

**Institut Sénégalais de Recherches Agricoles  
(ISRA)**

**Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le développement  
(CIRAD)**

**Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération  
(ORSTOM)**

**Réseau R<sup>3</sup>S**

**PROGRAMME CEE DG XII N° TS2A 0017 CD**

**HYDRODYNAMIQUE DES SOLS  
BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX DE  
THYSSE-KAYMOR**

**Rapport de la campagne de mesures Fev.-Avr. 1988**

***J. Albergel*<sup>1</sup>, *A. Bernard*<sup>1</sup>, *P. Ruelle*<sup>2</sup>, *J. Touma*<sup>1</sup>**

*1 UR 2B Département Eaux Continentales  
de l'ORSTOM*

*2 CIRAD, Département Systèmes Agraires  
de l'ISRA*

Dakar, Mars 1989

## HYDRODYNAMIQUE DES SOLS BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX DE THYSSE-KAYMOR

Rapport de la campagne de mesures Fev.-Avr. 1988

*J. Albergel, A. Bernard, P. Ruelle, J. Touma*

### INTRODUCTION

Les mesures entreprises en saison sèche 1988 et récapitulées dans ce rapport de campagne font suite :

- aux travaux de AUDIN (1987) sur la modélisation du bilan hydrique d'une parcelle d'arachide et d'une parcelle de mil en milieu paysan.

- aux travaux de RUELLE, SENE. et VAUCLIN (1988) sur la représentativité spatiale des mesures locales.

L'ensemble des mesures ont été réalisées sur le micro bassin versant de NDIBA. (µBV1 pour les agronomes, station S4 pour les hydrologues).

Deux expérimentations ont été menées en parallèle :

- étude locale de l'infiltration sous pluies simulées et sous MUNTZ. L'objectif visé est une meilleure compréhension physique de l'hydrodynamique de surface et souterraine qui doit conduire à une modélisation du ruissellement qui complètera le bilan hydrique simulé, actuellement disponible.

- étude spatiale des relations pluie-ruissellement-états de surface. Il s'agit de mesures du ruissellement sous pluie simulée sur 3 différentes unités définies à partir de la carte des états de surface (SENE, 1986) et de la carte Krigée de l'humidité (RUELLE et al. 1988).

Après une présentation succincte du micro bassin versant de NDIBA, ce rapport consigne les protocoles de mesures, la description des parcelles et les mesures effectuées. Une première interprétation des résultats est tentée.

### 1. LE MICRO- BASSIN VERSANT DE NDIBA

Le micro-bassin versant de NDIBA fait partie du dispositif expérimental mis en place par l'ISRA et l'ORSTOM dans le cadre du programme de recherches sur l'unité expérimentale de THYSSE KAYMOR à 25 km à l'Est de NIORO DU RIP dans le bassin Sud arachidier sénégalais.

Il est situé en bas de pente sur une terrasse colluvio-alluviale (ANGE, 1984, BROUWERS, 1987). Sa superficie est de 2,4 ha.

Il est bordé par une piste et isolé par une levée de terre partout où un risque d'invasion par les eaux extérieures est possible (lors des forts ruissellements).

Les pentes longitudinales et transversales sur les 2/3 amont du bassin sont de l'ordre de 0.5%. Vers l'aval, la pente longitudinale s'accroît et atteint 2%, les passages d'eau forment un ravineau.

Le bassin était entièrement cultivé en 1987 en mil et arachide. La figure 1 montre la limite des parcelles cultivées ainsi que le dispositif expérimental d'études.

Le sol a été décrit par BROUWERS (fin de saison sèche 1987) qui donne un profil type pour le bassin.

Sur les 60 premiers centimètres, le sol est très sableux ( 5 à 7 % d'argile en surface jusqu'à 18% à 60cm) il présente une structure continue à éclats émoussés, le matériau est très friable et fragile. Ce sol contient très peu de matière organique même en surface. Les traces d'activités animales sont visibles jusqu'à l'horizon 40 cm. (galeries d'insectes essentiellement).

Ensuite, la texture devient argilo-sableuse à 30% d'argile, le matériau est plastique, non fragile, très poreux (nombreux trous de 1 à 10 cm de diamètre occupent 5% de la surface. Le sol conserve ces propriétés jusqu'à une profondeur de 2m, à partir de 1.50 m de nombreuses tâches rouges d'oxydation développées en nodules sont visibles.

L'ensemble du bassin se classe dans le groupe des sols ferrugineux appauvris, à tâches et nodules en profondeur.

En Février 1988 (simulation de pluie) la surface du sol était nue, très piétinée par le bétail.

Dans la partie cultivée en arachide, le soulèvement à la lame firdous en traction bovine a laissé une surface partiellement «motteuse». Des mottes centimétriques très friables en sables lités sont dispersés dans des sables fins pulvérulents.

Ce type de surface fait partie du groupe C1 modal sableux à faible couvert végétal dans la classification CASENAVE & VALENTIN (1988)

Sur la parcelle plantée en mil, une croûte de battance recouvre la surface. Le modelé dû au sarclo-binage des cultures en traction attelée a « fondu » sous les pluies et il subsiste un faible micro relief. On note une croûte fine d'érosion sur le haut du « billon » et une croûte plus structurée présentant une porosité vésiculaire abondante. Ce type de surface fait partie du groupe C2 peu argileux à pellicule d'érosion et à faible couvert végétal dans la classification CASENAVE & VALENTIN (1988)

## 2. ETUDE LOCALE DE L'INFILTRATION, METHODE MUNTZ ET METHODE SIMULATION DE PLUIE

### 2.1 Objectifs

Cette expérimentation a pour but de caler un modèle de simulation des lames infiltrées pour un sol en fonction du temps pour des modes d'apport d'eau différents, à partir des mesures de pression. La première étape consiste à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de chaque horizon d'un sol à partir d'un essai MUNTZ et d'un essai simulation de pluie. Les relations pression en fonction de l'humidité volumique  $h(O)$  et conductivité en fonction de l'humidité volumique  $K(O)$  sont déterminées sur la même parcelle à partir des mesures de pression (tensiomètres) et d'humidité (sonde à neutrons) après les deux modes d'apport en eau différents :

-simulation de pluie, le ruissellement est possible. la charge au-dessus de la surface est nulle. essai à flux constant.

-essai MUNTZ, la charge à la surface du sol est maintenue constante. essai à charge constante.

Dans une première étape les caractérisations hydrodynamiques obtenues pour chaque mode expérimentale seront comparées .

Dans un second temps, il est prévu de caler un modèle d'infiltration simulant la lame infiltrée en fonction du temps et du mode d'apport.

Pour une telle expérimentation il a été choisi un site avec le moins possible de pellicule afin d'obtenir une humectation sur une profondeur suffisante sous simulation de pluie pour réaliser la comparaison avec le MUNTZ.

### 2.2 Méthode expérimentale (fig. 1)

Deux parcelles distantes de 20 mètres ont été choisies dans le champ d'arachide. Elles ont été équipées d'un casier de ruissellement de  $1m^2$  type ORSTOM (CASENAVE, 1982) et d'un dispositif de mesures du bilan hydrique comprenant :

-un tube d'accès neutronique installé au centre de la parcelle

-12 tensiomètres du type «Soil moisture» et Nardeux s'étageant de 5cm au-dessus de la surface à 160cm. Pour les horizons de surface des micro-tensiomètres «Soil moisture» ont été utilisés pour augmenter la précision de la mesure..

Pendant les pluies simulées, la surface du sol a été recouverte de copeaux de polystyrène expensé afin de limiter au maximum la formation de croûtes.

Sur la première parcelle un essai d'infiltration MUNTZ a suivi une série de trois pluies simulées. les deux premières à intensité constante, la troisième représentant un hyétogramme type de la pluie décennale dans la région. Sur la seconde parcelle l'essai MUNTZ, a précédé la simulation de pluie effectué suivant le même protocole.

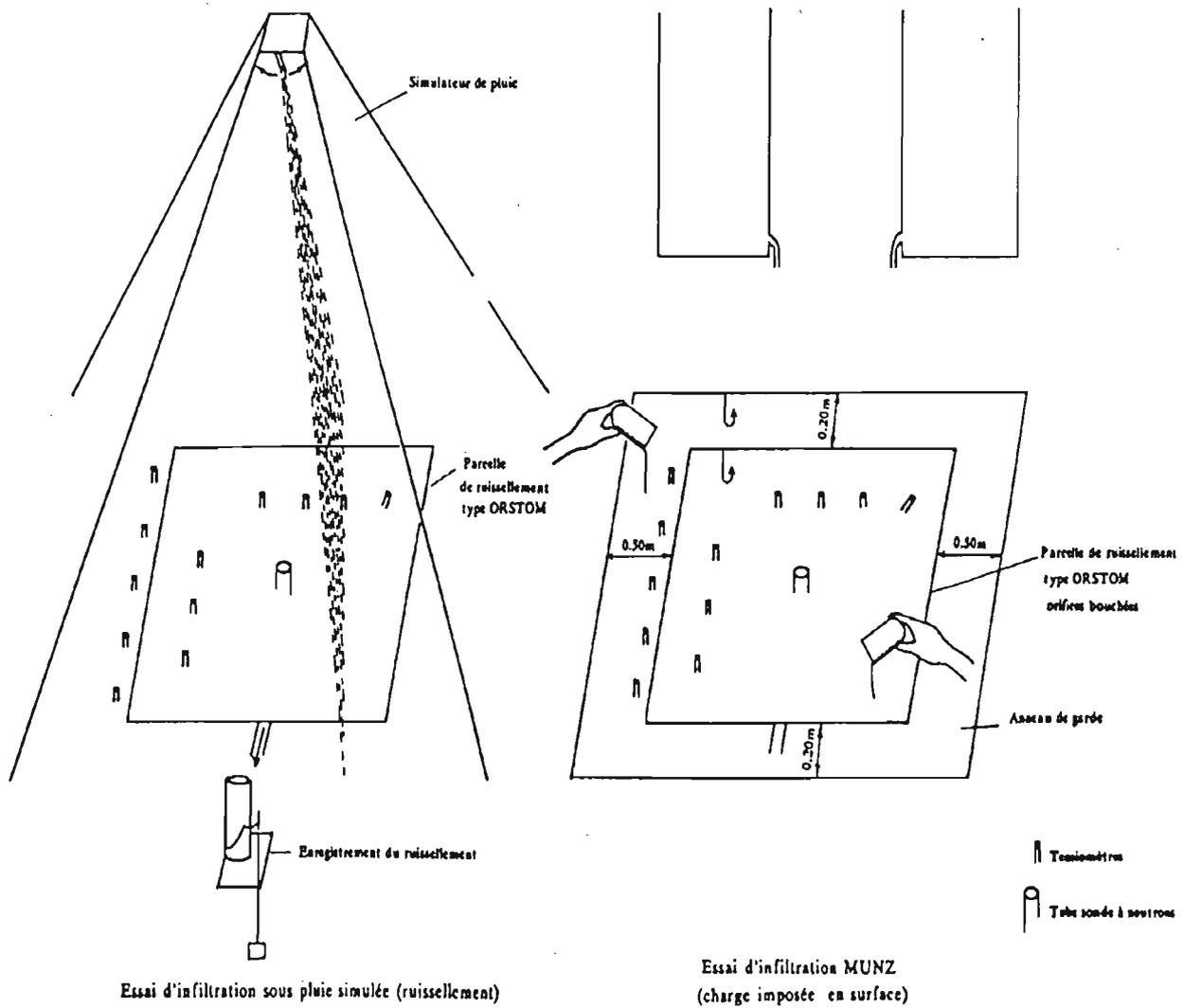
Les essais MUNTZ et simulation de pluie ont été séparés par une période de ressuyage d'une cinquantaine de jours pour avoir des conditions initiales d'humidité voisines pour les horizons supérieurs.

Les mesures des bilans hydriques ont été faites après les essais d'infiltration en couvrant la surface pour éviter l'évaporation (phase de drainage interne). Les parcelles ont été découvertes dès que les horizons de surface ont été drainés (mise en évaporation pour obtenir une évolution plus rapide de l'humidité).

L'essai d'infiltration MUNTZ se fait en utilisant la parcelle de ruissellement de  $1m^2$ . Les orifices de ruissellement sont condamnés avec un joint synthétique (RUBSON). Une diguette en terre imperméabilisée par une feuille plastique délimite l'anneau de garde de ce MUNTZ géant. La forme et la surface totale du MUNTZ est sensiblement la même que celle arrosée par le simulateur aux plus fortes intensités (20cm d'anneau de garde en amont et en aval de la parcelle. 50cm latéralement).

L'infiltration se fait sous une lame d'eau de  $3.75 \pm 0.25$  cm. Le repérage de la hauteur d'eau se fait à partir de niveau à pointe (bac d'évaporation).

Fig. 2.1 Dispositif expérimental



L'apport d'eau se fait manuellement, et correspond exactement à une lame d'eau de .5 cm. Les volumes d'eau infiltrés dans la parcelle sont mesurés en fonction du temps. Ce mode d'apport permet une bonne précision au début de l'infiltration.

Les essais d'infiltration ont été réalisés avec le simulateur de pluie automatique ORSTOM-DELTALAB (BERNARD, 1986).

### 2.3 Calendrier des mesures

#### - parcelle 1

le 30/01/1988 à 20h10 : pluie simulée P 1.1 intensité constante 60 mm/h pendant 1 heure.  
 le 31/01/1988 à 7h05 : pluie simulée P 1.2 intensité constante 60 mm/h pendant 1 heure 30 minutes.  
 le 01/02/1988 à 19h00 : pluie simulée P 1.3 hyétogramme type averse décennale :

20 minutes	60 mm/h
10 minutes	135 mm/h
10 minutes	110 mm/h
10 minutes	90 mm/h
10 minutes	60 mm/h
27 minutes	30 mm/h

le 06/04/1988 à 9h10 : infiltration MUNTZ.

#### - parcelle 2

le 03/02/1988 à 8h45 : infiltration MUNTZ.  
 le 22/03/1988 à 8h45 : pluie simulée P 2.1 intensité constante 60 mm/h pendant 1 heure.  
 le 23/03/1988 à 19h50 : pluie simulée P 2.2 intensité constante 60 mm/h pendant 1 heure 30 minutes.  
 le 24/03/1988 à 20h05 : pluie simulée P 2.3 hyétogramme type averse décennale.

Les suivis humidimétriques et tensiométriques ont été réalisés avec les fréquences suivantes :

- avant chaque essai et immédiatement après un profil neutronique et un profil tensiométrique ont été mesurées.
- pendant les essais, les lectures de tensiomètres ont été réalisées en continue pour observer la position du front d'humectation.
- entre les pluies simulées, deux à trois profils ont été mesurés et le sol recouvert.
- après la dernière pluie comme après l'essai MUNZ on a observé :
  - 3 profils le premier jour
  - 2 profils journaliers les quatre jours suivants
  - 6 profils le jour du «débâchage» de la parcelle (mise en évaporation de la surface du sol)
  - 1 profil par jour pendant les 8 jours suivants
  - 1 profil tous les deux jours par la suite.

Les mesures d'humidité et de charge hydraulique se sont poursuivies jusqu'à fin Mai.

Ce calendrier a été choisi a priori pour permettre de couvrir le mieux possible l'évolution de l'humidité du sol avec une charge raisonnable de travail. Il a été perturbé par des pannes de l'humidimètre neutronique. Il fera l'objet d'une analyse critique.

### 2.4 Analyse des données

#### 2.4.1 Courbe de rétention ( $h(\Theta)$ )

Les cotes z où l'on dispose à la fois de mesures neutroniques et tensiométriques sont les suivantes: 10 20 30 40 60 80 100 120 140 et 160cm.

Pour chacune d'elles, la détermination des points ( $\Theta, h$ ) peut être effectuée de deux manières:

- le temps est éliminé entre les courbes  $\Theta(t)$  et  $h(t)$  obtenues par lissage manuel des mesures portées sur échelle semi logarithmique (ex fig. 2.2)

- pour chaque mesure  $O(t_0)$  on détermine la valeur  $h(t_0)$  par interpolation linéaire entre les deux mesures  $h(t_0 - \Delta t)$  et  $h(t_0 + \Delta t)$ ,  $t_0 - \Delta t$  et  $t_0 + \Delta t$  étant les deux temps les plus proches de  $t_0$ .

La première méthode permet d'obtenir un nombre de points ( $\Theta, h$ ) plus important et moins dispersé que la seconde. Elle est sujette cependant à la qualité du lissage qui dépend fortement de la densité des points de mesure.

Fig 2.2 Courbes des évolutions simultanées de la pression et de l'humidité à la cote 10 cm sur P2 après simulation de pluie.

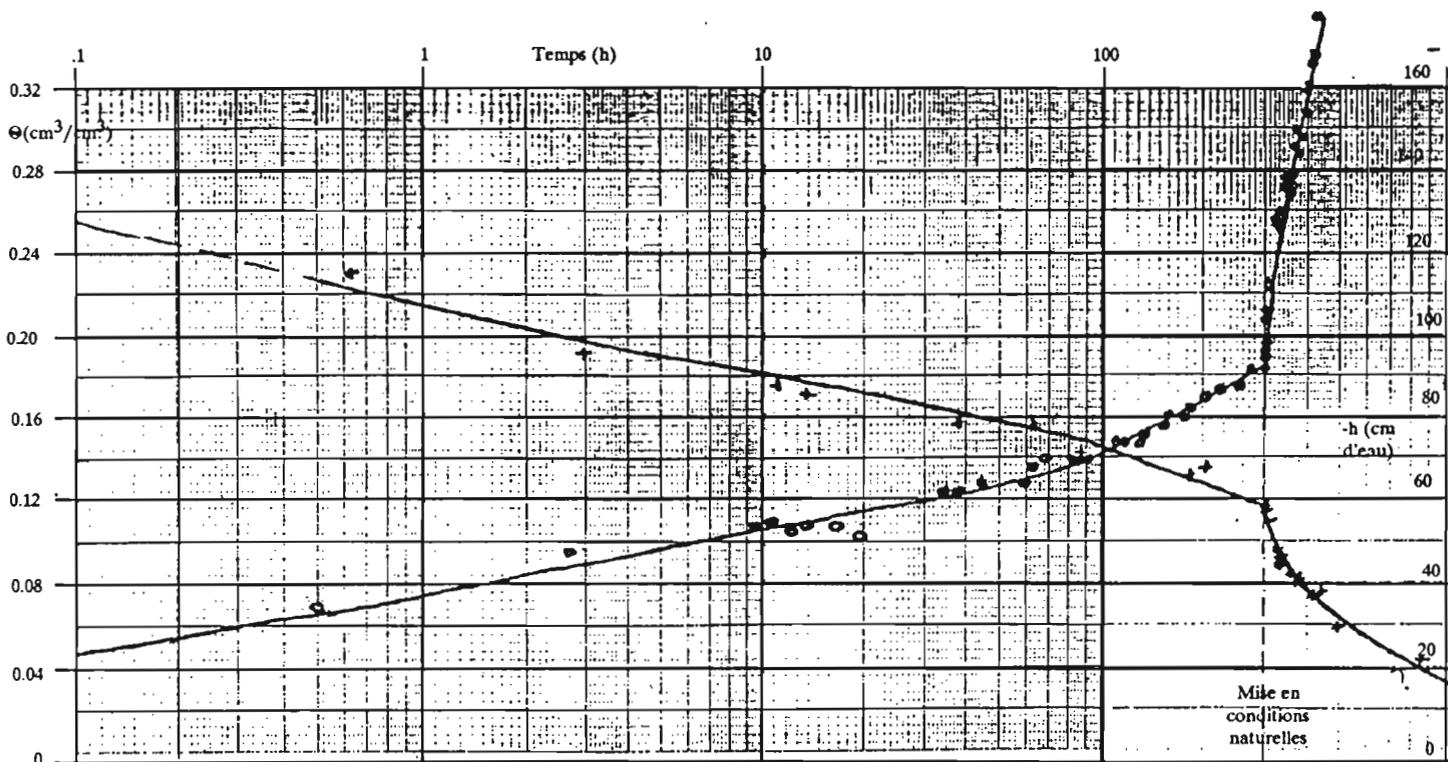
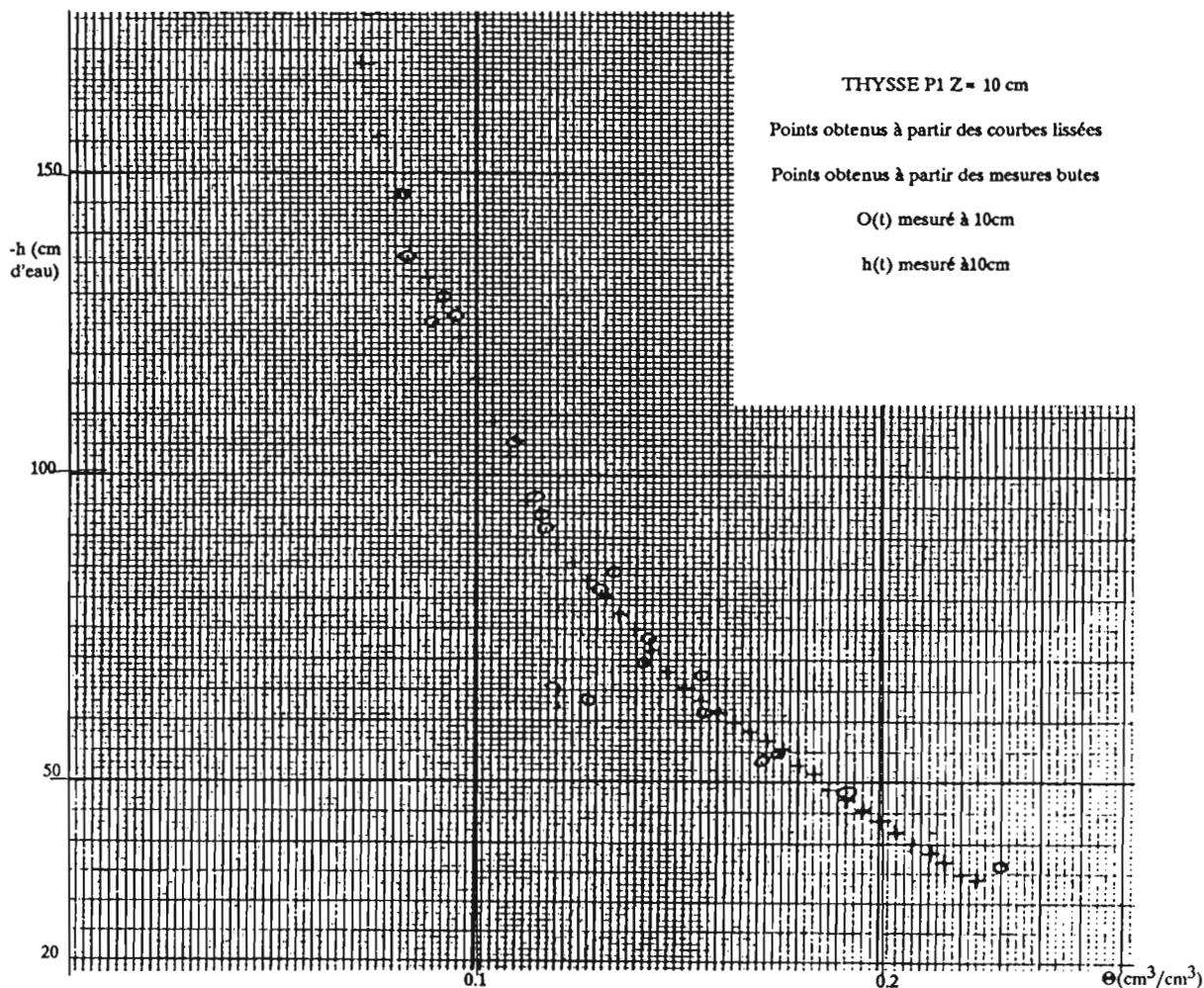


Fig.2.3 Courbes de rétention à partir des courbes lissées et à partir de l'interpolation des mesures sur P2 cote 10cm après simulation de pluie.



La seconde présente l'avantage de se prêter au dépouillement automatique. Toutefois son inconvénient est une faible densité de points ( $\theta, h$ ) associée à une dispersion relativement forte de ces derniers.

Le choix a priori entre les deux méthodes est difficile. Les données ont été dépouillées suivant les deux méthodes (ex fig. 2.3). Le lissage de la première méthode tend à masquer les erreurs expérimentales, nous avons retenu la seconde dans ce rapport.

Une relation de la forme (Gardner, 1958) a été ajustée sur les valeurs expérimentales.

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha h)^p} + \theta_r$$

où -  $\theta_s$  est la teneur en eau à saturation  
 -  $\theta_r$  est la teneur en eau «résiduelle»  
 -  $\alpha$  et  $p$  des paramètres d'ajustement.

Pour certaines cotes, la valeur de  $\theta_s$  a pu être mesurée mais pas pour d'autres, dans ce dernier cas il aurait été possible de la déterminer par ajustement mais il s'est avéré plus réaliste d'estimer ce paramètre par extrapolation des valeurs expérimentales disponibles. Quant à la valeur de  $\theta_r$  elle est obtenue par ajustement puisqu'elle n'est pas accessible à la mesure.

Tous les ajustements ont été effectués par le logiciel OPTIM sur les variables arithmétiques sans linéariser la relation (TOUMA & CHEVILLOTTE, 1988).

#### 2.4.2 Courbe conductivité hydraulique-humidité $K(\theta)$

Si la détermination de  $h(\theta)$  est directe et aisée, il n'en est pas de même pour la relation  $K(\theta)$ . Celle-ci est obtenue point par point par l'application de la loi de DARCY (avec l'hypothèse sous-jacente que l'écoulement est vertical : «absence de fuite latérale») :

$$q = -K dH/dz \quad (H=h-z)$$

$$\text{d'où } K = -q/(dH/dz)$$

La densité de flux  $q$  et le gradient de charge hydraulique  $dH/dz$  étant déterminés au même instant et à la même cote  $z$ . La quantité  $q$  est déterminée en considérant la loi de conservation de la masse  $d\theta/dt + dq/dz = 0$  qui s'intègre entre les cotes  $z_0$  et  $z$  :

$$\int_{z_0}^z \frac{d\theta}{dt} dz = \frac{d}{dt} \int_{z_0}^z \theta dz$$

Il apparaît donc que la connaissance du flux à la cote  $z$  nécessite celle de ce paramètre à la cote  $z_0$ . Ceci donne lieu à deux méthodes expérimentales :

##### i) Le drainage interne (HILLEL et al. 1968)

Le ressuyage est effectué en couvrant la surface du sol. Dans ce cas  $z_0 = z = 0$  et l'intégrale  $\int_{z_0}^z \theta dz$  représente le stock d'eau entre la surface du sol et la cote considérée.

##### ii) Les conditions naturelles ou méthode du plan de flux nul (ARYA et al. 1975)

Le ressuyage est effectué avec la surface du sol découverte; il y a donc évaporation (écoulement ascendant) en surface et percolation (écoulement descendant) dans les couches profondes. Le plan de flux nul qui sépare ces deux zones est celui où le gradient de charge s'annule, il définit donc la cote  $z_0$ .

#### 2.5 Résultats et discussion.

Dans ce rapport sont présentés et discutés les résultats relatifs aux mesures réalisées durant les essais et au cours du ressuyage. Les travaux de dépouillements et d'interprétations relatifs aux courbes de conductivité sont en cours et feront l'objet d'un rapport ultérieur.

##### 2.5.1 Données pendant l'infiltration

Seules les charges hydrauliques et les lames infiltrées (et ruisselées) étaient mesurées pendant l'infiltration. En effet, vu la position du tube d'accès de l'humidimètre neutronique (au centre de la parcelle), l'utilisation de ce dernier était prohibée lors des pluies simulées. Nous avons supprimé les mesures neutroniques pendant l'infiltration sous charge constante pour des raisons de commodité.

## i) les lames infiltrées

Pour ces deux parcelles, la lame infiltrée pendant l'essai MUNTZ était 180 mm. Cette quantité s'est infiltrée au bout de 36 minutes sur P1 et 84 minutes sur P2. Cette différence peut s'expliquer par le développement de l'activité faunique en surface plus important sur P1 que sur P2

Le total de la lame infiltrée pendant les trois pluies était 156 mm pour la parcelle P1 et 186 mm pour la parcelle P2.

Durant les deux essais (MUNTZ et SIMULATION) des quantités d'eau similaires ont donc été infiltrées sur les deux parcelles.

## ii) vitesse finale d'infiltration

A partir des lames infiltrées en fonction du temps, les vitesses d'infiltration en fin d'expérimentation ont été déterminées.

Pour la parcelle P1, cette vitesse est de 53, 30, 30 et 210 mm/h pour les trois pluies et le MUNTZ respectivement. Ces valeurs sont 57, 48, 30 et 120 mm/h pour la parcelle P2.

Notons que pour la parcelle P1, une activité faunique s'était développée à la surface du sol pendant la couverture qui a suivi les simulations de pluie. Ceci pourrait être la cause de la valeur élevée de l'intensité d'infiltration déterminée pour l'essai MUNTZ qui a suivi sur cette parcelle.

## iii) Les gradients de charge hydraulique

Les mesures effectuées ont permis de tracer le profil de charge hydraulique à la fin de chaque infiltration.

Pendant l'essai MUNTZ, le gradient de charge à la fin d'infiltration est de -1.2 pour la parcelle P1 et -1.7 pour la parcelle P2. Ce qui permet d'estimer la conductivité à saturation à la surface du sol à 175 mm/h pour la parcelle P1 et 71 mm/h pour la parcelle P2.

Bien que l'intensité d'infiltration se soit pratiquement stabilisée après 20 minutes du début de l'infiltration pour la parcelle P1 et 36 minutes pour la parcelle P2, cette quantité reste supérieure à la conductivité à saturation de la surface. Il n'est donc pas justifié d'assimiler la vitesse d'infiltration stabilisée à la conductivité à saturation en l'absence de mesures de la charge hydraulique.

En admettant l'absence de croûte superficielle, le gradient de charge déterminé à la fin des deux premières pluies (pour lesquelles le ruissellement a continué jusqu'à la fin de l'expérience) serait -1.4 et -1.6 pour la première et la seconde pluie respectivement sur la parcelle P1. Pour la parcelle P2 ces valeurs sont -2.4 et -2. La conductivité à la surface du sol de la parcelle P1 déterminée à la fin de la première pluie est 38mm/h, et 18mm/h à la fin de la seconde pluie. Pour la parcelle P2 cette valeur est 24mm/h pour les deux pluies.

L'hypothèse d'absence de croûte à la surface du sol, signifie que la conductivité déterminée correspond à la saturation. Ce paramètre devrait donc être constant au cours des différents essais. Les faibles valeurs obtenues pour les essais sous pluies simulées laissent supposer, que malgré les précautions prises, une croûte s'est formée à la surface du sol pendant la simulation de pluie.

2.5.2 Courbes  $h(\theta)$  toutes cotes confondues

Pour les 4 essais d'infiltration (simulation et MUNTZ sur les deux parcelles) les couples  $h, \theta$  ont été reportés en coordonnées cartésiennes tous horizons confondus. On remarque que quel que soit l'essai il est possible de regrouper les points en fonction des horizons pédologiques et du taux d'argile.

i) La parcelle 1 (fig. 2.4,  $h(\theta)$  après la simulation de pluie et 2.5 après MUNTZ)

- Courbe de rétention de l'horizon 0-10 cm. Une panne de tensiomètre n'a pas permis de représenter la courbe pour ce niveau dans l'essai SIMULATION de pluie.

- Courbe de rétention pour les niveaux 20-40 cm, correspond à un sol sableux.

- la courbe de rétention du niveau 80 cm qui s'individualise

- la courbe des niveaux 60 cm et 100 à 160 cm.

## ii) Parcelle P2 (fig 2.5 et 2.6)

On distingue 4 niveaux pour lesquelles les points se regroupent bien: et qui correspondent approximativement à la description pédologique du profil (cf § 1).

- la courbe de rétention pour l'horizon de surface (10 cm) . qui correspond à la partie du profil perturbée par le travail du sol.
- La courbe de rétention pour les niveaux 20 à 40 cm correspond aux horizons de texture sableuse
- La courbe de rétention pour le niveau 60cm correspond à une texture limono-sableuse
- La courbe de rétention pour les niveaux 80 à 160 cm correspond à une texture argilo-sableuse

Ces courbes  $h(\theta)$  tous horizons confondus amènent les réflexions suivantes:

- La séparation en horizons homogènes est la même dans l'essai MUNTZ que l'essai SIMULATEUR. les nuages de points sont superposables.
- Cette séparation correspond à la différenciation pédologique du sol. Une analyse granulométrique a été réalisée sur la parcelle 2. On notera que les courbes de rétention 10cm et 20-40 correspondent à un taux d'argile de l'ordre de 8%. la courbe du niveau 60 cm correspond à un taux d'argile de 13%. Les horizons plus profonds 80 à 160 cm caractérisés par la quatrième courbe ont un taux d'argile qui varie entre 22 et 25% (fig. 2.8). Exceptée la première courbe de rétention (10cm) qui correspond à un horizon remanié. l'évolution des courbes de rétention retrace celle des éléments fins dans le profil.

## 2.5.3 Comparaison des courbes de rétention obtenues après les essais SIMULATION et MUNTZ.

Pour comparer les courbes de rétentions obtenues par les deux méthodes une expression analytique de la forme donnée par GARDNER (1958) est ajustée pour chaque horizon sur les points expérimentaux «SIMULATION DE PLUIE», sur les points expérimentaux «MUNTZ» puis sur l'ensemble des points.

Nous développons ici la méthode suivie sur l'horizon 10 cm de la parcelle P2 puis présentons les résultats pour les autres horizons.

## i) horizon 10cm parcelle P2

L'ensemble des points expérimentaux obtenus à partir des deux essais est montré sur la figure 2.9 et 2.10 en échelle arithmétique et logarithme respectivement. L'examen de ces deux figures permet deux constats:

- Eu égard aux erreurs expérimentales, il n'est pas possible de distinguer les points obtenus à partir de l'essai MUNTZ de ceux obtenus à partir de l'essai simulation de pluie.

- Cependant, la gamme de variation des paramètres mesurés dépend du mode d'apport, notamment pour les fortes humidités. Alors que la plus forte humidité enregistrée lors de l'essai simulation de pluie est limitée à  $0.23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , elle est supérieure à  $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  lors de l'essai MUNTZ.

## Ajustement de l'équation de GARDNER sur l'essai MUNTZ

Les points expérimentaux correspondants à cette cote sont montrés sur la figure 3211 en échelle arithmétique et figure 2.12 en échelle logarithmique. Une extrapolation (manuelle) des points de la figure 2.12 donne une valeur de  $\theta_s$  comprise entre  $0.30$  et  $0.32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . On considère pour l'ajustement la valeur  $\theta_s = 0.310 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  ce qui donne:

$$\begin{aligned} \theta_r &= 0.038 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \\ \lambda &= -0.0162 \text{ cm}^{-1} \\ \beta &= 1.845 \\ \sum \Delta^2 &= 1.18 \cdot 10^{-3} \text{ (22 couples observés)} \end{aligned}$$

Cet ajustement est montré par les courbes continues figures 2.11 et 2.12

## Ajustement de l'équation de GARDNER sur l'essai de simulation

Les points expérimentaux obtenus à partir de cet essai à  $z=10\text{cm}$  sont montrés figures 2.13 et 2.14 en échelle arithmétique et logarithmique respectivement. Une extrapolation manuelle de ces points donne une valeur de  $\theta_s$  qui peut être comprise entre  $0.27$  et  $0.32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Afin de déterminer l'incidence de la valeur choisie de  $\theta_s$  sur la qualité de l'ajustement, on l'effectue avec les valeurs suivantes de  $\theta_s$ :  $\theta_s = 0.26 + i \times 0.01$  ( $i=1,2,\dots,6$ ).

Fig.2.4 Parcelle 1 simulation courbe h( $\theta$ )

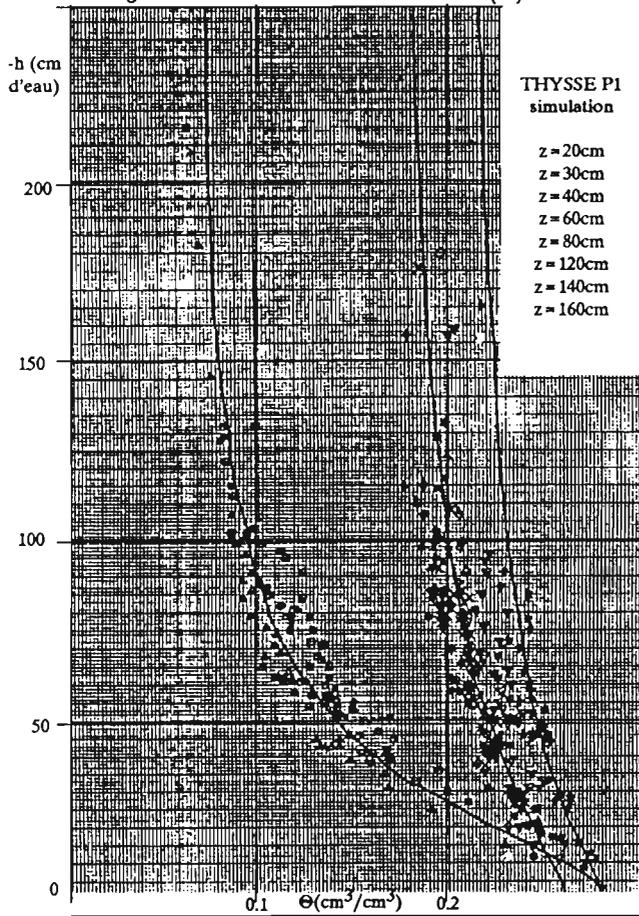


Fig.2.5 Parcelle 1 MUNTZ courbe h( $\theta$ )

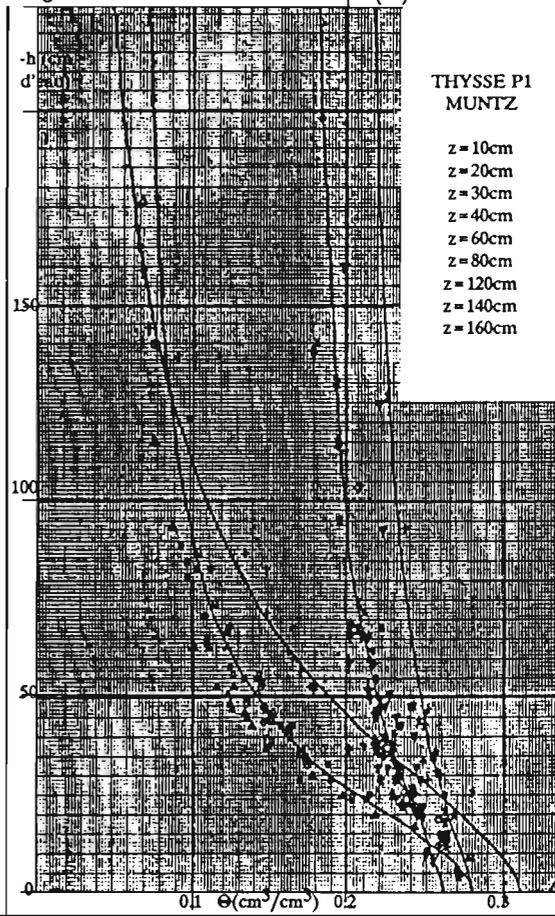


Fig.2.6. Parcelle 2 simulation courbe h( $\theta$ )

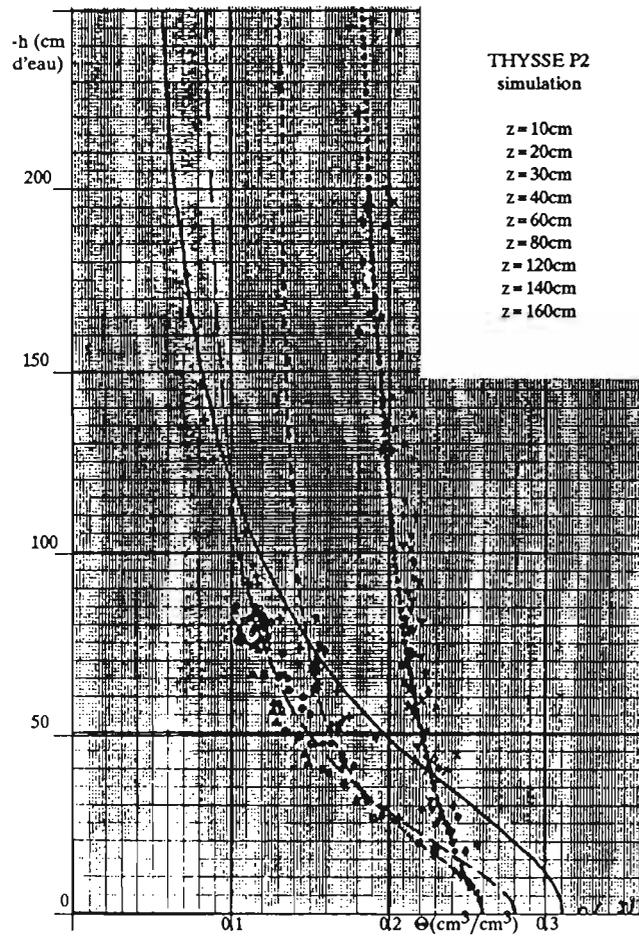


Fig.2.7 Parcelle 2 MUNTZ courbe h( $\theta$ )

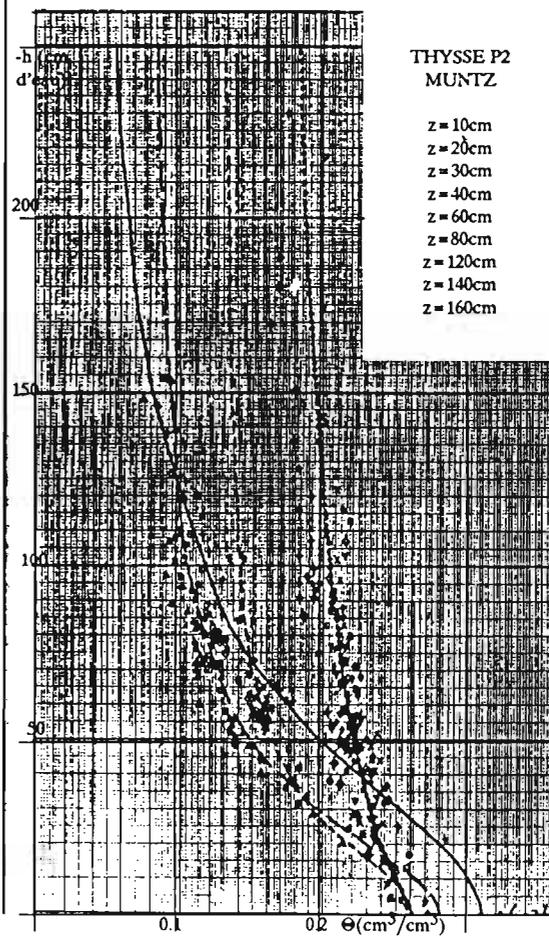


Fig 2.8 Taux d'argile en fonction de la profondeur parcelle P2

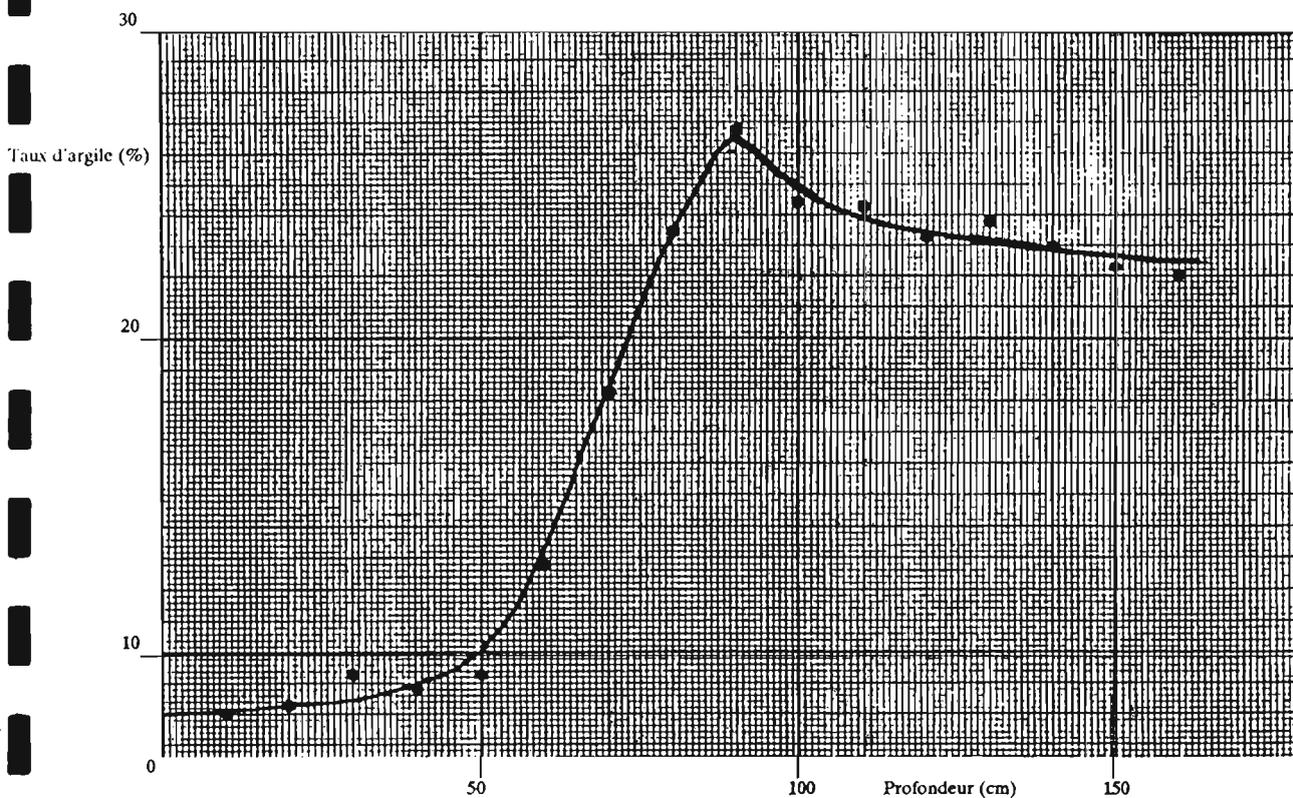


Fig. 2.9 P2  $h(\Theta)$  à  $z = 10\text{cm}$  comparaison MUNTZ et SIMULATEUR échelle arithmétique

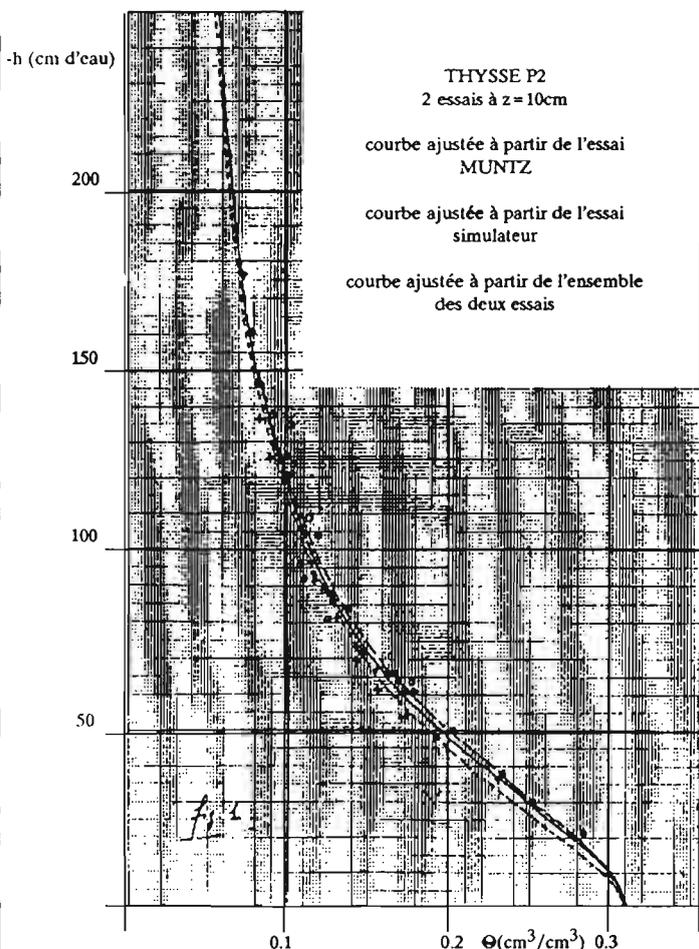


Fig. 2.10 P2  $h(\Theta)$  à  $z = 10\text{cm}$  comparaison MUNTZ et SIMULATEUR échelle logarithmique

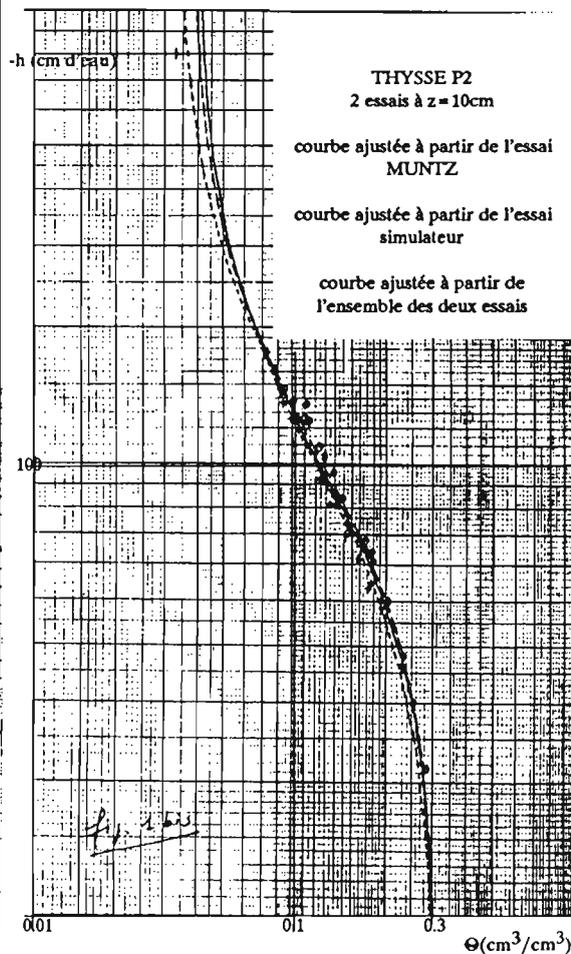


Fig.2.11 Ajustement essai MUNTZ P2 z = 10 cm  
échelle arithmétique

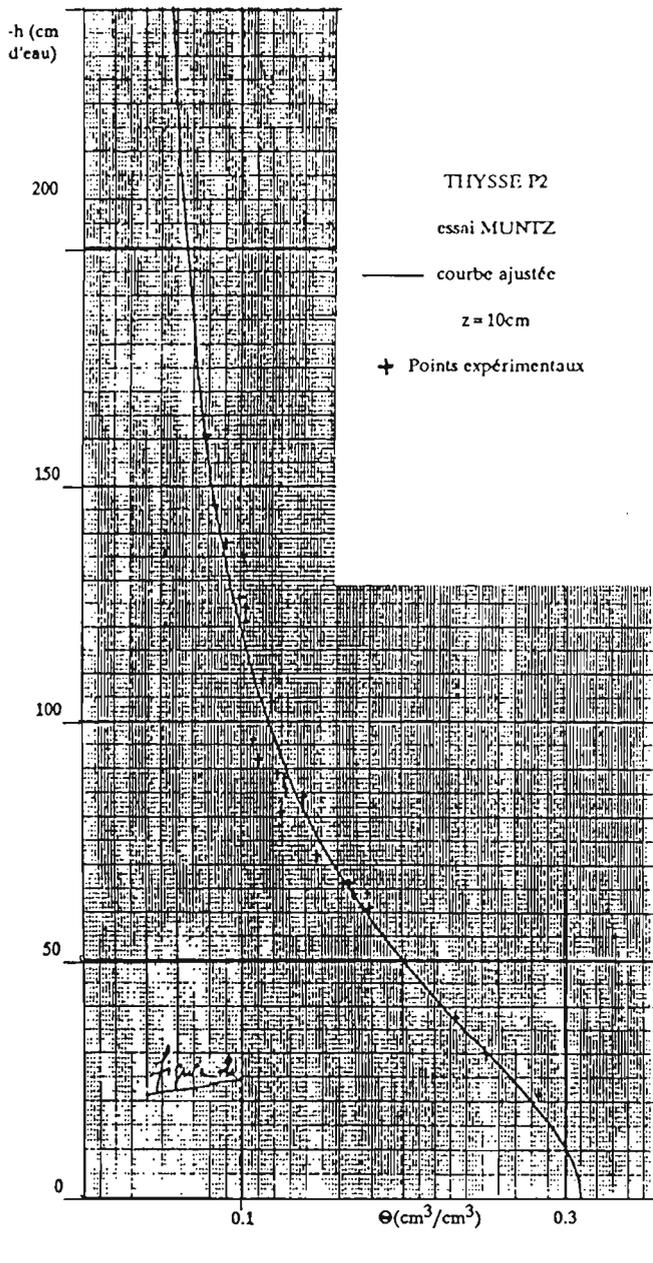
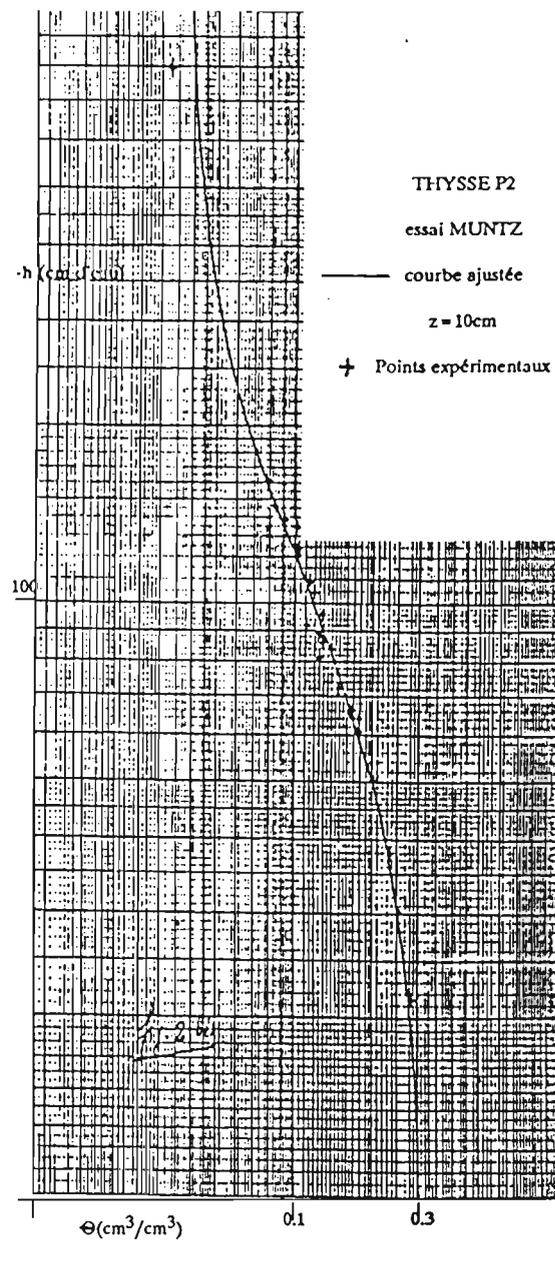


Fig.2.12 Ajustement essai MUNTZ P2 z = 10 cm  
échelle logarithmique



Les résultats des différents ajustements sont consignés dans le tableau 2.1 et visualisés sur les figures 2.13 et 2.14

Tableau 2.1 Paramètres ajustés en fonction du choix de  $\Theta_s$  (24 points)

$\Theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\Theta_r$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\lambda$ cm <sup>-1</sup>	$\beta$	$10^4 \sum \lambda^2$
0.270	0.036	-0.0148	1.908	5.66
0.280	0.035	-0.0155	1.835	4.87
0.290	0.034	-0.0161	1.770	4.43
0.300	0.034	-0.0168	1.712	4.01
0.310	0.033	-0.0175	1.661	3.68
0.320	0.032	-0.0183	1.615	3.42

L'examen du tableau 2.1 et des figures 2.13 et 2.14 montre que même si les paramètres ajustés peuvent varier sensiblement avec  $\Theta_s$ , les courbes ajustées sont pratiquement confondues dans le domaine de variation des valeurs expérimentales. Il est donc possible avec ce type d'essai de commettre une erreur de l'ordre de 20% sur la détermination de la teneur en eau à saturation. Si cette dernière ne paraît pas excessive en elle-même, notamment pour des applications pratiques, elle peut avoir une incidence très importante sur la détermination de la conductivité à saturation  $K_s$ . En effet, la conductivité du sol variant très fortement avec son humidité, notamment au voisinage de la saturation, une erreur de 20% sur  $\Theta_s$  peut se traduire par une erreur de plusieurs centaines % sur  $K_s$ .

Fig.2.13 Ajustement pour quelques valeurs de  $\Theta_s$  essai SIMULATEUR P2 z=10 cm échelle arithmétique

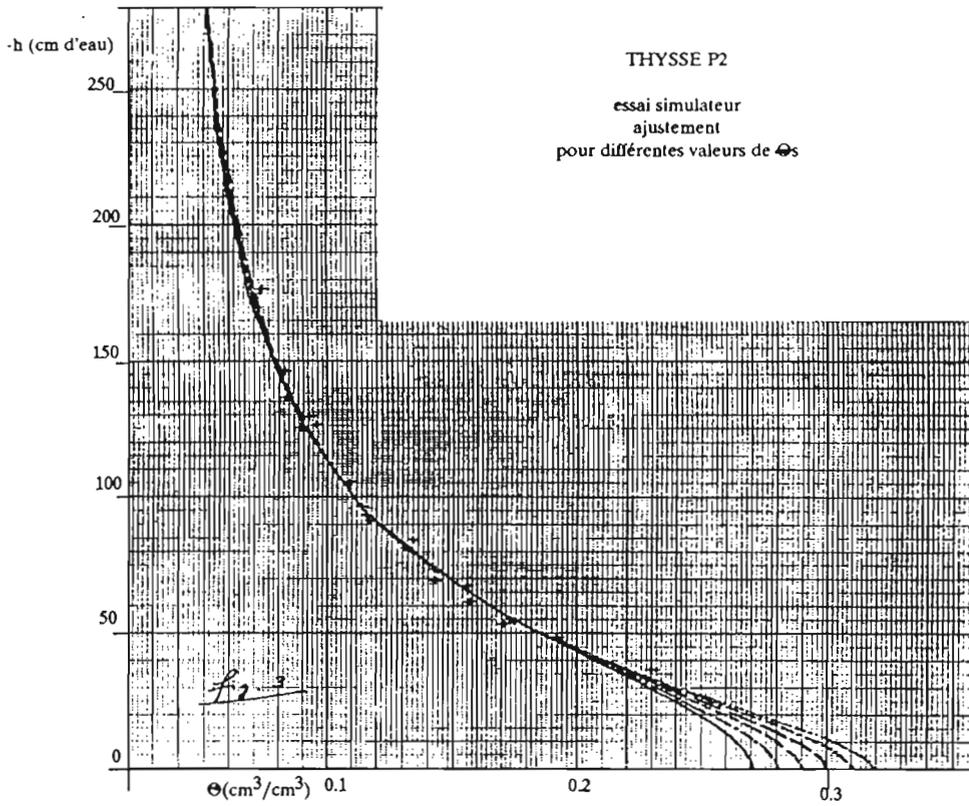
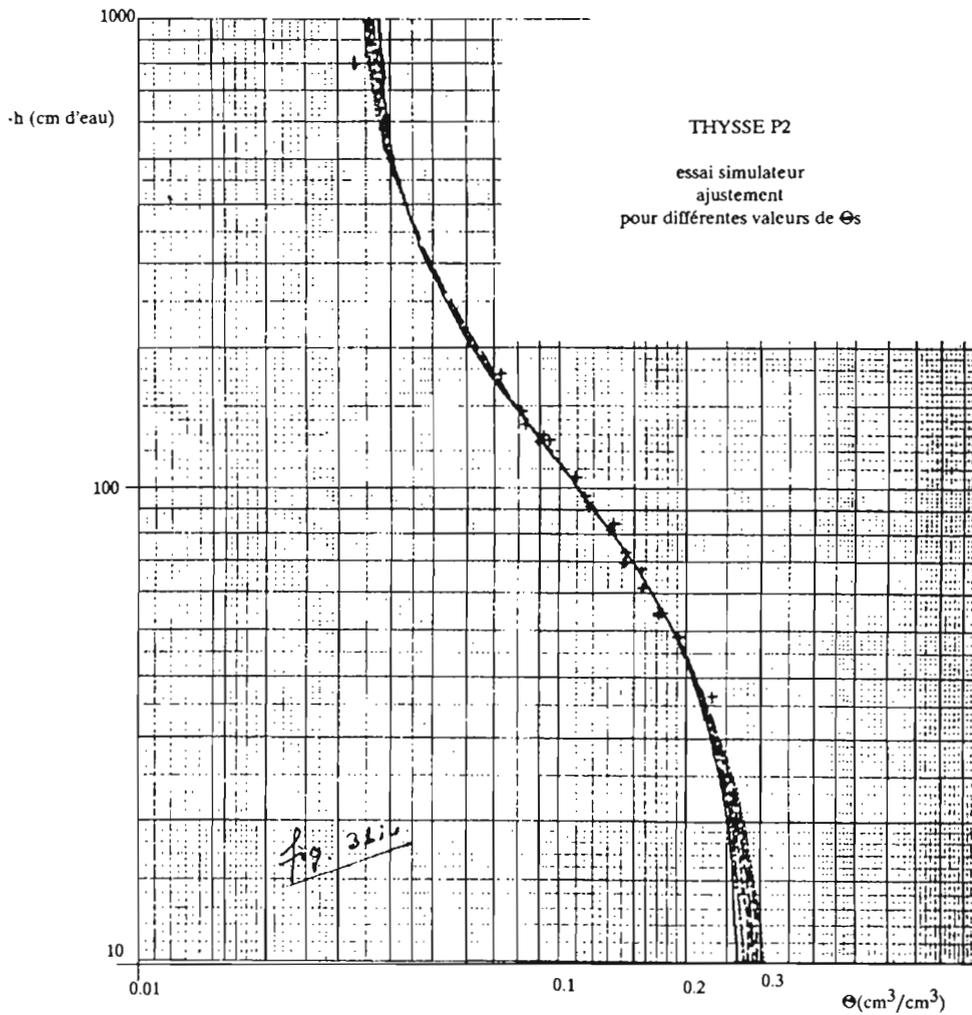


Fig.2.14 Ajustement pour quelques valeurs de  $\Theta_s$  essai SIMULATEUR P2 z=10 cm échelle logarithmique



## ii) Ajustement à l'ensemble des horizons.

Un traitement identique à celui détaillé ci-dessus pour l'horizon 10 cm a été appliqué aux autres horizons. Les tableaux 2.2 et 2.3 donnent les valeurs des paramètres de la formule d'ajustement pour l'essai simulateur, l'essai MUNTZ et en confondant les deux essais. Les figures 2.15 et 2.16 représentent ces ajustements pour la parcelle P1 et la parcelle P2 (courbes continues pour les points obtenus à partir des deux essais confondus, courbes en pointillés pour chaque essai pris séparément:)

Tableau 2.2 Paramètres de l'équation d'infiltration

Parcelle P1	$\Theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\Theta_r$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\frac{1}{\alpha}$ cm <sup>-1</sup>	$\beta$	$10 \times \Delta s^2$	n
SIMUL. 10cm	0.310	0.026	0.0166	1.690	0.25	24
MUNTZ 10cm	-	-	-	-	-	-
SIMUL+MUNTZ	0.310	0.026	0.0166	1.690	0.25	24
SIMUL. 20-40cm	0.280	0.056	0.0266	1.500	1.759	127
MUNTZ 20-40cm	0.280	0.073	0.0295	2.154	0.880	71
SIMUL+MUNTZ	0.280	0.070	0.0286	1.848	2.913	198
SIMUL. 60 et 100-160cm	0.260	0.172	0.0170	1.492	1.449	193
MUNTZ 60 et 100-160cm	0.260	0.186	0.0227	1.643	0.561	81
SIMUL+MUNTZ	0.260	0.175	0.0182	1.487	2.036	274
SIMUL. 80cm	0.280	0.206	0.0173	1.233	0.077	41
MUNTZ 80cm	0.280	0.208	0.0179	1.221	0.013	15
SIMUL+MUNTZ	0.280	0.206	0.0174	1.232	0.088	56
Parcelle 2	$\Theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\Theta_r$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\frac{1}{\alpha}$ cm <sup>-1</sup>	$\beta$	$10 \times \Delta s^2$	n
SIMUL. 10cm	0.310	0.033	0.0175	1.661	0.037	22
MUNTZ 10cm	0.310	0.038	0.0162	1.845	0.118	29
SIMUL+MUNTZ	0.310	0.040	0.0170	1.827	0.248	51
SIMUL. 20-40cm	0.280	0.085	0.0306	1.920	0.507	66
MUNTZ 20-40cm	0.280	0.080	0.0279	1.861	1.080	114
SIMUL+MUNTZ	0.280	0.082	0.0291	1.878	1.640	180
SIMUL. 60cm	0.260	0.141	0.0381	2.226	0.031	22
MUNTZ 60cm	0.260	0.129	0.0341	1.877	0.101	39
SIMUL+MUNTZ	0.260	0.134	0.0358	2.023	0.140	61
SIMUL. 80-120cm	0.260	0.140	0.0069	0.823	0.499	83
MUNTZ 80-120cm	0.260	0.152	0.0116	1.057	1.380	161
SIMUL+MUNTZ	0.260	0.160	0.0125	1.015	2.053	244

Le traitement de tous les horizons confirme le premier résultat présenté pour l'horizon 10 cm, à savoir :

- il est impossible de distinguer les points obtenus à partir de l'essai MUNTZ de ceux obtenus à partir de l'essai simulation de pluie.

On peut donc conclure que les points déterminés de la relation  $\Theta(h)$  ne sont pas affectés par le mode d'apport en surface.

- la gamme de variation des paramètres mesurés dépend du mode d'apport, notamment pour les fortes humidités. Le tableau 2.3 donne pour chaque cote  $\Theta_{max}$  et  $-h_{min}$  dans chacun des deux essais.  $\Theta_{max}$  est systématiquement inférieur dans l'essai simulation et  $-h_{min}$  systématiquement supérieur. Pour les cotes 60 à 120 cm, la différence entre les deux valeurs  $\Theta_{max}$  est du même ordre que l'erreur de mesure, et n'est donc pas significative. Pour les autres cotes et notamment les horizons de surface cette différence est due au mode d'apport de l'eau à la surface du sol.

Ceci montre que le ruissellement, effectivement observé lors de l'essai au simulateur de pluie ne signifie nullement que le sol sous-jacent soit forcément saturé.

## iii) Comparaison des courbes de rétention des deux parcelles

Si on compare les courbes de rétention obtenues sur les deux parcelles (fig 2.15 et 2.16) on remarque qu'excepté les courbes relatives aux cotes 60 cm et 80 cm les autres sont quasiment identiques. Ceci confirme l'homogénéité du sol où ont été installées les deux parcelles.

Tableau 2.3: Gamme de variation des paramètres  $h$  et  $\theta$  dans les essais simulation et MUNTZ

	z (cm)	P1		P2	
		$\theta_{max}$	-hmin	$\theta_{max}$	-hmin
SIMUL.	10	0.261	-	0.230	37
MUNTZ	10	0.280	20	0.284	20
SIMUL.	20	0.240	12	0.221	29
MUNTZ	20	0.258	9	0.259	17
SIMUL.	30	0.229	15	0.207	27
MUNTZ	30	0.263	7	0.250	12
SIMUL.	40	0.245	25	0.219	20
MUNTZ	40	0.279	9	0.257	13
SIMUL.	60	0.270	9	0.247	12
MUNTZ	60	0.271	6	0.253	4
SIMUL.	80	0.280	3	0.251	8
MUNTZ	80	0.288	0	0.270	4
SIMUL.	100	0.260	11	0.250	9
MUNTZ	100	0.262	-	0.257	2
SIMUL.	120	0.246	20	0.256	18
MUNTZ	120	0.257	12	0.251	25
SIMUL.	140	0.224	40	0.243	40
MUNTZ	140	0.246	20	0.248	12
SIMUL.	160	0.212	58	0.202	128
MUNTZ	160	0.242	26	0.231	17

Fig.2.15 Ajustement comparaison MUNTZ SIMULATEUR sur tous les horizons P1

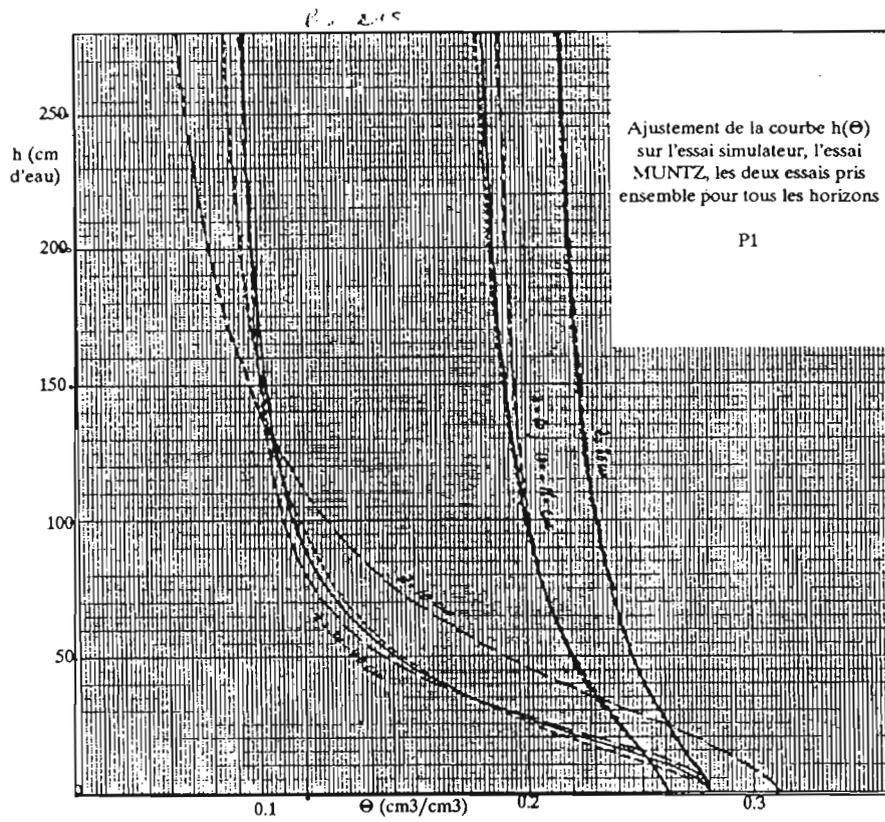
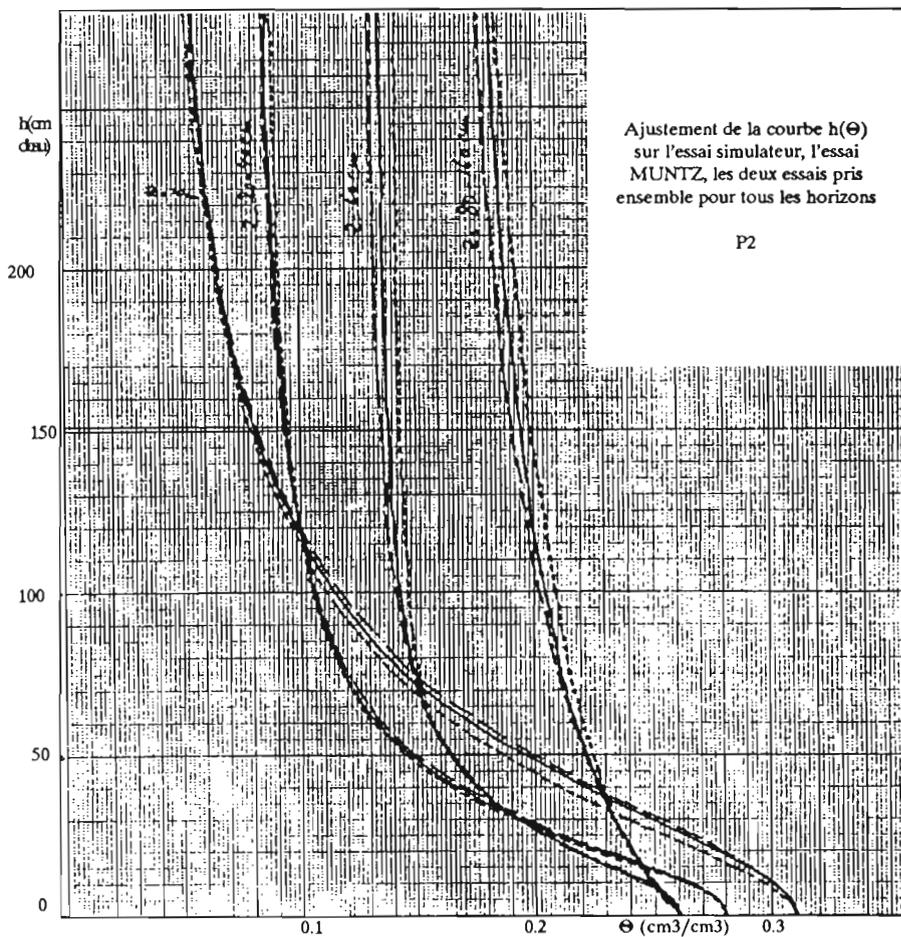


Fig.2.16 Ajustement comparaison MUNTZ SIMULATEUR sur tous les horizons P1



#### 2.5.4 Remarques sur le protocole expérimental:

##### i) Installation des appareils de mesures dans les deux parcelles

Le tube d'accès de l'humidimètre neutronique était installé au centre de la parcelle. Les tensiomètres superficiels (jusqu'à 60 cm) étaient aussi installés à l'intérieur de la parcelle de ruissellement, à une distance variant de 20 à 30 cm du tube d'accès. Quant aux tensiomètres profonds, ils étaient installés en bordure, mais à l'extérieur de la parcelle.

De ce fait, le front d'humectation détecté par les tensiomètres profonds était en retard par rapport à celui détecté par l'humidimètre neutronique. En conséquence, certaines mesures (qui correspondent à l'humectation et au début du ressuyage des cotes profondes) n'ont pas pu être exploitées.

Nous proposons donc pour les expérimentations futures d'installer la totalité des tensiomètres à l'intérieur de la parcelle. Un schéma possible serait de les implanter sur le périmètre d'un carré de 50 X 50 cm<sup>2</sup> de côtés, parallèles aux côtés de la parcelle, afin de ne pas perturber la sphère d'influence de l'humidimètre.

Certes, une pareille implantation perturberait les mesures de l'infiltration et du ruissellement. Cependant, en l'absence d'écoulements préférentiels le long des cannes tensiométriques, cette perturbation reste inférieure à 2% pour une batterie de 12 tensiomètres.

##### ii) Calendrier des mesures

Les mesures effectuées entre deux pluies n'étaient pas suffisamment denses pour être exploitées de façon fiable. De même, lors du dépouillement des mesures pendant le ressuyage, nous avons constaté une insuffisance de la densité des mesures du premier jour, vue l'évolution rapide des paramètres mesurés et une redondance de celles faites le jour de mise en évaporation.

On propose donc pour la suite de densifier les mesures entre les pluies, ainsi que le premier et même le deuxième jour du ressuyage.

### 3 ETUDE DES RELATIONS PLUIE-DEBIT-ETAT DE SURFACE

#### 3.1 Objectifs

La représentativité spatiale des mesures locales de bilan hydrique a été étudiée en mettant en relation les stocks hydriques et leurs variations temporelles déterminées sur les 7 sites de mesures de l'humidité par humidimétrie neutronique et ceux obtenus par prélèvements à la tarière en 57 verticales situées aux noeuds d'une grille de maille élémentaire 20mX20m superposée au micro bassin versant (fig. 3.1) Les données de cet échantillonnage réalisé à 4 dates (10/06, 2/07, 30/07 et 10/08/87) ont été analysées en assimilant les stocks à des variables régionalisées et en appliquant les concepts correspondants (RUELLE, SENE, et VAUCLIN, 1988).

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- la variabilité du stock hydrique n'est pas aléatoire, ceux-ci présentent une structure spatiale isotrope avec une portée de l'ordre de 100m.
- cette structure présente une bonne stabilité temporelle: les sites les plus secs (ou les plus humides) au début de la saison des pluies, restent les plus secs (ou les plus humides) tout au long de l'hivernage.
- le zonage du bassin a été obtenu à partir du krigeage des stocks hydriques (fig.3.2). La représentativité des sites de mesure du bilan hydrique a été ainsi confirmée.

En implantant un site de 2 parcelles de simulation de pluie par zone ainsi définie deux objectifs étaient poursuivis:

- vérifier la concordance entre l'infiltrabilité relative d'une zone, estimée sous pluie simulée et sa «classe d'humidité» déterminée à partir des cartes kriegées du stock hydrique;
  - trouver une fonction de production par zone homogène pour modéliser le ruissellement sur ce micro-bassin.
- Cette seconde partie de l'étude se fera après les observations de saison des pluies 88 et 89 où sera étalonné le déversoir du bassin.

#### 3.2 Méthode expérimentale

Le premier protocole envisagé était du type simulation de pluie classique (CASENAVE, 1985, ALBERGEL, 1987) avec une série de 6 pluies sur 2 ou 3 parcelles dans chaque unité. Ce protocole a été simplifié en raison des moyens disponibles:

- crédits CEE pas encore en place
- citerne pour le transport de l'eau pas encore disponible. Le transport de l'eau depuis le PAPEM jusqu'au site expérimentale (3 km environ) s'est fait avec une tonne à eau tractée par une paire de boeufs.

Le protocole complet sera réalisé en 1989 avec la campagne simulation de pluie sur le bassin S2 de KEUR DIANKO.

Deux hyétogrammes «type pluie décennale» séparés par 24 heures de ressuyage ont été simulés sur 2 parcelles choisies sur chaque site défini par l'étude de la variation spatiale de l'humidité. De plus, une parcelle a été installée dans le ravineau. Sur les parcelles 1 et 2 qui ont servi à l'expérimentation « comparaison MUNTZ simulation» les copeaux de polystyrènes expansés ont été supprimés pour la réalisation du troisième hyétogramme.

La comparaison des résultats sur les parcelles d'un même site doit renseigner sur l'homogénéité du phénomène.

Les parcelles 1 et 2 représentent la zone d'humidité supérieure à la moyenne.

La parcelle 3 a été installée dans le fond du ravineau.

Les parcelles 4 et 5 sont situées dans la zone la plus sèche.

Les parcelles 6 et 7 à l'amont du bassin ont été installées dans une zone d'humidité intermédiaire.

#### 3.3 Calendrier de la manipulation

FIG 3.1 Dispositif expérimental

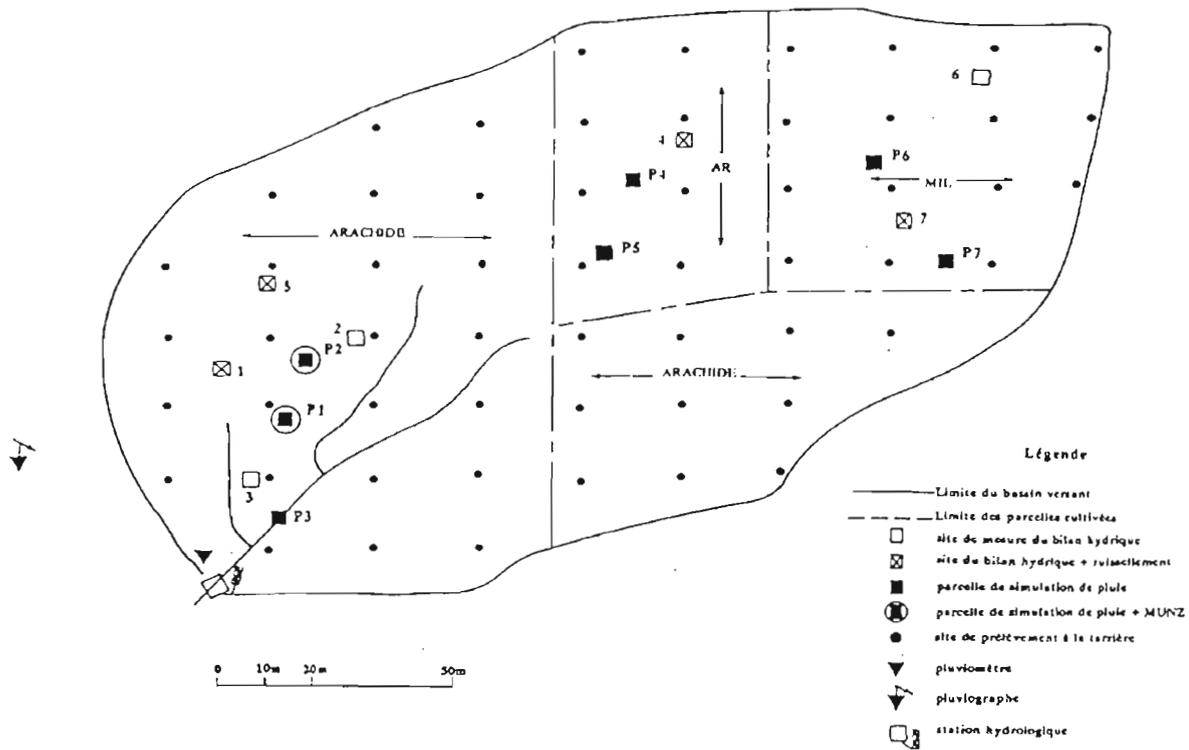
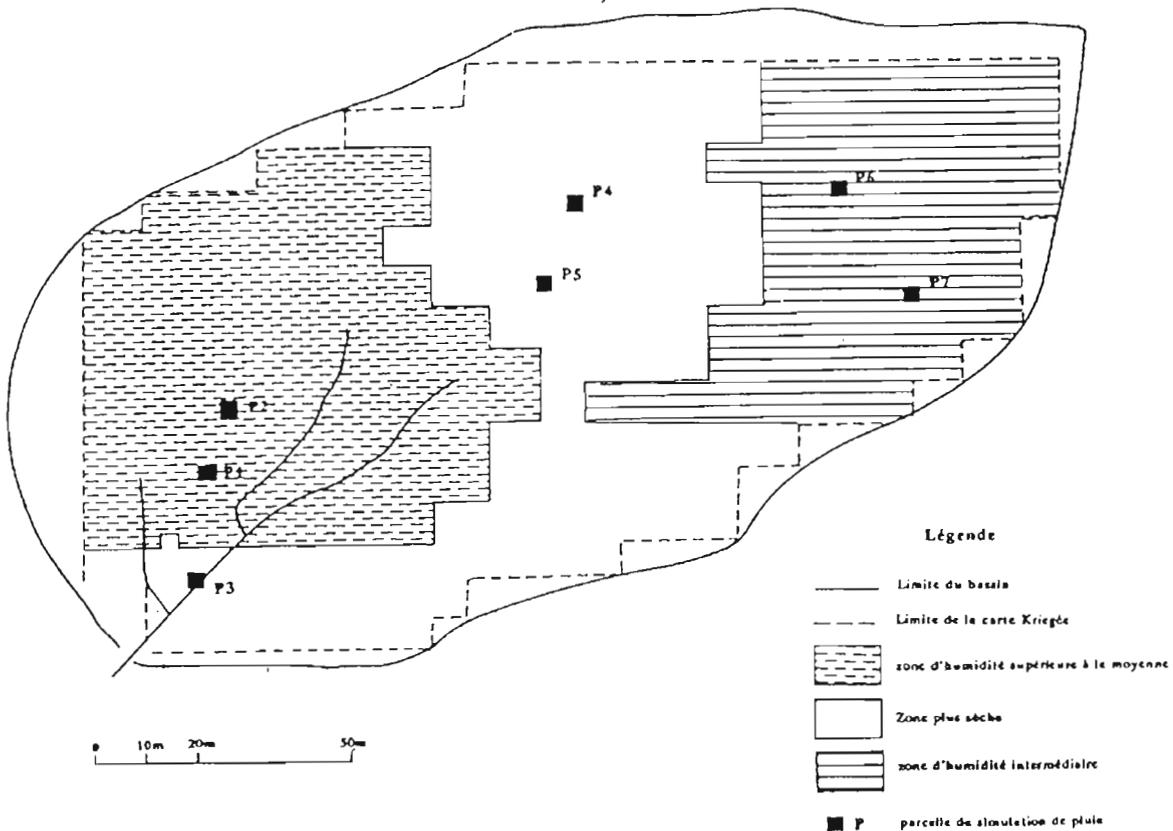


FIG. 3.2 Répartition spatiale de l'humidité obtenue par krigeage au 10/06/1987 (RUELLE, SENE, VAUCLIN, 1988)



Le tableau 1 récapitule le Calendrier des pluies simulées.

Tableau 3.1 Calendrier des pluies simulées.

Parcelle	date	heure	pluie	observations
1	30-01-88	20h10	I cte	vent mauvaises conditions
	31-01-88	07h05	I cte	R.A.S
	01-02-88	19h00	hyétogramme	R.A.S
2	22-03-88	19h50	I cte	R.A.S
	23-03-88	09h05	I cte	R.A.S
	24-03-88	18h30	hyétogramme	R.A.S
3	23-03-88	17h55	hyétogramme	R.A.S
	24-03-88	07h20	hyétogramme	écoulements parasites dans la goulotte
4	12-04-88	18h50	hyétogramme	R.A.S
	13-04-88	20h00	hyétogramme	R.A.S
5	12-04-88	09h15	hyétogramme	R.A.S
	13-04-88	22h45	hyétogramme	R.A.S
6	13-04-88	10h00	hyétogramme	R.A.S
	14-04-88	09h30	hyétogramme	R.A.S
7	13-04-88	17h50	hyétogramme	R.A.S
	14-04-88	17h30	hyétogramme	R.A.S

### 3.4 Description des parcelles de simulations

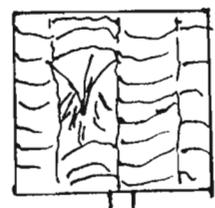
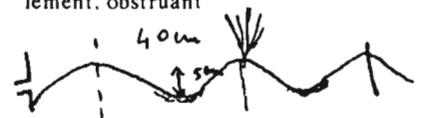
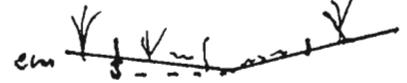
Les tableaux suivants présentent les caractéristiques de surface des parcelles avant la pluie le dernier tableau donne une appréciation sur les modifications de surface au cours des pluies.

Tableau 3.2 : Occupation du sol et végétation

parcelle	Occupation du sol	Végétation		Litière
		morte	vivante	
1	arachide champs de l'année	0%	0%	1% fanes feuilles
2	arachide champs de l'année	0%	0%	1% fanes feuilles
3	arachide remplacée par vég. nat.	5% graminées sèches	0%	75% tiges feuilles graines
4	arachide champs de l'année	0%	0%	0%
5	arachide champs de l'année	0%	0%	0%
6	mil champs de l'année modelé sarclo-binage	10% 2 poquets de mil	0%	20% tiges feuilles
7	mil champs de l'année modelé sarclo-binage	5% 1 poquet de mil	0%	40% tiges feuilles

Tableau 3.3 Eléments libres. micro-relief

Parcelles	éléments structuraux	éléments fins	microrelief
1	mottes centimétriques 10%	sable fin pulvérulent 70% épaisseur 3 cm	accumulation de sable pas obstruant
2	mottes centimétriques 10%	sable fin pulvérulent 90% épaisseur 3 à 4 cm	accumulation de sable pas obstruant
3	néant	sable 2%	en V dans l'axe de drainage
4	mottes centimétriques 5%	100% sable fin pulvérulent épaisseur 5 cm	néant
5	idem	idem	idem
6	néant	sable grossier dans le creux du modelé	modelé dégradé perpendiculaire à l'écoulement. obstruant
7	néant	idem	modelé dans le sens de la pente poquet de mil



## 3.3 activité méso-faunique, organisations pelliculaires

Tableau 3.4 Organisation de surface

Parcelle	Activité méso-faune	Organisations pelliculaires de surface			Catégorie (1)
		Couverture	épaisseur	vésicules	
1	faible 2 trous de fourmis	faible	fine	non	
2	moyenne termite	idem	fine	non	
3	moyenne termite	5%	fine	non	ERO (placage sableux)
4	néant	10%	fine	non	
5	néant	5%	fine	non	
6	moyenne termite	100%	fine sur le modelé structurée dans la dépression	oui	ST1+ERO
7	idem	100%	idem	oui	ST1+ERO

(1) Classification suivant CASENAVE et VALENTIN (1988)

## 3.4 Modification de l'état de surface après les pluies

Tableau 3.5 modifications de surface après la pluie

Parcelle	érosion	prise en masse des éléments fins	formation de pellicule	apparition de porosité vésiculaire
1	++	+++	+ ST1	non
2	++	+++	+ ST1	non
3	pas plus	+	+++DES	non
4	+++	+++	+++RUIS	quelques bulles 10%
5	+++	+++	+++RUIS	quelques bulles 10%
6	+		++CULT2	+ de bulles entre les billons
7	+		++CULT2	+ de bulles entre les billons2

A partir de l'ensemble de ces tableaux les surfaces élémentaires peuvent être classées de la façon suivante (classification CASENAVE et VALENTIN 1988):

- P1 et P2 Surface de type cultivée 1 à pellicule structurale 1 dominante
- P3 Surface non cultivée de type structurale 2 variante < 50% végétation
- P4 et P5 Surface de type cultivée 2 porosité vésiculaire 10% pas de micro relief
- P6 et P7 Surface de type cultivée 2 variante fort micro-relief porosité vésiculaire 15%

## 3.5 Résultats

## 3.5.1 Données sur le ruissellement et l'infiltration

Les hydrogrammes de ruissellement ont été dépouillés au pas de temps 2 mn. Rappelons que les enregistrements dont nous disposons permettent d'apprécier le 1/10 mm ruisselé et 10 secondes sur l'échelle des temps. Les étalonnages des intensités et le changement d'intensité quasi instantané du simulateur automatique permet de connaître la hauteur de la lame précipitée à +/- 2%.

Les lames infiltrées instantanées et les intensités d'infiltration calculées sur le pas de temps de 2 minutes ont été déduites des lames ruisselées. Les figures 3.3 présentent pour chaque essai :

- l'évolution de la lame d'eau précipitée en fonction du temps
- l'évolution de la lame infiltrée en fonction du temps
- l'évolution de l'intensité d'infiltration en fonction du temps

FIG.3.3 Pluie, lame infiltrée, intensité d'infiltration en fonction du temps

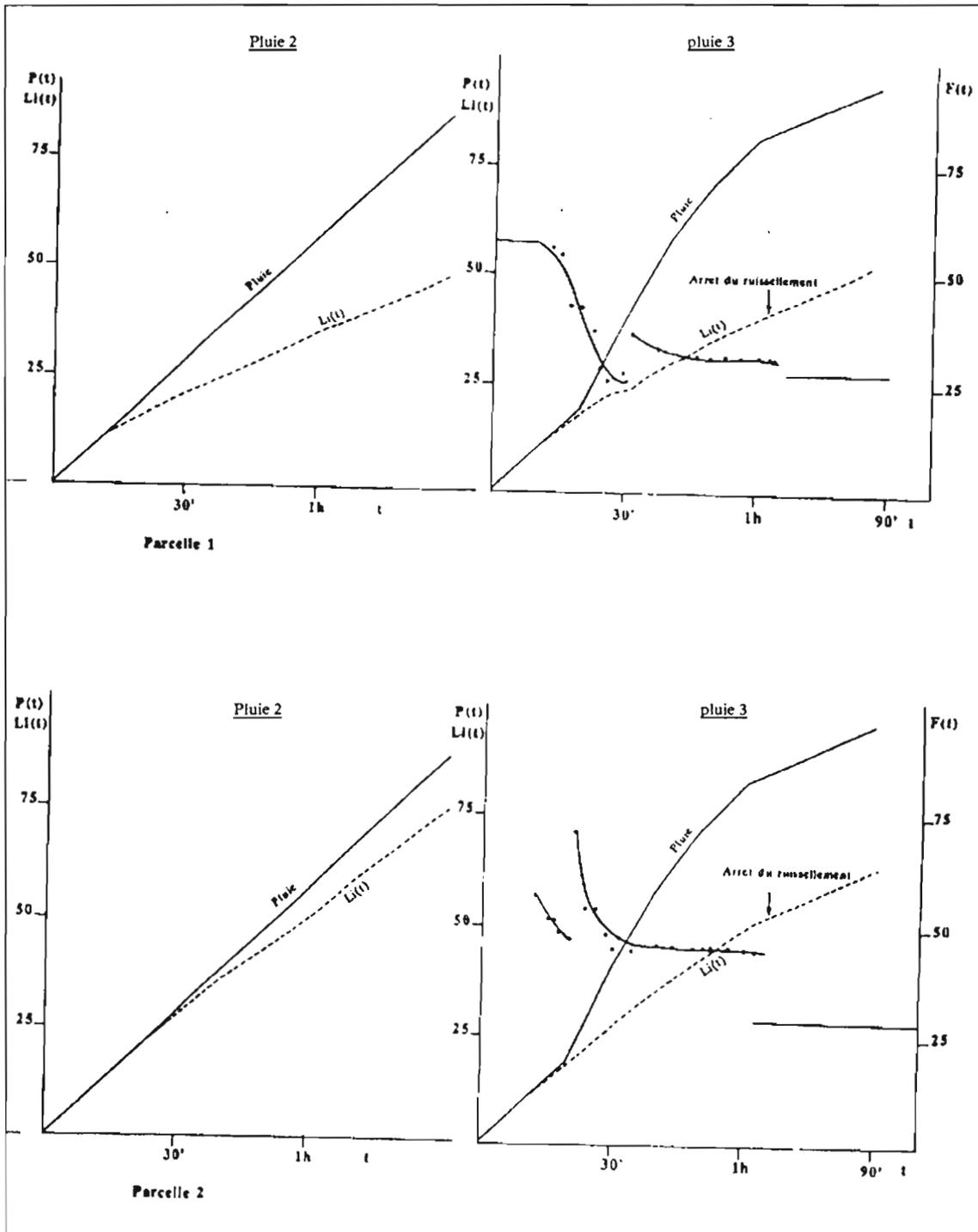


FIG.3.3 Pluie, lame infiltrée, intensité d'infiltration en fonction du temps

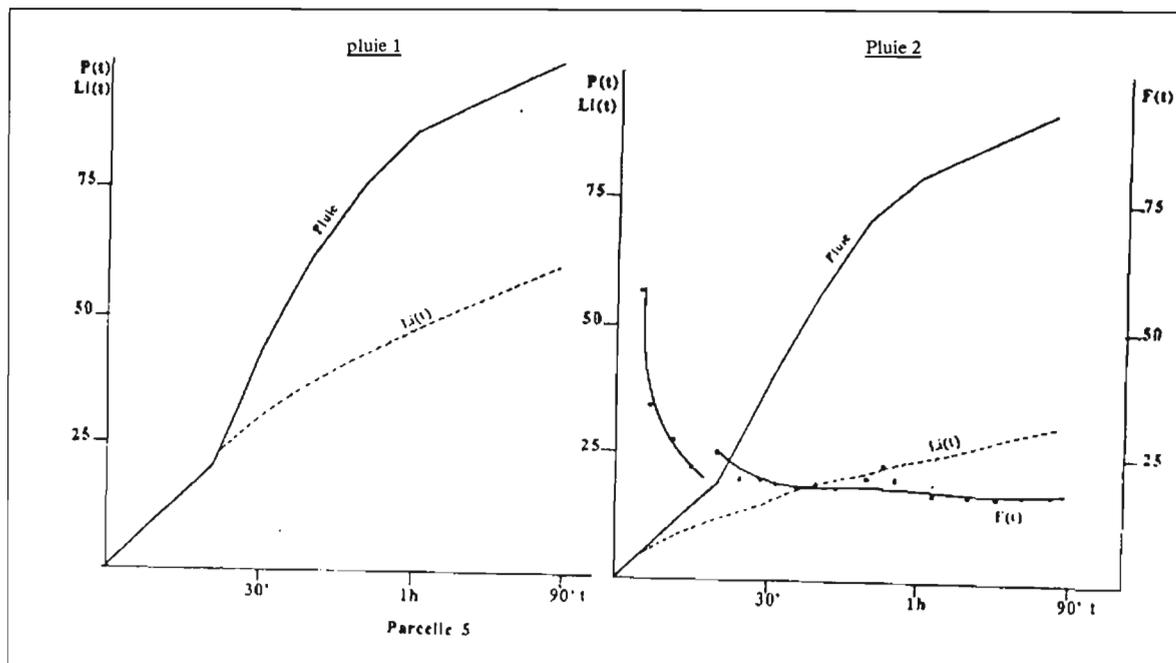
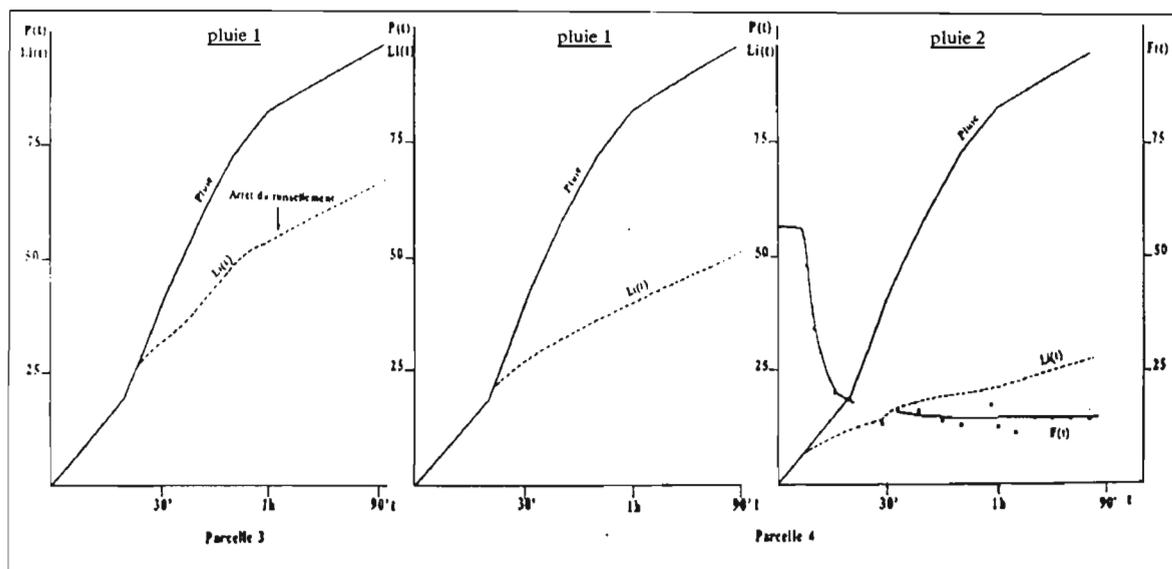
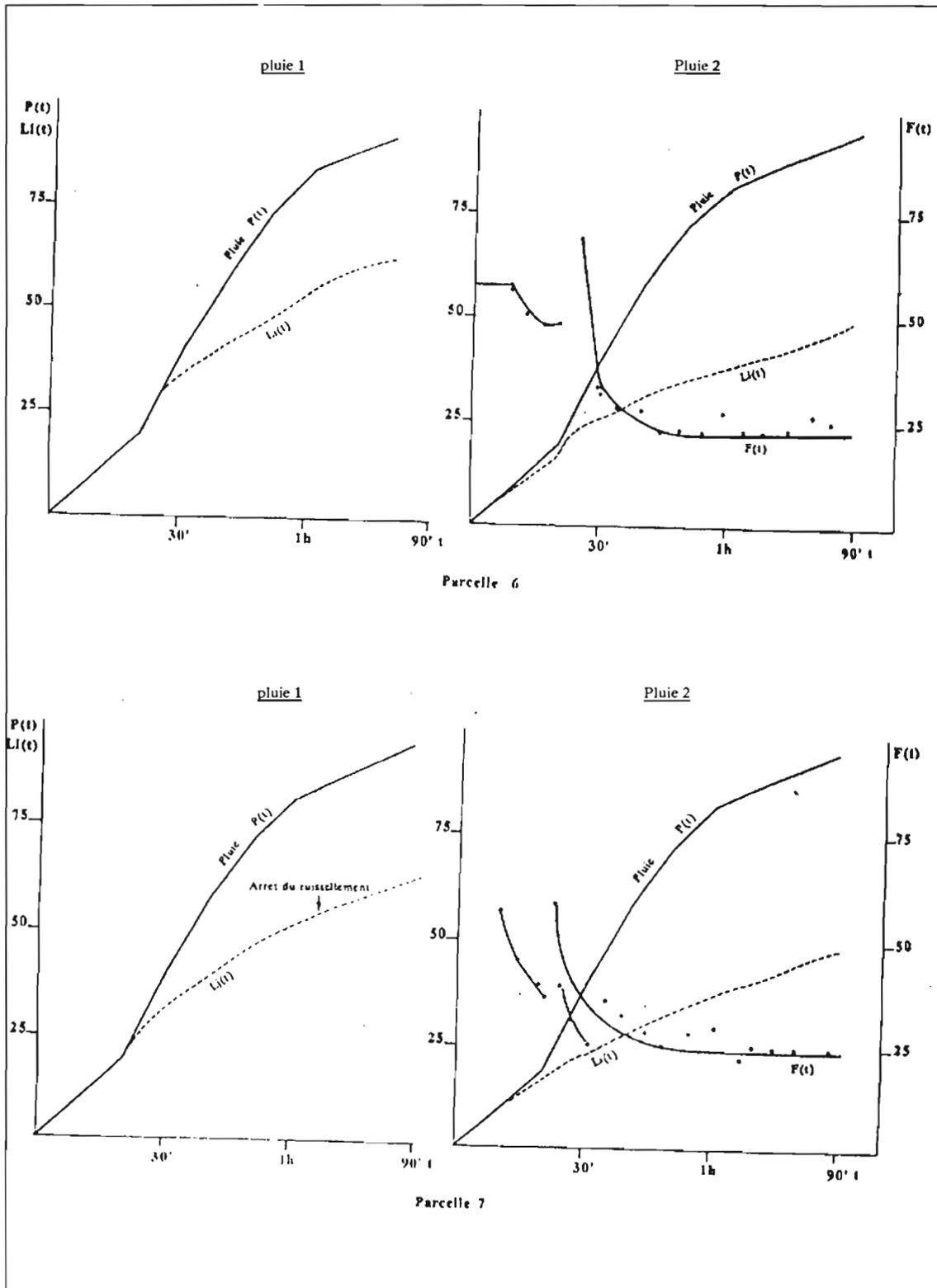


FIG.3.3 Pluie, lame infiltrée, intensité d'infiltration en fonction du temps



Le tableau 3.6 récapitule pour chaque pluie les principales caractéristiques du ruissellement et de l'infiltration:

- temps de ressuyage entre deux pluies (ta)
- hauteur totale précipitée (P)
- hauteur totale ruisselée (Lr)
- hauteur totale infiltrée (Li)
- pluie d'imbibition (hauteur de la lame précipitée avant l'apparition du ruissellement Pi)
- détention superficielle récupérable (hauteur ruisselée après l'arrêt de la pluie: Dr)
- kr coefficient de ruissellement (rapport hauteur ruisselée / hauteur précipitée)
- kru coefficient de ruissellement utile (rapport hauteur ruisselée- / hauteur précipitée- pluie d'imbibition)
- IK indice des précipitations antérieures  $IK_k = (IK_{k-1} + P_{k-1})e^{-ka}$

Tableau 3.6 : Résultats globaux des essais de simulation de pluie

Pluie	Temps ressuyage h	Hauteur précipitée P mm	Hauteur ruisselée Lr mm	Hauteur infiltrée Li mm	Pluie imbibition Pi mm	Dr mm	kr%	kru%	IK
1/1		57	1.7	55.3	32.0	0	3	7	0
2/1	10h55	85.6	36.9	48.7	9.5	0.4	43	48	45.4
3/1	35h57	95.1	41.8	53.3	9.0	0	44	49	61.9
1/2		57.6	1.3	56.3	29.6	0	2	3	0
2/2	13h15	87	12.2	74.9	9.3	0.1	14	16	43.7
3/2	33h25	95.6	31.8	63.8	10.8	0	33	38	65.2
1/3		96.5	29.7	66.9	19.3	0	31	38	0
2/3	13h42	95.3	-	-	7.3	-	-	-	71.6
1/4		95.4	44.3	51.1	14.1	0.1	46	54	0
2/4	22h50	95.7	67.8	27.9	5.8	0.5	71	75	59.3
1/5		99.9	40.1	59.8	20.4	0.3	40	50	0
2/5	37h30	93.1	62.2	30.9	4.6	0.2	67	70	45.7
1/6		98.2	27.6	70.6	20.0	0	28	35	0
2/6	23h30	95.0	45.6	49.4	8.0	0	48	52	60.2
1/7		95.1	31.0	64.1	19.2	0	33	41	0
2/7	23h40	95.2	63.2	32.0	9.1	0	66	73	58.1

### 3.5.2 Comparaison des aptitudes à l'infiltration des parcelles

Pour comparer «l'infiltrabilité» des différentes parcelles la pluie de type décennale simulée sur sol humide (dernière pluie) a été sélectionnée.

La figure 3.4 représente pour cette dernière pluie du protocole les courbes lames infiltrées en fonction du temps. La figure 3.5 représente pour cette même pluie les courbes de l'intensité d'infiltration en fonction du temps. Sur ces deux graphiques on remarque :

- Un comportement très voisin des parcelles P1 et P2. P4 et P5. P6 et P7 donc un comportement très voisin pour des parcelles situées dans une même unité de la carte kriegée (fig. 3.2).

- Les parcelles P1 et P2 sont les plus filtrantes viennent ensuite P6 et P7 et enfin P4 et P5. On retrouve ici l'ordre des zones d'humidité déterminé à partir des cartes kriegées.

**Cette concordance entre les aptitudes à l'infiltration mesurée sous simulation de pluie en saison sèche et les zones d'humidité homogène définies en saison des pluies confirme l'hypothèse que la recharge du stock hydrique se fait uniquement par l'infiltration directe de la pluie.**

### 3.5.3 Recherche d'une fonction de production du ruissellement

Le protocole de pluie n'est pas suffisant pour définir les équations classiques du ruissellement sous pluie simulée (ALBERGEL, 1987) ( $Lr = aP + bIK + cP \times IK + d$ ).

L'utilisation de la typologie des états de surface et des équations de ruissellement associées a été réalisée par VAKSMANN (1988) dans le calage du modèle agro-climatique de FOREST. Nous nous proposons de vérifier dans le cas de ce micro bassin la possibilité d'utiliser les équations de ruissellement données par le catalogue des états de surface.

i) P1. P2 Surface de type cultivée 1 à pellicule structurale 1 dominante

Equation de ruissellement

$$Lr = 0.2 P + 0.03 IK + 0.004 PIK - 3.0$$

Fig. 3.4 Lames infiltrées en du temps

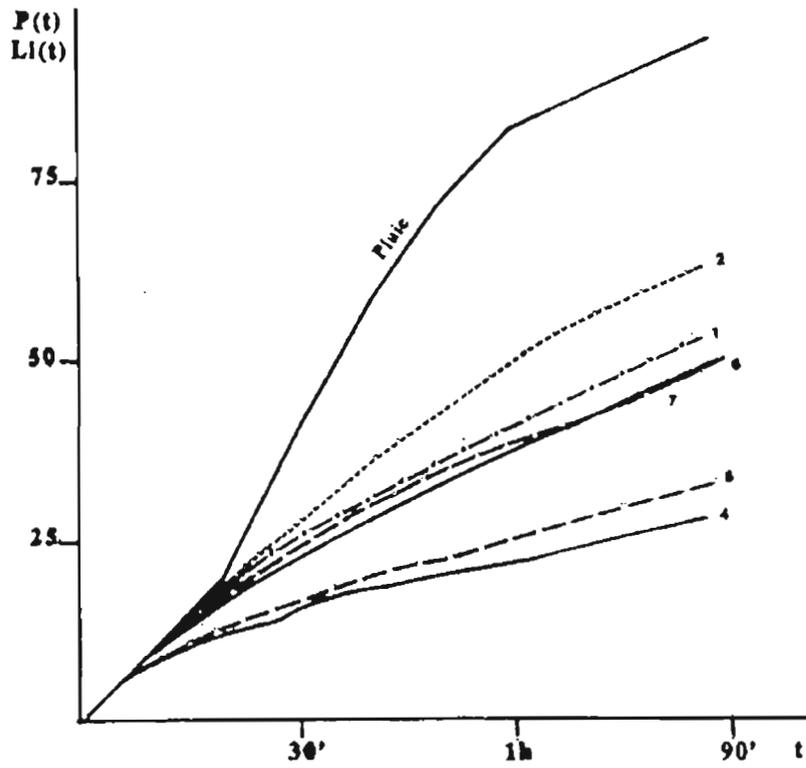
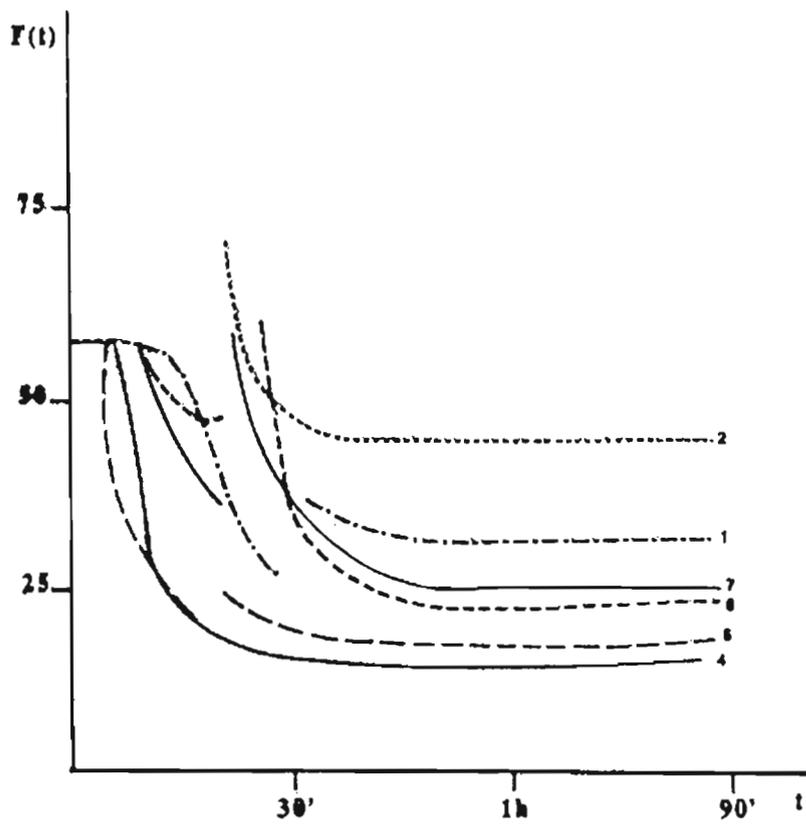


fig. 3.5 Intensité d'infiltration en fonction du temps



— 7: Parcelle 7

ii) P3 surface non cultivée de type structurale 2 variante < 50% de végétation

$$Lr = 0.3 P + 0.01 IK + 0.003 PIK - 8$$

iii) surface de type cultivée 2

$$Lr = 0.35 P + 0.04 IK + 0.004 PIK - 3.0$$

Le tableau 3.7 compare les caractéristiques de l'infiltration et du ruissellement mesurés sur nos sites expérimentaux et les valeurs données par le catalogue de surface pour la surface élémentaire correspondante.

Pis est la pluie d'imbibition sur sol sec

Pih est la pluie d'imbibition sur sol très humide (dernière pluie)

Kis coefficient d'infiltration pour une lame précipitée de 50mm sur sol sec IK=0

Kih coefficient d'infiltration pour une lame précipitée de 50mm sur sol très humide, ce coefficient est donné pour un IK de 20 dans le catalogue des états de surface, IK est voisin de 50 dans notre cas expérimental.

Tableau 3.7 Caractéristiques du ruissellement comparaison avec les données du catalogue de surface

	Pis mm	Pih mm	Ii mm/h	Kis %	Kih %
P1	32	9.0	27	96	64
P2	26.6	10.8	34	98	65
Référence	25-30	5-15	15-25	80-90	60-75
P3	19.3	7.3	-	72	-
Référence	10-20	1-5	5-10	60-70	50-60
P4	14.1	5.8	12	62	34
P5	20.8	4.6	15	60	36
Référence	8-12	2-4	1-7	60-80	50-70
P6	20.0	8.0	21	76	56
P7	19.2	9.1	23	72	52
Référence	15-25	5-10	10-20	80-90	70-80

Excepté pour Kih où les conditions d'humidité ne sont pas les mêmes pour l'expérimentation et le catalogue, les valeurs caractérisant le ruissellement et l'infiltration sur nos parcelles sont voisines des données du catalogue. Ce résultat nous a encouragé à appliquer l'équation de ruissellement du catalogue aux pluies simulées (hyéogrammes de type décennal). Le tableau 3.8 compare les lames ruisselées calculées à celles mesurées pour les différentes expérimentations.

Tableau 3.8 Comparaison des lames ruisselées observées et calculées

Pluie	Lro mm	Lrc mm	Pluie	Lro mm	Lrc mm
3/1	41.8	41.4	1/5	40.1	35.0
3/2	31.8	43.0	2/5	62.2	48.5
1/3	29.7	21.0	1/6	27.6	34.3
2/3	-	41.8	2/6	45.6	55.5
1/4	44.8	33.5	1/7	31.0	33.2
2/4	67.8	55.6	2/7	63.0	54.8

Les reconstitutions des lames ruisselées sont effectuées à 10 mm près, sur les 11 valeurs reconstituées on n'observe pas d'erreurs systématiques. La pente de la droite de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs calculées est de 0.991 et le coefficient de corrélation 0.775.

La précision obtenue sur le ruissellement par les équations du catalogue semble suffisante pour un bilan agro-climatique à l'échelle décennale. Une vérification en saison des pluies reste néanmoins nécessaire.

## CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS

Les résultats obtenus pendant cette campagne ont mis en évidence plusieurs points sur le plan théorique de l'infiltration et sur le fonctionnement hydrodynamique du micro-bassin versant choisi comme zone test pour l'étude du bilan hydrique des cultures d'arachide et de mil.

L'indépendance de(s) la courbe(s) de rétention du sol  $h(O)$  vis à vis du mode d'apport en eau à la surface a été démontrée. La courbe de rétention est une caractéristique intrinsèque du sol et indépendante de la méthode de sa détermination, comme il se doit théoriquement.

La gamme de variation des paramètres mesurés dépend du mode d'apport en surface. Elle est plus étendue sous charge constante que sous pluie. Dans les deux types d'essai, la teneur en eau à saturation des horizons superficiels n'a pas été mesurée. Cependant, les humidités enregistrées au cours des pluies étaient systématiquement inférieures à celles observées sous MUNTZ, bien qu'il y ait du ruissellement au cours des pluies. Ceci montre que le ruissellement ne peut pas être considéré comme un indicateur de la saturation du sol et amène à revoir les modèles de ruissellement fondés sur le concept de réservoir saturé.

La concordance des résultats obtenus à partir des mesures sous pluie simulée en saison sèche et ceux donnés par la carte kriegée des humidités en saison des pluies montre que la recharge des réserves hydriques du sol sur ce bassin se fait par infiltration et non par variations saisonnières du niveau de la nappe souterraine. Cette concordance confirme une fois de plus la fiabilité de la méthodologie mise au point pour exploiter les données obtenues par le simulateur de pluie et le bien fondé de son utilisation en saison sèche pour la prédiction des phénomènes qui ont lieu pendant la saison des pluies.

On notera à ce propos que le nouveau mini simulateur entièrement automatisé a fait ses preuves puisque c'était sa première utilisation sur le terrain en conditions tropicales.

La comparaison des résultats expérimentaux à ceux obtenus par application des formules proposées dans le catalogue des états de surface a montré que ces dernières estiment de façon satisfaisante les ordres de grandeur de l'infiltration et du ruissellement.

Sur l'ensemble des sites expérimentaux de THYSSE KAYMOR on se propose de poursuivre les études de physiques des sols en utilisant le simulateur de pluie couplé aux mesures de tensiométrie et d'humidité.

En 1989 se poursuivra le dépouillement des données obtenues au cours de cette première expérimentation pour déterminer les courbes de conductivité hydraulique. Une expérimentation de simulation de pluie sur l'ensemble des états de surface de la région sera réalisée en vue d'une modélisation des apports par ruissellement aux bas-fonds.

En 1990 l'acquisition par l'ISRA d'un deuxième simulateur de pluie permettra d'orienter les expérimentations sur le test de l'efficacité des différents travaux du sol pour améliorer leur recharge hydrique. Une étude théorique de la physique des croûtes de battance et de leur évolution au cours de la pluie est envisagée sur le site de THYSSE KAYMOR mais dépendra des résultats que l'on obtiendra en station à DAKAR.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBERGEL J., (1987) Genèse et prédétermination des crues au BURKINA FASO. Du m<sup>2</sup> au km<sup>2</sup>, étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de Doctorat es sciences de l'université PARIS VI PARIS, Col Etudes et Thèse de l'ORSTOM 336 p

ANGE, A, THIAM, A, SENE, M. (1984) Cartographie de détail au 1/500 des processus de remaniement des horizons de surface des sols sur 200 parcelles. ISRA KAOLAK

ARYA L.M. FARREL, D.A., BLAKE G.R. (1975) A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots : I. Determination of hydraulic properties of the soil. Soil sci. Soc. Am; Proc., 39, pp 424-430

AUDIN, P (1987) Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique avec ruissellement. ISRA/IRAT/ESAM Rap. Mult. 49 p.

BERNARD, A. (1986). Un nouveau simulateur de pluie. Gouttes et SPLASH, bul. du groupe méthodologique de simulation de pluie Vol.3 n° 2, ABIDJAN, pp 12-16

BROUWERS. M (1987) Etude morphopédologique des bassins versants de Thyssé Kaymor. CIRAD - ENSAM 40p: +cartes

CASENAVE A. & VALENTIN C. (1988) Les états de surface de la zone sahélienne Influence sur l'infiltration. CEE-ORSTOM. 2 tomes 202 p + cat. Photos

CASENAVE. A (1982). Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. cah ORSTOM. ser. hydro. Vol. XIX,4. pp 207-227

GARDNER W.R. (1958) Some steady state solutions of the unsaturated moisture Flow equation with application to evaporation from a water table. Soil sci., 85 pp 228-232

HILLEL D., KRENTOS V.D., STILIANOU Y (1972) Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in-situ Soil Sci., 114 pp 395-400

RUELLE P., SENE M., VAUCLIN M. (1988) Bilan hydrique d'un micro-bassin versant cultivé aspects stationnel et spatial. multigr. ISRA KAOLAK

SENE M. (1986) Carte des états de surface du Micro-BV1 Doc. ISRA. KAOLACK

TOUMA J. & CHEVILLOTTE H (1988) OPTIM. Logiciel d'optimisation de paramètres non linéaires ORSTOM DAKAR

VACKSMANN (1988) BIPODE. Logiciel de calcul des termes du bilan hydrique. IRAT. CIRAD