

**Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode MUNTZ  
Variabilité de la mesure**

P.Boivin, Orstom Bondy, 70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy

**Résumé**

Le dispositif double-anneau, ou dispositif Muntz, est destiné à caractériser l'infiltrabilité d'un sol dans le cas d'un écoulement monodimensionnel vertical. Les méthodes de dépouillement employées, basées sur les modèles de Philip (1957) ou de Green et Ampt (1911), supposent en outre un profil de sol homogène et un profil d'humidité initiale uniforme. On montre toutefois que le non respect de ces hypothèses n'invalide pas systématiquement la signification physique des résultats. Pour le site instrumenté, la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) a pu être évaluée.  $K_s$  est distribuée lognormalement et autocorrélée sur 40 mètres. Le coefficient de variation de  $K_s$  est faible et on n'a pas pu distinguer, au vu des courbes d'infiltration, les profils purement sableux des profils ayant un placage d'argile en surface.

La dimension du dispositif employé n'a aucune influence sur la mesure et sa variabilité. Dans le cas étudié, cette méthode s'avère fiable et très peu sensible aux variations morphologiques du profil sous-jacent. Une estimation de la valeur moyenne de la conductivité à saturation de notre site d'étude pourrait donc se faire à grande échelle par cette méthode, à faible coût tout en conservant une variance d'estimation raisonnable.

**Measuring soil saturated hydraulic conductivity using double-ring infiltrometer  
Variability of measurements**

**Abstract**

The double-ring infiltrometer is designed for direct estimation of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), in case of one-dimension vertical flow. Data interpretation is based on physical infiltration models such as Philip (1957) or Green and Ampt (1911), with additional assumptions : homogeneous soil profile and uniform soil moisture profile at the beginning of experiments. However, we show that results may keep their physical significance while those assumptions are not respected. In the studied case,  $K_s$  is lognormally distributed and spatially correlated, with a spatial correlation distance of 40 meters. The coefficient of variation is low and no difference was found between pure sandy soils and soils with a clay surface horizon.

Internal ring diameter has no influence on  $K_s$  measurements and variability. In that case, the method seems to be reliable, non influenced by variations in the soil profile. A large scale estimation of mean hydraulic saturated conductivity can be realised with low cost and good estimation variance.

## Introduction

Le dispositif double-anneau est l'une des méthodes permettant d'évaluer l'infiltrabilité des sols "in situ". C'est la méthode que nous avons retenue pour évaluer les variations spatiales de l'infiltrabilité des sols d'une vallée du domaine fluvio-marin de basse Casamance (Sénégal) faisant l'objet d'aménagements hydro-agricoles. Les sols du site d'étude sont des sols sulfatés acides évolués et sableux présentant parfois un placage d'argile en surface. Une parcelle de huit hectares a été retenue, sur laquelle 106 essais d'infiltration ont été conduits, incluant de une à quatre surfaces de mesure différentes.

Dans un premier temps, nous présenterons le matériel utilisé et le cadre conceptuel de son emploi. Nous présenterons ensuite les difficultés rencontrées au cours de l'exploitation des données, avant de discuter les résultats en termes de variabilité : variabilité spatiale de la mesure, loi de distribution, influence de la dimension du dispositif. En dernier lieu, nous dégagerons les conclusions de ce travail au niveau des contraintes d'estimation de l'infiltrabilité des sols en vue d'une cartographie.

### I-Dispositif expérimental.

Le principe de l'expérimentation est de mesurer l'infiltration d'une lame d'eau sous charge constante, s'infiltrant verticalement dans le sol.

Le dispositif utilisé est un dispositif double anneau, schématisé en figure 1, dont la réalisation est due à P.Zante (1988).

Il est composé de deux anneaux en tôle d'acier, de deux bidons d'alimentation et d'un ensemble de tuyauterie. L'anneau extérieur est appelé "anneau de garde" et a pour fonction de garantir une infiltration verticale dans l'anneau central.

Les deux anneaux sont disposés de façon concentrique sur le sol, puis enfoncés d'une dizaine de centimètres environ. L'enfoncement est réalisé de façon lente et régulière, pour éviter de perturber le sol au voisinage des anneaux. L'alignement des anneaux est contrôlé au niveau à bulle.

Les bidons d'alimentation disposent d'une jauge graduée et sont reliés à un tuyau circulaire percé de trous, de façon à alimenter rapidement en eau l'ensemble de la surface.

La mise en charge devant être instantanée, un film plastique est déposé sur le sol, pour protéger la surface lors du versement de la lame d'eau initiale, préalablement dosée dans un seau. Ce film plastique est aussitôt retiré. Une moustiquaire protège ensuite le sol au niveau des arrivées d'eau.

Une fois la lame d'eau initiale versée, l'apport d'eau dans les deux anneaux est réalisé manuellement par un opérateur, qui maintient le niveau constant au moyen d'un robinet et d'une jauge plantée dans le sol. Ce système est le plus fiable et le plus précis que nous ayons trouvé dans les conditions de notre expérimentation. A chaque apport d'eau, l'opérateur note le temps écoulé et la lame d'eau infiltrée par lecture de la jauge du fût d'alimentation.

L'épaisseur de la lame d'eau en charge a été fixée arbitrairement à 3cm.

Le résultat d'un essai d'infiltration est l'obtention d'une série de couples (lame infiltrée, temps).

## II-Méthode de dépouillement

Le dépouillement a pour but d'identifier, à partir des données expérimentales, des paramètres physiques caractérisant les conditions d'infiltration de l'eau dans le sol étudié. Ces paramètres sont identifiés à partir de l'ajustement de modèles mathématiques décrivant l'infiltration sous charge constante.

### a) Modèles utilisés, cadre conceptuel

Green et Ampt (1911) (noté G.A.) et Philip (1957) ont proposé des modèles simplifiés de l'infiltration, pouvant s'appliquer au dispositif double-anneau.

Ces modèles sont développés dans le cadre d'application de la loi de DARCY et supposent donc en particulier :

- qu'il n'y ait pas de modification du fluide (température et électrolyte);
- que l'écoulement soit laminaire (non turbulent);
- qu'il n'y ait pas de modification du réseau poral (gonflement, colmatage);

### Modèle de Green et Ampt (1911)

Cette loi s'applique 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  $h < H_f$ ,  $\theta < \theta_s$  pour  $h = H_f$ ) 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  $\theta < \theta_s$ )  $\theta_s$  étant la teneur en eau à saturation. La loi de Darcy s'écrit alors :

$$q = dI/dt = -K_s (H_f - H_0 - Z_f) / Z_f \quad (1)$$

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, reliée à la lame infiltrée  $I$  par :

$$I = Z_f (\theta_s - \theta_i) = Z_f D\theta \quad (D: \text{delta})$$

$\theta_i$  étant la teneur en eau initiale du milieu. On a donc :

$$dI/dt = -K_s (-1 + (H_f - H_0) D\theta / I) \quad (2)$$

Le flux d'infiltration est donc une fonction linéaire de  $1/I$ , dont la pente est :

$$-K_s (H_f - H_0) D\theta \quad \text{et l'ordonnée à l'origine est } K_s.$$

L'équation (2) s'intègre avec la condition  $I=0$  pour  $t=0$  pour donner :

$$K_s t = I + (H_f - H_0) D\theta \ln(1 - I / ((H_f - H_0) D\theta))$$

Pour les temps faibles, I est petit et donc :

$$I / ((H_f - H_0) D \emptyset) \ll 1$$

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

$$K_s t \sim -I^2 / (2(H_f - H_0) D \emptyset)$$

ou

$$I \sim (-2 K_s (H_f - H_0) D \emptyset)^{1/2} (t)^{1/2} \quad (3)$$

### 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  $(t)^{1/2}$ , 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 :

$$I(t) = S (t)^{1/2} + B t \quad (4)$$

Où S ( $L/(t)^{1/2}$ ) 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.

Généralement les paramètres S et B sont calculés par régression linéaire de  $I/(t)^{1/2}$  sur  $(t)^{1/2}$

Note :

On peut identifier (3) à la loi d'infiltration de Philip à l'origine :

$$I \sim S (t)^{1/2} \quad (5)$$

Ce qui fournit une expression de la sorptivité :

$$S \sim (-2 K_s (H_f - H_0) D \emptyset)^{1/2} = (2p)^{1/2}$$

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

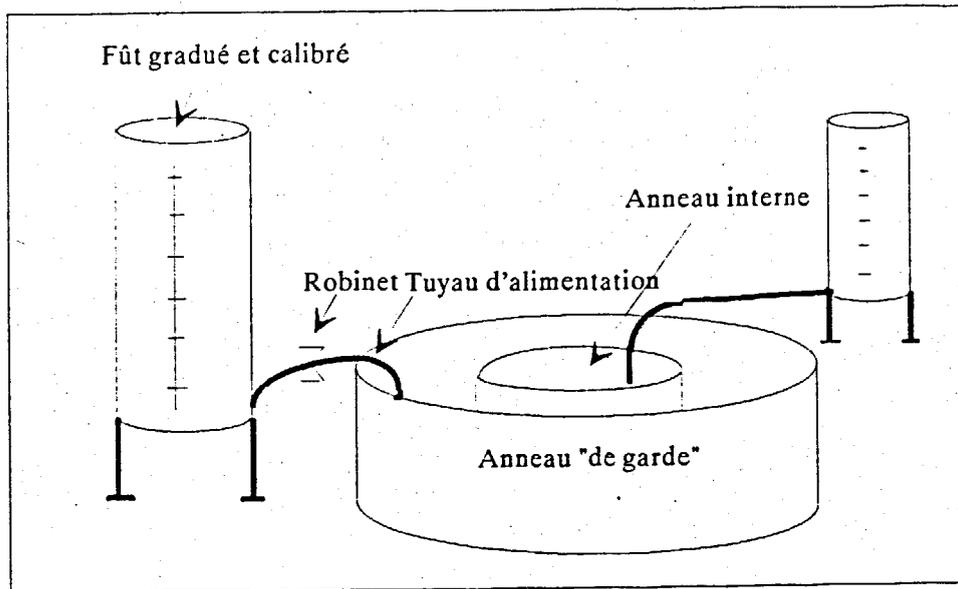
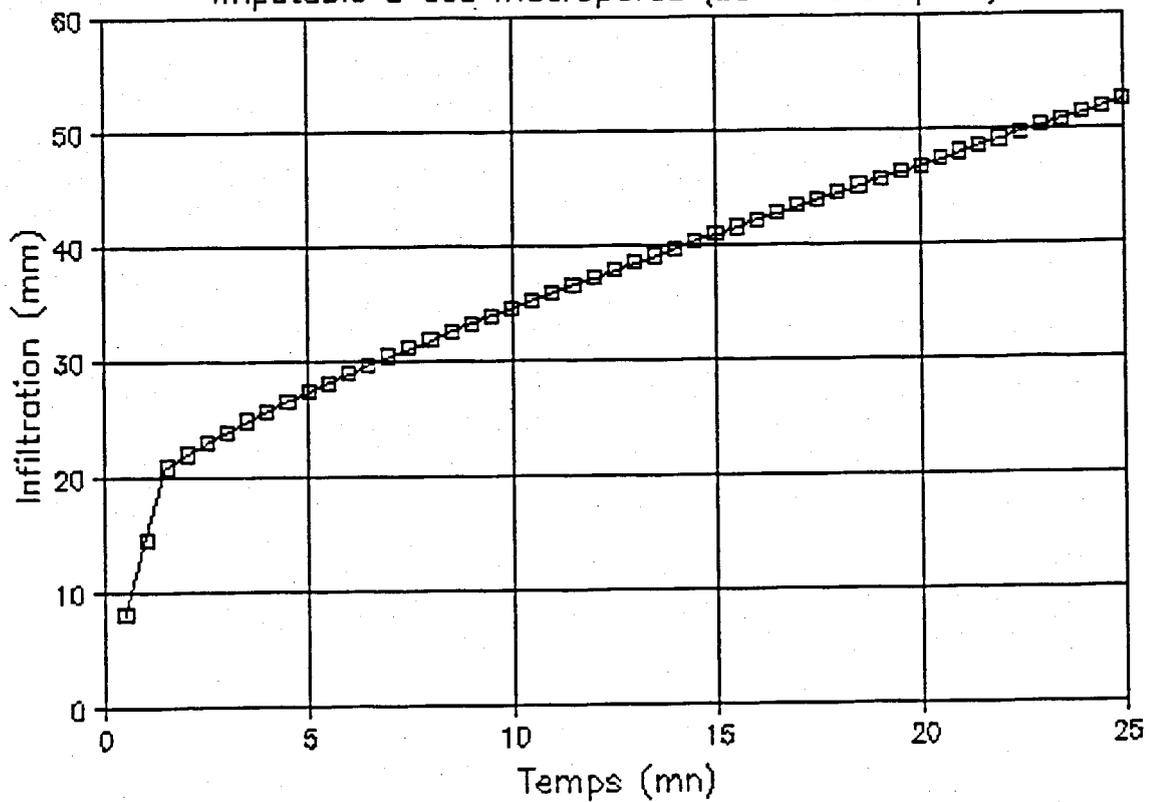


Figure 1 : représentation schématique d'un infiltromètre double-anneau

Fig.2: Infiltration avec rupture de pente  
Imputable à des macropores (schema simplifié)



b) Conditions d'application : problèmes de dépouillement.

De ce qui précède, il ressort que pour utiliser un infiltromètre double anneau afin d'estimer la conductivité hydraulique du sol à saturation ( $K_s$ ), il faut en particulier :

- que le sol soit homogène (pas de stratification);
- que le profil d'humidité initiale soit uniforme;
- qu'il n'y ait pas d'écoulements préférentiels (pas de macroporosité fonctionnelle).

Il est rare que ces trois conditions soient remplies. Dans notre cas, aucune ne l'était et nous avons donc du montrer qu'il nous était néanmoins possible d'évaluer  $K_s$  à partir des courbes d'infiltration (Boivin et al, 1988, Touma et Boivin, 1988).

Une infiltration préférentielle attribuable à des macropores semblait se produire en début d'infiltration, dans 50% des cas environ (fig. 2).

En faisant l'hypothèse que ces pores se remplissent en début d'infiltration mais n'ont pas d'influence ultérieure, c'est à dire que l'eau ne s'infiltré pas depuis les pores vers le sol une fois ces pores remplis, nous corrigeons les courbes d'infiltration expérimentales. Ceci revient (Boivin et al, 1988) à opérer un changement d'origine, en faisant débiter l'infiltration à partir de la rupture de pente (fig.2). Cette rupture se produit en moyenne au bout de 90 secondes, et après environ 20 millimètres infiltrés.

Nous avons montré ultérieurement, par des techniques de coloration, que notre interprétation était correcte (Colleuille, 1989).

En raison de la présence d'une nappe phréatique à 150cm et d'une longue saison sèche (9 mois), les profils d'humidité du sol avant infiltration sont systématiquement non uniformes. En moyenne, l'humidité volumique varie de 5 à 28% depuis la surface jusqu'à 100cm.

Nous avons utilisé la simulation numérique (Touma et Boivin, 1988), pour étudier l'impact d'un profil d'humidité non uniforme sur la courbe d'infiltration. Le principe est de simuler, à partir du logiciel *TEST* (Touma, J., 1987), l'infiltration d'une lame d'eau sous charge constante, pour des profils de sol correspondant à la gamme rencontrée, dans les cas où les profils d'humidité initiale sont uniformes et dans le cas où ils ne le sont pas.

Les modèles cités plus haut sont ensuite ajustés sur les courbes d'infiltration simulées, et l'on examine l'impact de la variation du profil d'humidité initiale sur l'évaluation du paramètre B (Philip, 1957) ou  $K_s$  (Green & Ampt, 1911).

Les variations du profil d'humidité ne perturbent pas de plus de 10%, dans le cas étudié, la valeur du paramètre trouvé par ajustement de l'un ou l'autre de ces modèles. Nous en concluons donc que le paramètre ajusté représente bien dans tous les cas une bonne évaluation du paramètre théorique.  $K_s$  dans le cas de Green & Ampt.

Enfin, dans une partie des cas, un placage d'argile d'une trentaine de centimètres en moyenne se superpose au profil sableux à la faveur de légères dépressions. En utilisant à nouveau la simulation numérique, Touma et Boivin (1988) montrent que pour les cas rencontrés, l'infiltration est alors caractéristique de l'horizon supérieur.

### III Variabilité

Une fois ces mises au point réalisées, les modèles de Philip et de Green et Ampt s'ajustent parfaitement aux données expérimentales (Boivin et al, 1988) et l'on dispose donc de plus de cent points de mesure de  $K_s$ , différentes surfaces de mesure ayant été employées pour 46 essais. Il devient possible de s'intéresser à la variabilité de la grandeur  $K_s$  (Boivin et Touma, 1988).

#### a) Variabilité spatiale

Les valeurs de  $K_s$  sont autocorrélées sur une distance de 40 mètres, le variogramme moyen calculé sur le logarithme de  $K_s$  correspond à la somme de deux schémas sphériques de portées 14 et 40 mètres et d'effet de pépité nul (figure 3).

Ceci signifie que les valeurs mesurées sont fortement corrélées les unes aux autres à faible distance, en particulier à moins de 15 mètres, puis qu'elles deviennent aléatoires à partir de 40 mètres.

Les points de mesure sont répartis en deux schémas : un maillage aléatoire de 60 points et 46 autres points (répartis sur un maillage de sept mètres de côté) venant sur-échantillonner une zone centrale.

Les 60 premiers points suffisent à établir le variogramme expérimental, les 46 points ajoutés ne perturbent pas la structure identifiée mais la précisent au voisinage de l'origine. De même, une carte du logarithme de la conductivité hydraulique à saturation calculée par krigeage sur les 60 premières mesures estime correctement les 46 points surnuméraires.

Il apparaît donc que pour l'étude de la variabilité spatiale à cette échelle, une soixantaine de points aurait suffi. D'autre part, les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité, posées en préalable au calcul des variogrammes, semblent satisfaites.

#### b) Loi de distribution.

$K_s$  est distribué lognormalement (Boivin et Touma, 1988) si l'on considère les 60 points qui échantillonnent toute la parcelle (figure 4).

Les 46 points ajoutés sont fortement autocorrélés et échantillonnent une zone à forte perméabilité, de telle sorte que la fonction de répartition de l'ensemble des points se rapproche d'une loi normale.

L'ensemble de ces résultats est cohérent avec ce que l'on trouve, concernant  $K_s$ , dans la littérature (voir par exemple Vauclin 1982 ou Gascuel-Oudou 1987), en signalant toutefois deux particularités :

- la distance d'autocorrélation trouvée est relativement importante;
- le coefficient de variation est faible.

Ces deux constatations et les résultats trouvés dans la bibliographie nous ont incité à examiner l'influence que pouvait avoir la dimension du dispositif double-anneau sur la mesure obtenue.

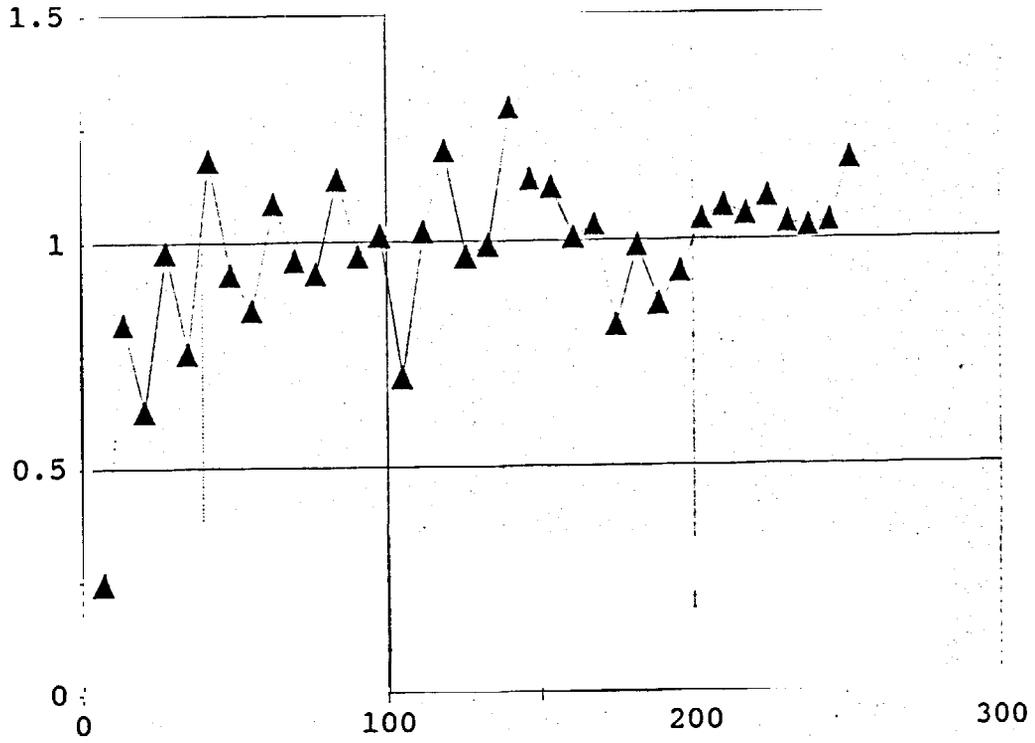
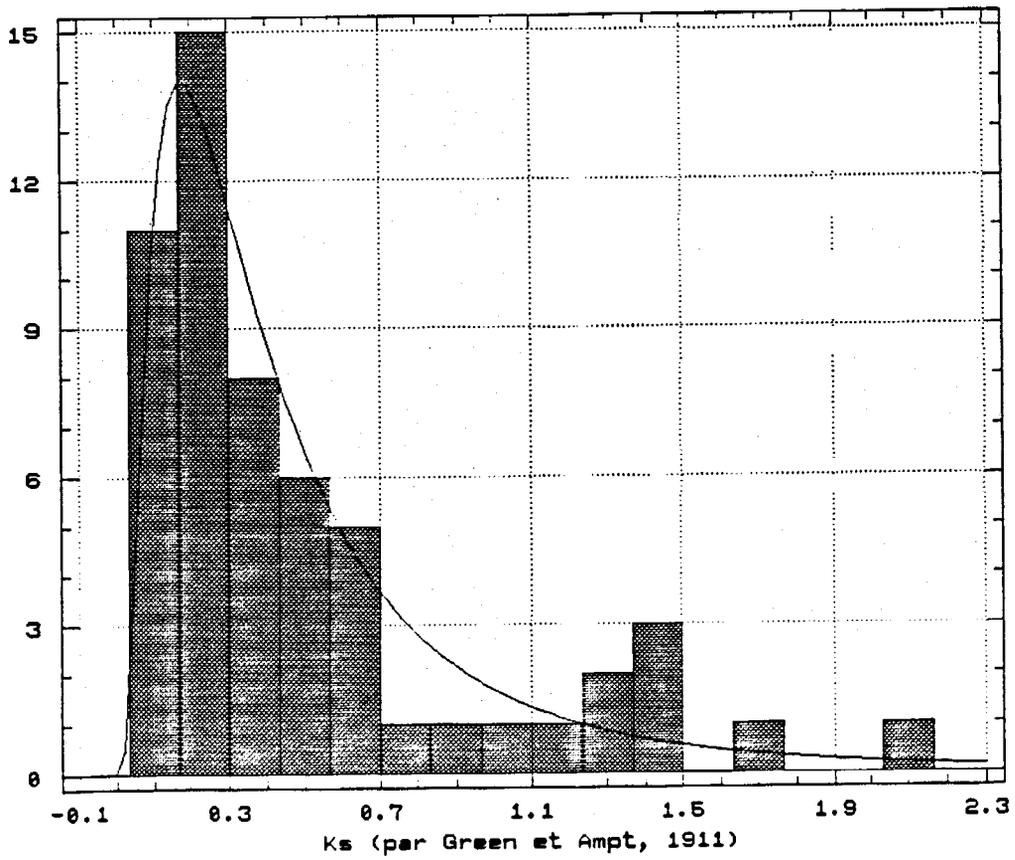


Figure 4 : Histogramme de fréquence



### c) Influence de la dimension du dispositif.

Les 46 essais qui sur-échantillonnent une zone à perméabilité relativement forte ont été conduits avec un dispositif particulier : à l'intérieur de l'anneau de garde, identique à celui utilisé précédemment, se trouvaient de trois à quatre anneaux concentriques permettant d'évaluer l'infiltrabilité sur des diamètres d'anneau interne variables. Les diamètres employés variaient de 11 à 50 cm.

La dimension de l'anneau externe a été conservée, en effet, Touma J. (1984) a montré par simulation numérique que la variation de la dimension de ce dernier peut avoir plus d'influence sur les transferts latéraux que la variation du rapport anneau interne / anneau externe.

Il apparaît que les  $K_s$  identifiés à partir des mesures issues des surfaces concentriques sont rigoureusement identiques :

-soient  $S_1$  une surface donnée et  $S_2$  une autre surface du même dispositif, et  $K_{s_{S_1}}$  et  $K_{s_{S_2}}$  leurs conductivités mesurées respectives, elles ont la relation statistique :

$K_{s_{S_1}} = K_{s_{S_2}}$  avec un coefficient de corrélation de 0.96 (Eisenlohr, 1989)  
(figure 5)

Ce résultat est surprenant au regard de certaines expériences comparables, telle celle de Sisson et Wierenga (1981), qui ont trouvé des variances fortement instables lorsque la dimension du dispositif de mesure varie.

Il semble, d'après les études en cours, que les surfaces de mesure utilisées renferment effectivement la plupart de la variabilité morphologique et hydrodynamique de l'horizon le moins conducteur.

## 4- Estimation spatiale de $K_s$ : possibilités et contraintes

Dans le cas présent, une cartographie par calcul d'une carte krigée du logarithme de  $K_s$  est la méthode la mieux adaptée, elle fournit une variance d'estimation tout à fait acceptable si l'on tient compte de la difficulté d'estimation ponctuelle du  $K_s$  par n'importe quelle méthode.

Pour une prospection, un maillage de 40 mètres de côté (soit environ six mesures à l'hectare) conviendra à l'estimation de valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle jusqu'à quelques dizaines d'hectares.

Un tel effort expérimental n'est pas très lourd étant donné la précision d'estimation que l'on peut en attendre : erreur moyenne nulle et dispersion de l'ordre de 20%.

Un échantillonnage plus important apporterait peu d'information supplémentaire, les valeurs mesurées étant alors fortement autocorrélées.

La caractérisation de la valeur moyenne de Ks sur une parcelle suppose 9 mesures pour une estimation à 20% près, selon la formule donnée par Vauclin (1982) :

N nombre de valeurs

CV : coefficient de variation

$$N = (1.96)^2 CV^2 / (0.2)^2 \quad (\text{probabilité à 95\%})$$

### Conclusion

Le dispositif double-anneau fournit ici une mesure qui paraît *robuste et fiable*.

**Robuste** : nous entendons par là qu'elle est peu sensible aux hétérogénéités qui se développent à l'échelle de la dizaine de centimètres, tant verticalement que latéralement à l'intérieur du profil. De même, la courbe d'infiltration reste proche des modèles théoriques, bien que l'on s'éloigne des conditions de leur énoncé. Enfin les modifications de la géométrie du dispositif n'ont pas de répercussion sur la mesure, dans la gamme testée.

**Fiable** : les valeurs mesurées dans l'espace sont fortement autocorrélées, indiquant d'une part que la mesure n'est pas entachée d'un "bruit de fond", d'autre part que la mesure possède un bon degré de reproductibilité.

Des conclusions aussi positives ont rarement été dégagées s'agissant de l'emploi d'autres méthodes de caractérisation de l'infiltrabilité.

En contrepartie, la discussion de fond reste ouverte, quand à la signification physique des paramètres extraits des courbes d'infiltration, dans la mesure où les conditions d'expérimentation ne sont pas celles du domaine d'application des modèles disponibles.

Toutefois, le fait que la mesure se fasse "in situ" et de façon globale est à notre avis un avantage, notamment vis à vis des mesures relativement ponctuelles réalisées sur échantillons. Dans notre cas, il a été montré (Colleuille, 1989; Eisenlohr, 1989) que la mesure sur échantillons prend en compte une forte variabilité se développant à l'échelle décimétrique. Il nous paraît préférable, dans ces conditions, de proposer comme estimation de Ks aux modélisateurs qui travaillent à l'échelle du profil de sol ou de la parcelle, les grandeurs obtenues à partir du dispositif double-anneau.

### Références bibliographiques

BOIVIN, P., TOUMA, J. et ZANTE, P., 1988, Mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau. I Résultats expérimentaux, Cahiers de Pédologie Orstom, 88-I.

BOIVIN, P. et TOUMA, J., 1988, Variabilité spatiale de l'infiltrabilité d'un sol mesurée par la méthode du double anneau, à paraître dans Cahiers de Pédologie ORSTOM, 1988 II.

**COLLEUILLE, H.**, 1989, Relations entre le comportement hydrodynamique d'un sol et sa morphologie. Mémoire de DEA, Université Paris VI.

**EISENLOHR, L.**, 1989, Influence de la géométrie d'un dispositif Muntz sur la mesure d'infiltrabilité et sa variabilité, Mémoire de DEA, Université Paris VI.

**GASCUEL-ODOUX, C.**, 1987, Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, cas d'une seule variable: revue bibliographique, *Agronomie*, 7 (1), 61-71.

**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)

**SISSON, J.B. & WIERENGA, P.J.**, 1981, Spatial Variability of Steady-State Infiltration Rates as a Stochastic Process, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 699-704.

**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.**, 1987, TEST : modèle pour tester la représentativité des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol non saturé déterminées "in situ". ORSTOM Dakar, multigr.

**TOUMA, J. et BOIVIN, P.**, 1988, Mesure de l'infiltrabilité des sols par la méthode du double anneau. II Simulation numérique, *Cahiers de Pédologie Orstom*, 88-I.

**VAUCLIN, M.**, 1982, Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol, Colloque S.H.F.-I.N.R.A., Avignon, Juin 1982, pp 9-45.

**ZANTE, P.**, 1988, Un dispositif de Muntz adapté à la détermination des caractéristiques hydrodynamiques du sol, Multigr. ORSTOM Dakar, 20 pages.