

# Intérêt d'une compartimentation morphologique du profil cultural pour l'étude de l'infiltration de l'eau dans les couches de sol travaillées

## Premiers résultats

Y. Coquet<sup>(1)</sup>, J. Roger-Estrade<sup>(2)</sup>, A. Boucher<sup>(3)</sup>, C. Labat<sup>(1)</sup> et P. Vachier<sup>(1)</sup>

(1) Unité Mixte de Recherche « Environnement et Grandes Cultures », INRA-INAPG, B.P. 01, F-78850 Thiverval-Grignon

(2) Unité Mixte de Recherche « Agronomie », INRA-INAPG, B.P. 01, F-78850 Thiverval-Grignon

(3) Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique, Université de Paris-Sud, F-91405 Orsay Cedex

\* Auteur correspondant : coquet@grignon.inra.fr

### RÉSUMÉ

Si l'on cherche à comprendre l'impact environnemental des pratiques agricoles, l'étude des propriétés hydrodynamiques de la couche de sol travaillée des parcelles cultivées revêt un intérêt particulier. En effet, ce sont ces propriétés qui vont, d'une part, déterminer le partage entre infiltration et ruissellement de l'eau à la surface du sol, et d'autre part, contrôler l'infiltration et la redistribution de l'eau dans la couche travaillée et donc l'importance des échanges physico-chimiques et biologiques qui pourront s'y réaliser. Les couches de sol travaillées ont une structure hétérogène dans l'espace. Cette hétérogénéité peut être décrite comme la coexistence, au sein de ces couches, de volumes de sol aux caractéristiques porales et structurales différentes : lit de semence, parties du profil cultural situées sous les passages de roues des engins agricoles, ou, au contraire, hors passages de roues. Cet article présente une caractérisation de la conductivité hydraulique de ces différents volumes de sol à l'aide de l'infiltromètre à disques, dans une parcelle agricole du centre expérimental de Grignon (Yvelines) dont le sol est un néoluvisol argilo-limoneux.

L'analyse des cinétiques d'infiltration de l'eau à différents potentiels hydriques montre que l'hétérogénéité de la conductivité hydraulique  $K(h)$  au sein de la couche de sol travaillée n'est mise en évidence que pour des potentiels supérieurs à - 8 cm (- 0,8 kPa). Dans le cas d'étude que nous présentons, les opérations culturales, en particulier la préparation du lit de semence (fragmentation du sol sur 8/10 cm de profondeur, compaction par les roues du tracteur tirant la herse rotative), n'ont affecté que la fraction de la porosité de rayon équivalent supérieur ou égal à 0,25 mm, donc visible à l'œil nu. Ce résultat justifie *a posteriori* la pertinence d'une description morphologique de la structure de la couche de sol travaillée, telle que celle proposée par Manichon (1987). D'autre part, nos observations suggèrent que le climat peut entraîner des modifications importantes de la conductivité hydraulique, notamment par le développement de fissures liées à la dessiccation dans les volumes de sol compactés. Enfin, ces observations montrent également que la conductivité hydraulique au sein du compartiment de la couche travaillée, situé sous le lit de semence et hors des passages des roues de reprise, est variable, en relation avec l'hétérogénéité de la structure observée dans ce compartiment. L'incidence de telles hétérogénéités de conductivité hydraulique sur les transferts au sein des couches travaillées mériterait d'être étudiée dans le cadre d'une modélisation des transferts d'eau dans les sols cultivés.

### Mots clés

*Travail du sol, conductivité hydraulique, infiltromètre à disques, structure du sol, compaction, hétérogénéité.*

## SUMMARY

### STRATIFICATION OF THE SOIL PROFILE FOR THE EXPERIMENTAL STUDY OF WATER INFILTRATION IN TILLED SOIL LAYERS; preliminary results.

The knowledge of the hydraulic properties of the tilled soil layers is important to assess the environmental impact of agricultural practices. Indeed, these properties determine the ratio between infiltration vs. overland flow. They also control the water flux, solute exchange and transformation rates throughout the tilled layer. The tilled layers of soils have an heterogeneous structure prone to morphological description as a juxtaposition of different types of soil volumes (Roger-Estrade and Manichon, 1998): the seedbed, the part of the ploughed layer located under the seed bed, either below or outside the wheel tracks. This paper presents an hydraulic conductivity characterisation of these different soil volumes by disc infiltrometry based on the multipotential method (figure 1; Reynolds and Elrick, 1991; Ankeny et al., 1991). The study has been conducted on the tilled layer of a Eutric Cambisol after ploughing the 25<sup>th</sup> of November, 1997, and harrowing for seedbed preparation the 20<sup>th</sup> of March, 1998 (figure 2).

The results show that the  $K(h)$  hydraulic conductivity-water potential relationship differed between the compartments only for water potentials larger than - 8 cm (- 0.8 kPa; figure 4 and table 1). From this - 8 cm potential up to -1 cm, the conductivity of the ploughed layer below the wheel tracks was much lower than that of the other compartments of the tilled layer (table 1). This result shows that compaction by wheel tracks plays a major role in the evolution of the structural porosity of the tilled layers. The ploughed layer below the wheel tracks had the larger saturated hydraulic conductivity due to the development of shrinkage cracks inside the compacted soil. This result exemplifies the effect of climate on the hydraulic properties of the tilled layer. Differences were observed between two  $K(h)$  replicates inside the ploughed layer between the wheel tracks, which was consistent with the variability of the soil structure observed inside this compartment of the tilled layer. All the differences observed in  $K(h)$  between the different compartments of the tilled layer concerned soil pores of equivalent radius larger or equal to 0,25 mm, so clearly visible by eye in the field. This justifies morphological approaches of the structure of tilled layers such as that proposed by Manichon (1987). Our results showed that the tilled layer cannot be considered as a homogeneous porous media, as generally done by most of the field scale water and solute transport models. The impact of the heterogeneities created by agricultural practices, esp. tillage and compaction, should deserve attention from the agricultural non-point source pollution modellers.

#### Key-words

Soil tillage, hydraulic conductivity, disc infiltrometer, soil structure, compaction, heterogeneity.

## RESUMEN

### COMPARTIMENTACIÓN DEL PERFIL DE SUELO PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN LAS CAPAS ARABLES DE LOS SUELOS CULTIVADOS; Primeros resultados

El estudio de las propiedades hidrodinámicas de las capas arables de las parcelas cultivadas reviste un interés particular para comprender el impacto ambiental de las diferentes prácticas de manejo. Efectivamente, estas propiedades determinan la partición entre la infiltración y la escorrentía del agua a la superficie del suelo y controlan la infiltración y la redistribución del agua en la capa arable y por lo tanto la importancia de los intercambios físico-químicos y biológicos. Las capas del suelo removidas por el cultivo tienen una estructura heterogénea en el espacio. Esta heterogeneidad puede ser descrita como la coexistencia de volúmenes de suelo con características porales y estructurales diferentes: capa de siembra, partes del perfil situadas bajo el paso de las ruedas de la maquinaria agrícola, o, al contrario, fuera del pasaje de las ruedas. Este artículo presenta una caracterización de la conductividad hidráulica de esos diferentes volúmenes de suelo gracias a la utilización de un infiltómetro a discos, en una parcela agrícola del centro experimental de Grignon (Yvelines), siendo el sol un "neoluvisol" arcillo-limonoso.

El análisis de las cinéticas de infiltración de agua a diferentes potenciales hídricos muestra que la heterogeneidad de la conductividad hidráulica  $K(h)$  en la capa arable es únicamente revelada para potenciales superiores a - 8 cm (- 0,8 kPa). En el caso estudiado, las operaciones de manejo, en particular la preparación de la cama de siembra (fragmentación del suelo hasta 8/10 cm de profundidad, compactación por las ruedas del tractor), han afectado únicamente la fracción de la porosidad de radio equivalente superior o igual a 0,25 mm, por lo tanto directamente visible. Este resultado justifica a posteriori la pertinencia de una descripción morfológica de la estructura de la capa arable, como la que ha sido propuesta por Manichon (1987). Por otro lado, nuestras observaciones sugieren que el clima puede provocar modificaciones importantes de la conductividad hidráulica, sobretodo por el desarrollo de fisuras asociadas a la desecación en los volúmenes de suelo compactados. Finalmente, estas observaciones muestran igualmente que la conductividad

hidráulica en el compartimento de la capa arable, situada bajo la cama de siembra y fuera del pasaje de la ruedas es variable en relación con la heterogeneidad de la estructura observada en este compartimento. La incidencia de esta heterogeneidad de conductividad hidráulica sobre la transferencia en las capas arables merecería ser estudiada en el marco de una modelización del transporte de agua en suelos cultivados.

### Palabras claves

Manejo del suelo, conductividad hidráulica, infiltrómetro a discos, estructura del suelo, compactación, heterogeneidad

Dans les parcelles cultivées, les couches de sol travaillées jouent un rôle particulièrement important dans le cycle de l'eau. Riches en matières organiques et micro-organismes, colonisées par le système racinaire du peuplement végétal, elles sont le siège de très nombreux échanges qui conditionnent l'évolution de la composition chimique de la solution du sol. D'autre part, leur structure, en relation avec les caractéristiques de l'ensemble du profil de sol, détermine fortement la dynamique de l'infiltration de l'eau dans le sol. La modélisation des transferts d'eau et de solutés au sein de ces couches est donc un enjeu important pour la prévision de la pollution diffuse et pour la mise au point de systèmes de culture permettant de minimiser les risques environnementaux : c'est en effet sur cette partie du sol qu'agit l'agriculteur, par les techniques culturales et le choix des successions de culture, qui déterminent le calendrier d'occupation des parcelles.

Une modélisation de type mécaniste de ces transferts implique la connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol travaillé, en particulier de sa conductivité hydraulique. L'infiltromètre à disques est un instrument couramment utilisé pour la mesure *in situ* de la conductivité hydraulique des sols à des potentiels de l'eau situés dans la gamme -25 et 0 cm de hauteur de colonne d'eau (Perroux et White, 1988; Coquet *et al.*, 2000). La mesure de la conductivité hydraulique du sol dans cette gamme de potentiel permet de détailler la relation conductivité hydraulique-potentiel de l'eau,  $K(h)$ , au voisinage de la saturation et d'en déduire des informations sur le fonctionnement hydrodynamique de la porosité du sol de rayon équivalent supérieur ou égal à 0,06 mm.

De nombreuses études de terrain ou de laboratoire sur sols non remaniés ont montré un accroissement très important de la conductivité hydraulique au voisinage de la saturation. Cet accroissement est généralement plus important que celui attendu d'une relation  $K(h)$  de type exponentielle, relation souvent vérifiée en Physique du Sol pour des sols remaniés ou ayant une structure particulièrement homogène (Pullan, 1990). Jarvis

et Messing (1995) ont montré que, pour plusieurs sols, cet accroissement était particulièrement marqué pour des potentiels de l'eau supérieurs à -6 cm, c'est-à-dire lorsque des pores de rayon équivalent supérieur à 0,25 mm étaient hydrauliquement actifs. Ces auteurs attribuent ces observations à l'effet de la macroporosité du sol, définie comme l'ensemble des pores de rayon équivalent supérieur à 0,25 mm (donc visibles à l'œil nu) susceptibles de conduire l'eau. La possibilité offerte par l'infiltromètre à disque de caractériser la macroporosité hydrauliquement fonctionnelle du sol a été utilisée par Ankeny *et al.* (1990) et Richard *et al.* (1997) pour étudier la compaction du sol par les passages de roue des engins agricoles. Ces auteurs ont montré une diminution importante de la conductivité hydraulique du sol sous les passages de roues qu'ils attribuent à la disparition des macropores lors du tassement. L'infiltromètre à disques a aussi été utilisé par Vauclin et Chopart (1992) pour comparer l'effet de différents modes de travail du sol (labour, semis direct) sur la conductivité hydraulique de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire.

La structure des couches de sol travaillées apparaît le plus souvent très hétérogène (Manichon, 1987). La variabilité spatiale de la structure découle tout d'abord du fait que les contraintes mécaniques appliquées au sol affectent rarement l'ensemble de la couche travaillée : les opérations de fragmentation lors du travail du sol (à l'exception du labour) ne concernent que la partie supérieure du profil cultural et le compactage ne concerne que le sol situé sous les passages de roues. D'autre part, le labour déplace et mélange des volumes de sol dont les structures sont souvent très différentes (Roger-Estrade, 1995; Roger-Estrade et Manichon, 1998). Enfin, à l'action des outils et des engins agricoles, il faut ajouter celle du climat, de la faune et des racines, qui font également évoluer de manière plus ou moins rapide et plus ou moins intense le volume et la géométrie de l'espace poral structural. Ainsi, dans la plupart des parcelles cultivées, la structure des couches de sol travaillées est caractérisée par la coexistence de volumes de sol dont les caractéristiques de poro-

sité et de structure interne sont très différentes. Il ressort de ces considérations que pour évaluer l'infiltration de l'eau dans une parcelle cultivée, il semble nécessaire de tenir compte des éventuelles différences de conductivité hydraulique pouvant exister au sein de la couche de sol travaillée. Une compartimentation préalable au choix de l'emplacement des mesures peut être réalisé, comme le suggère Manichon (1987), en tenant compte de la profondeur d'action des outils de travail du sol et de l'emplacement des passages de roues lors des opérations postérieures au labour.

Afin d'étayer cette idée, nous avons créé, dans des conditions proches de celles de la conduite normale d'une parcelle cultivée, un profil cultural présentant plusieurs compartiments dont la structure était bien différencié. Des mesures d'infiltrométrie ont ensuite été réalisées dans les différents compartiments pour une première approche expérimentale de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique au sein de la couche de sol travaillée.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### L'infiltromètre à disques

L'infiltromètre à disques (Perroux et White, 1988) permet de mesurer l'infiltration de l'eau dans le sol à partir d'un disque, en contrôlant le potentiel de l'eau  $h_0$  [L] à l'interface disque/sol via un vase de Mariotte. Les conditions d'utilisation de l'infiltromètre à disques sont décrites en détail dans Coquet *et al.* (2000).

### Equation de l'infiltration axisymétrique

L'infiltration axisymétrique en régime permanent de l'eau dans le sol est décrite par l'équation de Wooding (1968):

$$q_{\infty}(h_0) = K(h_0) \left( 1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \quad (1),$$

où  $q_{\infty}(h_0)$  [L.T<sup>-1</sup>] est la densité de flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol,  $K(h_0)$  [L.T<sup>-1</sup>], la conductivité hydraulique du sol au potentiel d'infiltration  $h_0$ ,  $r$  [L], le rayon du disque, et  $\alpha$ , une constante [L<sup>-1</sup>] caractéristique du sol définie par:

$$\alpha = \frac{K(h_0) - K(h_i)}{\int_{h_i}^{h_0} K(h) dh} \quad (2),$$

avec  $h_i$ , potentiel initial de l'eau dans le sol, et  $K(h_i)$ , la conductivité hydraulique du sol au potentiel initial  $h_i$ .

L'équation (1) n'est valable que lorsque certaines conditions d'application sont vérifiées:

1. Le sol est considéré comme un milieu semi-infini (limité

uniquement par sa surface), homogène et isotrope.

2. La relation entre  $K$  et  $h$  est supposée être de la forme (Gardner, 1958):

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (3),$$

avec  $K_s$ , conductivité hydraulique à saturation.

Cette dernière hypothèse permet d'écrire (1) sous la forme:

$$q_{\infty}(h_0) = K_s \exp(\alpha h_0) \left( 1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \quad (4).$$

White et Sully (1987) définissent une longueur caractéristique du phénomène d'infiltration, la longueur capillaire,  $\lambda_c$  [L], exprimant le rapport entre forces capillaires et forces gravitaires au potentiel  $h_0$ . Cette longueur capillaire s'exprime par:

$$\lambda_c(h_0) = \frac{\int_{h_i}^{h_0} K(h) dh}{K(h_0) - K(h_i)} \quad (5).$$

Soit:

$$\lambda_c(h_0) = \frac{1}{\alpha} \quad (6).$$

Plus  $\lambda_c$  est grand, plus les forces capillaires dominent la gravité dans le phénomène d'infiltration.  $\lambda_c$  est en pratique assimilable à la hauteur moyenne d'ascension capillaire d'une nappe dans le sol ou encore à un potentiel de l'eau pondéré par la conductivité hydraulique. L'application de la loi de Jurin permet de calculer à partir de  $\lambda_c$  un rayon de pore équivalent  $\lambda_m$ :

$$\lambda_m(h_0) = \frac{\sigma}{\rho_w g \lambda_c(h_0)} \quad (7),$$

où  $\sigma$  est la tension superficielle de l'eau dans le sol au contact de l'air [M.T<sup>-2</sup>]. On a numériquement:

$\lambda_m(h_0) = 0,074/\lambda_c(h_0)$ , si  $\lambda_c$  et  $\lambda_m$  sont exprimés en cm. On peut considérer  $\lambda_m$  comme un indicateur fonctionnel de la taille moyenne de la porosité assurant l'essentiel du flux d'eau au potentiel d'infiltration  $h_0$  considéré.

### Méthode multipotentiel

On voit d'après la relation (4) que, pour un rayon de disque  $r$  et un potentiel d'infiltration  $h_0$  donnés, le flux d'infiltration ne dépend que de 2 paramètres: la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  et le paramètre  $\alpha$ . Sous forme logarithmique, (4) s'écrit:

$$\ln(q_{\infty}(h_0)) = \ln \left( K_s \left( 1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \right) + \alpha h_0 \quad (8).$$

On peut donc envisager d'utiliser 2 mesures de  $q_{\infty}(h_0)$  réalisées au même endroit à 2 valeurs de  $h_0$  différentes pour en déduire les 2 inconnues  $K_s$  et  $\alpha$  (Reynolds et Elrick, 1991;

Ankeny *et al.*, 1991 ; Logsdon et Jaynes, 1993). Le problème posé par cette méthode est que la linéarité de l'équation (8) est rarement vérifiée dans la réalité :  $\alpha$  n'est pas constant mais dépend de  $h_0$ . Reynolds et Elrick (1991) proposent de décrire la relation  $K(h)$  par une exponentielle par morceaux, en considérant  $\alpha$  constant (=  $\alpha_{jk}$ ) sur chaque intervalle de potentiel  $[h_j ; h_k]$ ,  $h_j$  et  $h_k$  étant 2 valeurs successives du potentiel d'infiltration  $h_0$  définies par l'utilisateur. Pour chaque paire de couples  $\{q_{\infty}(h_j)h_j\}$  et  $\{q_{\infty}(h_k)h_k\}$ , on résout le système à 2 équations :

$$\begin{cases} \ln(q_{\infty}(h_j)) = \ln\left(K_{jk} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha_{jk}}\right)\right) + \alpha_{jk} h_j \\ \ln(q_{\infty}(h_k)) = \ln\left(K_{jk} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha_{jk}}\right)\right) + \alpha_{jk} h_k \end{cases} \quad (9)$$

de la même façon que précédemment, pour calculer  $\alpha_{jk}$  et  $K_{jk}$  (figure 1). Reynolds et Elrick (1991) proposent d'utiliser chaque couple de paramètres ( $\alpha_{jk}$ ,  $K_{jk}$ ) pour calculer  $K(h_m)$  au centre  $h_m = (h_j + h_k)/2$  de l'intervalle  $[h_j ; h_k]$  :

$$K(h_m) = K_{jk} \exp(\alpha_{jk} h_m) \quad (10)$$

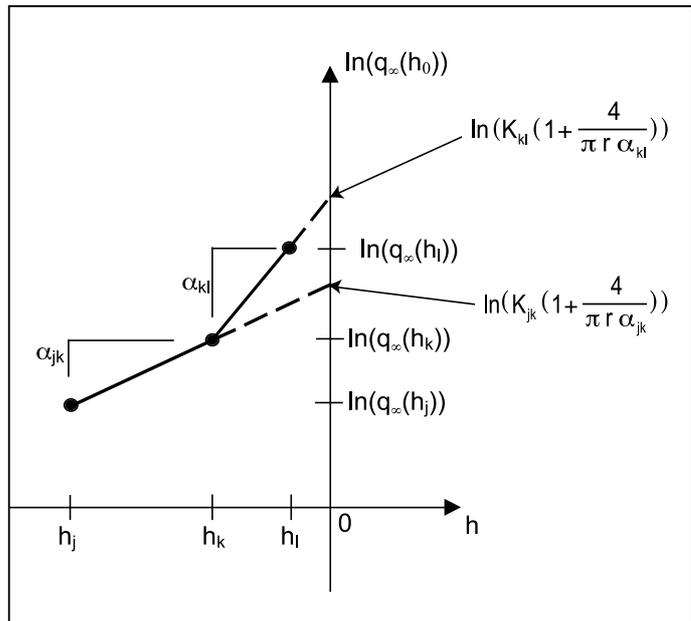
Ankeny *et al.* (1991) proposent, pour chaque valeur  $h_k$  encadrée par une estimation des paramètres à gauche ( $\alpha_{jk}$ ,  $K_{jk}$ ) et à droite ( $\alpha_{kl}$ ,  $K_{kl}$ ), de calculer une conductivité  $K(h_k)$  moyenne arithmétique des estimations à gauche ( $K(h_k) = K_{jk} \exp(\alpha_{jk} h_k)$ ) et à droite ( $K(h_k) = K_{kl} \exp(\alpha_{kl} h_k)$ ). Dans notre étude, nous avons combiné ces 2 approches. De plus, pour les valeurs extrêmes de  $h_0$  ( $h_1$ , valeur la plus faible, et  $h_n$ , valeur la plus élevée, généralement 0), nous avons calculé la valeur  $K(h_0)$  à partir de la seule estimation à droite (pour  $h_1$ ) ou à gauche (pour  $h_n$ ). On obtient ainsi  $2n+1$  valeurs de  $K$  pour  $n$  mesures de  $q_{\infty}(h_0)$ .

### Parcelle expérimentale

La parcelle retenue pour cette étude est située sur le domaine du Centre expérimental de Grignon (Yvelines). Le sol est un néoluvisol limono-argileux reposant à une profondeur d'environ 1 m sur un calcaire dur du Lutétien. Les caractéristiques moyennes de la couche travaillée sont les suivantes (en % de la terre fine et sèche ; fractions granulométriques calculées après destruction de la matière organique et décarbonatation) : argile : 22,9 ; limons fins : 25,7 ; limons grossiers : 43,6 ; sables fins : 7,0 ; sables grossiers : 0,8 ; matière organique : 2,2 et calcaire total : 1,3. Cette parcelle est en monoculture de

**Figure 1** - Estimation des paramètres  $K_{jk}$  (resp.  $K_{kl}$ ) et  $\alpha_{jk}$  (resp.  $\alpha_{kl}$ ) pour le calcul de  $K$  sur l'intervalle  $[h_j ; h_k]$  (resp.  $[h_k ; h_l]$ ) à partir de 2 couples de mesures  $(h_j, q_{\infty}(h_j))$  et  $(h_k, q_{\infty}(h_k))$  (resp.  $(h_k, q_{\infty}(h_k))$  et  $(h_l, q_{\infty}(h_l))$ ) dans le cas où la relation  $K(h)$  est supposée exponentielle par morceaux.

**Figure 1** - Estimation of parameters  $K_{jk}$  (resp.  $K_{kl}$ ) and  $\alpha_{jk}$  (resp.  $\alpha_{kl}$ ) of the  $K$  calculation on the interval  $[h_j ; h_k]$  (resp.  $[h_k ; h_l]$ ) from 2 couples of measurements  $(h_j, q_{\infty}(h_j))$  and  $(h_k, q_{\infty}(h_k))$  (resp.  $(h_k, q_{\infty}(h_k))$  and  $(h_l, q_{\infty}(h_l))$ ) assuming a piecewise exponential relationship for  $K(h)$



mais depuis 10 ans. Pour cette expérimentation, la parcelle (12 X 60 m) a été labourée le 25 novembre 1997. Le 20 mars 1998, alors que la couche de sol labourée était à une humidité moyenne proche de la capacité au champ, on a utilisé une herse rotative pour niveler et affiner la surface du labour sur une bande de 3 m de large. Lors de cette opération, effectuée dans le même sens que le labour, les passages de roues ont été précisément localisés. Deux passages de herse rotative ont été effectués roue dans roue afin d'obtenir un degré de tassement maximal sous le passage des roues et un état de fragmentation maximal du lit de semence.

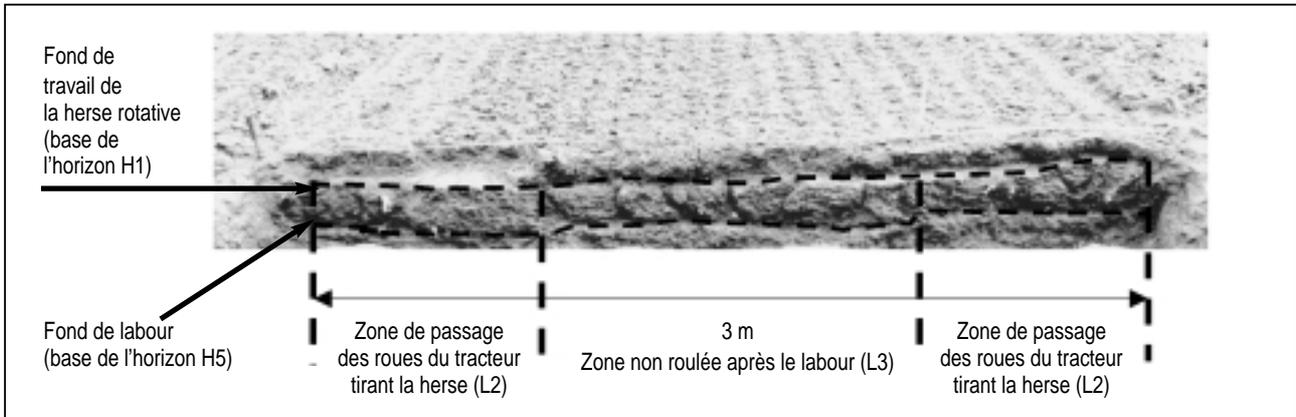
### Compartimentation du profil et description de la structure

Une fosse de 3 m de large et 60 cm de profondeur a été creusée perpendiculairement au sens de travail du sol, centrée sur l'axe de passage de la herse rotative. Sur la face d'observation (figure 2), on a tout d'abord réalisé une partition verticale du profil en identifiant les horizons créés par les outils de travail du sol :

1. l'horizon de surface (H1). De 8 à 10 cm d'épaisseur, cet horizon de reprise du labour, correspondant au lit de semence, résulte du travail

**Figure 2** - Face d'observation de l'état structural du profil cultural de la parcelle expérimentale étudiée.

**Figure 2** - View of the observation side of the wide shallow pit dug for the description of the structure of the tilled layer of the experimental plot.



de fragmentation du sol par les pièces travaillantes de la herse rotative.

2. l'horizon correspondant à la partie du sol travaillée par la charrue (profondeur de travail 25-27 cm), mais non modifié par les dents de la herse rotative (H5).

Une deuxième partition du profil a ensuite été effectuée en différenciant les zones situées sous les passages de roues du tracteur tirant la herse rotative (L2) de celles situées hors de ces passages (L3). Cette double partition a permis d'identifier 3 compartiments dans la couche de sol travaillée: H1, H5L3 et H5L2. Dans les 3 compartiments ainsi délimités, on a décrit la structure du sol.

Celui de H1 est apparu très fragmentaire, ce compartiment étant constitué d'agrégats infra centimétriques et de petites mottes (1-5 cm), sans débris végétaux. La structure est par ailleurs apparue très homogène dans l'ensemble du compartiment.

En revanche, la structure de l'horizon H5 était massive sous les passages de roues et plus fragmentaire dans la partie située hors roues. Le sol situé dans le compartiment de structure massive (H5L2) ne présentait pas de porosité structurale visible à l'œil, sauf quelques fentes de retrait millimétriques. Dans le compartiment H5L3 (hors passage de roues), l'observation a révélé une structure plus hétérogène. On y a observé des mottes (2-20 cm), séparées par des vides, ne présentant pas de porosité structurale visible à l'œil: elles ont été créées par le découpage puis le retournement par la charrue de zones fortement tassées lors de la culture précédente (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Le reste du compartiment était occupé par un mélange de terre fine (agrégats de  $\varnothing < 2$  cm) et de mottes (2-10 cm) présentant une porosité structurale visible à l'œil nu.

La conductivité hydraulique de chacun des 3 compartiments

identifiés dans la couche de sol travaillée a été mesurée à l'aide de l'infiltromètre à disques en utilisant la méthode multipotentielle aux potentiels d'infiltration successifs suivants:

- -15, -10, -7, -3, -1 et 0 cm pour H1 (1 mesure)
- -15, -10, -6, -3, -1 et 0 cm pour H5L2 (1 mesure)
- -15, -10, -6, -3, -2, -1 et 0 cm pour H5L3 (2 mesures).

Deux mesures de  $K(h)$  ont été réalisées dans le cas du compartiment H5L3 en raison de la variabilité de sa structure observée lors de la description de la couche travaillée, contrairement aux 2 autres compartiments (H1 et H5L2). Pour l'ensemble des mesures, un disque de 4 cm de rayon a été utilisé.

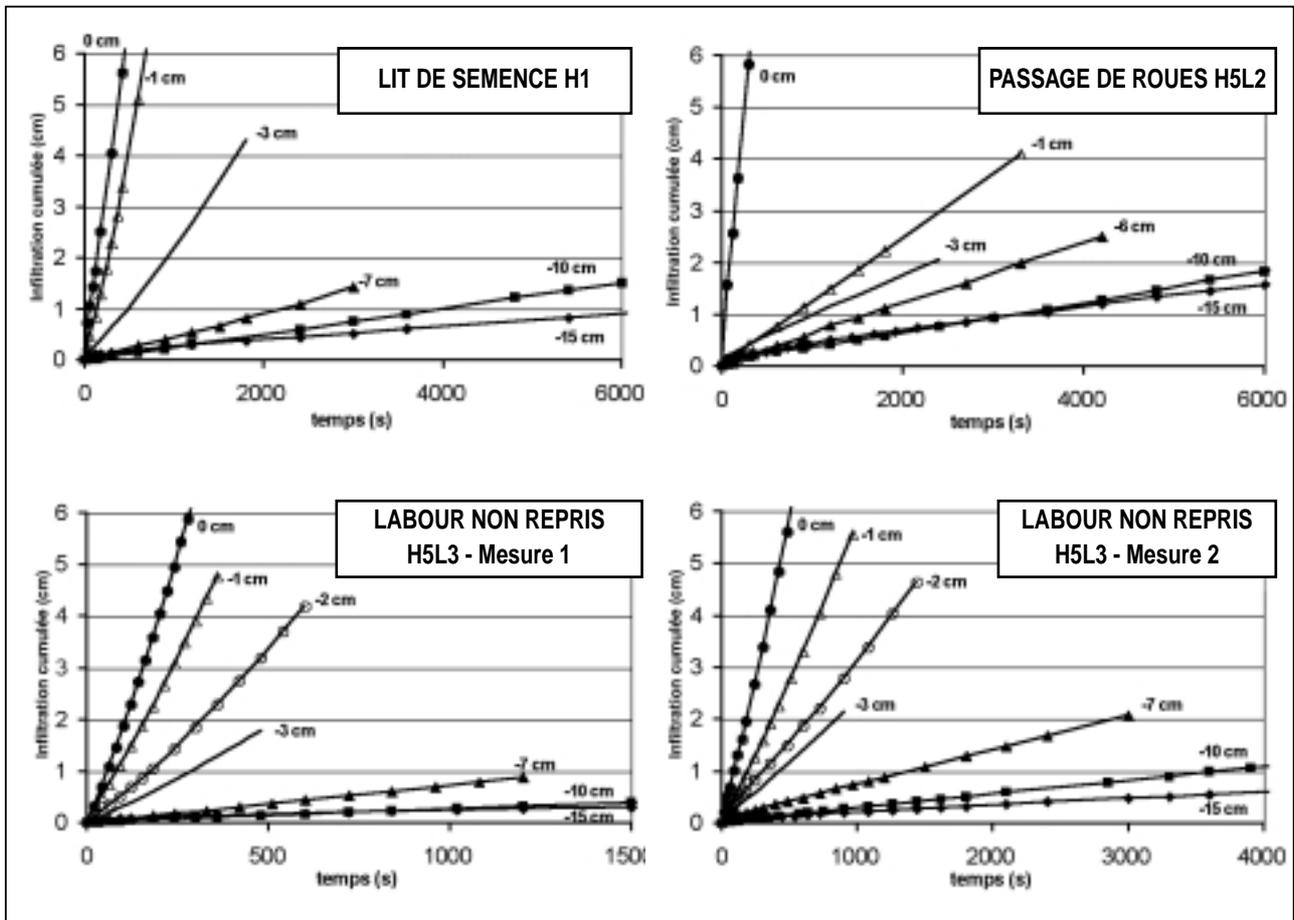
## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Relations $K(h)$

La *figure 3* présente les hauteurs d'eau infiltrées cumulées en fonction du temps aux différents potentiels d'infiltration pour chacune des 4 localisations. On constate classiquement l'accroissement du flux d'infiltration lorsque le potentiel d'infiltration croît (de -15 à 0 cm). Cet accroissement du flux est dû à la mise en fonctionnement de pores de taille de plus en plus grande, au fur et à mesure que le sol se rapproche de la saturation. Le *tableau 1* présente les valeurs de  $K(h)$  déduites des mesures multipotentiels. Ces valeurs sont accompagnées d'un calcul majorant de l'erreur absolue de mesure sur  $K$ , se basant sur une incertitude relative sur  $q_{\infty}$  de  $\pm 10\%$  et des incertitudes absolues de  $\pm 0,5$  cm pour  $r$  et  $\pm 1$  mm pour  $h_0$  (voir *Annexe*, et Coquet *et al.*, 2000). L'erreur relative sur  $K$  est en moyenne de 26%, ce qui est excellent pour ce type de paramètre physique. La *figure 4* présente les relations  $K(h)$  déduites des mesures multipotentiels dans les différents compartiments. Ces relations sont toutes

**Figure 3** - Cinétiques d'infiltration aux différents potentiels (-15 à 0 cm) pour chacune des 4 localisations au sein de la couche travaillée.

**Figure 3** - Infiltration kinetics at the different water potentials (-15 to 0 cm) for the 4 locations within the tilled layer.



croissantes, sauf pour le lit de semence au voisinage de la saturation. Sur cette représentation logarithmique, on voit que les relations  $K(h)$  ne sont pas des droites, mais que le paramètre  $\alpha$  est effectivement dépendant de  $h_0$ . En général,  $\alpha$  augmente avec  $h_0$  (tableau 1) à l'exception du lit de semence. Cette observation ne remet toutefois pas en cause la méthode multipotentiel, car il a été montré (Quadri, 1993; Vandervaere, 1995) que le domaine d'application de l'équation de Wooding n'était pas limité au cas des sols dont la relation  $K(h)$  est décrite par une exponentielle (la méthode multipotentiel reste donc applicable même si l'hypothèse (2) de l'équation de Wooding n'est pas vérifiée).

On remarque (figure 4) que les conductivités hydrauliques des différents volumes de sol sont quasiment identiques jusqu'au potentiel -8 cm. Ce résultat suggère que, dans les conditions d'humidité et de structure prévalant aux moments où le labour et la reprise ont été effectués, le travail du sol et le compactage n'ont pas affecté la porosité du sol de rayon équivalent

( $r_{\text{eq}}$ ) inférieur à 0,25 mm. Il est remarquable de constater que ce potentiel est proche de celui défini par Jarvis et Messing (1995), -6 cm, ce qui conforte l'approche fonctionnelle de la macroporosité du sol proposée par ces auteurs.

On observe en revanche (figure 4 et tableau 1) des différences à partir du potentiel -6 cm. Ces différences ont été comparées aux erreurs faites sur la mesure de  $K$  (cf. supra). Le sol situé sous le passage de roue (compartiment H5L2) se différencie assez nettement des 3 autres, les écarts observés étant supérieurs à la précision de la mesure de  $K$ . Sa conductivité hydraulique reste faible jusqu'au potentiel -1 cm. Au delà, elle augmente très fortement. A partir du potentiel -4,5 cm, les 2 mesures faites dans le compartiment H5L3 (labour non repris entre les passages de roues) se différencient également, l'écart observé étant là aussi supérieur à la précision des mesures. Ce résultat est cohérent avec l'hétérogénéité structurale observée dans ce compartiment. Nous faisons ici l'hypothèse que cette dif-

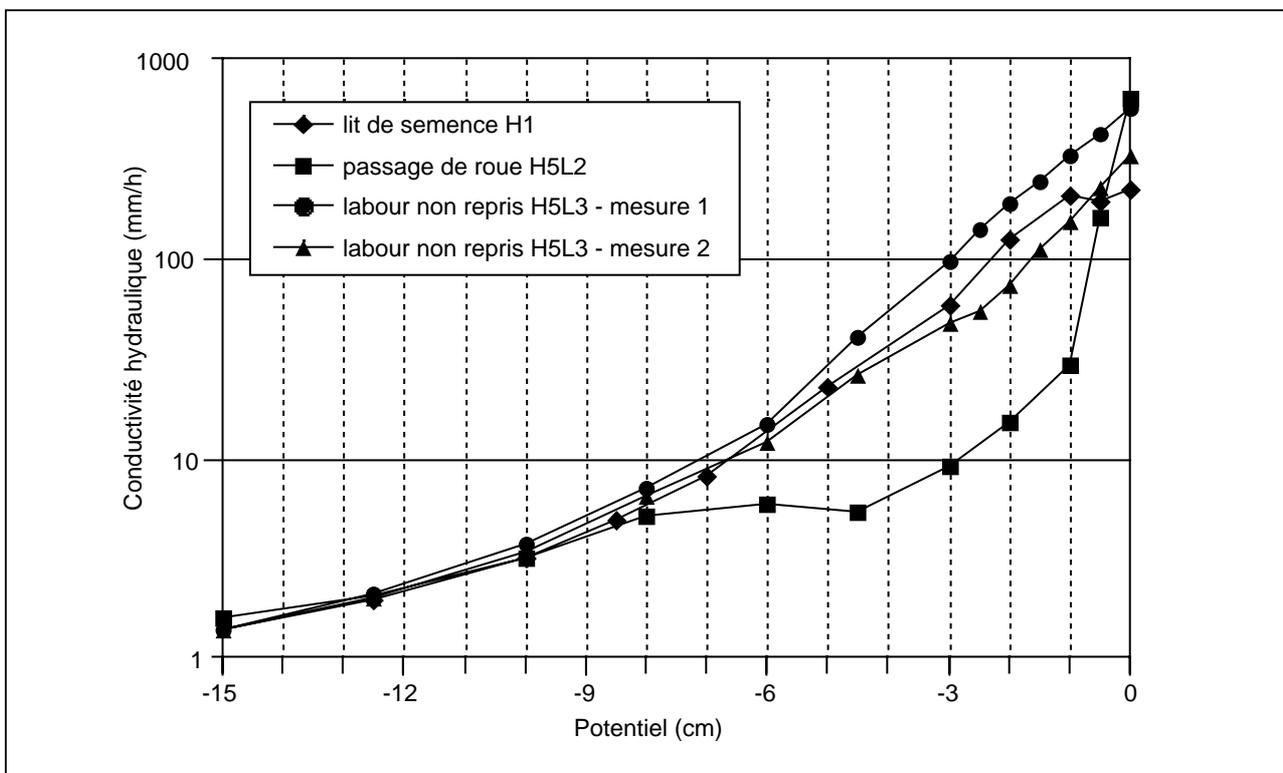
**Tableau 1** - Conductivités hydrauliques  $K(h_0)$  mesurées au potentiel d'infiltration  $h_0$  (équivalent au rayon de pore  $r_{\text{éq}}$ ) et valeurs des paramètres associés  $\alpha$ ,  $\lambda_c$  et  $\lambda_m$  pour chacun des 3 compartiments de la couche travaillée : A. lit de semence. B. labour non repris sous le passage de roue. C. et D. labour non repris entre les passages de roues. Les valeurs de  $K(h_0)$  et  $\lambda_m$  sont accompagnées de leur erreur de mesure absolue. Les valeurs de  $\lambda_m$  encadrées en pointillés à l'intérieur de chaque tableau ne sont pas différentes les unes des autres, compte tenu des erreurs de mesure.

**Table 1** - Hydraulic conductivities  $K(h_0)$  at potential  $h_0$  (corresponding to the equivalent pore radius  $r_{\text{éq}}$ ) and values of associated parameters  $\alpha$ ,  $\lambda_c$  and  $\lambda_m$  for each of the 3 compartments of the tilled layer : A. seedbed. B. ploughed layer below the wheel track. C. and D. ploughed layer between the wheel tracks.  $K(h_0)$  and  $\lambda_m$  values are accompanied by absolute errors.  $\lambda_m$  values framed by dashed lines inside each table are not different from each other when compared to measurement errors.

A Lit de semence H1						B Passage de roues H5L2					
$r_{\text{éq}}$ (mm)	$h_0$ (cm)	$K(h_0)$ (mm/h)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\lambda_c$ (cm)	$\lambda_m$ (mm)	$r_{\text{éq}}$ (mm)	$h_0$ (cm)	$K(h_0)$ (mm/h)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\lambda_c$ (cm)	$\lambda_m$ (mm)
0,10	-15	1,4 ± 0,3				0,10	-15	1,6 ± 0,4			
0,12	-12,5	2,0 ± 0,5	0,14	7,3	0,10 ± 0,02	0,12	-12,5	2,1 ± 0,6	0,10	9,9	0,07 ± 0,02
0,15	-10	3,2 ± 0,6				0,15	-10	3,2 ± 0,7			
0,17	-8,5	4,9 ± 1,3	0,20	4,9	0,15 ± 0,04	0,19	-8	5,2 ± 1,4	0,16	6,1	0,12 ± 0,03
0,21	-7	8,1 ± 1,5				0,25	-6	5,9 ± 1,7			
0,30	-5	23 ± 4	0,42	2,4	0,31 ± 0,03	0,33	-4,5	5,4 ± 2,9	0,09	11,0	0,07 ± 0,04
0,50	-3	58 ± 8				0,50	-3	9,0 ± 3,0			
0,74	-2	124 ± 24	0,68	1,5	0,51 ± 0,06	0,74	-2	15 ± 5	0,23	4,3	0,17 ± 0,05
1,5	-1	207 ± 55				1,5	-1	29 ± 7			
3,0	-0,5	193 ± 105	0,28	3,6	0,21 ± 0,11	3,0	-0,5	158 ± 32	2,76	0,4	2,05 ± 0,31
+ ∞	0	221 ± 135				+ ∞	0	628 ± 146			

C Labour non repris H5L3 - mesure 1						D Labour non repris H5L3 - mesure 2					
$r_{\text{éq}}$ (mm)	$h_0$ (cm)	$K(h_0)$ (mm/h)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\lambda_c$ (cm)	$\lambda_m$ (mm)	$r_{\text{éq}}$ (mm)	$h_0$ (cm)	$K(h_0)$ (mm/h)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\lambda_c$ (cm)	$\lambda_m$ (mm)
0,10	-15	1,4 ± 0,3				0,10	-15	1,4 ± 0,3			
0,12	-12,5	2,1 ± 0,5	0,16	6,10	0,12 ± 0,02	0,12	-12,5	2,0 ± 0,5	0,14	6,95	0,11 ± 0,02
0,15	-10	3,7 ± 0,6				0,15	-10	3,4 ± 0,6			
0,19	-8	7,1 ± 1,4	0,26	3,80	0,20 ± 0,03	0,19	-8	6,4 ± 1,3	0,24	4,15	0,18 ± 0,03
0,25	-6	14,5 ± 2,1				0,25	-6	12,0 ± 1,8			
0,33	-4,5	40,2 ± 6,9	0,57	1,75	0,42 ± 0,04	0,33	-4,5	26,2 ± 4,8	0,43	2,33	0,32 ± 0,04
0,50	-3	97,0 ± 15,8				0,50	-3	47,6 ± 10,8			
0,59	-2,5	138 ± 40	0,66	1,52	0,49 ± 0,13	0,59	-2,5	54,2 ± 24,2	0,35	2,85	0,26 ± 0,13
0,74	-2	187 ± 41				0,74	-2	72,7 ± 20,8			
1,0	-1,5	243 ± 77	0,57	1,76	0,42 ± 0,12	1,0	-1,5	109 ± 33	0,61	1,65	0,45 ± 0,12
1,5	-1	321 ± 74				1,5	-1	153 ± 33			
3,0	-0,5	422 ± 136	0,56	1,80	0,41 ± 0,12	3,0	-0,5	225 ± 63	0,72	1,38	0,54 ± 0,12
+ ∞	0	557 ± 212				+ ∞	0	324 ± 107			

**Figure 4** - Relations conductivité hydraulique – potentiel de l'eau  $K(h)$  issues des 4 mesures multipotentiels.**Figure 4** -  $K(h)$  hydraulic conductivity – water potential relationships plotted from the 4 multipotential measurements.

férence entre les 2 mesures provient de l'emplacement de l'infiltromètre au sein de ce compartiment : dans un cas, l'appareil était placé au-dessus d'un bloc tassé (mesure 2) ; dans l'autre (mesure 1), il était situé soit à cheval sur deux blocs tassés, soit au-dessus d'une zone constituée de mottes poreuses et/ou de terre fine. La conductivité mesurée dans le lit de semence présente des valeurs intermédiaires entre celles mesurées dans le compartiment H5L3.

### Interprétation des variations du paramètre $\lambda_m$

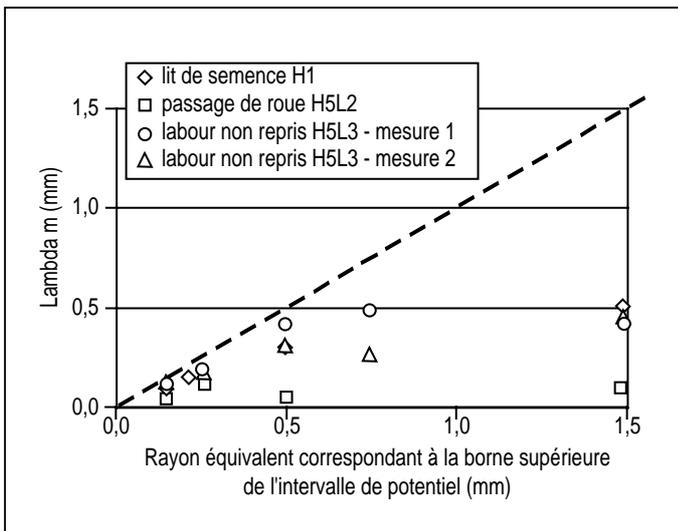
(tableau 1)

Le paramètre  $\lambda_m$ , calculé à partir de  $\alpha$  pour chaque intervalle de potentiel, permet d'établir un ordre de grandeur de la taille moyenne des pores assurant l'essentiel du flux d'infiltration. La comparaison de  $\lambda_m$  avec la gamme de rayon équivalent ( $r_{\text{éq}}$ ) correspondant à l'intervalle de potentiel dans lequel  $\alpha$  a été calculé permet de juger de la cohérence de la méthode et d'affiner l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la macroporosité. Tout d'abord, la cohérence des données obtenues par l'infiltromètre peut être jugée au fait que le paramètre  $\lambda_m$  n'est jamais supérieur au  $r_{\text{éq}}$  de la borne supérieure de l'intervalle de potentiel pour lequel il a été calculé. Par exemple, dans le cas du lit de

semence (tableau 1A), la première valeur de  $\lambda_m$ , 0,10 mm, est inférieure au  $r_{\text{éq}}$  (0,15 mm) correspondant à la borne - 10 cm de l'intervalle de potentiel [- 15 ; - 10 cm]. Le fait que cette observation soit systématiquement vérifiée (figure 5) confirme la fiabilité des données obtenues. D'autre part, on remarque que  $\lambda_m$  est quelquefois inférieur au  $r_{\text{éq}}$  à la borne inférieure de l'intervalle de potentiel (tableau 1). C'est le cas dans l'intervalle de potentiel [- 1 ; 0 cm] pour le lit de semence, [- 15 ; - 1 cm] pour le passage de roue et [- 3 ; 0 cm] pour le labour non repris. Cette observation s'explique par le fait que le sol a peu ou pas de pores fonctionnels dans ces gammes de potentiel. Par exemple, le sol situé sous le passage de roue n'a que peu de pores dans la gamme de  $r_{\text{éq}}$  [0,10 ; 1,5 mm] (tableau 1B), puisque l'essentiel du transport de l'eau est assuré, dans la gamme de potentiel où ces pores peuvent être fonctionnels ([- 15 ; - 1 cm]), par des pores dont le  $r_{\text{éq}}$  est, en moyenne, de 0,11 mm (moyenne des valeurs de  $\lambda_m$  : 0,07 ; 0,12 ; 0,07 et 0,17). Même si le sol contient quelques pores dans la gamme [0,10 ; 1,5 mm], ceux-ci ne sont pas assez nombreux, au regard de la précision des mesures, pour dominer les pores de plus petite taille du point de vue de la quantité d'eau transportée. La faible valeur de  $\lambda_m$  jusqu'au potentiel - 1 cm montre que le sol a subi une compaction conduisant à la disparition d'une grande partie de la macroporosité

**Figure 5** - Comparaison des valeurs du paramètre  $\lambda_m$  avec celles du rayon équivalent  $r_{eq}$  correspondant à la borne supérieure de l'intervalle de potentiel dans lequel  $\lambda_m$  a été calculé.

**Figure 5** - Comparison between the  $\lambda_m$  values and the equivalent radius  $r_{eq}$  corresponding to the upper bound of the potential interval within which  $\lambda_m$  was calculated.



fonctionnelle dans la gamme de  $r_{eq}$  [0,10; 1,5 mm]. La forte valeur de  $\lambda_m$  au voisinage immédiat de la saturation ( $h_0 > -1$  cm, soit  $r_{eq} > 1,5$  mm) peut être attribuée au développement des fentes de retrait millimétriques, observées sur le terrain, dans ce compartiment tassé. Cette fissuration expliquerait ainsi que ce compartiment ait la conductivité hydraulique à saturation la plus élevée parmi les 4 compartiments étudiés.

La figure 4 montre que, dans le lit de semence,  $K(h)$  reste stable dans la gamme de potentiel [-1 cm; 0 cm]. Dans cette gamme de potentiel, on observe également une diminution de  $\lambda_m$  (tableau 1A). Une telle diminution de  $\lambda_m$  est surprenante: lorsque l'on accroît  $h_0$ , des pores de plus grande taille devraient être mis en fonctionnement et donc  $\lambda_m$  augmenter, ou rester stable si de tels pores n'existent pas dans le volume de sol étudié. Une telle diminution ne peut donc s'expliquer qu'en faisant l'hypothèse d'une déformation de la porosité. L'effondrement du lit de semence à l'humectation a effectivement été constaté sur le terrain, conduisant à un affaissement de la surface du sol de 2 à 3 mm sous le poids de l'infiltromètre. Lorsque le sol étudié présente un fort risque d'effondrement à l'humectation, il serait préférable d'utiliser un infiltromètre dont le disque soit séparé de l'ensemble constitué par le réservoir d'alimentation et le vase de Mariotte, ce qui permettrait de diminuer la contrainte mécanique exercée par le poids de l'infiltromètre sur la surface du sol.

Dans les autres cas où l'on a observé une diminution de  $\lambda_m$  avec  $h_0$  (H5L2 entre -6 et -3 cm, H5L3/mesure1 entre -2 et 0 cm, H5L3/mesure 2 entre -3 et -2 cm), cette diminution est demeurée inférieure à l'erreur de mesure sur le paramètre  $\lambda_m$  (tableau 1, et calcul en Annexe). Dans ces

situations, on peut donc estimer que  $\lambda_m$  est resté stable, ce qui indique la quasi inexistence de porosité fonctionnelle correspondant aux intervalles de potentiel concernés. Les valeurs de  $\lambda_m$  qui ne sont pas différentes les unes des autres, compte tenu des incertitudes de mesure, sont encadrées par des pointillés dans les tableaux 1A à 1D. Par exemple, on peut considérer que le volume de sol correspondant à la mesure 1 dans le compartiment H5L3 (tableau 1C) n'a pratiquement pas de porosité fonctionnelle de rayon équivalent  $> 0,5$  mm, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'un infiltromètre positionné au dessus d'un bloc tassé de ce compartiment. En revanche, on observe que le volume de sol concerné par la mesure 2 effectuée dans le compartiment H5L3 (tableau 1D) présente une porosité fonctionnelle dont le rayon équivalent est compris entre 0,74 et 1,5 mm (accroissement de  $\lambda_m$  entre -2 et -1 cm de potentiel). Ceci est cohérent avec l'hypothèse d'un infiltromètre positionné à cheval sur 2 blocs tassés ou au dessus d'une zone constituée de terre fine et/ou de mottes ayant une forte porosité structurale.

Il est frappant de constater, en ce qui concerne les valeurs de  $\lambda_m$ , l'analogie entre l'effet du compactage et celui du remaniement du sol tel qu'il est pratiqué au laboratoire. White et Sully (1987) ont comparé des valeurs de  $\lambda_m$  mesurées *in situ* avec celles mesurées sur échantillons remaniés au laboratoire (voir leur tableau 4). Dans le cas des sols remaniés,  $\lambda_m$  (à -1 cm de potentiel) varie entre 27 et 116  $\mu\text{m}$  (5 valeurs, moyenne: 56  $\mu\text{m}$ ), ce qui est proche des valeurs que nous avons trouvées sous les passages de roue (71 à 120  $\mu\text{m}$ , moyenne: 86  $\mu\text{m}$ ; tableau 1B) lorsque les fissures ne sont pas fonctionnelles. Dans le cas des sols non perturbés, White et Sully (1987) obtiennent des valeurs de  $\lambda_m$  comprises entre 120 et 370  $\mu\text{m}$  (4 valeurs, moyenne: 220  $\mu\text{m}$ ) pour des potentiels variant de -3 à -1 cm, ce qui est proche des valeurs que nous avons mesurées en dehors des passages de roue (260 à 490  $\mu\text{m}$ , moyenne: 405  $\mu\text{m}$ ; tableau 1C et 1D). L'analyse du paramètre  $\lambda_m$  issu des mesures d'infiltration permet donc de rapprocher le phénomène de compaction et le remaniement d'échantillons qui tous deux contribuent à l'élimination de l'espace poral structural du sol.

## CONCLUSIONS

1. Les observations effectuées sur notre cas d'étude montrent que les différents types de structures identifiées *in situ* à partir de traits morphologiques se caractérisent par des comportements différents vis-à-vis de l'infiltration, que nous avons pu mettre en évidence avec l'infil-

trométrie à disque. Ils confortent donc l'idée qu'une stratification des mesures est un préalable indispensable à l'étude expérimentale de l'infiltration dans les couches de sol travaillées. Ces premiers résultats devraient cependant être confirmés par un dispositif expérimental incluant des répétitions des mesures infiltrométriques au sein de chaque compartiment.

2. Ces premiers résultats suggèrent également que le travail du sol et le compactage dû au roulage des engins agricoles n'ont affecté significativement, dans les conditions dans lesquelles cette étude a été mise en place, que la porosité de  $r_{\text{eq}} \geq 0,25$  mm. Le fait que cette fraction de la porosité soit visible à l'œil nu justifie *a posteriori* la pertinence de la description morphologique de la structure de la couche de sol travaillée proposée par Manichon (1987). Nos résultats suggèrent également que le climat, induisant des fentes de retrait dans les zones fortement tassées, peut avoir un effet important sur la conductivité hydraulique de la couche de sol travaillée.

3. L'infiltromètre à disques a permis de mettre en évidence des différences de conductivité hydraulique au sein du compartiment non roulé situé sous le lit de semence. Dans la mesure où ce compartiment occupe souvent une part importante du volume de l'horizon travaillé, l'analyse de la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique au sein de ce compartiment devra faire l'objet d'études plus poussées. En particulier, nous envisageons de caractériser  $K(h)$  sur un dispositif expérimental semblable à celui ci en multipliant les observations dans le sens du travail du sol.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient J. Troizier et son équipe pour la mise à disposition de la parcelle expérimentale et pour la réalisation des travaux culturaux. Ce travail a été financé par la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., Horton R., 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 467-470.
- Ankeny M.D., Kaspar T.C., Horton R., 1990 - Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 837-840.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques : aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7(1), 7-24.
- FAO, 1974 - Légende de la carte des sols du monde au 1/5.000.000. Unesco, Paris.
- 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, 228-232.
- Jarvis N.J., Messing I., 1995 - Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 27-34.
- Logsdon S.D., Jaynes D.B., 1993 - Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1426-1431.
- Manichon H., 1987 - Observation de l'état structural et mise en évidence d'effet de compactage des horizons travaillés. In : *Soil compaction and regeneration*, Monnier, G., Goss, M.J., (Ed.) - Balkema, Rotterdam/Boston, pp 39-52.
- Perron K.M., White I., 1988 - Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1205-1215.
- Pullan A.J., 1990 - The quasilinear approximation for unsaturated porous media flow. *Water Resour. Res.*, 26 (6), 1219-1234.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., 1991 - Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 633-639.
- Richard G., Sillon J.F., Marloie O., 1997 - Effect of soil tillage on the hydraulic properties of tilled layers: Consequence for pedotransfer functions. In: *The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Proceedings of the second workshop*, INRA Orléans (France), 10-12/10/1996, A. Bruand, O. Duval, H. Wösten, A. Lilly (Ed.), ESB - INRA, Orléans, pp. 97-103.
- Roger-Estrade J., 1995 - Modélisation de l'évolution de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture. Thèse INAPG. 186 p. + annexes.
- Roger-Estrade J., Manichon H., 1998 - Modélisation de la Ap layer structure: contribution to the analysis of long term effects of cropping systems on soil structure. In: *Actes du 16ème congrès mondiale de Science du Sol*, Montpellier, France, 20-26/08/1998. 8 p.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Boiffin J., Caneill J., 2000 - Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *Europ. J. Soil Sci.*, 51, 455-474.
- Quadri M.B., 1993 - L'infiltrométrie multi-disques pour la caractérisation hydrodispersive des sols non saturés: modélisation des transferts et applications. Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier - Grenoble I, LTHE, Grenoble, 226 p.
- Vandervaere J.P., 1995 - Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier - Grenoble I, LTHE, Grenoble, 329 p.
- Vauclin M., Chopart J.L., 1992 - L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale*, 46 (4), 259-271.
- White I., Sully M.J., 1987 - Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.*, 23, 1514-1522.
- Wooding R.A., 1968 - Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.*, 4, 1259-1273.

## Annexe : calculs d'erreur

### Erreur sur l'estimation de K

Pour 2 couples de mesure  $(h_1, q_{\infty}(h_1))$  et  $(h_2, q_{\infty}(h_2))$ , on peut obtenir les valeurs des paramètres  $K_{1,2}$  et  $\alpha_{1,2}$  en résolvant le système d'équations (9). Cela permet de calculer 2 valeurs de K:  $K(h_1)$ , estimation à la borne inférieure de l'intervalle de potentiel, et  $K(h_2)$ , estimation à la borne supérieure. Dans ce qui suit, on utilise les notations simplifiées suivantes:  $q_1 = q_{\infty}(h_1)$ ,  $q_2 = q_{\infty}(h_2)$ ,  $\alpha = \alpha_{1,2}$ ,  $K_1 = K(h_1)$ ,  $K_2 = K(h_2)$  et  $K_m = K(h_m)$ .

D'autre part, on assimile l'erreur absolue sur chaque variable à son écart-type d'estimation :  $\Delta X = \hat{\sigma}(X)$

#### Estimation à la borne inférieure :

$$K_1 = \frac{q_1}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}}$$

On obtient :

$$\left(\frac{\Delta K_1}{K_1}\right)^2 = \left[1 + \frac{1 - K_1/q_1}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_1}{q_1}\right]^2 + \left[\frac{1 - K_1/q_1}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_2}{q_2}\right]^2 + \left[1 - \frac{K_1}{q_1}\right]^2 \left[\frac{\Delta r}{r}\right]^2 + \left[\frac{1 - K_1/q_1}{(h_1 - h_2)}\right]^2 (\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2) \quad (A1).$$

#### Estimation à la borne supérieure :

$$K_2 = \frac{q_2}{1 + \frac{4}{\pi r \alpha}}$$

On obtient :

$$\left(\frac{\Delta K_2}{K_2}\right)^2 = \left[\frac{1 - K_2/q_2}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_1}{q_1}\right]^2 + \left[1 - \frac{K_2/q_2}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_2}{q_2}\right]^2 + \left[1 - \frac{K_2}{q_2}\right]^2 \left[\frac{\Delta r}{r}\right]^2 + \left[\frac{1 - K_2/q_2}{(h_1 - h_2)}\right]^2 (\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2) \quad (A2).$$

On remarque que seuls les termes dépendant des flux d'infiltration  $q_1$  et  $q_2$  sont différents puisque

$$\frac{K_1}{q_1} = \frac{K_2}{q_2} \quad (A3).$$

#### Estimation au centre (méthode de Reynolds et Elrick) :

$$K_m = \frac{K_1}{\exp(\alpha h_1)} \exp\left[\alpha \left[\frac{h_1 + h_2}{2}\right]\right] = \frac{K_2}{\exp(\alpha h_2)} \exp\left[\alpha \left[\frac{h_1 - h_2}{2}\right]\right]$$

On obtient :

$$\left(\frac{\Delta K_m}{K_m}\right)^2 = \left[\frac{1}{2} + \frac{1 - K_1/q_1}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_1}{q_1}\right]^2 + \left[\frac{1}{2} - \frac{1 - K_1/q_1}{\alpha(h_1 - h_2)}\right]^2 \left[\frac{\Delta q_2}{q_2}\right]^2 + \left[1 - \frac{K_1}{q_1}\right]^2 \left[\frac{\Delta r}{r}\right]^2 + \left[\frac{1 - K_1/q_1}{(h_1 - h_2)}\right]^2 (\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2) \quad (A4).$$

**Moyenne des estimations à gauche et à droite (méthode de Ankeny et al.):**

$$\bar{K} = \frac{K_2 + K_1}{2}$$

On a simplement:

$$(\Delta \bar{K})^2 = \frac{(\Delta K_1)^2 + (\Delta K_2)^2}{4} \quad (\text{A5}).$$

### Erreurs sur les estimations de $\alpha$ , $\lambda_c$ et $\lambda_m$

En utilisant les notations simplifiées définies précédemment et en considérant  $\sigma$ ,  $\rho_w$  et  $g$  comme des constantes connues avec une grande précision, on obtient:

$$\left(\frac{\Delta \lambda_m}{\lambda_m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \lambda_c}{\lambda_c}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 = \frac{1}{(\ln q_1 - \ln q_2)^2} \left[ \left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)^2 \right] + \frac{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2}{(h_1 - h_2)^2} \quad (\text{A6}).$$

