

Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transferts hydriques, et l'évaporation d'un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal

Limamoulaye CISSE ⁽¹⁾ et Georges VACHAUD ⁽²⁾

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un essai agronomique de longue durée portant sur les possibilités de régénération de sols sableux totalement dégradés du Nord-Sénégal par amendement organique, on a pu observer de très forts contrastes de cinétique d'humectation du sol en saison des pluies à partir de mesures de profils hydriques effectuées par humidimétrie neutronique sous culture d'arachide sur le traitement avec apport de matière organique et sur témoin.

Deux types d'expérimentations ont été effectués pour déterminer si cet effet provenait d'une modification des propriétés de rétention et de conductivité hydrique du sol par la matière organique :

- Essais de caractérisation hydrodynamiques classiques, par infiltration sous charge constante suivie de drainage interne. Aucun effet significatif n'a pu être obtenu ni sur les paramètres des lois d'infiltration, ni sur les relations caractéristiques $K(\theta)$ et $h(\theta)$. En outre, ces essais mettent en évidence une très forte hystérésis de succion qui montre clairement la difficulté d'utiliser une courbe de drainage obtenue en laboratoire pour caractériser un comportement de terrain.

- Suivi de l'évaporation sur sol nu immédiatement après semis. Là encore les résultats obtenus sur le témoin et sur l'essai, ne conduisent à aucune différenciation. Ces essais permettent en outre de proposer une loi de paramétrisation simple liant l'évaporation à la teneur en eau du sol.

On montre, dans un autre article publié par ailleurs sur l'aspect agronomique de l'expérimentation, que les effets constatés s'expliquent essentiellement par une très forte différence de colonisation du sol par le système racinaire des cultures étudiées.

MOTS-CLÉS : Amendement organique – Sol sableux – Sénégal – Infiltration – Évaporation – Caractérisation hydrodynamique – Succion – Conductivité hydraulique – Humidimétrie neutronique.

ABSTRACT

EFFECT OF ORGANIC ENRICHMENT ON INFILTRATION, SOIL WATER TRANSFER COEFFICIENTS AND EVAPORATION OF A DEGRADED SANDY SOIL OF NORTHERN SENEGAL

In the course of a long term agronomic experiment, dealing with the study of rehabilitation of degraded sandy soils of Northern-Senegal by organic enrichment, very high contrasts were observed in terms of wetting front penetration into the soil during the crop season. In 1983, for a groundnut crop, despite a very low rainfall (165 mm), it was clear from water content profile measurements taken with a neutron moisture meter both on control and treatment, with 3 repetitions each time, that the wetting front was quickly reaching the depth of 4 m on the control, but remaining in the root zone, above 2 m on the treatment.

(1) Institut Sénégalais de Recherches Agricoles CNRA, B.P. 53, Bambey, Sénégal.

(2) Institut de Mécanique de Grenoble, Laboratoire Associé au CNRS, B.P. 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France.

Two series of experiments were therefore made to determine whether or not this result was induced by the effect of organic matter on the water holding capacity and the hydraulic conductivity of the sand.

1 – First an hydrodynamic characterization, with classical methodology : constant head infiltration followed by internal drainage. No significant effect was observed on the parameters of the infiltration law, nor on the relationships $K(\theta)$ and $h(\theta)$. Furthermore a strong hysteresis was obtained for the soil suction relationship, indicating clearly the danger of using a drainage curve obtained under laboratory conditions, starting from full saturation, to describe field behavior.

2 – Second the measurement of daily values of evaporation immediately after sowing, and for a period of 18 days. The results obtained on the control and on the treatment, with each time 3 repetitions of daily measurements of soil water content profiles, show no significant differences as long as the crop development is limited. From the analysis of the data, a simple model is suggested relating evaporation to the water content of the upper soil layer.

In another paper, related more specifically to the agronomic aspect of the experiment, an explanation of the observation made initially is given in term of root density. It is shown that the root development as well as the root mass are very significantly improved by application of organic matter, and consequently the water and nutrient uptake by the plant highly increased.

This study was supported by a Technical Assistance Contract between the International Atomic Energy Agency and the Government of Senegal (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles).

KEY WORDS : Organic Amendment – Sandy Soil – Senegal – Infiltration – Evaporation – Soil Water Suction – Soil Hydraulic Conductivity – Neutron Probe.

1. INTRODUCTION

A l'occasion d'un essai agronomique de longue durée mené à Thilmakha, en zone Centre-Nord du Sénégal, et portant sur l'étude des possibilités d'améliorer le niveau de fertilité d'un sol dégradé par le labour, la fertilisation minérale, l'amendement calcique et/ou organique, on a pu observer des différences de comportement très marquées entre traitements aussi bien au niveau de la production végétale qu'à celui des transferts dans le sol. On a ainsi montré que malgré une faible pluviométrie utile (moins de 200 mm), de fortes pertes en drainage (jusqu'à 40 % de la pluie) pouvaient être mesurées sur les traitements sans apport de matière organique, alors que ces pertes étaient nulles pour les mêmes cultures dans le cas contraire.

Nous avons donc été amenés à effectuer des essais de caractérisation des propriétés hydrodynamiques du sol, en fonction des traitements imposés, afin de déterminer si l'amendement organique pouvait ou non modifier les propriétés de rétention et de conductivité hydrique du sol, et d'évaluer la possibilité de caractériser les pertes en drainage par application de la loi de Darcy.

Cet article ne concerne que cet aspect de l'expérimentation qui a comporté par ailleurs un suivi agronomique détaillé, et une caractérisation des bilans hydriques et minéraux d'une succession culturale : arachide-mil-arachide. (CISSE, 1986).

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un contrat d'Assistance Technique entre l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique et l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (Convention SEN/5/017).

2. PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIMENTATION

L'expérimentation globale concerne l'étude des bilans de production, de consommation et des pertes hydriques et minérales dans un dispositif agronomique implanté depuis 1972 sur un sol dunaire représentatif des sols dégradés de la zone soudano-sahélienne, avec rotation arachide-mil. Elle est implantée à Thilmakha, 60 km au nord-est de Bambey, et est décrite en détail par L. CISSE, 1986.

En fonction des résultats globaux (portant sur les rendements annuels) obtenus depuis la mise en place de l'expérimentation, seuls les deux extrêmes d'une série de 8 traitements ont été retenus pour faire l'objet d'un suivi détaillé relatif aux transferts d'eau et d'éléments minéraux dans le sol :

- le témoin T0, avec labour et apport de fumure minérale forte
- le traitement T1, avec en plus apport d'amendement organique sous forme d'épandage de 10 t/ha de fumier tous les 2 ans.

2.1. DESCRIPTIF DES MESURES

Le suivi hydrique détaillé a débuté en 1983, et ne concernait que l'arachide. Pour chacun des 2 traitements on disposait (à raison de 5 répétitions), d'un tube d'accès pour humidimètre neutronique implanté jusqu'à la profondeur de 4 m.

Les premières séries de mesures ont permis de mettre en évidence des différences considérables au niveau de la cinétique de pénétration du front d'humectation de la pluie, et des profils hydriques (fig. 1 et 2) sur les traitements. Sans apport de matière organique, le front d'humectation atteignait ainsi la dernière cote de mesure (3,7 m) fin septembre, alors que sur T1, aucune variation d'humidité n'était mesurable au-delà de 2 m.

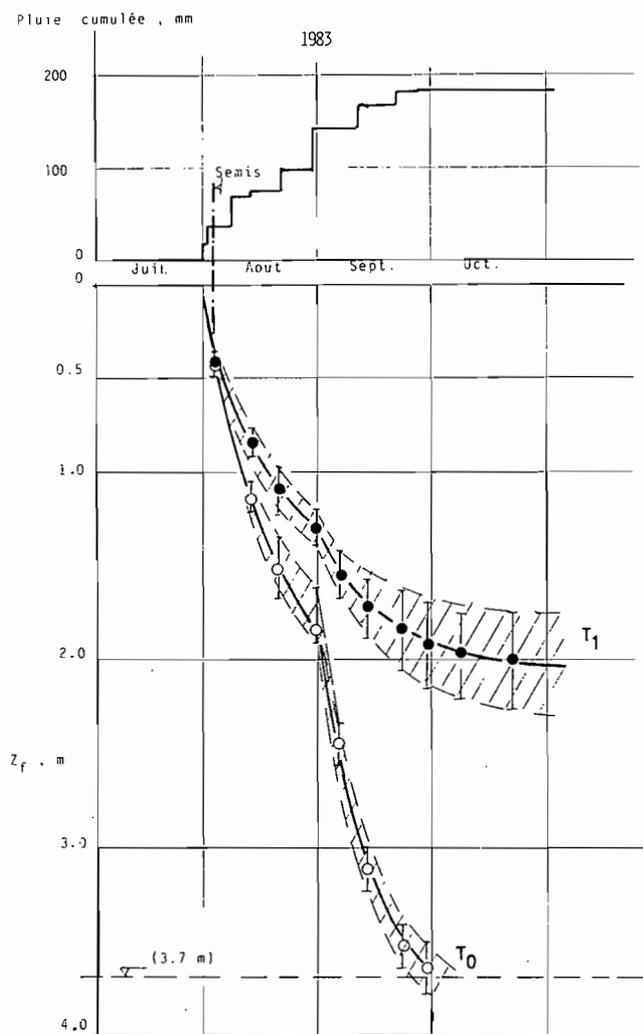


Fig. 1 - Cinétique comparée de pénétration du front d'humectation sur traitement avec ou sans apport de matière organique

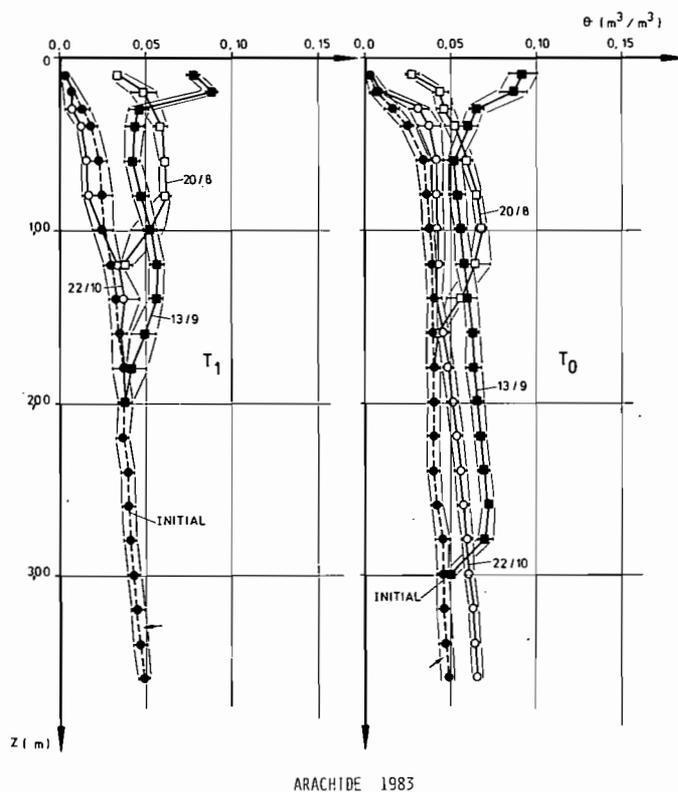


Fig. 2 - Profils hydriques des mesures à des dates caractéristiques durant le cycle de culture 1983

L'étude détaillée de la variabilité des teneurs en eau a d'autre part montré que leur écart-type spatial était voisin de $\pm 0,005 \text{ m}^3/\text{m}^3$, soit du même ordre que l'incertitude de la mesure neutronique (VAUCLIN *et al.*, 1983), et que les informations obtenues en n'instrumentant que 3 blocs seraient analogues à celles données par les 5 blocs.

Après un suivi détaillé de bilan hydrique concernant les 2 cultures en 1984, et reposant sur l'utilisation d'humidimètre neutronique et de tensiomètres à raison de 3 répétitions par traitement, selon une procédure décrite

par CISSE-VACHAUD, 1988, on s'est consacré durant la saison sèche et au début de la saison des pluies 1985 à deux types d'expérimentations qui font l'objet de cet article :

. d'une part, on a effectué en janvier-mars 1985 deux essais de caractérisation hydrodynamique (infiltration puis drainage interne) sur une parcelle témoin (I0) et sur une parcelle avec amendement organique (I1).

. d'autre part en juillet 1985, juste au moment des pluies, et dans le but de caractériser en détail les processus d'infiltration des premières pluies et d'évaporation en début de cycle, on a conduit une expérimentation très fine sur chacun des 2 traitements T0 et T1 semés en mil. On a implanté sur trois répétitions de chaque traitement des tensiomètres aux cotes 0,1 et 0,2 m au voisinage de chacun des tubes d'accès pour sonde neutron et l'on a suivi deux fois par jour (matin et soir) l'évolution des mesures tensiométriques et celle des profils hydriques dans le premier mètre.

L'analyse de ces deux essais a naturellement été effectuée dans le but de rechercher si la présence de matière organique pouvait, en l'absence de végétation, induire des différences sur les paramètres de transferts hydriques du sol.

2.2. CARACTÉRISTIQUES DU SOL

C'est un sol sableux (ferrugineux tropical peu lessivé) dont la granulométrie est extrêmement homogène (dans l'espace, et avec la profondeur). Les échantillons prélevés lors de la mise en place des tubes d'accès conduisent aux valeurs reportées tableau I, toutes profondeurs et tous blocs réunis par traitement.

TABLEAU I
Caractéristiques granulométriques du sol (en % de la masse totale sèche) (tranche de sol 0-3,5 m)

	T0 (témoin)	T1
Argile + Limon ($< 20 \mu$)	3.9 ± 0.7	3.8 ± 0.6
Sable fin ($20-100 \mu$)	1.7 ± 0.3	1.5 ± 0.3
Sable moyen ($100-200 \mu$)	64.1 ± 3.5	64.8 ± 3.1
Sable grossier ($> 200 \mu$)	29.9 ± 3.3	29.2 ± 3.4

La masse volumique de sol (mesurée au cylindre) est de $1,45 (\pm 0,15) \text{ T/m}^3$ dans l'horizon 0-0,1 m, puis de $1,5 (\pm 0,15) \text{ T/m}^3$ jusqu'à 1,5 m.

Les caractéristiques physicochimiques analysées, et qui sont présentées par CISSE, 1986, montrent que l'apport de fumier n'a d'influence (dans le sens d'un accroissement) que sur la teneur des bases échangeables (Ca, Mg et K) et sur celles de la matière organique dans l'horizon 0-0,1 m.

La caractérisation fine du statut organique du sol montre que la différence essentielle entre les deux traitements concerne la répartition des différentes formes d'azote présentes dans l'horizon 0-0,1 m. Dans cette couche de sol, la fraction N-aminé est de 66 ppm sur T1 et de 43 ppm sur T0. C'est le résultat le plus discriminant.

3. DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU SOL

Les deux essais (notés respectivement I0 et I1) de détermination des relations $K(\theta)$, $h(\theta)$ entre conductivité hydraulique, pression, et teneur en eau ont été effectués selon le protocole décrit par G. VACHAUD *et al.* (1978). Chacun des deux sites comporte un tube d'accès pour humidimètre neutronique jusqu'à 4 m de profondeur, et 10 tensiomètres à mercure implantés aux profondeurs de 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 ; 1,1 ; 1,3 et 1,5 m.

Chaque essai comporte deux phases : *infiltration d'eau* sous charge constante (0,04 m), avec infiltrmètre à 2 anneaux, de diamètres respectifs 0,5 et 1 m, et contrôle du volume infiltré par un dispositif de Mariotte (dans

les deux cas la lame d'eau totale infiltrée est de 150 mm), puis *redistribution par drainage interne*, avec couverture de la surface du sol par une feuille de plastique couverte de paillage, et suivi de l'évolution des profils hydriques et tensiométriques pendant 2 semaines.

Afin d'obtenir avec une bonne précision la teneur en eau de la couche superficielle de sol, on a lors de chaque mesure effectué des prélèvements à la tarière dans les horizons 0-0,1 et 0,1-0,2 m, avec duplication et calcul de la teneur en eau volumique en utilisant une masse volumique de 1,45 T/m³, et 1,50 T/m³ respectivement.

On doit noter qu'en liaison avec les résultats reportés figures 1 et 2, les profils hydriques mesurés en saison sèche sur le traitement T1 sont toujours légèrement plus secs que pour T0 (tabl. II).

Cette différence se retrouve au niveau des essais I0 et I1 (fig. 3) ; ce sera là, du point de vue hydrodynamique, la seule différence marquante.

TABLEAU II
Profil de teneur en eau en fin de saison sèche

Tranche sol m	Parcelles T0 $\theta \text{ m}^3/\text{m}^3$	Parcelles T1 $\theta \text{ m}^3/\text{m}^3$
0 -0.5	0.015 ± 0.009	0.009 ± 0.005
0.5-1	0.033 ± 0.003	0.023 ± 0.003
1 -1.5	0.043 ± 0.004	0.025 ± 0.002
5 -2.0	0.047 ± 0.025	0.030 ± 0.004
2.0-2.5	0.040 ± 0.004	0.037 ± 0.002

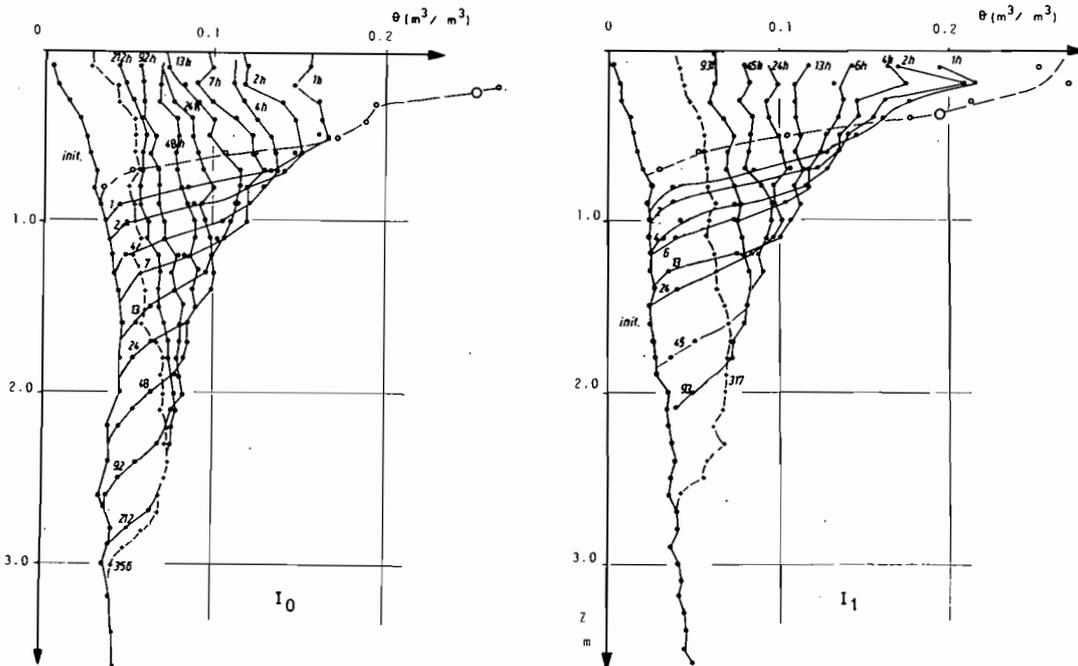


Fig. 3 - Profils hydriques en drainage interne sur les essais I0 et I1

Compte tenu des variations relativement faibles de la teneur en eau avec la profondeur, on peut, dans chaque cas, raisonnablement admettre l'hypothèse d'un profil hydrique initial uniforme.

3.1. ANALYSE DES ESSAIS D'INFILTRATION

Cette analyse ne porte que sur le volume infiltré. On sait en effet qu'il est vain d'effectuer durant cette phase une étude détaillée de l'évolution des profils d'humidité compte tenu de l'imprécision de la mesure neutronique lors de la présence d'un front d'humectation dans la sphère d'influence.

L'évolution de la lame d'eau cumulée infiltrée dans l'anneau intérieur est reportée fig. 4a pour chacun des 2 essais.

Les conditions d'expérimentation (profil hydrique initial uniforme, charge constante) correspondent à celles fixées pour obtenir la solution de PHILIP (1969) :

$$I = St^{1/2} + At \tag{4}$$

Les deux paramètres intervenant dans cette équation, à savoir la sorptivité S caractérisant l'absorption d'eau par capillarité et le paramètre de gravité A, ont donc été déterminés par la recherche classique de corrélation linéaire entre I/\sqrt{t} et \sqrt{t} résultant de l'écriture de l'équation (4) sous la forme $I/\sqrt{t} = S + A\sqrt{t}$ (5) (fig. 4b) :

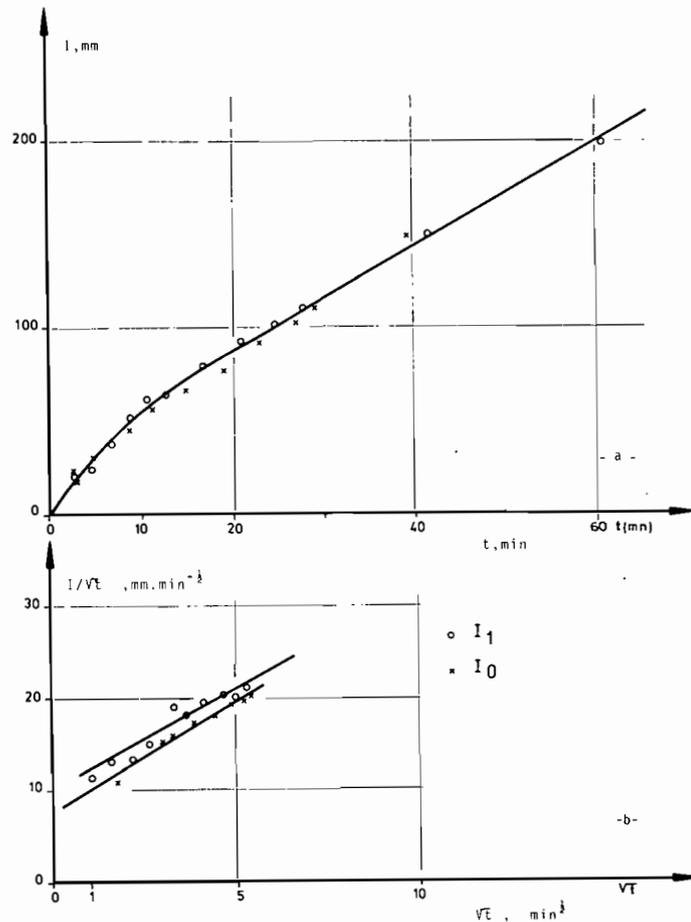


Fig. 4 - Courbe d'infiltration cumulée sur I0 et I1

L'on obtient pour chacun des deux essais les valeurs suivantes :

	r ²	S (mm/√min)	A(mm/min)
10	0.95	8.21	2.26
11	0.89	9.19	2.47

Aucune différence significative ne peut être trouvée entre les valeurs de sorptivité et du paramètre A obtenues sur les 2 essais.

Faute de méthode plus précise, on ne peut qu'obtenir une estimation de la conductivité hydraulique à saturation K_s en utilisant la règle généralement admise (YOUNGS 1968) :

$$2/3 K_s \leq A \leq K_s \quad (5)$$

ce qui conduit à une fourchette de valeurs K_s = 140 à 210 mm/h pour une teneur en eau à « saturation » de 0,255 ± 0,015 m³/m³.

Une tentative ayant pour but d'obtenir une meilleure approximation de K_s à partir d'un régime permanent de plus longue durée (6 h d'infiltration) n'a pas conduit à des valeurs de résultats interprétables du fait d'une prédominance des transferts latéraux.

3.2. ANALYSE DU DRAINAGE GRAVITAIRE – RELATION K(θ)

On trouvera aussi fig. 3 l'évolution des profils d'humidité mesurés, pour chacun des deux essais durant la phase de redistribution. Toutes les mesures n'ont pas été reportées. On dispose en fait pour chaque essai de plus de 30 profils répartis globalement de la façon suivante :

- 5 profils durant la 1^{re} heure suivant la disparition de la lame d'eau
- puis 1 profil toutes les heures pendant les six heures suivantes
- puis 2 profils par jour pendant 3 jours et enfin 1 profil par jour jusqu'à la fin de l'essai (356 h après la disparition de la lame).

On notera dans les deux cas la très grande uniformité des profils hydriques mesurés. L'évolution des mesures est analogue ; la seule différence notable est liée à une cinétique plus rapide du front d'humectation sur 10, ce qui s'explique simplement par la plus forte humidité initiale.

Nous ne reviendrons pas sur la méthode de calcul de la relation K(θ) qui a fait l'objet d'exposés détaillés dans deux articles précédents (VACHAUD, DANCETTE *et al.* 1978 ; VACHAUD, VAUCLIN, COLOMBANI, 1981).

Notons simplement que le calcul de l'évolution dans le temps du flux hydrique à une cote z a été fait par une méthode semi-analytique présentée dans l'article de 1981, cité ci-dessus. Cette méthode repose sur l'identification de la variation du stock hydrique entre la surface du sol et la cote considérée par une relation de type :

$$S_z(t) = a + b \ln t \quad (6)$$

ce qui donne immédiatement pour les conditions d'essais :

$$q(z,t) = \frac{dS}{dt} = -\frac{b}{t} \quad (7)$$

La conductivité K correspondant à la teneur en eau θ mesurée à z et t est donnée par K = -q/dH/dz (7), le dénominateur étant simplement la pente des profils de charge hydraulique (fig. 5) à z et t.

On trouvera fig. 6 tous les points de mesures obtenus pour ces deux essais aux cotes 0,5, 1, 1,5 et 2 m. L'homogénéité du sol est telle qu'il n'est pas possible de séparer les horizons. Les traitements ne donnent aucune différence significative.

Si le gradient de charge hydraulique à une cote était constant dans le temps, il devrait découler de l'expression (6) une relation K(θ) de type exponentiel. Les profils de charge hydraulique montrent clairement que, pendant la phase de drainage, dH/dz varie entre -1 et -0,7 pour z > 0,5 m. De ce fait la meilleure estimation fonctionnelle pour la relation K(θ) (fig. 6) est une loi en puissance de type

$$K(\theta) = a.\theta^b \quad (8)$$

avec a = 2,10⁵ ; b = 5,352 ; K en mm/h et un coefficient de corrélation de 0,9885.

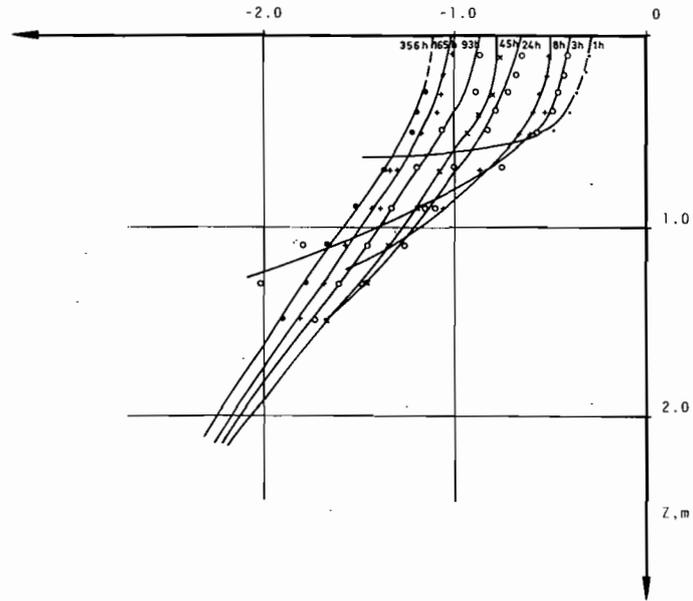


Fig. 5 - Profil de charge hydraulique en drainage interne sur l'essai 10

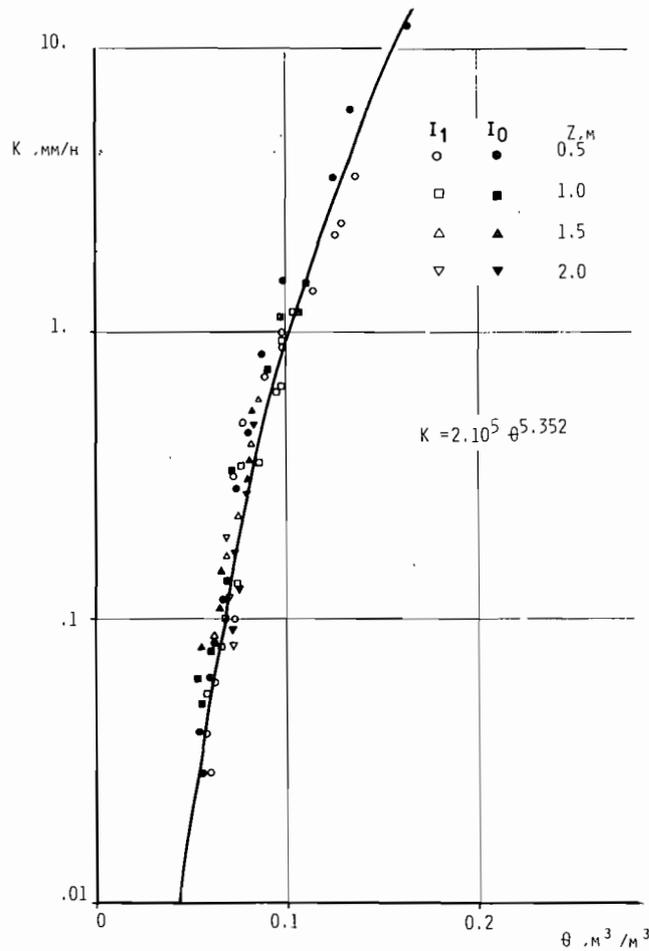


Fig. 6 - Relation $K(\theta)$ obtenue sur les 2 essais 10 et 11 pour différentes profondeurs

L'application de cette caractérisation à la détermination des bilans hydriques fait l'objet d'une autre publication (CISSE-VACHAUD, 1987).

3.3. DÉTERMINATION DES COURBES DE RÉTENTION $h(\theta)$

Aucune différence spécifique n'étant discernable, au niveau du coefficient de conductivité K , entre les deux traitements, nous avons tenté de rechercher si, au niveau de la rétention d'eau, l'apport de matière organique pouvait avoir un effet significatif, au moins pour l'horizon de surface. Les mesures obtenues pendant les essais de caractérisation permettent de répondre facilement à cette question, puisque l'on peut corrélérer à chaque niveau z la valeur de la pression interstitielle h (déduite de la charge hydraulique H mesurée au tensiomètre) à la teneur en eau θ déterminée au même instant.

Afin de minimiser l'influence d'erreurs de mesure trop importantes deux contraintes ont été imposées :

- dans les horizons 0-0,1 m et 0,1-0,2 m les teneurs en eau sont obtenues par prélèvement d'échantillons, et non par l'humidimètre neutronique.
- toutes les valeurs de teneur en eau correspondant au temps de passage du front d'infiltration à la cote de mesure ne sont pas prises en compte.

On a reporté fig. 7a tous les couples de points (h, θ) obtenus durant les 2 essais pour les deux niveaux 0-0.1 m et 0,1-0,2 m. Clairement aucun effet significatif de rétention supplémentaire d'eau ne peut être attribué à la présence de matière organique. La courbe obtenue en lissant toutes ces valeurs - caractérisée par la suite par le symbole (D) - correspond à la courbe de drainage partant de l'état de saturation ($\theta_s \sim 0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

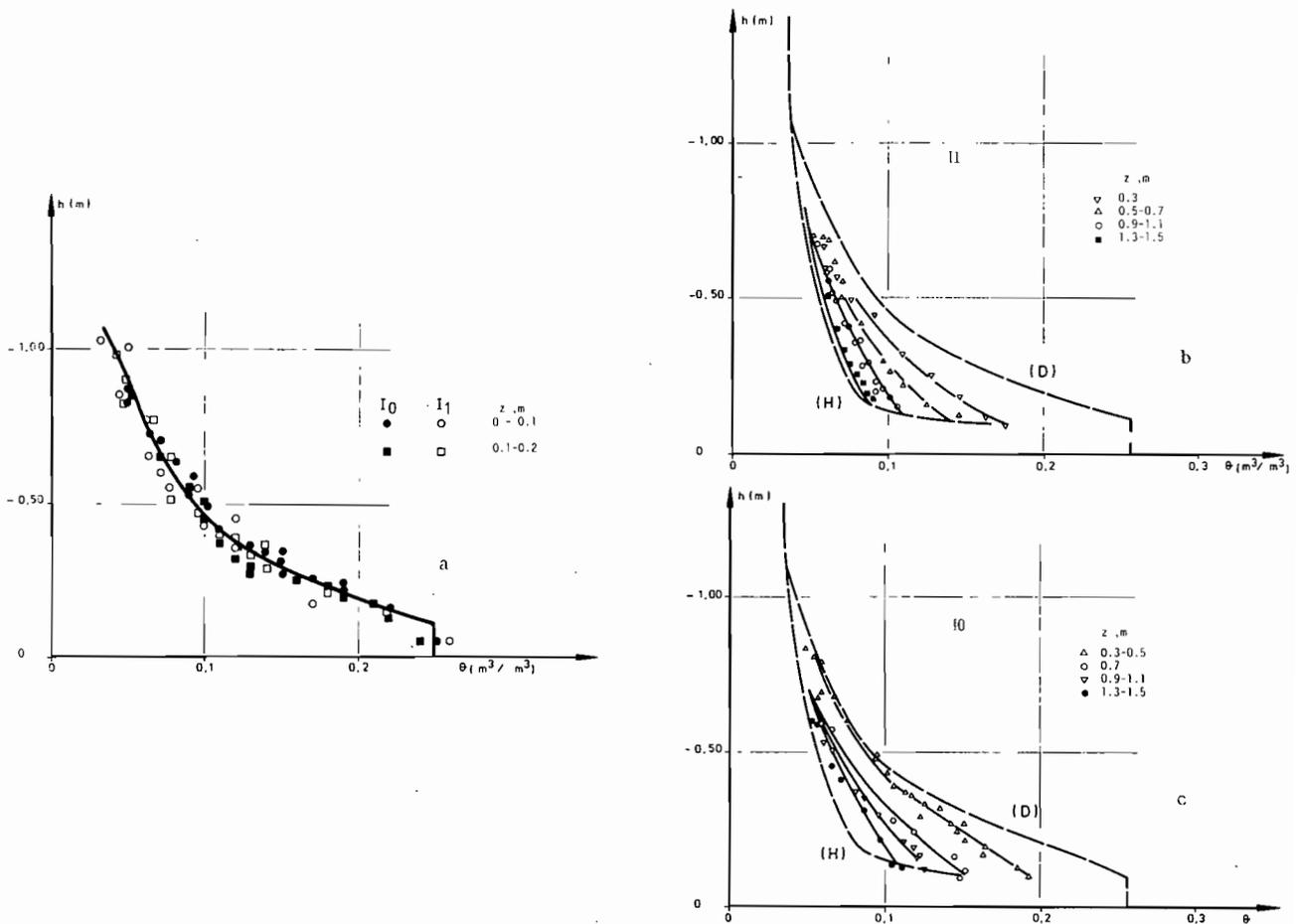


Fig. 7 - 7a : Relation $h(\theta)$ mesurée sur I0 et I1 à 0,1 et 0,2 m pendant le drainage interne ; 7b et 7c : Relations $h(\theta)$ mesurées dans les mêmes conditions sur I1 (7b) et I0 (7c) pour $Z > 0,3$ m

L'analyse des résultats est plus complexe aux autres profondeurs, car d'après les profils hydriques donnés fig. 3, les différentes sections de mesure sont soumises dans une première phase à un processus d'infiltration, puis à un ressuyage (VACHAUD, THONY, 1970) ; de plus la valeur de la teneur en eau maximum atteinte à la fin de l'infiltration décroît lorsque z augmente, et n'est pas la même (à un niveau donné) dans les 2 essais (cette dernière observation étant simplement liée à la différence d'humidité de départ).

Il faut dès lors prendre en compte le phénomène d'hystérésis et considérer, à chaque niveau, une courbe de drainage secondaire dont la forme dépend de la valeur de θ max. On trouvera fig. 7b et 7c le réseau de courbes obtenues pour chacun des deux essais. Dans un but de clarté nous avons regroupé les sections pour lesquelles les valeurs de θ max sont très voisines. Il est clair que pour ce sol les phénomènes d'hystérésis sont très importants. De plus les courbes issues de la même valeur de θ max (par exemple $z = 0,5$ m, fig. 7b et $z = 0,7$ m, fig. 7c ou $z = 0,9$ m-1,1 m, fig. 7b et $z = 1,3$ -1,5 m, fig. 7c) se superposent parfaitement.

Afin de mieux préciser la nature et l'importance de cette hystérésis en condition naturelle nous avons considéré toutes les autres mesures de teneur en eau et de pression obtenues sous cultures en 1984 et 1985 sur chacun des 12 sites de mesure en phase d'humectation du sol correspondant aux pluies d'hivernage (en évitant toujours de prendre en compte le passage d'un front). L'ensemble des valeurs $h(\theta)$ obtenues en toutes profondeurs et tous sites confondus est reporté fig. 8. La courbe obtenue correspond à la courbe d'humectation du sol partant de l'état sec. C'est l'autre enveloppe du cycle d'hystérésis reportée fig. 7b et 7c avec le symbole (H).

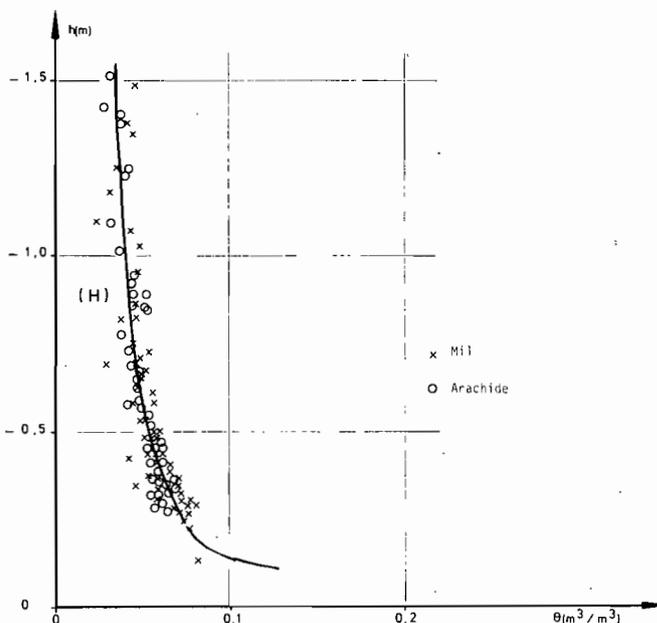


Fig. 8 - Relations $h(\theta)$ obtenues sur tous les sites de l'essai agronomique en phase d'humectation en début de saison des pluies

4. SUIVI HYDRIQUE EN DÉBUT DE SAISON DES PLUIES

Dans le but de conforter les résultats obtenus par la caractérisation des coefficients de transfert, à savoir le fait que les 2 traitements étudiés ne se différencient pas du point de vue hydrique au niveau des relations eau-sol, une campagne de suivi intensif des transferts d'eau dans les couches superficielles du sol a été effectuée du 19 juillet au 6 août 1985 sur les 6 parcelles (3 répétitions par traitements) cultivées en mil durant cette année.

Cette période se caractérise par 3 événements pluvieux : la pluie de semis (17 mm) le 19 juillet, suivie par une pluie de 16 mm le 23 juillet, puis 4,5 mm le 25 juillet.

On dispose des mesures suivantes sur chacune des 6 parcelles instrumentées :

- profils hydriques par mesures gravimétriques dans les horizons 0-0,1 m, 0,1-0,2 m, puis par humidimètre neutronique, avec un pas de 0,1 m jusqu'à 1,1 m ;
- mesures tensiométriques à 0,1 et 0,2 m.

Ces mesures sont effectuées à partir du 19 juillet (juste après la première pluie) sur la base de 2 mesures par jour (à 8 h et à 18 h) sur chaque site jusqu'au 27 juillet, puis une mesure le 1 et le 8 août. On dispose enfin d'un état hydrique de référence qui est, pour chaque site, un profil mesuré le 8 juillet avant toute pluie.

On trouvera, fig. 9, 3 profils hydriques caractéristiques de chacun des traitements (moyenne et écart type des teneurs en eau mesurés à chaque profondeur) obtenus aux périodes suivantes : fin de saison sèche (8/07), maximum de stock hydrique (après la pluie du 24/07) et fin de l'expérimentation (le 8/08). Il importe de noter que durant toute la période de mesure, la teneur en eau au-delà de 0,9 m reste toujours égale à sa valeur initiale, soit environ $0,02$ à $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Compte tenu de l'expression obtenue pour $K(\theta)$ (fig. 6), il en résulte une valeur de conductivité hydraulique inférieure à 10^{-3} mm/h . On peut dès lors négliger tout flux de drainage et caractériser l'évapotranspiration directement par :

$$\text{ETR} = P - \Delta S \quad (9)$$

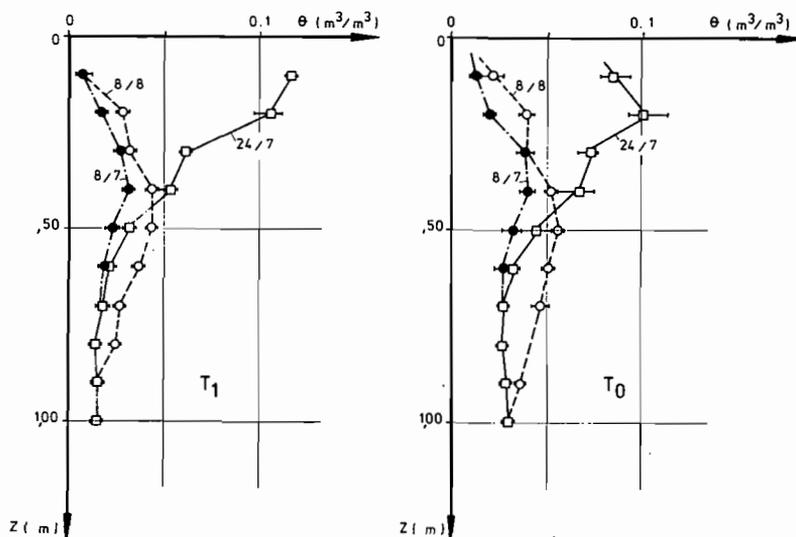


Fig. 9 - Profils hydriques caractéristiques mesurés en début de saison des pluies

Par simplification, les calculs de variation de stocks ont été effectués sur toute la tranche de sol explorée, soit $0-1,1 \text{ m}$.

Il est d'autre part clair que la pénétration du front d'infiltration consécutif à ces dernières pluies est analogue sur les 2 traitements.

Trois types d'analyses ont été effectués. En premier lieu, on trouvera, fig. 10, l'évolution de l'humidité volumique sur la tranche de sol $0-0,2 \text{ m}$, pendant la durée de l'expérimentation pour les 2 traitements. Chaque point de mesure

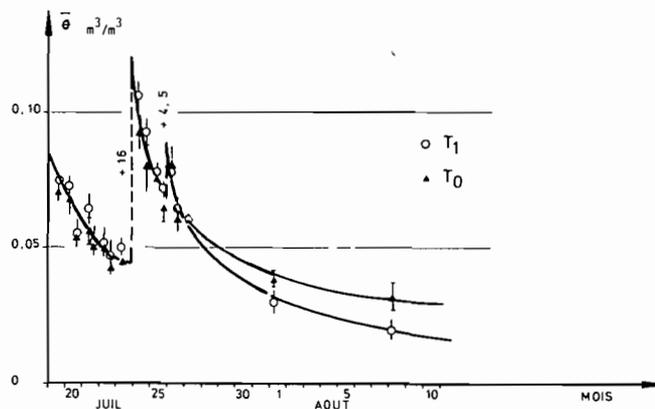


Fig. 10 - Évolution de la teneur en eau moyenne de la tranche $0-20 \text{ cm}$ en début de saison des pluies

représente la moyenne sur les 3 répétitions disponibles, associée à sa bande d'incertitude, qui est généralement voisine de $\pm 0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Ce n'est qu'à partir de fin juillet, soit environ 10 jours après semis, que des différences significatives apparaissent. Ce qui va dans le sens de l'explication avancée par CISSE (1986) relative aux fortes différences de profils hydriques observées durant le cycle de culture et qui résulteraient d'un effet de l'amendement organique sur le développement racinaire, beaucoup plus intense sur T1.

On a également caractérisé à partir des mesures simultanées de pression d'eau et de teneur en eau les courbes de succion $h(\theta)$, pour les tranches 0-0,1 et 0,1-0,2 m pour chacun des sites. A titre d'exemple, on trouvera, fig. 11, pour 2 parcelles (l'une sur T0, l'autre sur T1), les mesures obtenues du 24 au 27 juillet. Ces points sont situés par rapport au cycle d'hystérésis obtenu dans la section précédente. Deux remarques s'imposent :

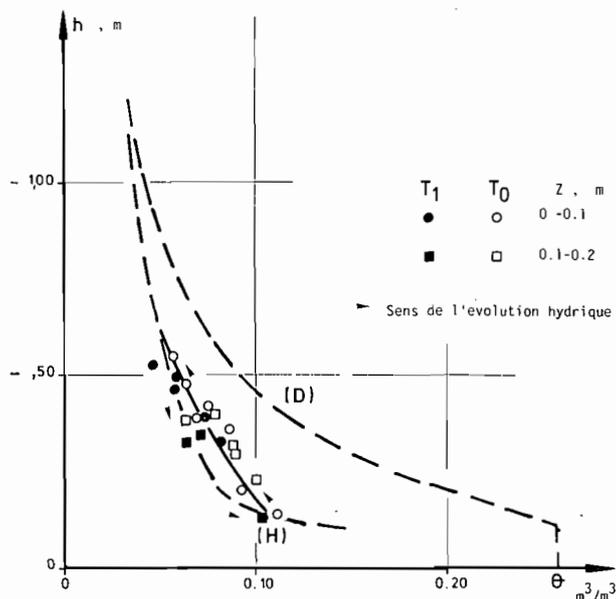


Fig. 11 – Courbes de succion mesurées dans les tranches 0-10 et 10-20 cm du 24 au 27 juillet 1985

- aucune différence significative ne peut être observée au niveau de la courbe $h(\theta)$ entre les deux traitements T0 et T1 pour ces deux horizons, ce qui rejoint tout à fait les résultats obtenus lors de l'essai d'infiltration ;
- par contre, la courbe $h(\theta)$ ainsi obtenue, qui correspond à une branche de drainage, est très différente de la courbe principale en drainage (D), puisqu'en régime pluvial l'humidité du sol en surface est bien inférieure aux valeurs résultant d'une infiltration prolongée. Ce point pose d'ailleurs le problème de la représentativité de courbes de succion obtenues à partir de la saturation (en laboratoire ou lors d'essai d'infiltration de terrain) à s'appliquer aux conditions naturelles.

On a enfin appliqué l'équation (9) pour déterminer l'évapotranspiration réelle (en fait essentiellement évaporation jusqu'au 29/07) à partir des variations de stock hydrique. Les calculs ont été faits sur une base de 2 jours du 20 au 31/07, puis de 3 jours. Afin d'obtenir une normalisation, les valeurs moyennes ont été rapportées à l'évaporation bac classe A (moyenne sur la même période), mesurée à Bambey, aucune mesure de ce type n'étant disponible à Thilmakha. Il y a certes un biais à ce niveau, mais nous considérons qu'il ne s'agit que d'une erreur relativement faible. On trouvera tableau III les valeurs d'ETR et du rapport ETR/EV Bac ainsi obtenues sur les 2 traitements. Reprenant une suggestion de paramétrisation proposée par DEARDORFF (1977) et déjà testée dans un article précédent (VACHAUD, VAUCLIN, 1981), nous avons recherché s'il existait une relation simple entre la réduction du taux d'évapotranspiration journalière (essentiellement dans ce cas évaporation sol nu), exprimée par le rapport ETR/EV Bac et la teneur en eau de la couche de surface, ici 0-0,2 m. Il s'agit d'une liaison hautement significative puisque l'on obtient un coefficient de corrélation linéaire de 0,913, représentée graphiquement fig. 12. Il n'est enfin pas possible de faire une distinction significative entre les résultats obtenus sur l'un ou l'autre traitement.

TABLEAU III
Relation entre la réduction de l'évaporation et la teneur en eau de surface

PERIODES	Ev. Bac mm	T1			T0		
		ETR mm	ETR/Ev. Bac	θ 0-20 m ³ /m ³	ETR mm	ETR/Ev. Bac	θ 0-20 m ³ /m ³
20-21/07/85	6,6	2	0,31	0,068	1,8	0,27	0,065
22-23/07	5,3	0,7	0,13	0,05	1,5	0,28	0,046
24-25/07	5,9	4	0,68	0,093	3,2	0,54	0,086
26-27/07	4,9	3,2	0,65	0,071	2,5	0,51	0,073
28-29/07	5,9	2	0,342	0,054	2	0,35	0,056
30-31/07	7,42	1	0,135	0,04	1,2	0,16	0,045
1- 3/08	5,8	0,8	0,13	0,032	0,5	0,09	0,038
4- 6/08	7,3	0,7	0,1	0,026	0,07	0,01	0,026

Pluviométrie : 19/07 (soir) : 17 mm
23/07 (soir) : 16 mm
25/07 (soir) : 4,5 mm

Toutes les valeurs sont des moyennes journalières obtenues pour ETR et θ à partir de 3 répétitions par traitement.

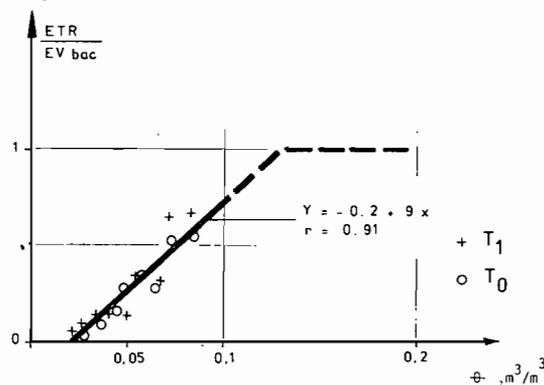


Fig. 12 - Liaison entre évapotranspiration normalisée par l'évaporation bac et la teneur en eau de surface

5. CONCLUSION ET DISCUSSION

Deux informations essentielles nous paraissent devoir être tirées de cette étude :

1 - Les contrastes très importants observés au niveau de l'humectation du sol pendant le cycle de culture et, comme le montre en détail une autre étude (CISSE, VACHAUD, 1987), au niveau des taux de consommation des variétés cultivées ne peuvent pas s'expliquer par un effet de l'apport en matière organique sur les propriétés hydrodynamiques du sol. Ce point peut être controversé, car d'autres études, notamment DE JONG, 1983, MEEK *et al.*, 1982, ... ont pu mettre en évidence de fortes réductions de l'évaporation et de l'infiltration, associées à une augmentation de la rétention en eau suite à des amendements organiques. Il s'agit toutefois toujours d'essais effectués

avec des sols ayant une forte proportion d'éléments fins, alors que JAMISON, 1958, a pu montrer que pour les sols grossiers, et à très faible teneur en matière organique – ce qui est le cas dans notre essai – aucun effet n'était généralement observé.

2 – Du point de vue plus hydrologique, il semble établi que pour le type de sol étudié une très forte corrélation existe entre la teneur en eau des horizons de surface et l'évaporation, du moins en début de saison des pluies, tant que le développement végétatif est très faible. Cette relation pourrait être mise à profit pour estimer les flux d'évaporation, donc les réserves en eau du sol, à partir d'utilisation de données par télédétection.

Dans le but d'apporter une explication à l'observation qui a servi de base à cette étude (forte différence de cinétique d'humectation du sol en saison de culture), une étude systématique de l'évolution de l'enracinement a été effectuée par L. CISSE (1986). Cette étude montre clairement que les fortes différences obtenues sont essentiellement dues à de très grandes différences de biomasses racinaires induites par amendement organique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 26 juin 1987

BIBLIOGRAPHIE

- CISSE (L.), 1986. – Étude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production de mil et d'arachide sur un sol dégradé du Centre-Nord Sénégal. Thèse de Dr Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, nov. 1986 : 184 pp.
- CISSE (L.), VACHAUD (G.), 1988. – Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. I – Bilans de consommation, production et développement racinaire. Accepté pour *l'Agronomie*.
- DEADORFF (J.W.), 1977. – A parametrization of ground-surface moisture content for use in atmosphere prediction models. *J. Appl. Meteo.*, vol. 16 : 1182-1185.
- DE JONG (R.), CAMPBELL (C.A.), 1983. – Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Can. j. Soil Sci.*, vol. 63 : 291-302.
- JAMISON (V.C.), KROTH (E.M.), 1958. – Available moisture storage capacity in relation to textural composition and organic matter content of several Missouri soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 22 : 129-192.
- MEEK (B.), GRAHAM (L.), DONOVAN (T.), 1982. – Long term effect of manure on soil nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, organic matter and water infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 46 : 1014-1019.
- PHILIP (J.R.), 1969. – The Theory of Infiltration. *Advances in Hydroscience*, vol. 5 : 215-305, Acad. Press, New York.
- VACHAUD (G.), DANCETTE (C.), SONKO (M.) et THONY (J.L.), 1978. – Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agro.*, vol. 29 : 1-36.
- VACHAUD (G.), THONY (J.L.), 1970. – Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different water contents. *Water Resources Res.*, vol. 7 : 111-127.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), COLOMBANI (J.), 1981. – Bilan hydrique dans le Sud Tunisien. 1 – Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée. *J. of Hydrology*, vol. 49 : 31-52.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), 1981. – Bilan hydrique dans le Sud Tunisien. 2 – Modélisation numérique et prévision des transferts hydriques en sol stratifié. *J. of Hydrology*, vol. 49 : 53-73.
- VAUCLIN (M.), HAVERKAMP (R.), VACHAUD (G.), 1983. – Analyse des erreurs liées à l'utilisation de l'humidimètre neutronique. Symposium sur « Utilisation des Isotopes et des Rayonnements en Physique des Sols et Irrigation », Aix-en-Provence. Agence Int. Énergie Atomique, Vienne, éd. : 533-549.
- YOUNGS (E.D.), 1968. – An estimation of sorptivity for infiltration study from moisture content consideration. *Soil Sci.*, vol. 106 : 157-163.