

Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau

1. Résultats expérimentaux

Pascal BOIVIN (1), Jaoudat TOUMA et Patrick ZANTE (2)

(1) Centre ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy Cédex

(2) Centre ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

RÉSUMÉ

Dans le but de caractériser la variabilité spatiale de l'infiltrabilité des sols d'une vallée du domaine fluvio-marin de basse Casamance (Sénégal), 60 essais d'infiltration par la méthode du double anneau ont été réalisés. Dans cette première partie et à partir de quelques hypothèses sur les conditions d'infiltration, deux modèles sont ajustés aux données expérimentales et comparés. Dans une deuxième partie, la validité des hypothèses émises et la signification physique des paramètres obtenus lors de l'ajustement des modèles sont discutés au moyen de la simulation numérique. Dans une troisième partie, les résultats expérimentaux sont étudiés en termes de variabilité spatiale.

MOTS-CLÉS : Lois d'infiltration — Double anneau — Infiltrabilité — Sols sulfatés acides — Variabilité spatiale — Sorptivité — Conductivité à saturation.

ABSTRACT

MEASURING SOIL INFILTRABILITY USING DOUBLE-RING INFILTRMETER

1. Experimental results

Using double-ring infiltrometer, sixty infiltration experiments were conducted in a Casamance valley (Senegal), in order to study spatial variability of soil infiltrability. Experimental results are presented and fitted on two theoretical models with the help of some assumptions on the experimental conditions. The fitted results are compared between them and to the experimental data. In a second paper we discuss the validity of the assumptions made and the physical significance of the fitted parameters, using numerical modeling. The spatial variability of the experimental results is presented in a third paper.

KEY WORDS : Infiltration equations — Double-ring infiltrometer — Infiltration capacity — Acid sulfate soils — Spatial variability — Sorptivity — Saturated hydraulic conductivity.

1. INTRODUCTION

L'étude des transferts de sels et d'acidité dans les sols du domaine fluvio-marin de basse Casamance nous a conduit, dans le cadre d'un programme conjoint

ORSTOM (3)/ISRA (4), à réaliser diverses campagnes de mesures dans le but de définir les caractéristiques des transferts hydriques dans les sols de cette région. Parmi ces mesures, nous avons réalisé une série d'infiltrations par la méthode du double anneau (Muntz), afin

(3) Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en coopération.

(4) Institut Sénégalais de la Recherche Agricole.

d'étudier la variabilité spatiale de l'infiltrabilité, pour les sols d'une vallée test équipée d'une digue anti-sel.

Sur une parcelle de 8 Ha, 60 essais d'infiltration ont été effectués. Pour exploiter ces essais en termes de varia-

bilité spatiale, il nous fallait exprimer les diverses courbes d'infiltration obtenues à l'aide d'un minimum de paramètres communs à l'ensemble des essais, ces paramètres ayant, de préférence, une signification physique.

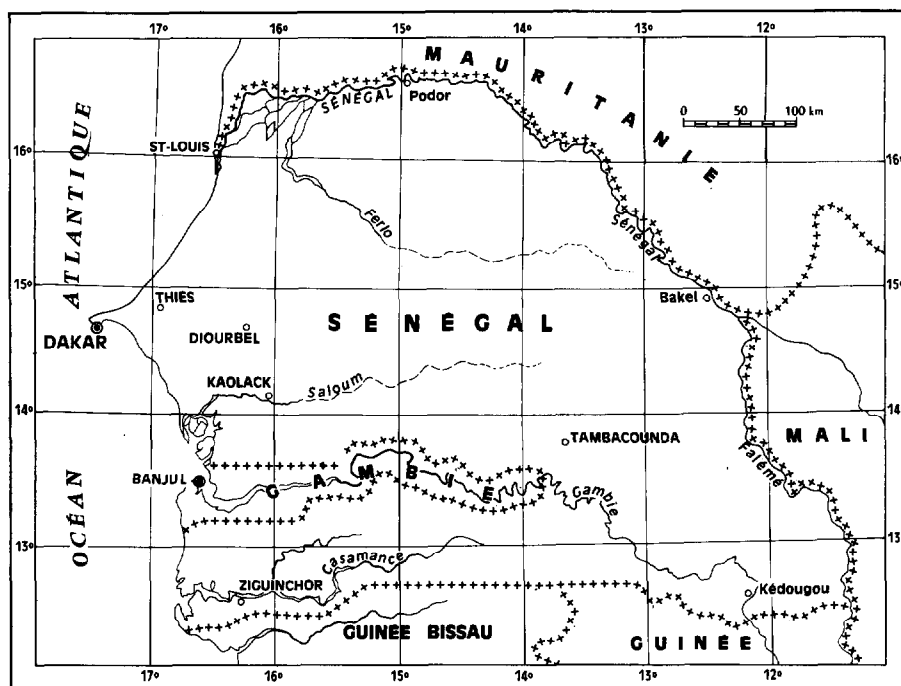


FIG 1. — Carte de situation. *Situation map*

Nous présentons dans cette première partie les différents ajustements de modèles d'infiltration que nous avons pu réaliser et les hypothèses que nous avons dû formuler pour obtenir un lot de données homogène.

Certaines conditions d'application des modèles employés n'étant pas respectées, nous ferons appel à la simulation numérique dans une deuxième partie, pour discuter de la signification physique des paramètres obtenus lors de l'ajustement des modèles.

Les résultats de la campagne de mesure en termes de variabilité seront présentés dans une troisième partie.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Une parcelle de 8 Ha a été sélectionnée, sur une basse terrasse du Bolong (1) de Katouré (région du Ziguinchor) (cf. fig.1). Un maillage aléatoire stratifié de 60 points a été défini : à partir d'un maillage uniforme de 14 m de côté (400 points), 60 points ont été retenus par tirage au hasard.

Le dispositif d'infiltration double anneau avait la géométrie suivante :

- anneau externe de diamètre 113 cm (1 m² de surface)
- anneau interne de diamètre 56 cm (0.25 m² de surface)

(1) Nom vernaculaire donné aux affluents de la Casamance.

— lame d'eau douce, de 2,5 cm d'épaisseur maintenue constante manuellement par un opérateur.

Chaque essai d'infiltration était arrêté lorsque la lame infiltrée atteignait 25 cm, ce qui donne en moyenne quarante couples de mesure lame infiltrée/temps par essai.

A la fin de chaque essai, on procédait à l'ouverture d'une fosse pédologique, dont l'une des faces se trouvait selon le diamètre du double anneau. Cette fosse était décrite et prélevée pour analyse.

3. LES SOLS

La parcelle d'étude est située sur un sol sulfaté acide évolué : seul un profil sur les soixante réalisés contenait de la Jarosite. En revanche tous les profils contiennent des Iron Pipes en grand nombre, qui correspondent à d'anciens chenaux racinaires de Palétuviers Rhizophoras. Les Iron Pipes sont présents sur plus de 80 cm pour chaque profil. On note la présence générale vers 110-120 cm d'un horizon sulfuré où les racines de Rhizophora sont nombreuses et non dégradées.

Le pH eau dépasse rarement 4,5. Tous les profils sont sableux en profondeur (en général à partir de 30 cm). En surface et dans la moitié des cas environ, on trouve un horizon argileux d'une trentaine de centimètres en moyenne, atteignant exceptionnellement 60 cm dans l'un des profils.

La parcelle est orientée perpendiculairement au cours hypersalé du Bolong. La partie proche du Bolong est hypersalée. Une carte de salure effectuée au conductivimètre électromagnétique montre que la salure décroît régulièrement depuis le Bolong et en s'en éloignant. Trois hectares environ sont salés. La zone non salée est fortement acide, avec des pH eau généralement inférieurs à 4.

La nappe est à une profondeur de 130 cm en moyenne. La topographie est quasiment plane. Le parcellaire est aménagé en rizières endiguées, le riz est repiqué sur billons. Pour la réalisation des infiltrations, nous avons systématiquement décapé les billons pour se placer au niveau de l'inter-billons. Précisons que ces parcelles sont travaillées chaque année en début de saison des pluies (billonage), puis se trouvent en condition d'infiltration sous charge en raison de l'endiguement. De ce fait, les essais réalisés sont représentatifs des conditions naturelles d'infiltration sur ce site.

Cette situation est tout à fait représentative de l'ensemble de la région, fortement affectée par la sécheresse (BOIVIN *et al.*, 1986), où l'on trouve des rizières implantées sur des sols généralement naturellement acidifiés et hypersalés, des manifestations extrêmes d'acidité apparaissant dans les zones non salées (LE BRUSQ *et al.*, 1987).

4. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Nous avons signalé la présence d'une hétérogénéité texturale (superposition argile/sable) dans 50 % des cas.

Les profils d'humidité initiaux sont presque toujours non uniformes. Classiquement, l'humidité volumique est de l'ordre de 5 % en surface, pour atteindre 30 % à 1 m de profondeur où le sol est proche de la saturation.

5. DEPOUILLEMENT DES DONNÉES

Modèle de Philip

Ce modèle est obtenu à partir de la solution analytique de l'équation de l'infiltration de PHILIP (1957), dans le cas monodimensionnel vertical, en série entière en \sqrt{t} , limitée aux deux premiers termes. Elle s'applique à des sols homogènes dont le profil d'humidité initiale est uniforme et pour une charge constante appliquée en surface. Dans ce cas, la lame infiltrée I en fonction du temps t est donnée par :

$$I(t) = S \sqrt{t} + B t \quad (1),$$

Où S (L/\sqrt{t}) est la sorptivité, qui exprime la capacité plus ou moins grande que possède le sol à absorber l'eau par capillarité, et B un paramètre ayant les dimensions d'une vitesse, qui est de l'ordre de $K_s/3$ à $2K_s/3$, K_s étant la conductivité du sol à saturation. On notera que la relation entre K_s et B n'est pas établie théoriquement.

Nous avons donc dans un premier temps choisi de modéliser les courbes $I(t)$ expérimentales à partir d'une équation de cette forme et en ajustant deux paramètres que nous appellerons S et B . En effet, si l'hétérogénéité des profils texturaux et la non uniformité de l'humidité initiale nous placent, en toute rigueur, hors des conditions d'application de ce modèle, l'étude effectuée en deuxième partie permet de montrer que ces conditions initiales ne sont pas contraignantes.

Généralement les paramètres S et B sont calculés par régression linéaire de I/\sqrt{t} sur \sqrt{t} .

Sur les 60 essais d'infiltration, 24 s'ajustent très bien à ce modèle (fig.2), il s'agit indifféremment de sols entièrement sableux ou à couche superficielle argileuse, sans qu'aucun paramètre de la description pédologique des profils ne permette de les distinguer de l'ensemble.

En revanche, les autres essais ont tous le même comportement, illustré par la figure 3 : en exprimant la loi d'infiltration selon :

$$I/\sqrt{t} = S + B \sqrt{t} \quad (2)$$

On obtient non pas une droite mais une courbe proche d'une branche d'hyperbole à l'origine.

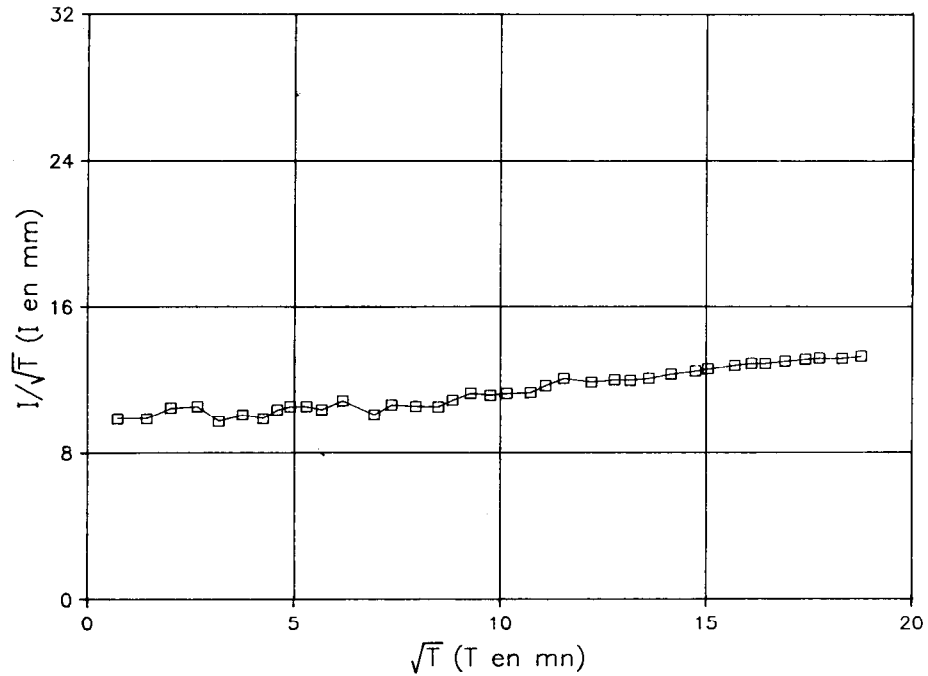


FIG. 2. — Essai d'infiltration s'ajustant à PHILIP, sans hypothèse complémentaire. *Infiltration data fitted on PHILIP'S infiltration equation without additional assumption*

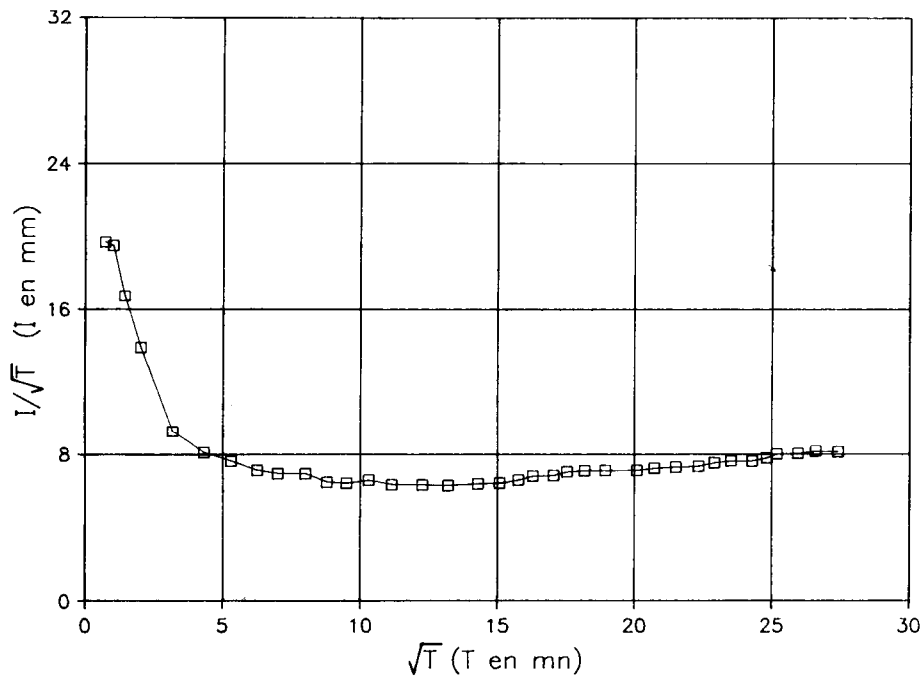


FIG. 3. — Essai d'infiltration ne s'ajustant pas à PHILIP, sans hypothèse complémentaire. *Infiltration data non fitted on PHILIP'S infiltration equation without additional assumption*

L'observation des courbes $I(t)$ correspondantes (fig.4) montre que toutes ces courbes présentent une forte pente à l'origine et pendant un temps très court (1 à 2 mn),

puis une rupture de pente au-delà de ce temps.

Ce comportement peut être imputé à la présence de « macropores », qui ont effectivement été observés lors

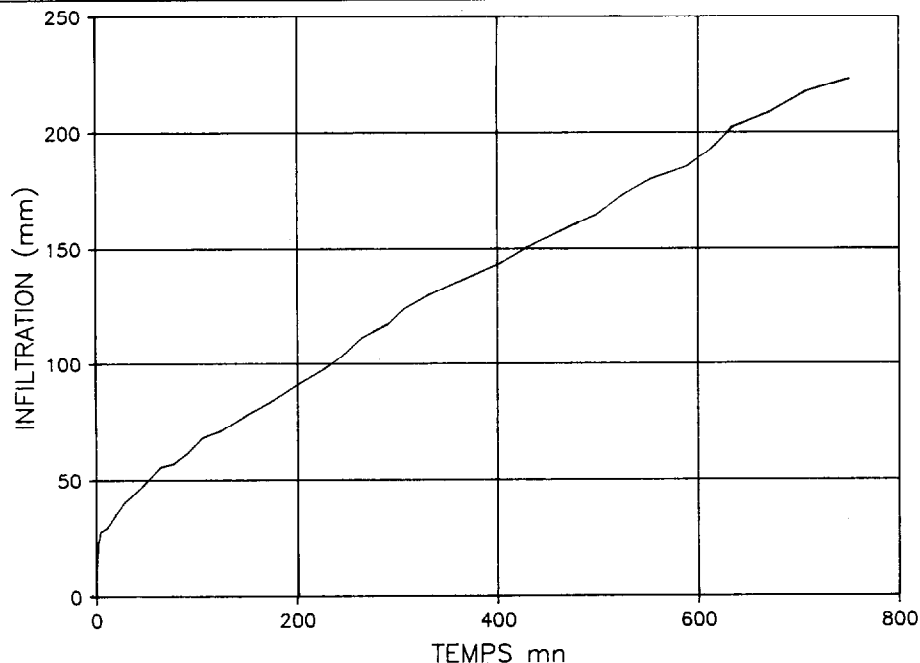


FIG. 4. — Essai d'infiltration ne s'ajustant pas à PHILIP sans hypothèse complémentaire : courbe I(t) présentant une rupture de pente. *Infiltration data non fitted on PHILIP's infiltration equation without additional assumption : cumulative infiltration with an abrupt change in slope*

des descriptions des profils correspondant à chaque essai. Ceci nous a conduit à émettre l'hypothèse suivante :
La courbe I(t) obtenue correspondrait à la somme de

deux phénomènes, i.e. le remplissage en début d'infiltration d'un volume de macropores et une loi d'infiltration (« normale ») (selon (1)) (fig.5).

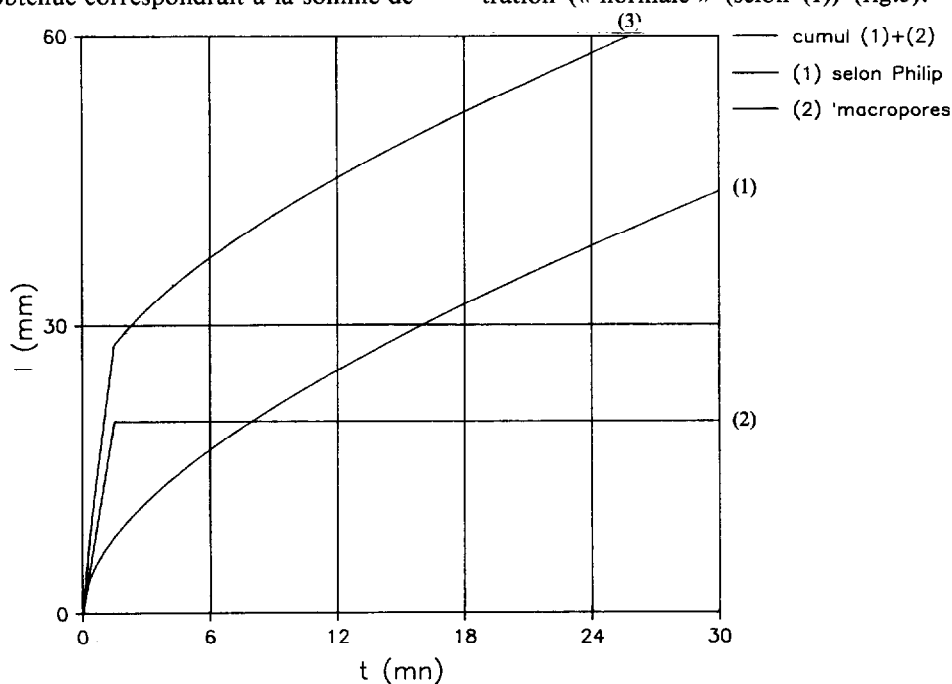


FIG. 5. — Représentation schématique de l'infiltration sur un site présentant des « macropores ». *Schematic representation of infiltration with « macropores »*

Pour tester cette hypothèse, nous avons dans un premier temps opéré un simple décalage des origines de l'infiltration, en temps et en lame infiltrée. Ceci revient à faire l'approximation que le remplissage des « macropores » se fait en début d'infiltration (en moyenne en 1,5 mn) et avant l'infiltration selon (1). Notons que cette considération revient à ne pas prendre en compte le

volume d'eau infiltré dans la matrice poreuse pendant ce temps. On identifie alors un « volume de macropores » correspondant à la rupture de pente sur la courbe $I(t)$ (fig.5), et l'on calcule une nouvelle courbe $I(t)$, volume de « macropores » déduit.

A la suite de cette transformation, la totalité des courbes d'infiltration s'ajuste correctement selon la loi (1) (fig.6).

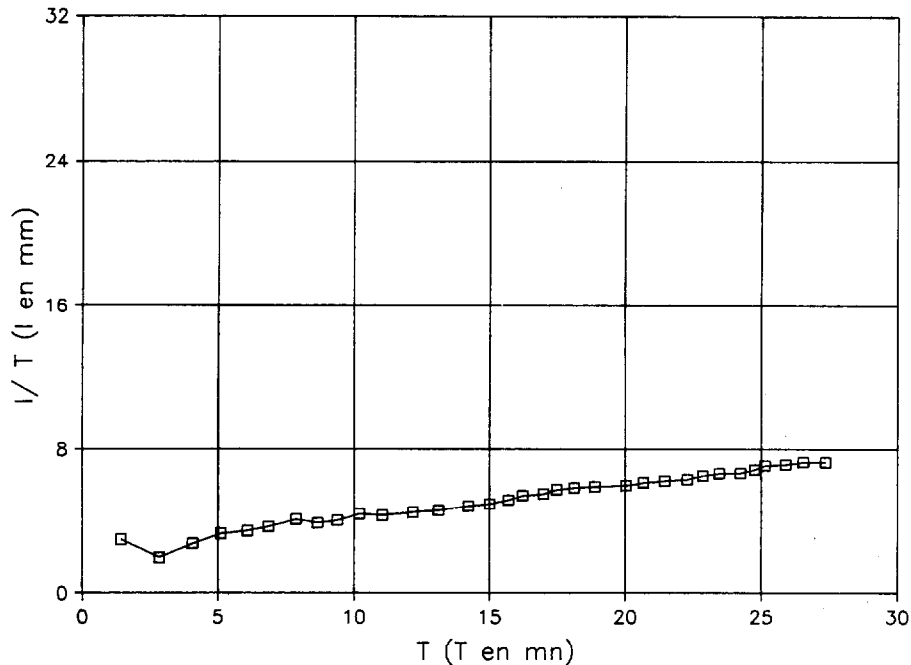


FIG. 6. — Infiltration corrigée par les « macropores ». *Infiltration with correction of « macropores »*

Toutefois, pour certains essais, on constate la présence d'une rupture de pente en fin d'infiltration. Dans d'autres cas, les points de mesure sont peu nombreux en raison de difficultés dans la conduite de l'essai. Enfin, deux profils situés en limite de parcelle sont complexes : couches de sable et d'argile de faible épaisseur se succédant. Bien qu'il soit possible de traiter ces données nous avons donc choisi, pour plus de sûreté, de ne travailler dans la suite de cette étude qu'avec quarante neuf des soixantes courbes d'infiltration.

On obtient alors pour chaque essai les grandeurs α et β qui pourraient correspondre respectivement aux termes S et B de la loi de PHILIP si les conditions d'application étaient respectées.

On étudiera ultérieurement les propriétés statistiques de ces grandeurs.

On notera que dans le cas des sols bi-couche argile/sable, l'infiltration est contrôlée par la couche de surface (TOUMA J., 1984 et 1988). Dans le cas étudié, la couche argileuse, lorsqu'elle est présente, se trouve toujours sur la couche sableuse.

Lors de l'ajustement, nous avons systématiquement testé l'ajustement de (1) et de (2). Les valeurs comparées des paramètres obtenus sont reproduites dans le tableau I. Ces deux méthodes d'ajustement donnent ici des résultats très proches : coefficients de corrélation entre modèle ajusté et données expérimentales toujours supérieur à 0.95. Cependant l'ajustement de (1) donne toujours un meilleur coefficient de corrélation entre modèles et données expérimentales. Ceci provient du fait que dans le cas de (1), les erreurs de mesure à l'origine ont moins de poids lors de l'ajustement que dans le cas de (2). L'ajustement de (1) paraît donc préférable.

Cependant, le fait d'opérer un simple décalage des origines étant une approximation grossière, nous avons testé le raisonnement suivant :

— à partir du volume V de macropores identifié sur la courbe expérimentale $I(t)$, nous estimons que le volume réel de « macropores » est $x.V$, avec : $0 < x < 1$.

— ce volume de macropores se remplit selon une loi linéaire entre le temps $t = 0$ et le temps t où l'on

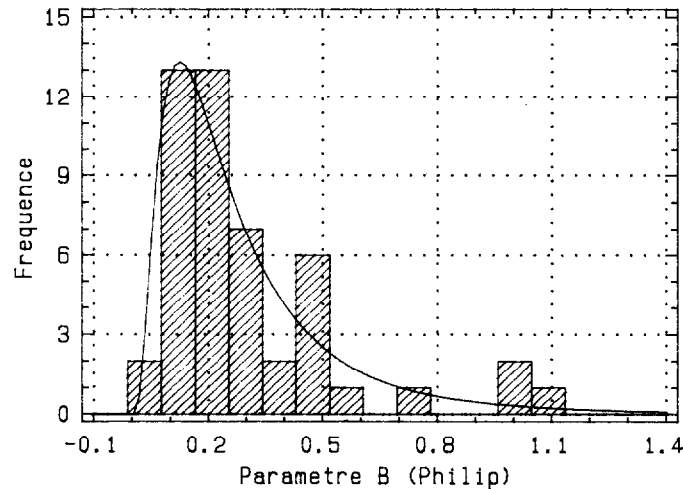


FIG. 7. — Loi de distribution du paramètre β (B de PHILIP) déterminé à partir des différents essais. *Distribution of the fitted values of β (B in PHILIP'S infiltration equation)*

TABLEAU I
Valeurs comparées des constantes α et β . *Compared values of the fitted parameters*

| LOI AJUSTEE | α MOYEN | β MOYEN |
|--|----------------|---------------|
| (2) $I/\sqrt{t} = \alpha + \beta \cdot \sqrt{t}$ | 6.32 | 0.33 |
| (1) $I = \alpha \cdot \sqrt{t} + \beta \cdot t$ | 6.15 | 0.34 |
| Ecart moyen (1)-(2) | .14 | 0 |

observe la rupture de pente de la courbe expérimentale $I(t)$ (fig.5).

Nous soustrayons donc à chaque instant t la lame infiltrée dans les « macropores », et nous testons pour différentes valeurs de x la qualité de l'ajustement obtenu et l'influence sur α et β des variations de x .

La meilleure corrélation entre modèle et données expérimentales est obtenue pour $x = 0.9$, et les valeurs α et β obtenues ne sont pas significativement différentes de celles obtenues par simple décalage des origines de la courbe.

Le fait d'opérer un simple décalage des origines, bien qu'étant une méthode approximative, donne donc ici

de bons résultats et présente l'avantage d'être numériquement beaucoup plus simple à mettre en œuvre.

Adimensionnalisation

L'adimensionnalisation des constantes issues du modèle de PHILIP a été réalisée par SHARMA *et al.* (1980), pour tester la cohérence des résultats donnés par l'ajustement.

L'ensemble des données s'ajuste parfaitement au modèle : $\sigma = \Gamma^{1/2} + \Gamma$ avec : $\sigma = \beta I / \alpha^2$ et $\Gamma = \beta^2 t / \alpha^2$

Avec un coefficient de corrélation $c > 0.99$ (fig.8). Ce coefficient de corrélation reste supérieure à 0.99 si l'on scinde les données en plusieurs lots (avec ou sans « macropores », avec ou sans argile).

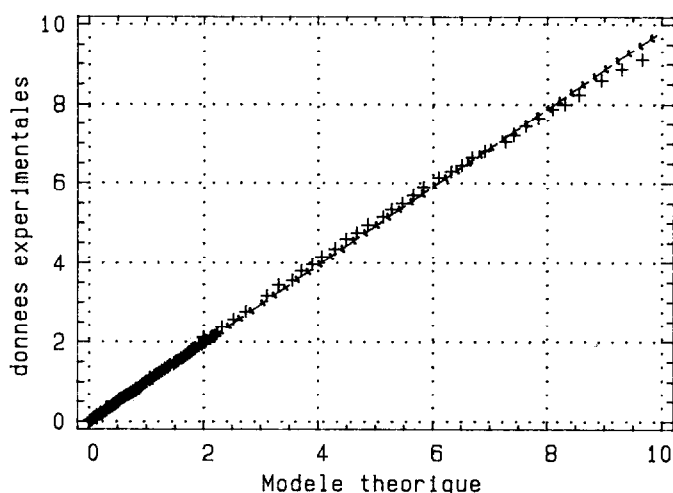


FIG. 8. — Paramètres de PHILIP adimensionnalisés : comparaison entre valeurs théoriques et expérimentales. *Comparison between experimental and theoretical values of PHILIP'S parameters : dimensionless expression*

Green et Ampt

Nous avons conservé le lot de données corrigées du « volume de macropores », et testé l'ajustement du modèle de GREEN et AMPT (1911).

Cette loi s'applique aussi à des milieux homogènes et des profils d'humidité initialement uniformes, une charge constante étant appliquée en surface. Elle est obtenue en supposant que les profils d'humidité sont des profils « pistons », ce qui revient à dire que la courbe de rétention $\Theta(h)$ est une fonction échelon ($\Theta = \Theta_s$ pour $h \geq H_f$, $\Theta < \Theta_s$ pour $h \leq H_f$, H_f étant la pression au niveau du front) et que la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau $K(\Theta)$ est une masse de Dirac ($K = K_s$ pour $\Theta = \Theta_s$, $K = 0$ pour $\Theta < \Theta_s$) Θ_s étant la teneur en eau à saturation. La loi de Darcy s'écrit alors :

$$q = dI/dt = -K_s (H_f - H_0 - Z_f) / Z_f \quad (3)$$

où H_0 est l'épaisseur de la lame d'eau imposée à la surface du sol et Z_f est la profondeur du front, liée à la lame infiltrée I par :

$$I = Z_f (\Theta_s - \Theta_i) = Z_f \Delta\Theta$$

Θ_i étant la teneur en eau initiale du milieu. On a donc :

$$dI/dt = -K_s (-1 + (H_f - H_0) \Delta\Theta / I) \quad (4)$$

Le flux d'infiltration est donc une fonction linéaire de $1/I$, dont la pente est : $-K_s (H_f - H_0) \Delta\Theta$ et l'ordonnée à l'origine est K_s . L'équation (4) s'intègre avec la condition $I = 0$ pour $t = 0$ pour donner :

$$K_s t = I + (H_f - H_0) \Delta\Theta \ln(1 - I / ((H_f - H_0) \Delta\Theta))$$

Pour les temps faibles, I est petit et donc :

$$I / ((H_f - H_0) \Delta\Theta) \ll 1$$

Et l'on peut donc développer le terme \ln en série de TAYLOR limitée aux deux premiers termes, ce qui résulte en :

$$K_s t \approx - I^2 / (2(H_f - H_0) \Delta\Theta)$$

ou

$$I \approx (-2 K_s (H_f - H_0) \Delta\Theta)^{1/2} \sqrt{t} \quad (5)$$

Que l'on peut identifier à la loi d'infiltration de PHILIP à l'origine :

$$I \approx S \sqrt{t} \quad (6)$$

Ce qui fournit une expression de la sorptivité :

$$S \approx (-2 K_s (H_f - H_0) \Delta\Theta)^{1/2} = \sqrt{(2p)}$$

p étant la pente de la droite d'ajustement de dI/dt en fonction de $1/I$

Nous avons donc ajusté dI/dt en fonction de $1/I$ pour chaque essai :

$$dI/dt = p/I + K_s \text{ avec } S \approx \sqrt{(2p)}$$

Cependant, et comme pour l'ajustement du modèle de PHILIP, les hypothèses de départ n'étant pas satisfaites, nous considérons que nous obtenons une grandeur a (et non S) et une grandeur b (et non K_s) pour chaque ajustement.

L'ajustement donne les résultats suivants :

— tous les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0.99 ;

D'autre part, soit :

a (modèle de GREEN et AMPT)

α (modèle de PHILIP)

on a :

$$a = 0.97\alpha + 0.33 \text{ coeff. de corrélation : } 0.96$$

b (GREEN et AMPT)

β (PHILIP)

$\beta = 0.82.b - 0.02$ coeff. de corrélation : 0.94

(résultat obtenu sur 49 courbes d'infiltration)

Compte tenu de la précision de la méthode expérimentale, on peut considérer que les deux méthodes donnent des résultats parfaitement corrélés. En particulier les sorptivités calculées par les deux modèles sont quasiment identiques.

8. CONCLUSION

Une correction des courbes expérimentales $I(t)$ a dû être envisagée dans la moitié des cas environ, en raison de l'absorption très rapide d'une lame d'eau en début d'infiltration, phénomène que nous attribuons à des macropores. Nous ne pouvons pas envisager d'approche numérique de ce problème, nous tenterons donc ultérieurement de confirmer notre analyse par une expérimentation.

Les hypothèses d'uniformité du profil d'humidité initial et d'homogénéité texturale ne sont pas toujours vérifiées. Une deuxième partie, faisant appel à la simula-

tion numérique, montrera que les variations de conditions initiales rencontrées ne sont pas contraignantes pour la détermination des paramètres physiques S et K_s par ajustement aux modèles de PHILIP ou de GREEN et AMPT.

Dans ces conditions, les expérimentations que nous avons menées nous permettent de déterminer ces paramètres sur cinquante essais d'infiltration. Ces résultats seront étudiés ultérieurement pour leurs caractéristiques statistiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

- l'Institut Sénégalais de la Recherche Agricole pour le soutien apporté à la réalisation des expérimentations,
- M. G. VACHAUD de l'Institut de Mécanique de Grenoble pour ses conseils et l'encadrement de ce travail.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 3 septembre 1988

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN (P.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.), ZANTE (P.), 1986. — Sécheresse et évolution de sédiments fluvio-marins au Sénégal. Cas de la Basse Casamance, Symposium INQUA-Dakar.
- LE BRUSQ (J.Y.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.) et CARN (M.), 1987. — Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Science du sol*, 1987, 3, Vol.5 : 173-184.
- GREEN (W.H.), AMPT (G.A.), 1911. — Studies on soil physics. 1 : The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4 : 1-24.
- PHILIP (J.R.), 1957. — The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84 : 257-264.
- SHARMA (M.L.), GANDER (G.A.) and HUNT (C.G.), 1980. — Spatial variability of infiltration in a watershed, *J. Hydrol.* 45 : 101-122.
- TOUMA (J.), 1984. — Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. Thèse de Docteur ès Sciences Physiques, Université de Grenoble.
- TOUMA (J.), BOIVIN (P.), 1988. — Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau.2. Résultats numériques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXIV, n° 1 : 27-37.