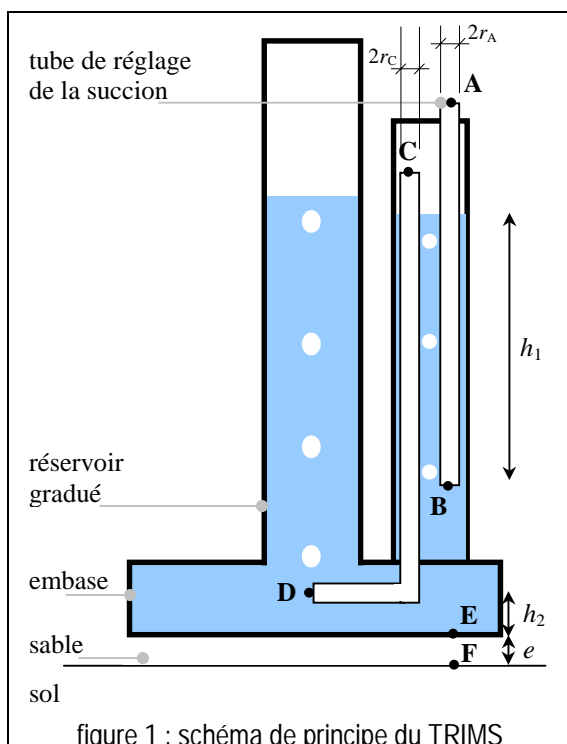


Conductivité Hydraulique Proche de la Saturation par la méthode de l'infiltromètre à disque sous succion (Hydraulic conductivity near saturation).

La courbe de conductivité hydraulique proche de la saturation est un paramètre important pour prédire les mouvements de l'eau dans le sol. Cette courbe peut être déterminée avec la méthode décrite ici lorsque le sol est homogène horizontalement et verticalement en terme d'humidité et de densité, et que les conditions d'applications de la loi de Darcy sont satisfaites.

Introduction :

La formation du ruissellement dépend en premier lieu de la capacité d'infiltration des premiers centimètres de sol au voisinage immédiat de la saturation (quelques mbar de succion). L'infiltromètre à succion multidisques (TRIMS) permet d'accéder à la courbe de conductivité et à la sorptivité des premiers cm de sol. Le principe de la méthode est décrit ci-dessous.



Le principe est d'apporter de l'eau à la surface du sol sous une succion contrôlée. Typiquement, la gamme des potentiels utilisés varie de -15 cm d'eau (-15 mbar) à 0 cm, soit la saturation. Le schéma du TRIMS est donné en figure 1.

L'opérateur enregistre les variations au cours du temps du niveau d'eau dans le réservoir (voir fig. 1). Ces variations sont converties en variations de volumes (connaissant la section intérieure du réservoir) puis en hauteur d'eau infiltrée (connaissant la section de l'embase). L'obtention de la courbe de conductivité et de la sorptivité se fait à partir de l'examen de la hauteur d'eau infiltrée au cours du temps. Des équations et des méthodes de résolutions différentes peuvent être trouvées dans la littérature (voir thèse de Vandervaere, 1995) suivant que l'on considère le "début" de l'infiltration (régime transitoire) ou la fin de l'infiltration lorsque le régime permanent est supposé être atteint. En pratique, le régime permanent n'est jamais atteint et les auteurs parlent de régime pseudo-permanent. Dans la suite, nous utiliserons les équations développées par Haverkamp et al. (1994) et les méthodes de résolutions proposées dans la synthèse de Zaremba (1996) adaptées à l'interprétation des données acquises lors du régime transitoire. En annexe, on trouvera les méthodes possibles si on souhaite utiliser le régime permanent.

Théorie :

• Equation d'infiltration :

On note I_{3d} la quantité d'eau cumulée (en mm) qui s'est infiltrée dans le sol. Cette quantité évolue en fonction du temps t suivant la relation (Haverkamp et al., 1994) :

$$I_{3d} = S \cdot \sqrt{t} + (A + B) \cdot t \quad [1]$$

avec :

$$A = \left(\frac{2 - \beta}{3} \right) \cdot K(h_0) \quad [2]$$

$$B = \frac{\gamma \cdot S^2(h_i, h_0)}{r \cdot (\theta(h_0) - \theta(h_i))} \quad [3]$$

où β est une constante et vaut approximativement 0.6, γ prend la valeur 0.75, K est la conductivité du sol, h_0 est le potentiel hydrique appliqué par l'intermédiaire du TRIMS, h_i est le potentiel initial du sol, θ est la teneur en eau et S est la sorptivité. Cette équation suppose que $K(h_i) \ll K(h_0)$, et donc que le sol est initialement "suffisamment sec".

- Calcul du potentiel appliqué h_0 :

Le potentiel h_0 est calculé en supposant que l'équilibre hydrostatique est réalisé entre les différents points marqués sur la fig. 1.

Si on néglige les phénomènes de tension superficielle, la pression en A est égale à la pression en B, et les pressions en C et D sont identiques. Dans ce cas, on a :

$$h_0 = e + h_2 - h_1 \quad [4]$$

Dans cette relation h_2 est fixe et invariable, e est égale à l'épaisseur de la couche de sable et h_1 peut être ajusté par l'opérateur par l'intermédiaire du tube de réglage de la succion.

Si on prend en compte les phénomènes de tension superficielle, la relation [3] devient, en considérant un angle de contact eau-verre de 0 rad :

$$h_0 = e + h_2 - h_1 - \frac{2 \cdot \sigma}{\rho_w \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_C} \right) \quad [5]$$

où g est la gravité, ρ_w est la masse volumique de l'eau et σ la tension superficielle. A 20 °C, σ vaut $72.75 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ (*Handbook of Chemistry*, ed. de 1996). Pour un rayon de 2 mm, la correction apportée par l'effet capillaire est de 1.5 cm.

Matériel et Méthodes:

- **Matériel :**

Le TRIMS est rempli d'eau dégazée. Une membrane souple est installée sous l'embase et est retenue par un joint torique. Cette installation se fait sous l'eau afin de ne pas emprisonner de bulles d'air entre l'embase et cette membrane.

Une couche peu épaisse de sable fin est épanchée à la surface du sol sur une section égale exactement à la section de l'embase (utilisation

d'un gabarit) : elle a pour but d'améliorer le contact entre l'embase et le sol. Les petites fissures doivent être préalablement bouchées ou isolées afin de ne pas les remplir de sable, ce qui augmenterait artificiellement la surface de contact alimentée en eau.

Le TRIMS est posé délicatement et parfaitement vertical (on peut utiliser un guide vertical et une crémaillère : voir fig. 2) à la surface de cette couche de sable : le chronomètre est déclenché à cet instant. L'opérateur enregistre alors l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir au cours du temps en enregistrant les temps de passage du ménisque devant les graduations du réservoir. L'expérience est arrêtée lorsque le régime pseudo-permanent semble s'être installé, ce qui peut prendre de 30 mn à plusieurs heures. On a ainsi obtenu la courbe expérimentale correspondant à l'eq. [1].

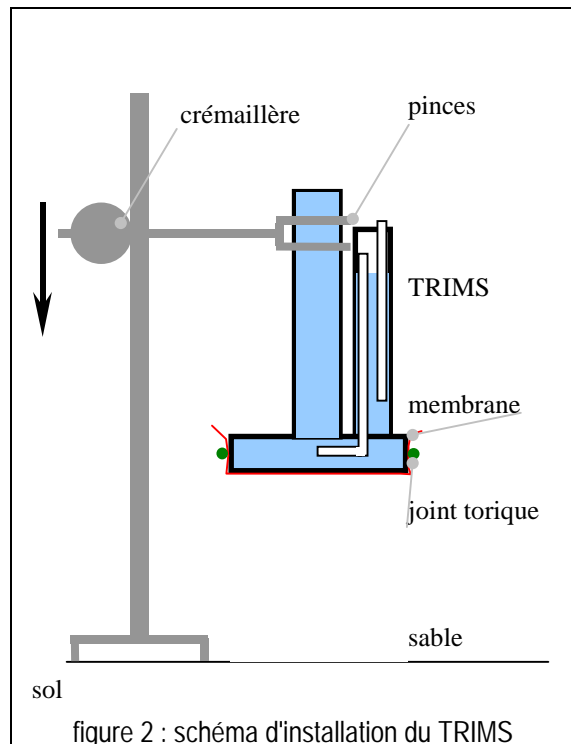


figure 2 : schéma d'installation du TRIMS

Des profils de teneur en eau initiale doivent être effectués à proximité de la zone de mesure sur les vingt premiers cm. Ces prélèvements devant permettre de définir la teneur en eau volumique initiale, il faut faire des prélèvements permettant le calcul de la teneur en eau pondérale mais également de la densité apparente (voir fiches protocoles correspondantes).

A la fin de l'expérience, on reporte sur un transparent la forme horizontale de la couche de sable, ce qui permettra de calculer précisément

l'aire du contact sable-sol, et on effectue également un profil de teneur en eau sur les 20 premiers cm.

• **Méthodes de résolution :**

Ces méthodes utilisent le régime transitoire d'infiltration durant lequel les hypothèses d'homogénéité ont le plus de chance d'être respectées.

Méthode "mono-test transitoire"

Le calcul de $K(h)$ ne se fait pas directement à partir de [1]. En dérivant [1] par rapport à \sqrt{t} , on obtient :

$$\frac{dI_{3d}}{d\sqrt{t}} = S + 2 \cdot (A + B) \cdot \sqrt{t} \quad [6]$$

L'évaluation du terme de gauche dans [6] se fait expérimentalement à partir de la variation de hauteur d'eau dans le réservoir entre 2 mesures successives. On trace ensuite la relation expérimentale :

$$\frac{\Delta I_{3d}}{\Delta\sqrt{t}} = f(\sqrt{t}) \quad [7]$$

Les coefficients de la régression linéaire entre $\frac{\Delta I_{3d}}{\Delta\sqrt{t}}$ et \sqrt{t} donneront directement S (ordonnée à l'origine) et la quantité $2(A+B)$ (la pente). La relation [3] permet de calculer B à partir de S , et donc la quantité A . Finalement, la conductivité $K(h)$ est estimée à partir de [2].

Méthode "multi-rayon transitoire"

On procède initialement comme précédemment en traçant la relation [7]. D'après la relation [2], A ne dépend que de la succion appliquée, alors que B dépend également du rayon de l'embase. La méthode consiste donc à faire plusieurs expériences avec des embases de rayons différents.

Notons p_i la pente obtenue à partir de la régression effectuée sur la relation [7] durant l'expérience i avec l'embase de rayon r_i . On a :

$$p_i = 2 \cdot (A + B_i) \quad [8]$$

Si l'on dispose de 2 embases de rayon r_1 et r_2 , l'introduction de [3] dans [8] donne :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot p_1 - r_2 \cdot p_2}{r_1 - r_2} \quad [9]$$

$$S = \sqrt{\frac{\theta(h_0) - \theta(h_i)}{\gamma} \cdot \frac{p_1 - p_2}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}} \quad [10]$$

Si on dispose d'au moins trois rayons différents, il suffit de tracer p_i en fonction de $\frac{1}{r_i}$: l'ordonnée

à l'origine de la régression effectuée sur ces données fournira directement la quantité $2A$, la pente fournira la quantité $\frac{2 \cdot \gamma \cdot S^2}{\theta(h_0) - \theta(h_i)}$.

Ces expériences se font obligatoirement à des emplacements différents, ce qui pose le problème de la non-prise en compte de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques du sol.

Résultats :

Des exemples de résultats sont présentés sur les figures 3 et 4. Ces résultats ont été obtenus sur le domaine expérimental INRA des Vignères (84) sur un sol avec une forte proportion d'argile gonflante.

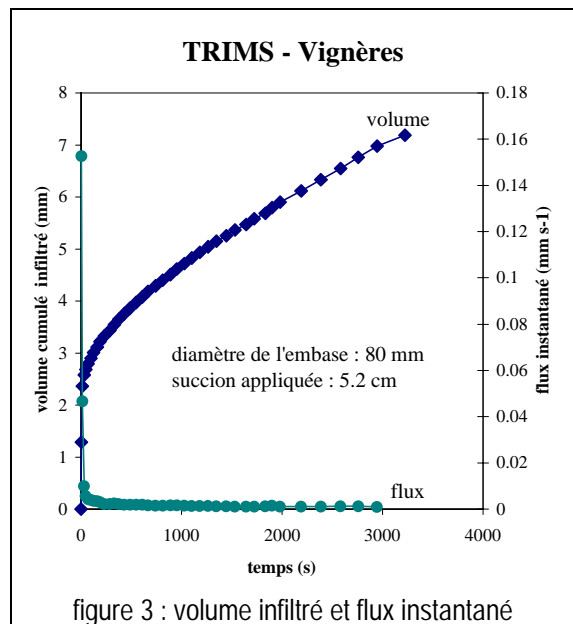
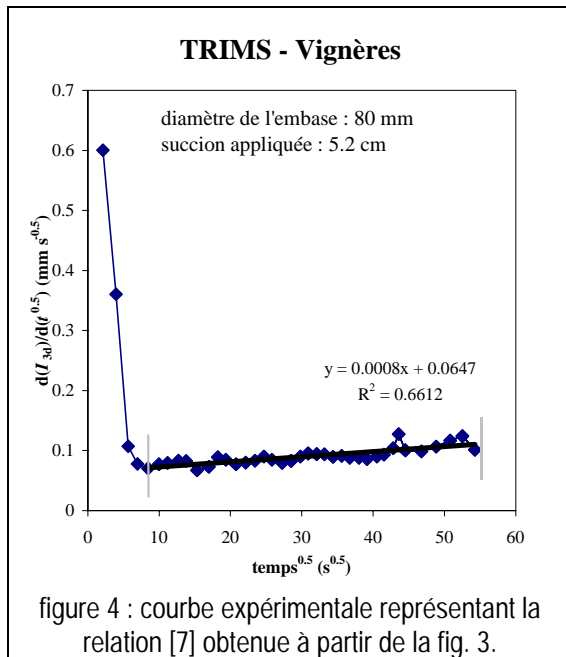


figure 3 : volume infiltré et flux instantané



Conclusions :

La méthode est très sensible aux conditions expérimentales, mais également à la méthode utilisée pour le calcul de la conductivité hydraulique. D'autres méthodes peuvent s'appliquer si on raisonne sur le régime pseudo-permanent : le lecteur est renvoyé à la lecture de la thèse de Vandervaere (1995) pour plus de détails.

L'étude de Zaremba (1996) a montré que le contact embase-sable doit être de bonne qualité et que la présence de bulles d'air piégées entre la membrane et la couche de sable conduit à des estimations aberrantes de la sorptivité et de la conductivité. Ces deux points doivent donc être particulièrement soignés lors de l'utilisation au champ du TRIMS.

Références :

- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J. and Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc-infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30, 2931-2935.
- 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 de l'Université Joseph Fourier de Grenoble - INPG, 329 p.

Zaremba, G., 1996. Etude critique de la mesure de l'infiltration sous succion avec un infiltromètre à disques. Rapport de DEA, Université Montpellier II, 61 p.

Annexe(régime permanent) :

Le flux d'infiltration à travers une surface circulaire de rayon r , alimentée en eau sous une succion h_0 tend vers un régime permanent q_0^∞ :

$$q_0^\infty = K(h_0) + \frac{4 \cdot \Phi}{\pi \cdot r} \quad [A1]$$

où Φ est le potentiel de flux matriciel défini par :

$$\Phi = \int_{h_i}^{h_0} K(h) dh \quad [A2]$$

Suivant la méthode de résolution utilisée, on suppose que la conductivité et le potentiel sont liés par une relation exponentielle :

$$K(h) = K_{sat} \cdot e^{\alpha \cdot h} \quad [A3]$$

L'équation de Wooding [A1] s'écrit alors :

$$q_0^\infty = K(h_0) + \frac{4 \cdot b \cdot S^2(h_0, h_i)}{\pi \cdot r \cdot (\theta(h_0) - \theta(h_i))} \quad [A4]$$

avec $b=0.55$ et :

$$\Phi = \frac{b \cdot S^2}{\theta_0 - \theta_i} \quad [A5]$$

Méthode de résolution multi-rayons permanent

On utilise l'équation [A1] pour plusieurs rayons : le flux permanent dépend du rayon, alors que la conductivité en est indépendante ainsi que le potentiel de flux matriciel. Si on utilise au moins 3 rayons différents (donc à trois endroits différents), on peut tracer la courbe :

$$q_0^\infty(r) = f\left(\frac{1}{r}\right)$$

L'ordonnée à l'origine de la régression linéaire effectuée sur cette courbe donne $K(h_0)$, et la

pente donne la quantité $\frac{4 \cdot \Phi}{\pi}$.

Si on utilise seulement 2 rayons, on fait un calcul direct et on obtient :

$$K(h_0) = \frac{q_0^{\infty, r_1} \cdot r_1 - q_0^{\infty, r_2} \cdot r_2}{r_1 - r_2}$$

$$\Phi(h_0, h_i) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_0^{\infty, r_1} - q_0^{\infty, r_2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

***Méthode de résolution multi-potentiels
permanent***

La combinaison de [A1], [A2] et [A3] donne, en négligeant la conductivité initiale par rapport à la conductivité finale :

$$q_0^{\infty} = K_{sat} \cdot e^{\alpha \cdot h_0} \cdot \left(1 + \frac{4}{\pi \cdot \alpha \cdot r} \right)$$

K_{sat} et α étant inconnus. On fait plusieurs expériences avec des valeurs croissantes de h_0 , et on trace la courbe :

$$\ln(q_h^{\infty}) = f(h)$$

La valeur de la pente fournit α , l'ordonnée à l'origine fournit K_{sat} .

La courbe obtenue est rarement une droite car l'équation [A3] est rarement vérifiée : α dépend de h .

Stéphane RUY, juillet 1999