

Mise au point de sondes de mesure de conductivité électrique pour l'estimation des transferts de solutés en milieux poreux variablement saturés

Thais PARIS, Cédric CHAUMONT, Cyril KAO, Julien TOURNEBIZE

Cemagref, Unité de Recherche « Ouvrages pour le drainage et l'étanchéité », Parc de Tourvoie BP 44, 92163 Antony, thais.paris@cemagref.fr

Abstract

Electrical conductivity probes (4-electrodes Wenner array system) have been designed and constructed in order to evaluate the spatial distribution of solute leaching into soils.

Experimental studies have been carried out to investigate the volume of sampled soil of these probes. The probes have also been successfully used to monitor changes in electrical conductivity at various depths in a soil column following application of a tracer pulse (CaCl_2) during a leaching study. The measured breakthrough curves have confirmed the good accuracy of this measurement technique.

Introduction

L'étude des courbes d'éluion en sortie de systèmes expérimentaux, tels que des modèles physiques de sols, obtenues par traçage chimique ou isotopique, est couramment utilisée afin d'identifier les mécanismes responsables du transfert de solutés dans les milieux poreux naturels. En particulier, ce type d'expérimentation permet d'estimer les paramètres hydro-dispersifs du milieu en question dont la connaissance est nécessaire à tout effort de modélisation de ces processus.

Dans ce contexte, et pour des raisons pratiques, l'évolution des concentrations n'est en général mesurée qu'en sortie de système. Une connaissance de l'évolution temporelle des concentrations "dans" les milieux poreux est un moyen d'améliorer par la mesure la compréhension fine des mécanismes mis en jeu. Les techniques traditionnelles fondées sur un prélèvement de la solution du sol (par micro-bougies poreuses en dépression par exemple) impliquent un certain nombre de contraintes (volume prélevé, temps de prélèvement, fraction porale de l'eau prélevée, représentativité) qui en limitent l'utilisation si on cherche à mesurer le passage rapide d'un front de traceur, de manière répétée dans le temps et l'espace. Dans cet esprit, des sondes de conductivité électrique ont été mises au point dans le but de connaître la répartition spatiale du soluté à l'intérieur d'un massif de sol, par mesure de la résistivité électrique apparente du sol, ρ_a (paramètre sensible et dépendant du sol : structure, état hydrique, ambiance apparente physico-chimique). Ce système de mesure a en particulier l'avantage de ne pas perturber l'écoulement dans le sol contrairement à la méthode

d'extraction de la solution du sol par des bougies poreuses. L'acquisition de la mesure peut de plus se faire sur des pas de temps très courts.

Matériel et méthode

Après une première étude méthodologique et bibliographique, nous avons choisi d'adapter une méthode issue des travaux sur les sondes de conductivité "four-electrode probe" (Rhoades, 1976 ; Huang *et al.*, 1995 ; Bristow *et al.*, 2001 ; Nützmann *et al.*, 2002). Le principe de la mesure est de suivre la résistivité électrique apparente du sol, ρ_a .

Les sondes ont été conçues et élaborées au sein de l'unité de recherche DEAN du Cemagref d'Antony. Chaque sonde présente quatre électrodes équidistantes sur un même axe. Elles sont constituées d'un tube en plexiglas de 8mm de diamètre (pour des contraintes de géométrie adaptée aux traversées de paroi préexistantes sur le modèle physique de sol "MaSHyNS" : Maquette de Simulation Hydraulique des Nappes Superficielles, Kao, 2002). Quatre gorges de 1mm de largeur et 1mm de profondeur ont été alaisées dans le plexiglas pour y couler de l'étain raccordé à 1 fil électrique à l'intérieur du tube. Les bagues sont séparées entre elles de a (=5 mm) par le plexiglas non conducteur (Figure 1). La longueur entre les deux électrodes externes est alors de 19 mm. La température est mesurée par le moyen d'un thermocouple installé à l'intérieur du tube. Ceci permet de faire une correction en température pour normer les conductivités électriques à 25°C. Les sondes sont connectées à une centrale de mesure CR10X (Campbell Scientific Inc, Logan, Utah).



Figure 1 : Photo de la sonde type Wenner.

Le principe de mesure de la configuration présentée ci-dessus consiste à appliquer un courant (I) entre les 2 électrodes extérieures et de mesurer la différence de tension (ΔV) entre les deux électrodes intérieures d'une part et de mesurer la tension aux bornes d'une résistance de référence placée en parallèle d'autre part (Wenner, 1916). La conductivité électrique apparente du sol (EC_a , S/m) est estimée par la relation, :

$$EC_a = \frac{f}{\rho_a} \quad (1)$$

où f est un facteur de correction de température de 25°C [-] et ρ_a est la résistivité électrique apparente ($\Omega \cdot m$) mesurée dans le sol $= (k \cdot \Delta V / I)$ où k est un coefficient géométrique égal à $4\pi a$ (m).

L'étalonnage des sondes a été préalablement réalisé dans des solutions salines. Des relations linéaires pour toutes les gammes de concentration testées ont été obtenues. Une relation linéaire théorique établie par Rhoades *et al.* (1986) a été utilisée afin de relier la mesure de EC_a à la conductivité électrique de l'eau du sol, EC_w :

$$EC_a = \theta_w \cdot \tau \cdot EC_w + EC_s \quad (2)$$

où θ_w est la teneur en eau volumique du sol [-], τ est un facteur de transmission lié à la tortuosité du milieu poreux (≤ 1) [-], EC_w est la conductivité électrique de l'eau du sol en S/m et EC_s est la conductivité électrique apparente de la phase solide (due aux cations échangeables adsorbés aux minéraux argileux) en S/m.

τ et EC_S étant caractéristiques du milieu poreux, ils sont déterminés par calibrage "in situ" lors de l'expérimentation (en régime permanent de concentration du traceur). Des paires de données à deux conductivités électriques différentes nous ont permis de déterminer la pente ($= \tau \cdot \theta_w$) et l'ordonnée à l'origine ($= EC_S$) de la relation 2.

La géométrie particulière du système ne permet pas de déterminer simplement le volume de la mesure. Nous savons que pour la configuration Wenner, la profondeur d'investigation de la mesure est égale à la séparation entre électrodes, a (Rhoades *et al.*, 1971). Le volume de mesure a tout d'abord été estimé qualitativement par différents essais dans des volumes de solution saline et des proximités de parois variables.

Résultats et discussion

Des expériences de traçage mono dimensionnel vertical avec du $CaCl_2$ sur une colonne d'un sol sablo-limoneux ($h=1$ m, $\varnothing=0.15$ m) ont été réalisées à débit constant et pour un apport de traceur sous forme de créneau. Trois sondes ont été testées et insérées à 90, 65 et 35 cm par rapport à la base de la colonne. Le débit et les pressions de l'eau dans le sol ont été mesurés en parallèle. Un conductivimètre standard (WTW) a été placé en série en sortie du système.

Un exemple de courbes d'élution obtenues (trois pour les sondes et une en sortie de système) pour l'expérience de traçage sont représentés dans la figure 2, sous forme adimensionnelle. En abscisse a été présenté le temps cumulé depuis l'injection du traceur (créneau d'une durée de 15h) et en ordonnées la conductivité relative.

Les résultats obtenus sont encourageants. Les courbes d'élutions mesurées aux différentes altitudes dans la colonne présentent une allure cohérente avec la dynamique de transfert attendue du soluté. Les phases de montée et de descente ne semblent pas influencées par l'hétérogénéité que pourrait engendrer la présence d'un front qui perturberait la mesure à l'échelle du volume de mesure des électrodes. Le signal enregistré permet un suivi continu et particulièrement stable du processus de transfert du traceur.

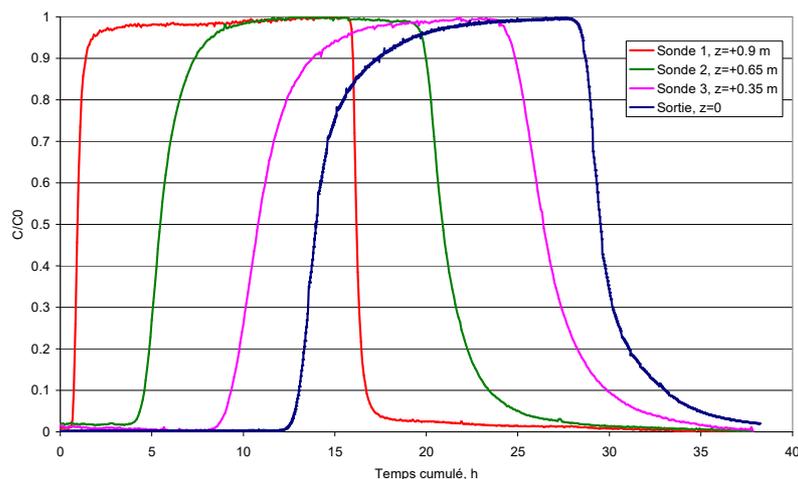


Figure 2 : Courbes d'élution obtenues pour les 3 sondes et le conductivimètre en sortie du système. Durée du créneau injecté en surface du sol : 15 h.

Afin de généraliser ce type de suivi à l'échelle de modèles physiques de laboratoire, plusieurs points restent à approfondir : (1) analyser le comportement géochimique du sol en présence du traceur choisi afin de valider la stratégie d'un suivi de concentration par un suivi de

conductivité électrique du milieu ; (2) réaliser des expérimentations dans des conditions de sols variablement saturés afin d'en évaluer l'influence sur la méthode de suivi ; (3) développer une analyse métrologique adaptée afin de caractériser l'incertitude associée à ce type de mesure.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien du projet "Transferts" de l'Institut Fédératif de Recherche « Environnement et Gestion de l'Espace Régional ». Il a bénéficié des conseils de J.P. Gaudet (LTHE Grenoble), T. Bariac (CNRS, BMC), M. Benedetti (CNRS, Paris VI) et F. Lehmann (IMFS Strasbourg).

Références

- Bristow K.L., Kluitenberg G.J., Goding C.J., Fitzgerald T.S., 2001. A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3), 265-280.
- Huang K., Toride N., Vangenuchten M.T., 1995. Experimental Investigation of Solute Transport in Large, Homogeneous and Heterogeneous, Saturated Soil Columns. *Transport in Porous Media*, 18(3), 283-302.
- Kao C., 2002. Fonctionnement hydraulique des nappes superficielles de fonds de vallées en interaction avec le réseau hydrographique. PhD, ENGREF, Paris, 266 + Annexes pp.
- Nützmann G., Maciejewski S., Joswig K., 2002. Estimation on water saturation dependence of dispersion in unsaturated porous media: experiments and modelling analysis. *Advances in Water Resources*, 25, 565-576.
- Rhoades J.D., 1976. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements. *FAO Soils Bulletin*, 31, 159-186.
- Rhoades J.D., Ingvalson R.D., 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 54-60.
- Rhoades J.D., Oster J.D., 1986. Solute Content. In: A. Klute (Editor), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Am. Soc. of Agronomy, Madison, WI, pp. 985-1006.
- Wenner F., 1916. A method of measuring earth resistivity. *U.S. Dept. Com. Cur. Of Stand. Sci.*, Paper 258.