ 5 cm. A l'aval, des trous et un canal collecteur permettent d'acheminer le ruissellement vers une cuve surmontée d'un limnigraphe à grande vitesse de rotation qui permet d'enregistrer les volumes ruisselés avec une précision de 0.1 mm et de 10 secondes (Casenave et Valentin, 1989; Bernard, 1987).

On applique une succession de cinq pluies sur chaque parcelle en utilisant des temps de ressuyage différents entre chacune.

### 4-2. Choix des pluies :

La région de Podor se trouve entre les courbes isohyètes interannuelles 200 et 300 mm , en zone sahélienne. La caractéristique principale des pluies de la simulation est donc une averse à pointe d'intensité unique et proche de celle rencontrée à Podor, à savoir  $\leq 135$  mm/h. Les pluies choisies pour la simulation sont décrites dans la figure 9.

### 4-3. La mesure du front d'humectation :

On effectue cette mesure pour intercepter le signal de l'arrivée de l'eau à des pas de temps et de profondeur serrés et pour avoir un suivi très fin de sa progression dans le sol. Ceci nous permet de voir l'influence éventuelle d'une croûte de surface.

On utilise pour cela des micropointes tensiométriques d'un diamètre de 2 mm. C'est une technique qui a déjà fait ses preuves en laboratoire, notamment dans son application à la rétractométrie (Boivin, 1991). Elle n'avait cependant jamais à notre connaissance été utilisée sur le terrain dans ce but, certainement en raison des difficultés qu'elle pose et dont nous parlerons plus loin.

Le principe de fonctionnement est le même que celui d'un tensiomètre classique. On mesure la pression de l'eau à l'intérieur du sol à l'aide d'une micropointe de céramique poreuse. La pointe est reliée par un capillaire à une colonne de mercure. Le capillaire et la pointe sont saturés en eau et désaérés. La saturation de la bougie et du circuit hydraulique impliquent que l'eau tend vers un équilibre énergétique de part et d'autre des parois de la bougie. L'eau à l'intérieur de la bougie se met à la même pression que l'eau du sol avoisinant. Dans notre

cas, la pointe est placée dans un sol sec. La matrice exerce donc une succion sur la pointe qui la transmet à la colonne de mercure. La force de succion se lit par l'élévation de mercure qu'elle provoque.

La fiabilité du système dépend de deux facteurs principaux : un bon contact entre la pointe et le sol et l'absence d'air et de possibilités d'entrée d'air dans le tube capillaire. Ces deux conditions sont difficiles à réaliser sur le terrain, surtout dans un sol aussi compact que du vertisol sec. Voici le protocole que nous proposons :

Il faut commencer par saturer les pointes tensiométriques. Pour ce faire, on les place, immergées dans de l'eau désaérée, dans un milieu sous vide. Il faut ensuite désaérer le capillaire souple qui relie la pointe à un capillaire rigide trempé dans le mercure. On utilise une seringue à longue aiguille très fine et on emplit le capillaire d'eau désaérée. L'eau entrant dans le tuyau repousse les bulles d'air vers l'extérieur. Le capillaire rigide se désaère très facilement en injectant de l'eau désaérée. L'air s'échappe par l'autre côté plongé dans le mercure. On relie les deux capillaires à l'aide d'un joint en plastique enduit de graisse silicone afin d'assurer une meilleure étanchéité. Dès lors, le tensiomètre peut être installé. On perce le sol aux profondeurs désirées avec un diamètre équivalent à celui du tube capillaire et de la pointe, soit environ 4mm. On humecte le fond du trou de façon à réaliser une pâte d'argile et on y place la pointe. On fixe le système dans le sol à l'aide d'un clou cavalier pour empêcher la pointe de bouger.

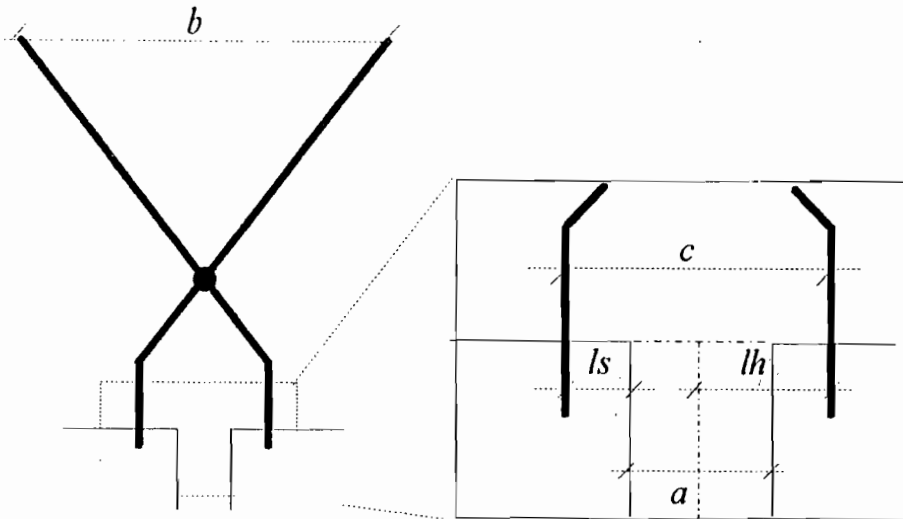
Considérant l'état de sécheresse du sol avant l'expérimentation, on est en droit de s'attendre à trouver des potentiels nettement supérieurs à 1000 mb. Or comme il n'est techniquement pas possible de mesurer des potentiels supérieurs à 900 mb, car au-delà de cette limite l'eau se dissocie, l'expérimentation a été commencée avant que le sol et le tensiomètre ne s'équilibrent. Il fallait donc choisir le délai entre l'installation du tensiomètre et le début des simulations pour que le potentiel mesuré soit suffisamment haut pour intercepter le front d'humectation mais pas trop pour que le tensiomètre ne désamorçe avant l'arrivée du front d'humectation. Pour cette raison, nous avons dû interpréter nos résultats de manière qualitative et non quantitative (voir paragraphe 5-1 et les figures s'y rattachant).

Les tensiomètres ont été placés dans le sol à des profondeurs variables selon l'expérience effectuée. Sur les parcelles de simulation de pluie à 2, 3, 4, 5, 6 cm de profondeur. Sur les parcelles fissurées à 2, 4, 6, 8, 10 cm latéralement à une profondeur de 15 cm et 2.5, 4.5, 5.5, 7.5, 8.5 en profondeur.

#### **4-4. La mesure de la cinétique de fermeture des fissures :**

##### *4-4-1. Installation des sites :*

On place sur les sites choisis dans la partie basse de la toposéquence deux parcelles d'expérimentation. Une parcelle de simulation de pluie et une parcelle de simulation d'irrigation. Elles ont une taille différente des autres parcelles utilisées pour la détermination des coefficients de ruissellement. Il fallait une surface suffisamment grande



*Figure 10 : Système de mesure de la fermeture des fissures*  
*b : écartement des pinces démultiplié par trois*  
*c : écartement réel des pinces*  
*ls : largeur de la paroi du prisme sec*  
*lh : largeur de la paroi du prisme humecté*  
*a : ouverture de la fissure*



*Figure 11 : Installation du système de mesure de la fermeture des fissures*

pour qu'elle puisse intercepter un maximum de prismes (diamètre d'un prisme  $\leq 50$  cm) mais elle ne devait pas dépasser les deux mètres de côté, limite d'homogénéité d'arrosage du simulateur de pluie. Ces considérations justifient également le choix d'une toposéquence de dimension fissurale moyenne et non pas dans un gilgai de dimension trop large. Les deux parcelles font donc  $2.25 \text{ m}^2$ . Elles sont délimitées du reste du sol par quatre tôles enfoncées à une profondeur de 50 cm (les fissures les plus profondes ne dépassent pas les 30 cm de longueur) pour éviter que l'eau apportée durant les simulations ne se déverse dans le réseau de fissures connecté à celui de la parcelle d'observation.

#### *4-4-2. Méthode de mesure :*

La première hypothèse faite est que la section d'une fissure est un triangle isocèle dont la base est la largeur de la fissure en surface. On considère que la largeur en surface est un bon indicateur de la fermeture de toute la fissure. C'est d'ailleurs le seul indicateur accessible à la mesure. On suit donc l'évolution de la largeur à l'aide d'une pincette. Elle est enfoncée dans le sol de part et d'autre de l'ouverture, dans les bords de la fissure (voir figure 10). La contribution des parois du prisme à la fermeture des fissures est connue par une mesure au double mètre de l'écartement des bras de la pincette. Un rapport de longueur de trois permet de démultiplier le mouvement, facilitant ainsi la mesure dont la précision est de  $\pm 1\text{mm}$  au niveau de la lecture, soit  $0.3 \text{ mm}$  au niveau de la fissure.

La mise en place des pincettes doit s'effectuer dans un pré-trou réalisé à la perceuse pour s'assurer qu'elles soient solidaires du sol et qu'elles en suivent bien tous les mouvements. On équipe le réseau de fissure des parcelles et on procède à la simulation (voir figure 11).

Afin d'évaluer dans l'espace le développement de la fissuration, de situer le degré de fissuration de nos parcelles d'étude par rapport au secteur environnant et d'apprécier le développement de la fissuration au voisinage de la transition vers la zone non fissurée, il nous a semblé intéressant de réaliser une cartographie de la fissuration du sol au niveau de notre site d'étude.

#### **4-5. Établissement de la cartographie de la fissuration**

Nous avons délimité une zone de  $36\text{m} \times 21\text{m}$  autour de nos parcelles d'observation englobant l'ensemble de la dépression fissurée. Sur un maillage de  $3\text{m} \times 3\text{m}$  sur toute la surface, nous avons mesuré la largeur et la profondeur de chaque fissure qui interceptait le côté d'une maille. Pour convertir ces mesures en des volumes de fissures et des retraits linéaires du sol, nous avons utilisé la méthode développée par Zein El Abedine et Gleen Robinson (1971). Elle a été appliquée à l'étude de vertisols de la plaine de Gezira au Soudan, vouée à l'agriculture irriguée. Le but des auteurs était de quantifier le volume des

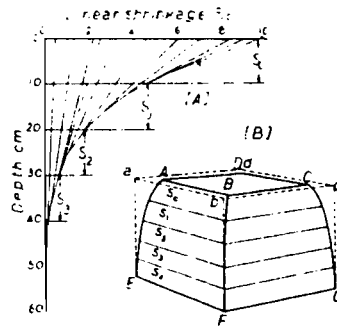


Figure 12 : A. Diagramme de la courbe de retrait linéaire  
 En abscisse : retrait linéaire en %  
 En ordonnée : profondeur en cm  
 B. Diagramme du calcul du volume de sol et de fissure



fissures qui déterminent un régime hydrique différent selon leur dimension. Nous allons développer les principes de la méthode puis discuter des modifications que nous y avons apporté.

#### *4-5-1. La méthode d'estimation du volume des fissures*

Abedine et Robinson déterminent deux transects de 20 m de longueur. Chaque fissure qui intercepte le transect est mesurée en largeur et en profondeur. On calcule sur la base de ces mesures le retrait linéaire horizontal du sol à différents niveaux de profondeur en faisant l'hypothèse que la section de la fissure est un triangle isocèle dont la base est la largeur de la fissure, en passant par les étapes suivantes :

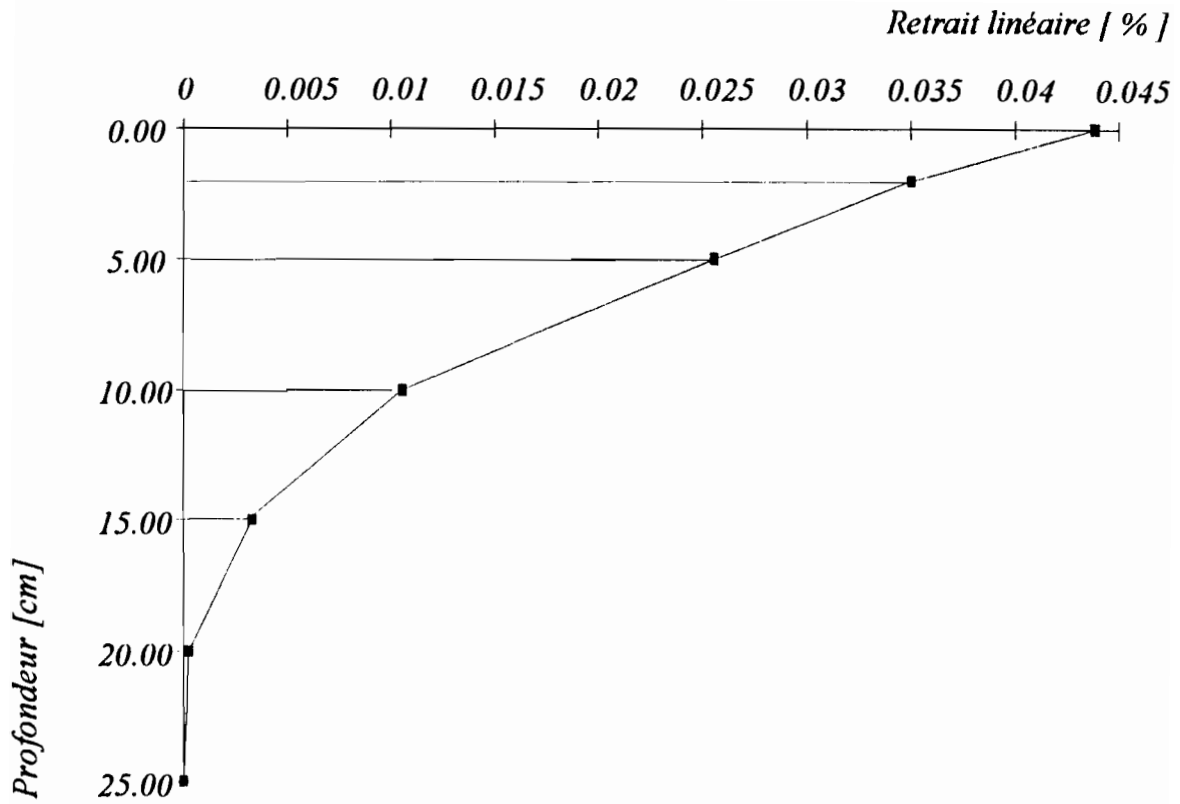
- a) On classe les fissures par ordre décroissant de profondeur.
- b) Elles sont dessinées, dans l'ordre de leur classement, sur un graphe comprenant en abscisse le cumul des retraits linéaires en % et en ordonnée la profondeur. On obtient ainsi une courbe du retrait linéaire du sol selon la profondeur (voir figure 12 a).
- c) Le volume du sol sans fissure se calcule pour une surface de  $1\text{m}^2$  en utilisant l'équation du volume d'une pyramide tronquée.  
 $V = 1/3 * h * (A1 + A2 + \text{SQR}(A1 * A2))$  avec  $A1$  = aire de la base supérieure  
 $A2$  = aire de la base inférieure et  $h$  = profondeur
- d) Le volume total ABCDEFG (voir figure 12 b) est calculé en le divisant en tranches de hauteur connues. On détermine les bases en lisant les grandeurs sur la courbe de retrait linéaire.
- e) En soustrayant le volume total abcdEFG (voir figure 12 b) du volume de sol sans fissure calculé, on obtient le volume de fissures.

Modifications apportées :

##### *a) La taille du transect :*

Nous utilisons les 4 côtés d'une maille comme un seul transect. Sa longueur est donc de  $4 \times 3$  mètres. Abedine et Robinson utilisent un transect de 20 mètres de long.

Nous avons choisi un maillage qui rende compte de la variabilité de notre terrain. Le risque que l'on court en utilisant un transect plus petit est d'avoir un échantillon de fissures plus petit que le volume élémentaire représentatif. On entend par là, la taille de l'échantillon le plus petit à partir de laquelle la propriété que l'on étudie ne varie plus. Plus le transect est petit, moins nombreuses seront les fissures interceptées. Si on en arrive à mesurer une seule fissure, la variance locale sera très grande. Si par contre le transect est très grand, il intercepte un grand nombre de fissures très variables mais dont la valeur moyenne sera attribuée à un point. On perd donc de l'information sur les variations locales.



*Figure 14 : Courbe du retrait linéaire du sol obtenue numériquement*  
 En abscisse : retrait linéaire en %  
 En ordonnée : profondeur en cm

*b) L'établissement de la courbe de retrait linéaire en fonction de la profondeur :*

C'est par un traitement graphique qu' Abedine et Robinson déterminent la courbe. Nous avons choisi d'établir numériquement la courbe pour d'une part accélérer le traitement des données et d'autre part bénéficier d'une plus grande précision. Nous obtenons directement la courbe cumulative représentant le retrait linéaire du sol en fonction de la profondeur (voir figure 14).

*4-5-2. L'établissement de la carte de fissuration*

On attribue au centre de chaque maille de notre quadrillage le volume de fissure calculé selon la méthode d'Abedine et Robinson. On obtient donc pour chaque maille un volume de fissure par  $m^2$ . On s'intéresse à connaître la fissuration du sol en n'importe quel point de l'espace, avec la meilleure fiabilité. Une recherche de corrélation spatiale entre les volumes obtenus par l'établissement du variogramme et une interpolation par krigeage aboutit à la réalisation d'une carte des volumes de fissures et des retraits linéaires par profondeur.

*4-5-3. Calage de la carte de volume des fissures*

La carte établie repose entièrement sur l'hypothèse que le volume des fissures peut être connu par la mesure de la largeur et de la profondeur des fentes. Nous avons voulu vérifier si cette hypothèse était légitime. Nous avons pour cela choisi trois parcelles de  $2.25 m^2$  que nous avons isolées du reste du sol par des tôles (voir paragraphe 4-4-1). Nous avons mesuré le volume de fissure des parcelles que nous avons localisées sur la carte en emplissant les fissures avec du sable très fin.

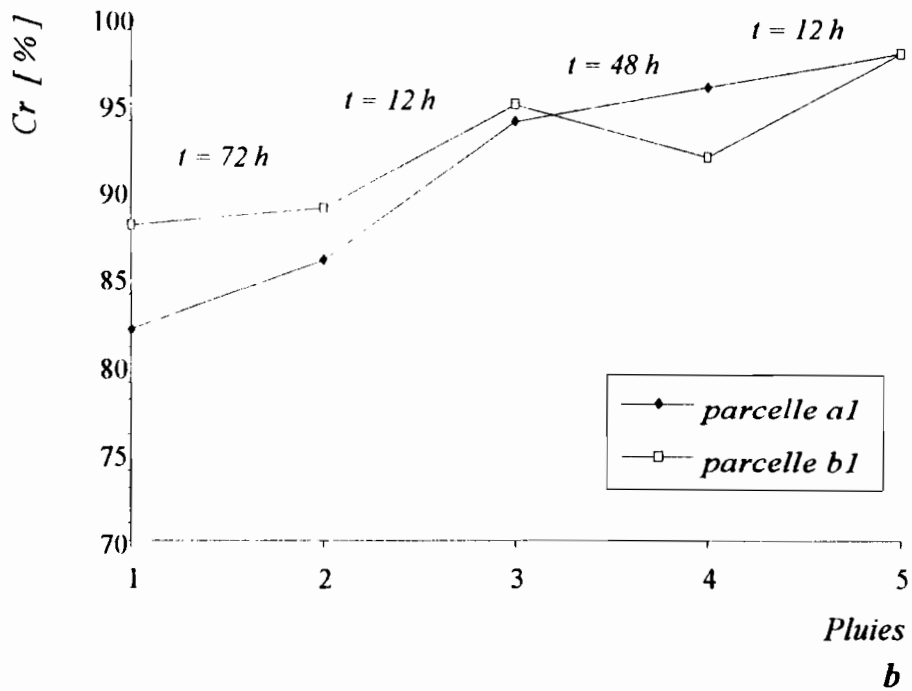
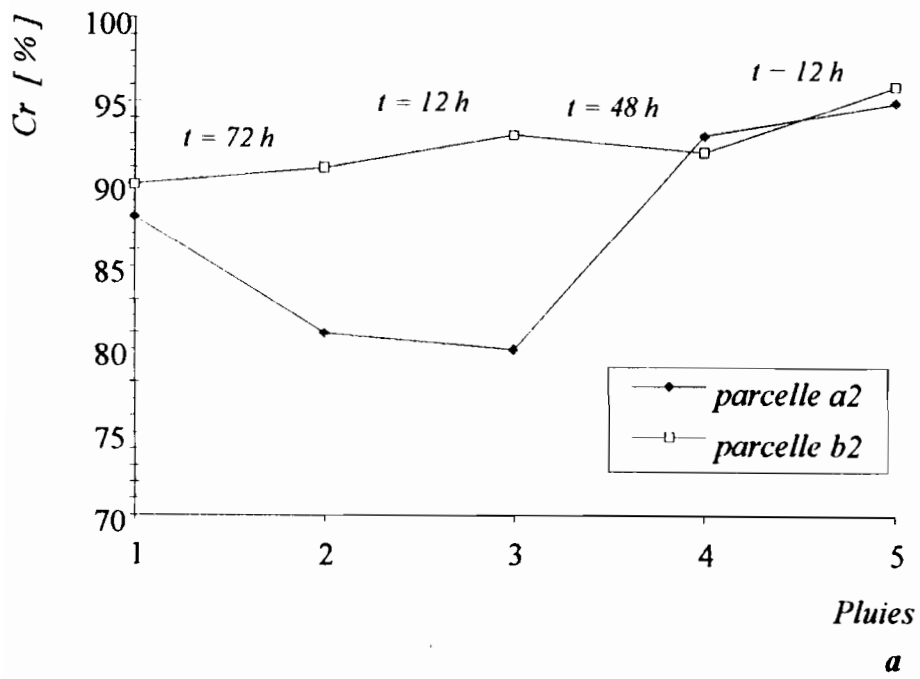
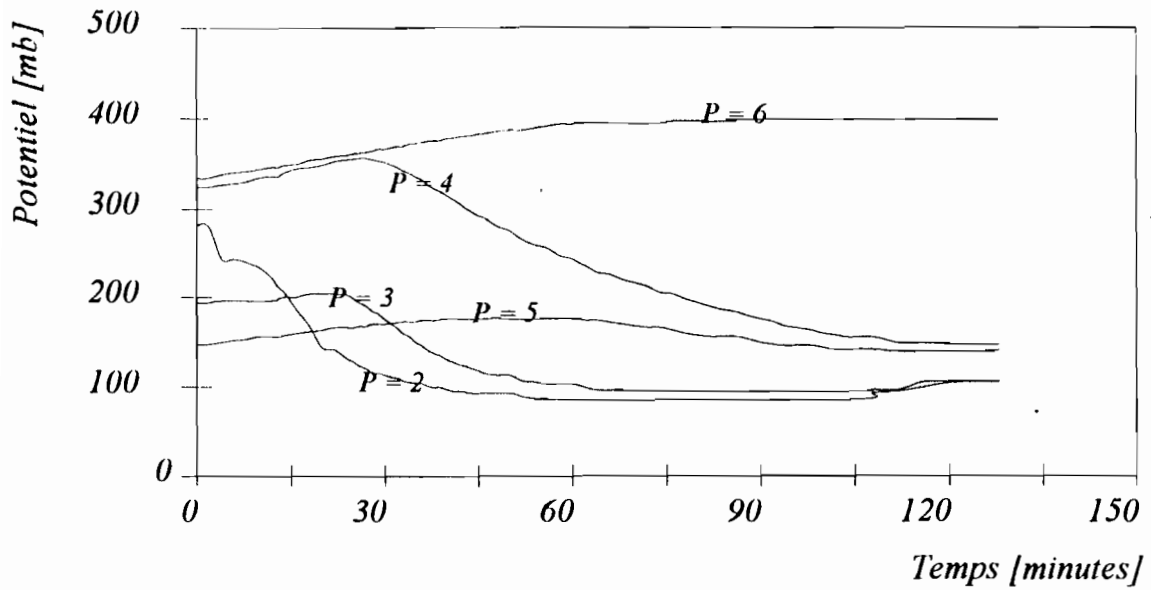
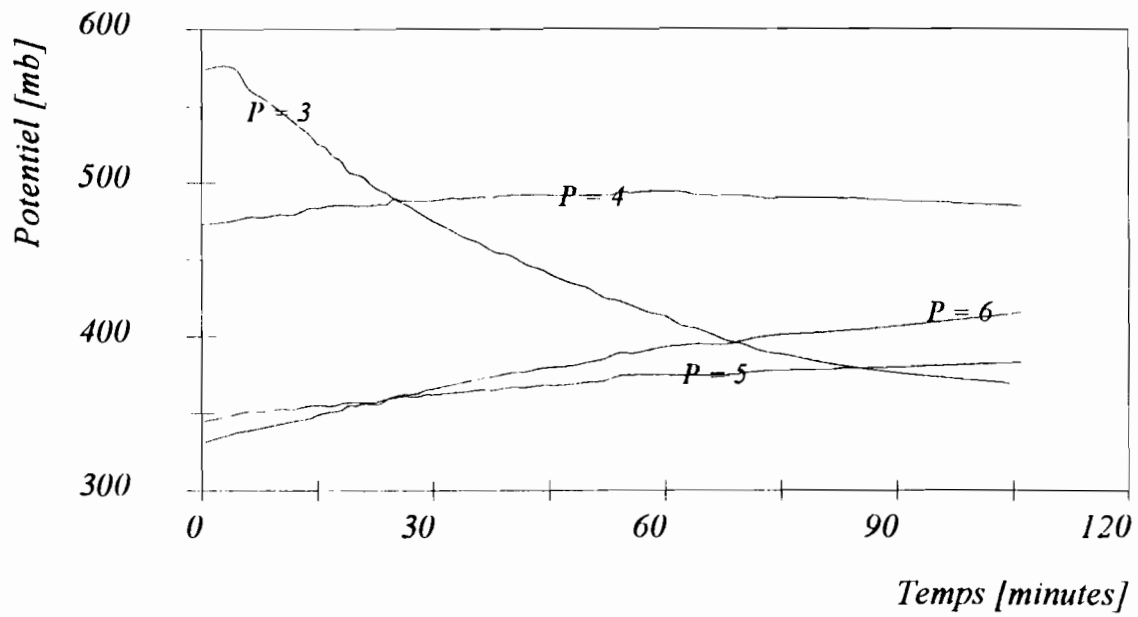


Figure 15 : Evolution des coefficients de ruissellement (CR) au cours des pluies  
*t* = temps de ressuyage en heures  
 En abscisse : pluies  
 En ordonnée : CR en %  
 CR des parcelles A2 et B2 (a)  
 CR des parcelles A1 et B1 (b)



a



b

Figure 16 : Progression du front d'humectation sur la parcelle A1  
 Pluie du 2 décembre 1994 (a)  
 Pluie du 5 décembre 1994 (b)  
 $P$  = profondeur en cm

## V. RESULTATS

Nos expériences se sont donc déroulées en trois parties bien distinctes. Une première partie consacrée à la simulation de pluie, une deuxième consacrée à l'étude de la cinétique de gonflement des fissures et de réhumectation des prisme et une dernière partie vouée à l'étude de la répartition spatiale de la fissuration. Nous allons présenter et discuter un à un les résultats de ces trois études.

### 5-1. La simulation de pluie

La simulation de pluie sur les parcelles A et B nous a permis d'observer les comportements suivants :

On voit sur la figure 15 que les coefficients de ruissellement (CR) sont très élevés sur les parcelles A et B et qu'ils augmentent en général au fur et à mesure des pluies. On note trois exceptions : sur la parcelle A2, il commence à chuter. Sur les parcelles B il chute après un temps de ressuyage de 48 heures. Le ruissellement est un peu plus important sur les parcelles A que sur les parcelles B et la différence entre les parcelles A et B diminue au fur et à mesure des pluies. La variation du type de pluie n'influence pas le ruissellement.

La figure 16 montre que le front d'humectation atteint une profondeur de 5 cm de sol après la première pluie et une profondeur de trois puis de deux centimètres seulement pour les pluies suivantes (les autres graphiques de la progression du front d'humectation au cours des pluies sont reportés dans les annexes 1 et 2).

Ces observations amènent les réflexions suivantes :

Comme nous l'avions imaginé, les parties hautes de la toposéquence ruissellent beaucoup, en moyenne le CR vaut 93 %. Les parties intermédiaires également puisque la moyenne des CR s'élève à 89 %. On peut donc conclure que la différence de position de la parcelle dans la partie non fissurée de la toposéquence n'est pas significative.

L'augmentation du CR au cours des pluies peut s'expliquer par l'augmentation de la saturation du sol en eau mais pas seulement. La dernière observation prouve que la surface du sol s'est transformée de sorte que les parcelles finissent par avoir un comportement identique. Sous l'effet des gouttes de pluie et du ruissellement, les deux surfaces acquièrent les mêmes caractéristiques et finissent par provoquer un ruissellement équivalent. Cette modification de la surface est causée par la formation d'une croûte qui empêche finalement le front d'humectation de pénétrer au delà de 2 cm dans le sol.

Nous avons observé cette « organisation pelliculaire de surface » pour pouvoir la classer. Nous nous sommes appuyés pour cela sur les travaux de Valentin et Casenave (1989) sans pour autant atteindre le niveau de détail de leurs descriptions, ce qui n'était pas le propos de notre étude.

Description de l'organisation pelliculaire de surface :

Microhorizon	épaisseur	type	porosité	couleur
Premier	< 0.5 mm	plasmique à fentes	nulle	gris-beige
Deuxième	< 0.5 cm	plasmique continu et sableux fin	nulle	gris-beige
Troisième	< 1 mm	argilo-sableux	vésiculaire	gris plus foncé beige

Tableau 3 : description de la croûte de surface

Ces trois microhorizons déterminent une croûte de ruissellement. Un caractère secondaire de la croûte n'apparaît pas dans cette détermination : nous mentionnerons pour mémoire le rôle de la décantation dans le façonnement du premier horizon de surface. En effet, à la fin de la précipitation, les particules fines solides transportées par l'écoulement se déposent sous l'effet du ralentissement du ruissellement. Le premier microhorizon est donc plus un horizon de décantation que de ruissellement. L'air piégé sous les trois premiers microhorizons est responsable de l'imperméabilisation de la surface.

La différence de CR entre les parcelles A et B pourrait s'expliquer de la façon suivante : le sol, situé à proximité de la zone fissurée, contient des microfissures invisibles en surface dans lesquelles l'air peut s'échapper, ce qui retarde l'imperméabilisation des premiers centimètres de la surface. C'est une hypothèse que nous n'avons pas pu vérifier. Il faudrait pour cela observer la croûte et le piégeage d'air sous-jacent après chaque précipitation ce qui nous obligerait à remanier une partie de la surface et modifierait par la suite le ruissellement.

On peut expliquer la soudaine influence du temps de ressuyage après la troisième pluie ainsi : au début de la simulation, un long temps de ressuyage favorise l'infiltration mais la formation de la croûte de ruissellement la ralentit. L'influence du temps de ressuyage, de l'augmentation de la saturation en eau du sol et de la formation de la croûte de ruissellement se compensent. Une fois la croûte constituée, les surfaces des parcelles sont similaires (après la troisième pluie les CR de A et B sont identiques) et seul le temps de ressuyage a encore une influence.

Il est évident que les pluies naturelles, de part leur structure et leur forte intensité provoquent la formation de cette croûte de ruissellement et que l'écoulement finit donc dans le fond des cuvettes fissurées où il provoque la réhumectation et le gonflement des prismes. La différence de situation topographique engendre donc un comportement hydrique différent qui lui-même génère des particularités pédologiques.

## 5-2. Cinétique de fermeture des fissures

Nous avons procédé à deux apports d'eau différents sur nos parcelles : l'une a été aspergée, l'autre irriguée par submersion. Les comportements se sont avérés assez similaires. Nous ne distinguerons donc plus les deux cas dans la suite de la discussion, sauf pour présenter une éventuelle particularité.

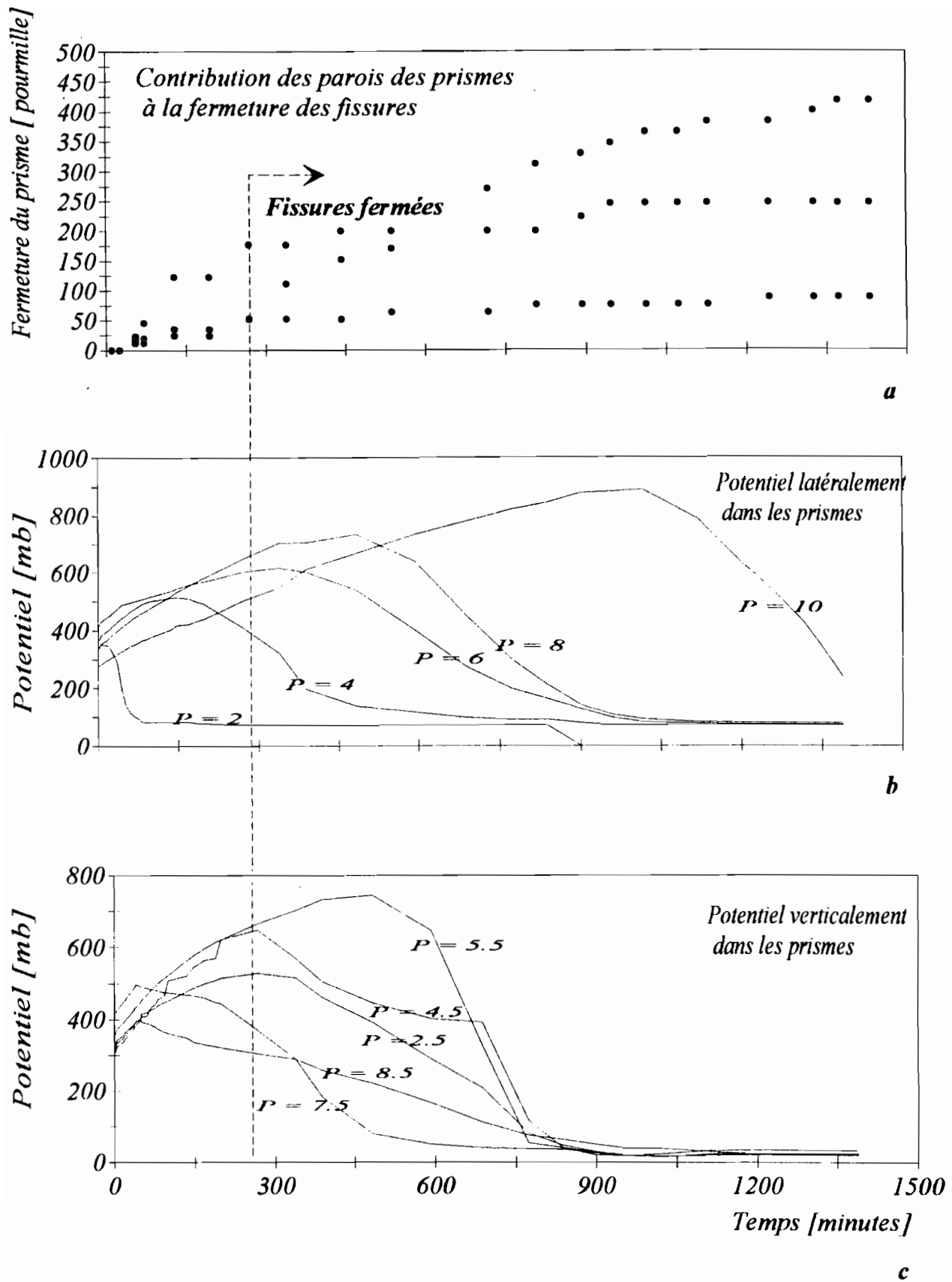


Figure 17 : Contribution des parois des prismes à la fermeture des fissures (pourmille) en fonction du temps (minutes) (a)  
 Potentiel du sol (mb) mesuré verticalement dans un prisme en fonction du temps (minutes) (b)  
 Potentiel du sol (mb) mesuré latéralement dans un prisme en fonction du temps (minutes) (c)



Fissure	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Participation [%]
Largeur de la fissure [cm]	1	1.5	1	1.5	1	1	1	1	1	1	2	2	
Déplacement lu sur la pince après 4 heures 30, lorsque la fissure est fermée [cm]	0.4	0.6	1	0.4	0.5	0.9	1	1	0.8	0.7	0.9	0.8	
Déplacement du prisme après 4 heures 30, lorsque la fissure est fermée [cm]	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	19.0
Déplacement du bord du prisme après 4 heures 30, lorsque la fissure est fermée [cm]	0.9	1.3	0.7	1.4	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	1.7	1.7	81
Déplacement du prisme à la fin de l'expérience [cm]	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	27
Déplacement du bord du prisme à la fin de l'expérience [cm]	0.8	1.2	0.7	1.3	0.8	0.7	0.6	0.5	0.7	0.7	1.6	1.6	73

Tableau 1 : Participation des prismes et de leurs bords à la fermeture des fissures

Parcelle d'aspersion 9 décembre 1994

num pincette	pincette haut <i>b [cm]</i>	pincette bas <i>c [cm]</i>	largeur fissure <i>a [cm]</i>	gonflement <i>[cm]</i>	longueur sec <i>ls [cm]</i>	longueur humide <i>lh [cm]</i>	Taux de retrait <i>[%]</i>	Taux de gonflement <i>[%]</i>
2	15	5.00	2.5	0.2	2.50	4.80	47.9	92.0
3	14.4	4.80	1	0.2	3.80	4.60	17.4	21.1
4	13.9	4.63	1.8	0.6	2.83	4.03	29.8	42.4
5	15	5.00	1.3	0.9	3.70	4.10	9.8	10.8
6	16.5	5.50	1.2	0	4.30	5.50	21.8	27.9
7	16.2	5.40	1.5	0.4	3.90	5.00	22.0	28.2
8	16.7	5.57	2	0.4	3.57	5.17	31.0	44.9
9	15.2	5.07	1.7	0.5	3.37	4.57	26.3	35.6
10	16.3	5.43	2	0.5	3.43	4.93	30.4	43.7
11	16.5	5.50	2.6	1	2.90	4.50	35.6	55.2
12	16.4	5.47	2.4	0.5	3.07	4.97	38.3	62.0
13	16.7	5.57	2	0.2	3.57	5.37	33.5	50.5
<i>Moyenne</i>							28.03	41.1

Parcelle d'irrigation 11 décembre 1994

num pincette	pincette haut <i>b [cm]</i>	pincette bas <i>c [cm]</i>	largeur fissure <i>a [cm]</i>	gonflement <i>[cm]</i>	longueur sec <i>ls [cm]</i>	longueur humide <i>lh [cm]</i>	Taux de retrait <i>[%]</i>	Taux de gonflement <i>[%]</i>
2	16	5.33	1	0.2	4.33	5.13	15.6	18.5
3	13.7	4.57	1.5	0.3	3.07	4.27	28.1	39.1
4	14.8	4.93	1	0.3	3.93	4.63	15.1	17.8
5	15.1	5.03	1.5	0.2	3.53	4.83	26.9	36.8
6	14.8	4.93	1	0.2	3.93	4.73	16.9	20.3
7	15.2	5.07	1	0.3	4.07	4.77	14.7	17.2
8	14.4	4.80	1	0.4	3.80	4.40	13.6	15.8
9	14.8	4.93	1	0.5	3.93	4.43	11.3	12.7
10	15.2	5.07	1	0.3	4.07	4.77	14.7	17.2
11	14.9	4.97	1	0.3	3.97	4.67	15.0	17.6
12	14.5	4.83	2	0.4	2.83	4.43	36.1	56.5
13	16.9	5.63	2	0.4	3.63	5.23	30.6	44.0
<i>Moyenne</i>							19.12	24.44

Tableau 2 : Taux de retrait et de gonflement des bordures des prismes



*Figure 18 : Profil ouvert dans le sol à l'endroit d'une fissure, après 22 heures d'irrigation*

Nous avons observé les faits suivants : la figure 17 montre le mouvement des fissures représentatives de toute la gamme des cinétiques de fermeture observées, le moment où les fissures se sont fermées ainsi que la progression du front d'humectation verticalement et latéralement dans les prismes.

Les premiers mouvements des pincettes apparaissent après environ une heure et 77 mm d'eau appliqués. A ce moment, le front d'humectation se trouve à 2 cm d'épaisseur latéralement et à moins de 2 cm de profondeur verticalement dans les prismes.

Après 4 heures 30, les premières fissures sont fermées en surface mais les pincettes continuent à bouger et n'ont transmis qu'un déplacement de 19 % en moyenne de la largeur de la fissure (voir tableau 1). Le front d'humectation n'a pas franchit la profondeur de 2.5 cm ni l'épaisseur de 4 cm.

Après 22 heures, les pincettes ne bougent plus. Le front d'humectation se trouve seulement à 8 cm latéralement et a dépassé la profondeur de 5.5 cm (il n'y a pas de mesures fiables au-delà de cette profondeur). On voit sur la figure 18 que seul le sol à proximité de la fissure est réhumecté.

Ces observations amènent les commentaires suivants :

#### *5-2-1. La chronologie de la réhumectation et du gonflement des prismes :*

L'eau gagne d'abord les fissures et commence par réhumecter les bords des prismes et la surface. Contrairement à ce que l'on attendait, le gonflement du prisme a lieu au sommet et en bordure d'abord puisque les fissures sont fermées avant que le coeur et le fond du prisme ne soient réhumectés. On a pu observer lors de la simulation d'irrigation des fissures fermées en leur sommet mais ouvertes au dessous. Petit à petit, l'eau se redistribue lentement dans le reste du profil comme nous le montrent les mesures tensiométriques (voir figure 17).

#### *5-2-2. Le mécanisme de fermeture des fissures :*

Le déplacement du sol mesuré par les pinces ne suffit pas à expliquer la fermeture des fissures.

A la fin de l'expérimentation, la plupart des fissures sont cependant jointives.

La pince ne rend compte que du déplacement du prisme à l'extérieur des pointes. Le reste du mouvement est causé par la tranche de sol se situant à l'intérieur des pointes, c'est-à-dire les premiers centimètres des bords du prisme (voir figure 10). On assiste donc à un comportement différentiel des parties du prisme. Il apparaît clairement que la contribution des parois à la fermeture des fissures est très importante (voir tableau 1). Les bordures du prisme montrent un taux d'expansion linéaire très important (voir tableau 2 et la figure 10 qui l'illustre), beaucoup plus élevé que celui que l'on est en droit d'attendre en considérant les échantillons étudiés en laboratoire. En effet, le retrait

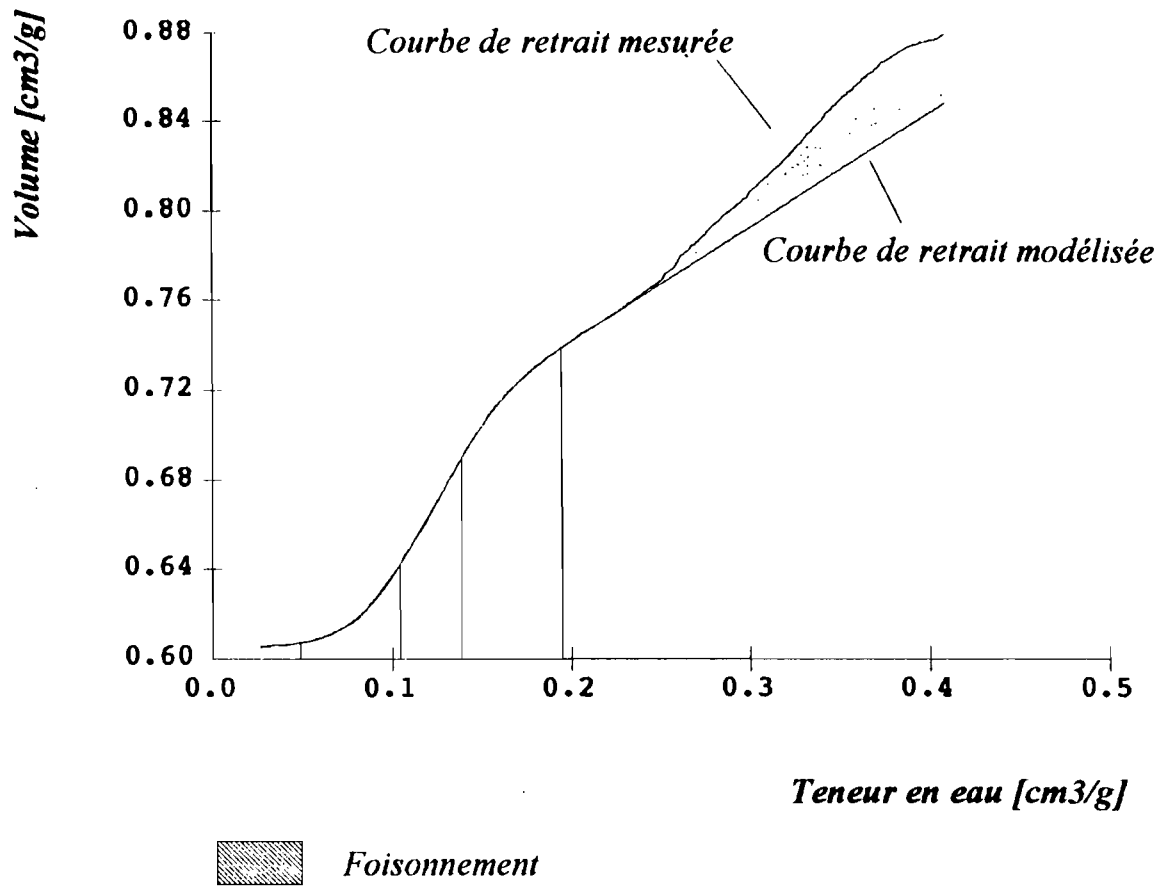


Figure 19 : Courbe de retrait sur un échantillon de sol de Pont-Gary

volumique d'un sol composé de 50 % d'argiles dont 20 % de kaolinites vaut ici environ 20 %. On transforme cette valeur en retrait linéaire.

Soient :  $V_f$  le volume final,  $V_o$  le volume initial,  $L_f$  la longueur finale et  $L_o$  la longueur initiale.

1)  $(V_f - V_o) / V_o = 0.2$

2)  $V_f / V_o = 1 + 0.2$  si  $V_o = 1$

3)  $V_f = V_o * (L_f/L_o)^3$  si l'hypothèse de l'isotropie du retrait est admise.

4)  $L_f = (1.2)^{1/3}$  pour  $L_o = 1$

5) Taux de retrait linéaire = 6 %

Le taux de retrait des bordures se calcule comme suit :

$$(L_h - L_s) / L_h$$

Le taux de retrait des bordures des fissures donne une valeur moyenne de 28 % pour la parcelle aspergée et de 19 % pour la parcelle submergée, ce qui représente trois à cinq fois la valeur que l'on est en droit d'attendre.

Les observations précédentes montrent qu'il faut expliquer la fermeture des fissures par un phénomène autre que celui du gonflement des prismes. C'est en effet par foisonnement du sol des bordures que les fissures se ferment. Le foisonnement est défini par Hénin (1976) à une échelle macroscopique comme « un accroissement du niveau du sol, dû en particulier au travail de terrain, mais également à toutes les autres actions. Il correspond à une augmentation de la porosité sur une épaisseur plus ou moins grande du profil... ». Dans notre cas, le foisonnement est causé par l'eau et est visible à une échelle centimétrique autant latéralement que verticalement. L'eau occupe l'espace libre entre les agrégats et les écarte sans pour autant les séparer. L'horizon qui foisonne garde sa cohésion mais prend un aspect spongieux observable sur les faces structurales des fissures.

Ce comportement du sol apparaît sur les courbes de retrait effectuées en laboratoire mais avait été considéré comme une déformation due à la manipulation car il n'avait jamais été observé sur le terrain (voir figure 19).

Après la fermeture des fissures, les pincettes continuent à montrer que le prisme bouge. Le gonflement du prisme se poursuit et comprime les bordures (voir tableau 1). En maintenant l'irrigation ou l'aspersion plus longtemps, l'eau finirait par atteindre le cœur du prisme et provoquerait son gonflement complet.

Le foisonnement des surfaces est donc un phénomène très rapide. On peut toutefois se demander si la lenteur et l'inertie du processus de gonflement des prismes n'est pas simplement due à une erreur de mesure ou à des pertes d'eau dans nos parcelles. Il convient donc de vérifier que l'expérimentation a bien fonctionné.

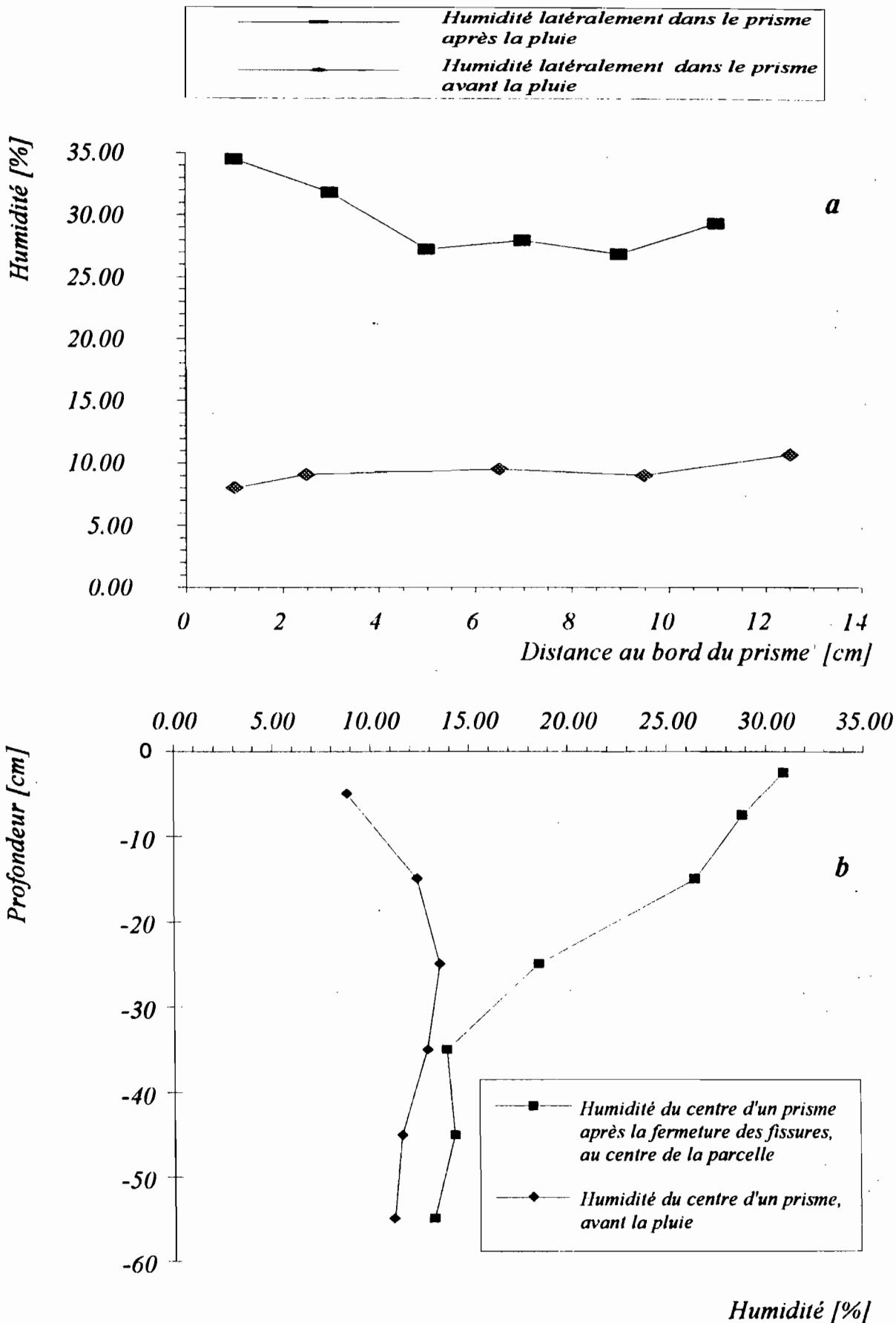


Figure 20 : Profils d'humidité  
 Profil pris latéralement dans le prisme (a)  
 Profil pris verticalement dans les prisme (b)

*a) Vérification du système de mesure des fissures :*

Un dispositif de repères fixes (clous cavaliers plantés dans le sol) a été placé aux pieds des pincettes pour s'assurer qu'aucun mouvement du sol ne se faisait sans les déplacer. On n'a constaté aucun déplacement relatif des pieds de la pincette par rapport aux points fixes ce qui prouve que les mouvements de la pincette étaient bien solidaires de ceux du prisme.

*b) Vérification de l'étanchéité des parcelles*

La quantité d'eau stockée dans la parcelle se déduit des profils d'humidité pris soit au centre d'un prisme soit latéralement dans le sol à une profondeur de 15 centimètres. On observe déjà qu'une part faible de l'eau a servi à réhumecter le sol en profondeur (voir figure 20).

La quantité d'eau stockée dans la parcelle vaut selon le profil au centre du prisme 155.7 litres. Cette valeur sous-estime la moyenne de la quantité d'eau sur la parcelle puisque nous avons vu plus haut que le centre des prismes était beaucoup moins bien humecté que les bordures. La quantité d'eau stockée selon le profil latéral vaut 361 litres. Cette valeur surestime la moyenne de la quantité d'eau sur la parcelle puisqu'elle est mesurée à une profondeur où le front d'humectation a déjà bien pénétré. Le stock d'eau se trouve entre ces deux valeurs.

La quantité d'eau déversée au total sur la parcelle est de 332.5 litres. On constate donc que les ordres de grandeurs sont cohérents.

Après 15 minutes d'aspersion à une intensité de 88 mm/h, l'eau affleure à la surface de la parcelle. On vérifie alors que la quantité d'eau déversée n'excède pas le volume des fissures et le volume de sol humecté à ce moment-là (moins de 2 cm selon le tensiomètre latéral) ce qui montrerait que le système n'est pas étanche.

La quantité d'eau apportée après 15 minutes vaut 49.95 litres.

Le volume de fissure calculé sur la parcelle (ci-après) vaut 22, 5 litres. Les 27.45 litres restant ont pu humecter le sol en surface et sur les parois des fissures. La surface totale développée par ce système vaut environ 550 dm<sup>2</sup>. Si l'on suppose une teneur en eau volumique de 40 % de la partie du sol humectée, les 27.45 litres correspondent à 1.25 centimètres de profondeur de la zone humectée en surface et sur les parois. Ce résultat est cohérent avec nos mesures tensiométriques.



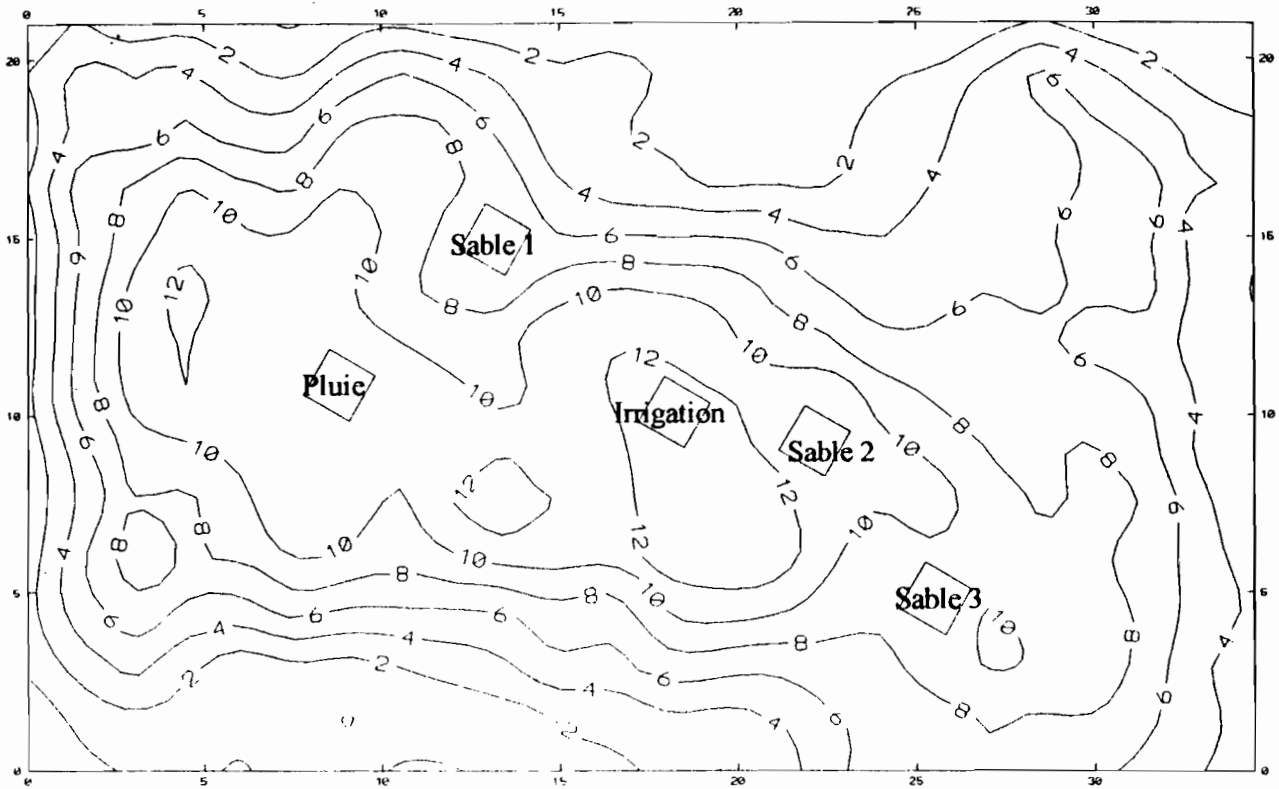


Figure 21 a : Carte des fissures, volume en l/m<sup>2</sup> estimé par krigeage  
(Distances en mètres)

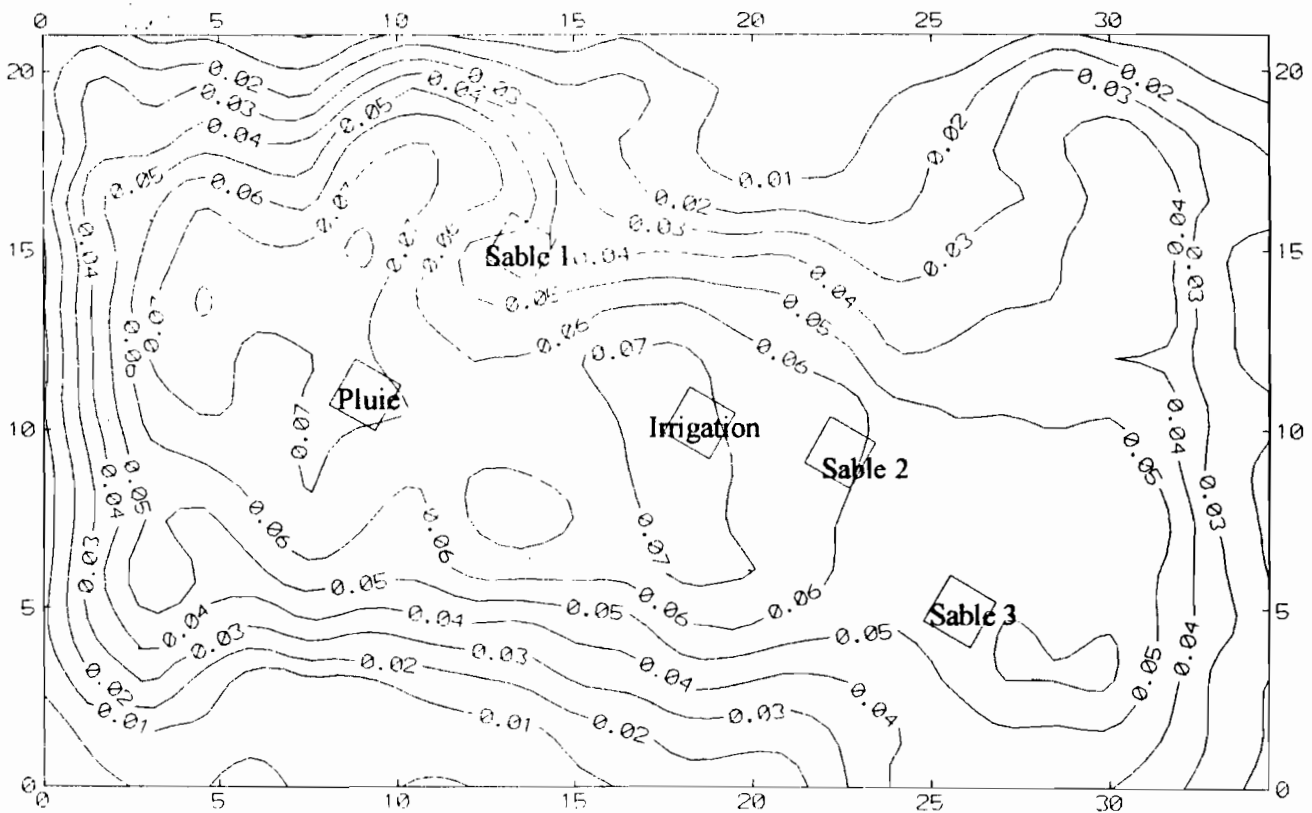


Figure 21 b : Carte du retrait linéaire en %, surface du sol  
(Distances en mètres)

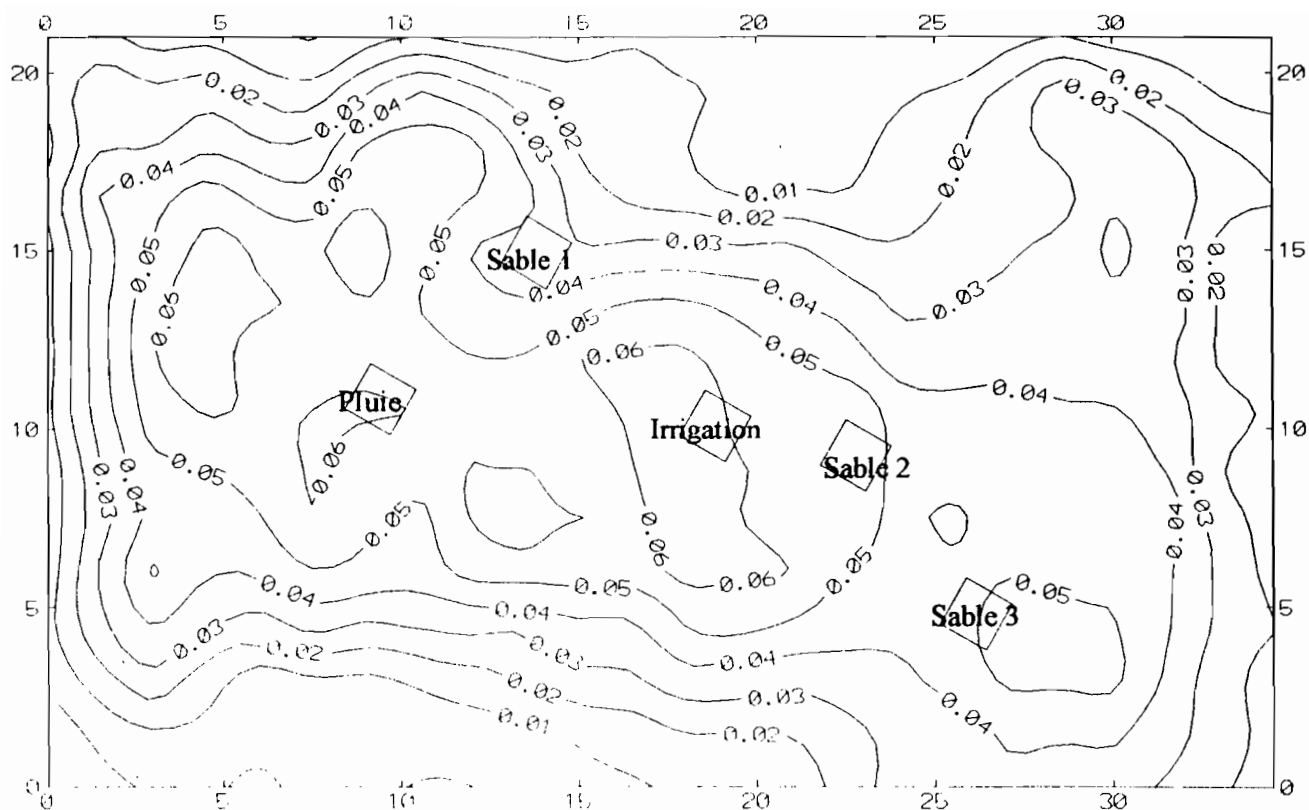


Figure 21 c : Carte du retrait linéaire en %, profondeur 2 cm  
(Distances en mètres)

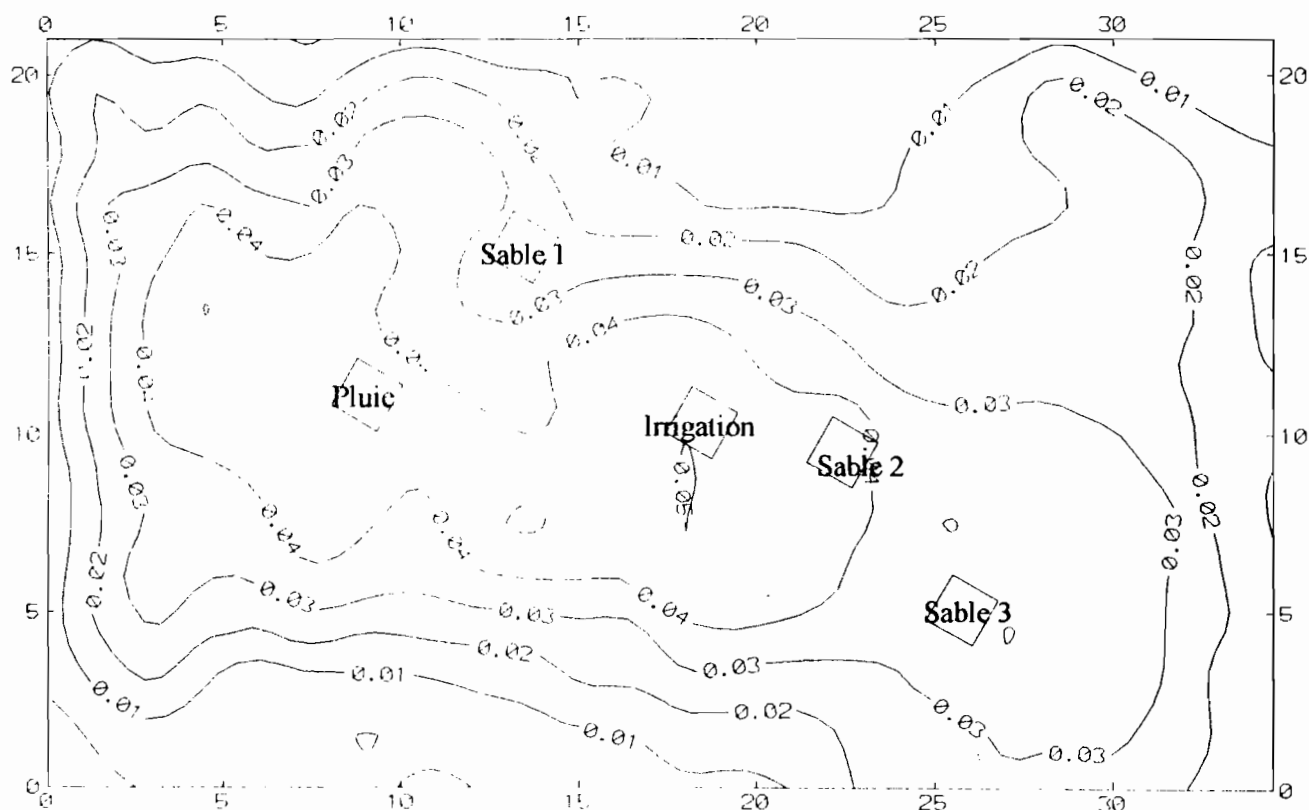


Figure 21 d : Carte du retrait linéaire en %, profondeur 5 cm  
(Distances en mètres)

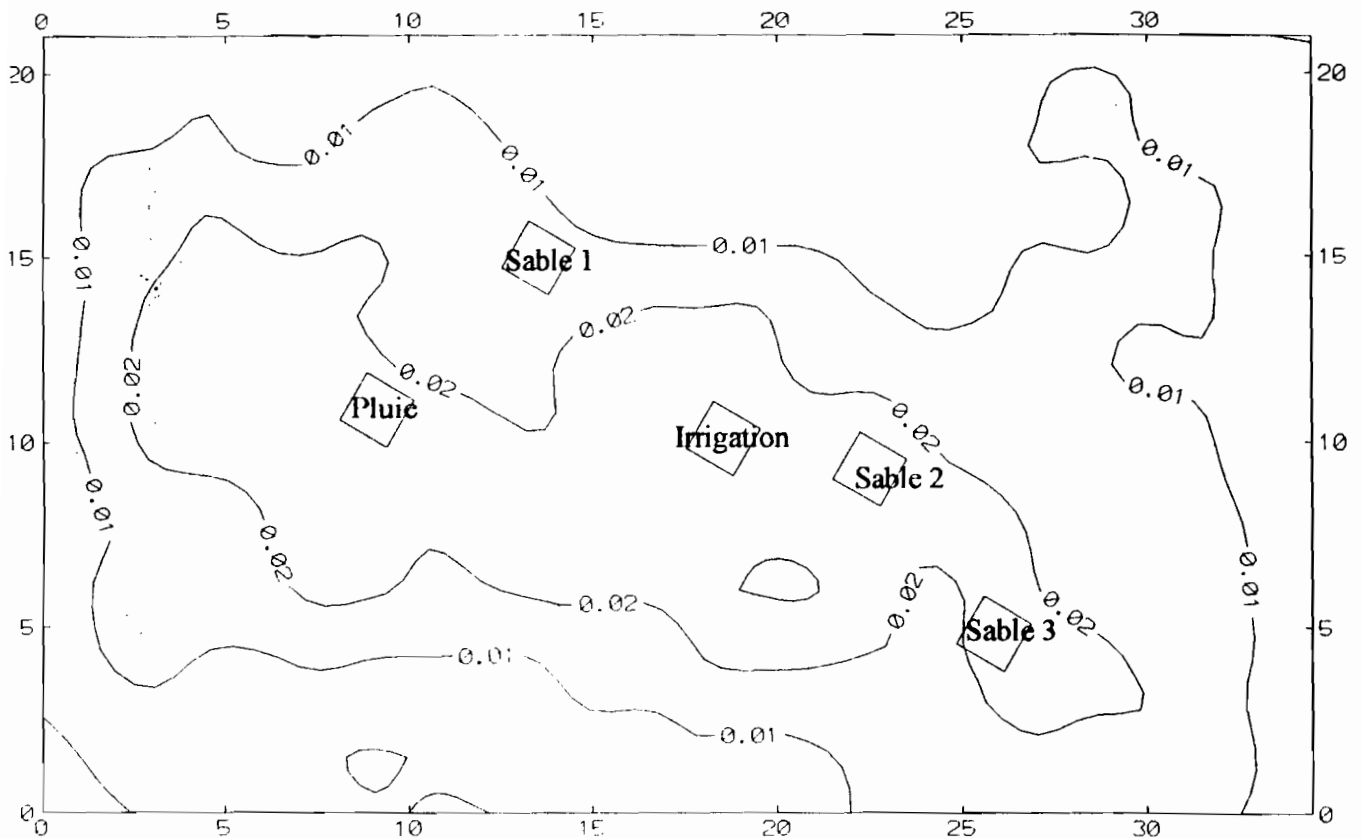


Figure 21 e : Carte du retrait linéaire en %, profondeur 10 cm  
(Distances en mètres)

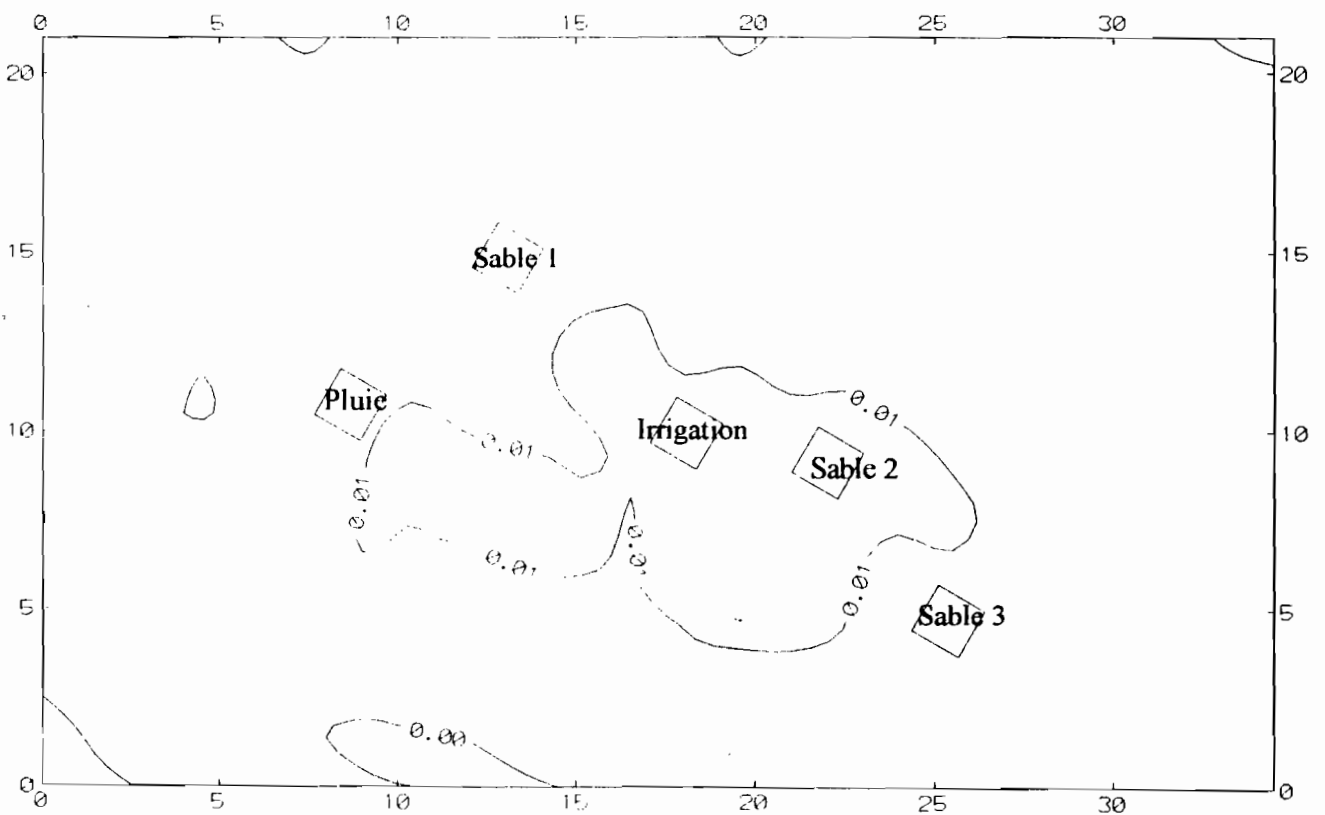


Figure 21 f : Carte du retrait linéaire en %, profondeur 15 cm  
(Distances en mètres)

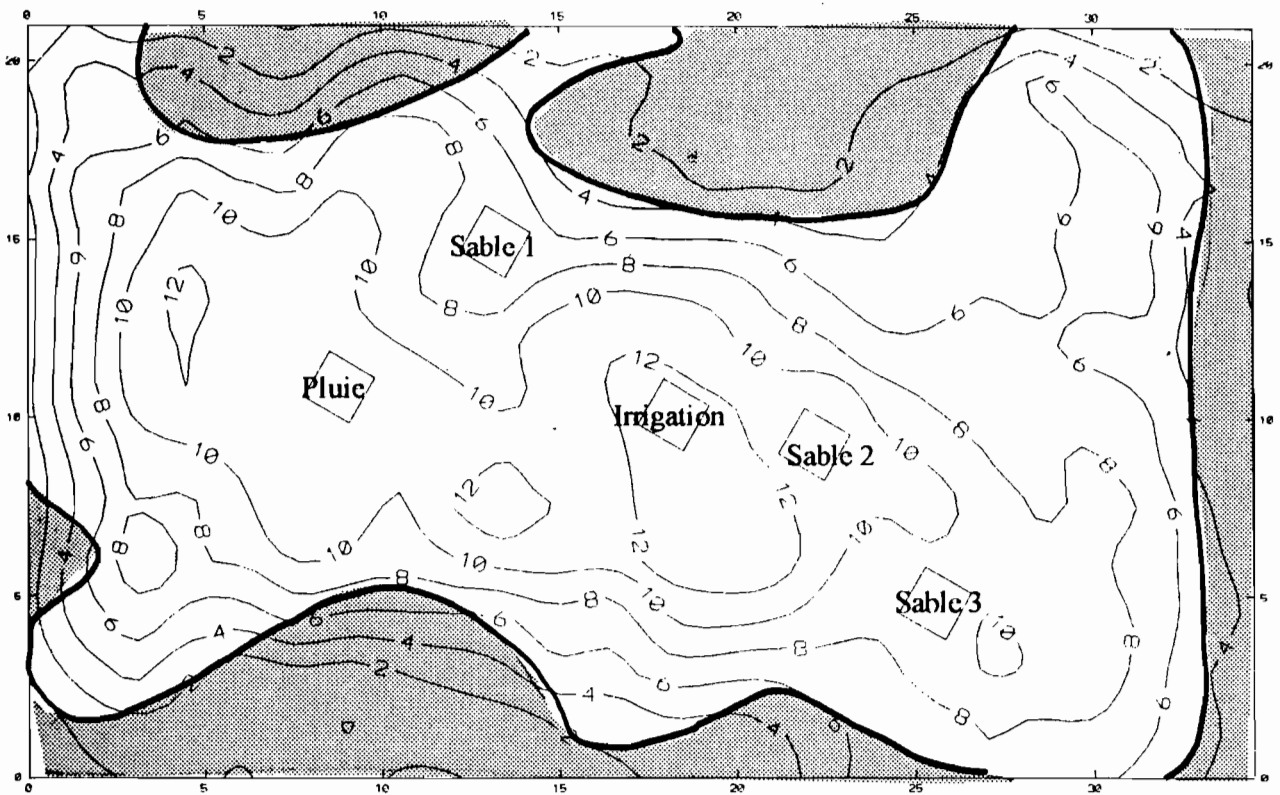


Figure 21 g : Carte du volume de fissures et de la couverture herbeuse

Zone enherbée :

Zone nue :

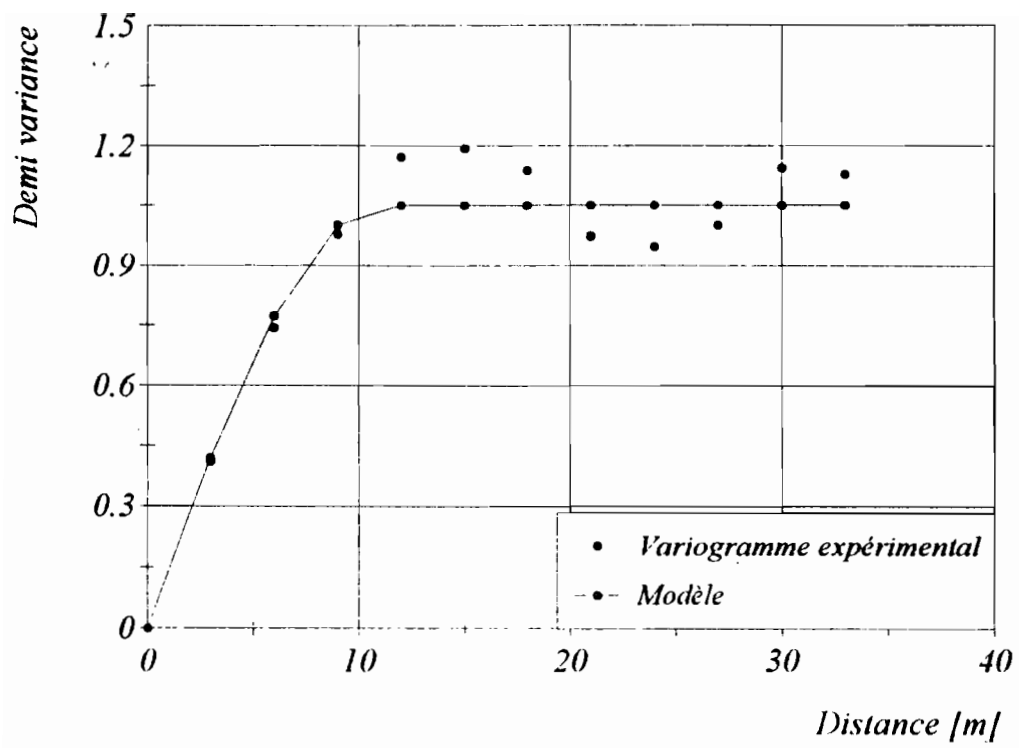


Figure 22 : Variogramme du volume de fissures

## 5-3. Cartographie de la fissuration

### 5-3-1. Présentation des cartes

Nous avons obtenus 6 cartes décrivant la fissuration de notre zone d'étude : une carte des volumes de fissure, et cinq cartes du retrait linéaire en % aux profondeurs 0, 2, 5, 10 et 15 centimètres (voir figures 21 a, b, c, d, e et f).

Les zones les plus fissurées ont un volume de vide de 12 litres par m<sup>2</sup>. On remarque deux zones bien distinctes à cette densité de fissuration.

### 5-3-2. Qualité de la méthode

Les questions que nous nous posons par rapport aux cartes du retrait linéaire aux différentes profondeurs et de volume de fissures portent sur la représentativité et la reproductibilité de la méthode et sur l'adéquation des échelles de mesure et du phénomène observé. L'étude des variogrammes obtenus permet de discuter de la qualité de notre détermination. Les variogrammes du volume de fissures et des retraits linéaires aux différentes profondeur présentent tous la même structure illustrée par la figure 22.

#### a) *L'effet de pépité extrapolé par le variogramme = 0*

Cela signifie que la variance de la mesure locale est très faible. Notre méthode est donc reproductible. De plus, l'échelle de 4 × 3 mètres choisie pour les transects a permis de saisir le segment élémentaire représentatif permettant de reproduire localement la fissuration et n'est donc pas trop courte.

#### b) *La structure du variogramme est nette*

Le variogramme croît jusqu'à atteindre un palier de 1.06 pour une portée de 11 mètres.

Cela signifie que les mesures réalisées mettent en évidence une régionalisation des valeurs. La taille des transects n'était pas trop longue (des transects plus longs auraient produit un lissage de l'information).

#### c) *Le variogramme atteint un pallier*

L'échelle de la parcelle et du maillage choisis sont bien adaptés l'un à l'autre pour identifier la structure.

Enfin, les cartes de volumes obtenues correspondent qualitativement avec les observations faites sur les terrain. Un croquis où nous avons reporté les zones

enherbées montre que ces zones sont justement celles qui sont fissurées (voir figure 21 g).

Pour tester la représentativité quantitative de la carte de volume de fissuration nous avons tenté d'effectuer un calage.

### 5-3-3. Vérification de la méthode d'estimation quantitative des volumes de fissure :

Sur trois parcelles de 2.25 m<sup>2</sup>, nous avons comparé les volumes de fissures estimés par trois méthodes différentes : la méthode du krigeage des volumes obtenus par Abedine et Robinson (appelée volume carte). Une mesure de la longueur, largeur et profondeur de la totalité des fissures de la parcelle, assimilées à des prismes (appelée volume théorique). Un remplissage des fissures par du sable fin (appelée volume sable).

Les résultats que nous avons obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

	<b>Parcelle sable 1</b>	<b>Parcelle sable 2</b>	<b>Parcelle sable 3</b>
<b>Volume sable [l / m<sup>2</sup>]</b>	10	7.5	11.8
<b>Volume carte [l / m<sup>2</sup>]</b>	7	11	10
<b>Volume théorique [l / m<sup>2</sup>]</b>	-	6.7	6.8

Tableau 7 : Volumes de fissure estimés.

On constate que les valeurs obtenues sont hétérogènes. Les écarts entre les méthodes ne s'ordonnent pas de la même façon d'une parcelle à l'autre. Chaque méthode comporte des risques d'erreur que nous allons analyser. La méthode d'Abedine et Robinson ne permet pas de grosses erreurs, d'ailleurs l'effet de pépité du variogramme extrapolé à l'origine est nul. La mesure de toutes les fissures est par contre très sensible à une mauvaise estimation de la largeur et de la longueur de la fissure. La méthode utilisant du sable sous-estime généralement le volume parce que le fond des fissures est parfois remplis d'herbe et de terre provenant de l'effritement des bords des prismes.

En conclusion nous pouvons simplement remarquer que nous n'avons pas assez de répétition de mesures pour trancher pour l'une ou l'autre méthode mais celle d'Abedine et Robinson est a priori la plus cohérente et la plus sûre. Elle permet en tout cas une bonne représentation qualitative des variations du terrain. On ne peut cependant pas garantir sa précision pour estimer quantitativement les volumes de fissures.

## VI. CONCLUSION GENERALE

Nous avons pu par ce travail observer le ruissellement et le fonctionnement des fissures d'une séquence de vertisols. Nous avons constaté les faits suivants :

### 6-1. Étude du ruissellement

Notre objectif était de caractériser les CR de la séquence. Nous avons constaté qu'ils atteignaient 100 % moins la quantité d'eau nécessaire à humecter les premiers centimètres de sol situés sur le fond imperméable de la croûte de surface.

Pour cette expérience, nous sommes parvenus à mettre au point une méthode de mesure des potentiels sur des distances très fines qui s'applique bien à l'étude des encroûtements de surface. Cette technique est susceptible d'intéresser les hydrodynamiciens cherchant à simuler l'infiltration de l'eau sous pluie simulée, à travers une croûte de sol.

### 6-2. Étude de la fissuration

L'observation de la chronologie de la fermeture des fissures nous a paru particulièrement intéressante. C'est un phénomène rapide (ordre de grandeur de l'heure) auquel participent, dans un premier temps, non pas tout le prisme mais uniquement ses bordures. De plus, contrairement à ce que rapporte la littérature, la fermeture des fissures s'est produite par le sommet du prisme et non pas par sa base. Ceci est certainement dû au mode d'apport rapide de l'eau. Cette fermeture par le haut entraîne un piégeage de l'air sous la surface tandis que dans le cas d'un apport très lent, l'eau se répand dans tout le réseau de fissure et ne réhumecte que la base des prismes qui commencent donc probablement par se fermer par le bas.

Ce mécanisme, qui n'avait jamais été décrit à notre connaissance, présente un intérêt pour les hydrodynamiciens qui s'appliquent à connaître et à modéliser les écoulements préférentiels dans la macroporosité qui dépend de la dynamique fissurale.

Enfin, la subtilité du mécanisme peut remettre en question les débats touchant à l'isotropie et l'anisotropie du retrait. Il est avant tout capital de préciser l'échelle et les pas de temps de l'observation du phénomène et il semble dès lors peu raisonnable de vouloir le quantifier à une échelle macroscopique.

Nous avons pu d'autre part remarquer le gonflement différentiel des prismes sous l'effet du foisonnement du sol. Ce foisonnement apparaissait déjà sur les courbes de retrait tracées en laboratoire sur des échantillons de sol non remaniés mais on l'avait imputé à un défaut du protocole de la mesure du retrait. Nos observations réalisées sur le terrain nous permettent donc d'affirmer que ces courbes ne fournissent pas de résultats aberrants lorsque les teneurs en eau sont élevées. Reste à montrer maintenant si le foisonnement mesuré sur les échantillons de sol est provoqué par l'échantillon entier ou par ses bordures uniquement



pour pouvoir ensuite soutenir que les mesures de laboratoire reproduisent fidèlement les observations effectuées in situ ou non.

### **6-3. Domaine d'application des résultats**

Cette étude peut déboucher sur d'autres recherches.

Possédant une cartographie des surfaces occupées respectivement par les zones ruisselantes et les zones fissurées et connaissant les CR il serait possible d'utiliser des chronologies de pluies passées pour simuler et mieux connaître le remplissage des mares temporaires utilisées pour les cultures de décrues.

Plus généralement, en procédant à une étude plus systématique de la dynamique fissurale en relation avec le régime d'apport d'eau et le comportement du gonflement du sol, on posséderait l'outil indispensable à toute modélisation des écoulements dans ce type de sol.

## ANNEXES

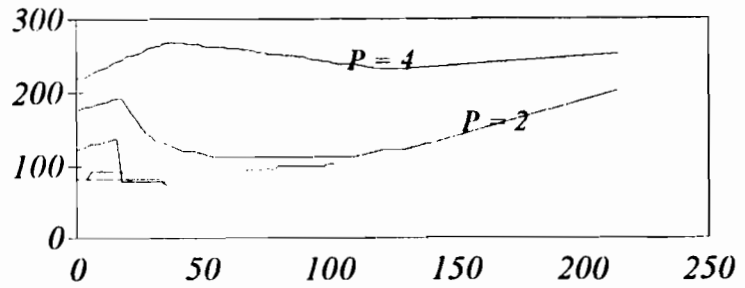
Annexe 1 : Relevé tensiométrique de la parcelle B

Annexe 2 : Relevé tensiométrique de la parcelle A

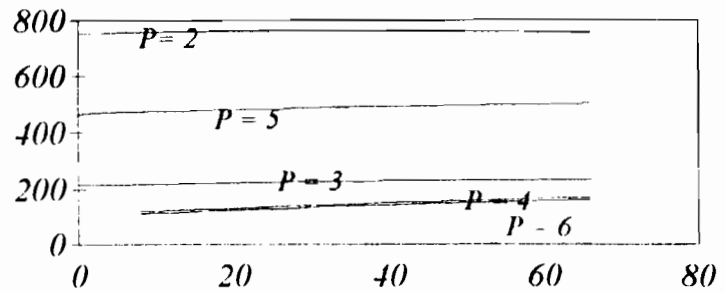
Annexe 1 : Relevés tensiométriques de la parcelle B

En abscisse : temps [min]  
 En ordonnée : potentiel [mh]  
 P = Profondeur en cm

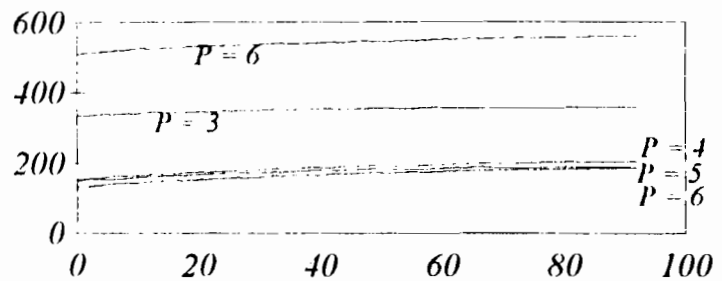
Parcelle B : 2.12. 1994



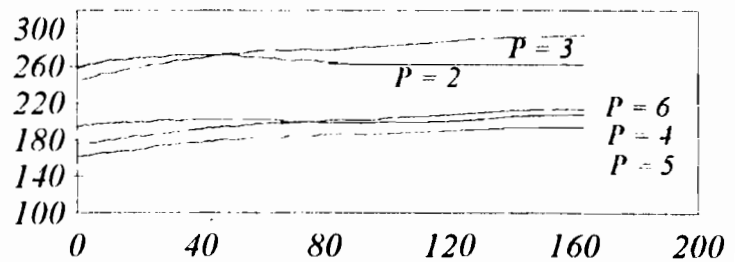
Parcelle B : 5. 12. 1994 matin



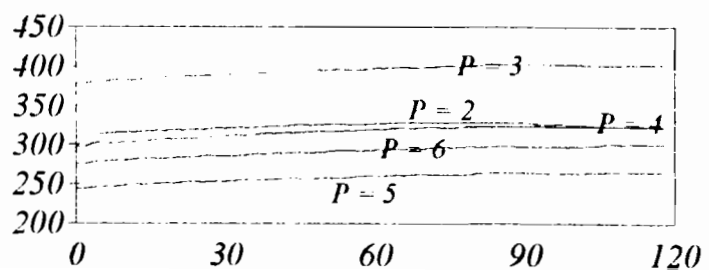
Parcelle B : 5. 12. 1994 soir



Parcelle B : 7. 12. 1994



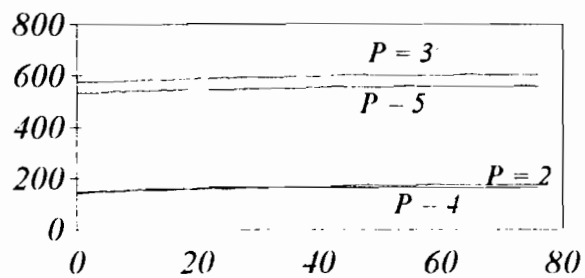
Parcelle B : 8.12. 1994



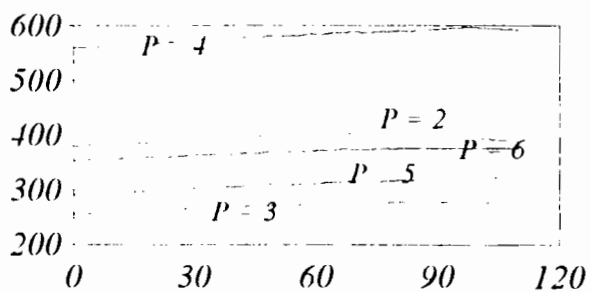
Annexe 2 : Relevés tensiométriques de la parcelle ~~A~~

En abscisse : temps [min]  
 En ordonnée : potentiel [mb]  
 P = Profondeur en cm

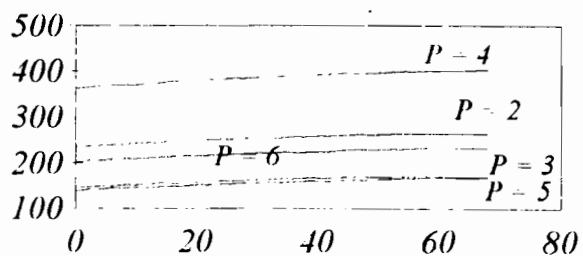
Parcelle A : 5. 12. 1994 soir



Parcelle A : 8. 12. 1994



Parcelle A : 7. 12. 1994



## BIBLIOGRAPHIE

- BERNARD A.**, 1987, Le simulateur de pluie deuxième génération, note technique. Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM Montpellier.
- BLAKE G., SCHLICHTING E., and ZIMMERMANN U.**, 1973, Water Recharge in a Soil with Shrinkage Cracks, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 37
- BOIVIN P. et al**, 1995, Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, ORSTOM actualité février 95, éd. ORSTOM Paris.
- BOIVIN P.**, 1991, Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Collection Etudes et Thèses, ORSTOM éditions, Paris, 226 pages.
- BOOLTINK H. W. G. and BOUMA J.**, 1991, Physical and Morphological Characterization of Bypass Flow in a Well-Structured Clay Soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1249-1254 (1991).
- BOUMA J. and LOVEDAY J.**, 1988, in *Vertisols : Their Distribution, Properties, Classification and Management*. Larry P. Wilding and Ruben Puentes Editors, 181 pp.
- BOUMA J., DEKKER L. W. and WÖSTEN J. H. M.**, 1978, A Case Study on Infiltration into Dry Clay Soil II. Physical Measurements, *Geoderma*, 20 (1978) 41-51
- BOUMA J., DEKKER L. W.**, 1978, A Case Study on Infiltration into Dry Clay Soil I. Morphological Observations, *Geoderma*, 20: 27-40
- CASENAVE A. et VALENTIN Ch.**, 1989 Les états de surface de la zone sahéenne, Influence sur l'infiltration, Editions ORSTOM, Paris 1989, 226 pages.
- CHENG YANN and PETTRY D. E.**, 1993, Horizontal and Vertical Movements of Two Expansive Soils in Mississippi, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1542-1547.
- COCONNIER K.**, 1992, mémoire de fin d'études. Typologie des sols vertiques (vallée du fleuve Sénégal), confrontation de la morphologie à la physico-chimie, Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes.
- COQUET Y.**, 1995, Etude in situ des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 355 pages.
- GROUZIS M., ALBERGEL J. et BOIVIN P.**, 1992, Atelier de Formation aux Techniques d'Etude de l'eau dans le système Sol - Plante - Atmosphère, ORSTOM Dakar.
- GUILLIERME L.**, 1993, mémoire de fin d'études. Etude de la variabilité physico-chimique des vertisols, moyenne vallée du fleuve Sénégal, Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes.
- HENIN S.**, 1976, Cours de physique du sol. Vol. I. ORSTOM éditions.
- HILLEL D.**, 1980, *Fundamentals of soil physics*. Acad. Press. New York.
- HISAYOSHI INOUE**, 1993, Lateral water flow in a clayey agricultural field with cracks, *Geoderma*, 59 : 311-325
- KNEALE W. R. and WHITE R. E.**, 1984, The Movement of Water through Cores of a Dry (Cracked) Clay-Loam Grassland Topsoil, *Journal of Hydrology*, 95: 361-365

- MITCHELL A. R. and van GENUCHTEN M. Th.**, 1993, Flood Irrigation of a Cracked Soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:490-497.
- RADULOVICH R., SOLLINS P., BAVEYE P., and SOLORZANO E.**, 1992, Bypass Water Flow through Unsaturated Microaggregated Tropical Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:721-726.
- SEGUIS L., CHEVILLOTTE H., GASCUEL-ODOUX C., BOIVIN P. et BRAUDEAU E.**, 1990, Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Contribution de l'imagerie satellitaire. 4ème journée de l'Université des Réseaux d'Expression Française « télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique », Montréal, Québec.
- TALSMA T. and van der LELIJ A.**, 1976, Infiltration and Water Movement in an in Situ Swelling Soil during Prolonged Ponding, *Aust. J. Soil Res.*, 14, 337-49.
- VAN STIPHOUT T. P. J., VAN LANEN H. A. J., BOERSMA O. H. and BOUMA J.**, 1987, The Effect of Bypass Flow and Internal Catchment of Rain in the Water Regime in a Clay Loam Grassland Soil, *Journal of Hydrology*, 95 1-11
- WOPEREIS M. C. S., BOUMA J., KROPFF M. J. , SANIDAD W.**, 1994, Reducing bypass flow through a dry, cracked and previously puddled rice soil, *Soil & Tillage Research*, 29 : 1-11
- ZEIN EL ABEDINE A. and ROBINSON GLENN H.**, 1971, A Study of Cracking in Some Vertisols of the Sudan, *Geoderma*, 5: 229-241