

Etude hydraulique du prélèvement de la solution du sol par bougie poreuse

BOUARFA S.
ARLOT M.P.
LINARD N.
ZIMMER D. (*)

RÉSUMÉ

L'évolution au cours du temps du volume de solution prélevée par une bougie poreuse ainsi que sa valeur finale sont étudiés dans le cas d'un protocole à dépression décroissante. Une modélisation, fondée sur la loi de Darcy et sur la loi de Boyle-Mariotte, simplifiée par la prise en compte d'une conductance globale sol-bougie indépendante du temps, est réalisée. Les formules développées sont validées expérimentalement sur les résultats d'essais au laboratoire en cuves de sable à des états hydriques différents (Tableau I, Figures 2, 3 et 4).

Le volume final de solution prélevée ne dépend que des conditions aux limites et initiales du système (Figure 1) ; ce volume est sous la dépendance étroite du volume d'air total dans le système et du rapport entre dépression appliquée et pression de la solution du sol. Le temps de prélèvement est fortement sensible à la pression de l'eau du sol ; il varie de manière inversement proportionnelle à la conductance du système sol-bougie. Celle-ci, liée à la conductivité hydraulique du sol (Figure 5), n'est cependant définie analytiquement que lorsque la bougie oppose seule une résistance à l'écoulement (Tableaux II et III, Figure 6).

MOTS-CLÉS : bougie poreuse - échantillonnage - qualité de l'eau - milieu non saturé - modélisation.

THE SAMPLING RATE OF POROUS CUP SAMPLERS : PHYSICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL VALIDATION

Porous cup samplers are widely used in water quality investigations. However the sampling method still suffer from insufficiencies as the major factors controlling the sampling rate are known only on a qualitative basis. Formulae are developed giving both final sampled volume and sampling rate in case of transient state sampling according to the usual method whereby the pressure regularly increases in the cup after an initial depression has been applied. This approach is based on Darcy's and Boyle-Mariotte's laws; it is simplified by taking account of a constant conductance of the soil-cup system. The formulae are validated versus laboratory sand tank experiments at different soil water pressures (Table I, Figures 2, 3 and 4).

The final sampled volume is entirely determined by boundary and initial conditions applied to the system (Figure 1); it is mainly dependent on the total initial air volume of the sampling device and on the ratio of initial depression versus soil water pressure. The sampling rate depends (i) on the boundary - especially on soil water pressure - and initial conditions and (ii) on the conductance of the soil-cup system which is bound to the hydraulic conductivity of the soil (Figure 5). The conductivities and the conductances of the porous cups are defined and measured in appendix (Tables II and III, Figure 6).

KEY-WORDS : porous cup - sampling - water quality - unsaturated zone - modelling.

(*) CEMAGREF, Division Drainage, Parc de Tourvoie, 92185 Antony Cédex.

INTRODUCTION

L'utilisation de bougies poreuses pour prélever la solution du sol est devenue fréquente dans les recherches sur la qualité des eaux et sur l'environnement (ADDISCOTT, 1990). Bien que de mise en oeuvre aisée, cette technique de prélèvement présente des problèmes méthodologiques liés : (1) aux interactions chimiques entre les parois de la céramique poreuse et l'échantillon ; (2) aux conditions de mise en place de la bougie poreuse *in situ*, et (3) à la méconnaissance des aspects hydrauliques du prélèvement.

Les deux premiers aspects ont été déjà largement étudiés. Les interactions chimiques sont essentiellement dues à la libération et la sorption d'ions par les parois de la céramique poreuse, en particulier sur les phosphates (GROVER et LAMBORN, 1970 ; HANSEN et HARRIS, 1975 ; NAGPAL, 1982 ; GROSSMANN & *al.*, 1987). L'utilisation de bougies poreuses pour l'analyse des nitrates de la solution du sol ne semble par contre pas poser de problèmes particuliers (WAGNER, 1962 ; HANSEN et HARRIS, 1975 ; NAGPAL, 1982). Par ailleurs le mode de mise en place des bougies, horizontal ou vertical, dépend principalement des objectifs et des contraintes de l'expérimentation (CHEVERRY, 1983 ; GROSSMANN & *al.*, 1987 ; KONIG et UDLUFT, 1992).

En revanche, la modélisation hydraulique du prélèvement n'a guère été abordée. Or, la connaissance de la dynamique des transferts de la solution vers la bougie est déterminante pour l'élaboration d'un protocole expérimental et pour une bonne mise en oeuvre de la méthode.

Les approches connues ont des bases très différentes. La *sphère d'influence* est définie par WARRICK et AMOOZEGAR-FARD (1977) de manière analytique en régime permanent, son rayon étant le rayon maximal d'interception d'un écoulement gravitaire. MORRISON et LOWERY (1990a) utilisent un traceur qu'ils injectent dans une colonne de sable à différentes distances de la bougie. Le temps de transfert vers la bougie croît selon une fonction puissance de la distance. VAN DEN PLOEG et BEESE (1977) étudient, grâce à une modélisation numérique fondée sur l'équation de Richards, les relations entre taux de prélèvement, dépression appliquée et taux de percolation dans le sol. Les simulations sont conduites en drainage vertical sur colonnes de matériaux sableux ou limoneux, la dépression appliquée dans la bougie étant constante. Même pour des dépressions peu supérieures à celles du sol en place, le taux de prélèvement par les bougies est supérieur au taux de percolation et la *représentativité de l'échantillon* prélevé par rapport à la solution drainée est sujette à caution. Leur étude les conduit à préconiser des bougies de grande taille afin de permettre des prélèvements suffisants sous une faible dépression.

D'autres auteurs s'attachent à l'influence de la *technique de prélèvement*. Dans la technique habituelle, la dépression n'est pas maintenue dans la bougie, mais décroît lors de l'entrée de la solution dans la bougie jusqu'à ce qu'un équilibre avec la pression de l'eau du matériau environnant soit atteint. Les volumes prélevés sont plus faibles avec cette technique qu'avec une dépression constante au cours du prélèvement (NARASIMHAN et DREISS, 1986 ; MORRISON et LOWERY, 1990b), ce qui conduit les premiers auteurs à remettre en question le caractère opérationnel des

résultats antérieurs, obtenus le plus souvent pour des dépressions constantes. Les seconds auteurs, qui basent leur étude sur une analyse statistique, montrent de plus que, en dépression décroissante, les principaux facteurs du temps de prélèvement sont, dans l'ordre, la dépression initiale puis le rayon, la conductance et le volume de la bougie.

L'objet du travail présenté dans cet article est de modéliser la dynamique de prélèvement d'une bougie poreuse dans le cas habituel où la dépression dans la bougie est décroissante. Par une formalisation analytique du problème, des formules décrivant l'évolution du volume de solution prélevée en fonction du temps ainsi que le volume final prélevé sont développées en fonction des paramètres physiques et hydrodynamiques du sol et de la bougie. L'influence des paramètres est ensuite discutée. Grâce à un travail expérimental sur colonne de sol, une validation expérimentale des formules est réalisée. En annexe, sont définies et décrites les méthodes de mesure des conductivités hydrauliques et des conductances des bougies, souvent entachées d'imprécisions dans la littérature.

I - THEORIE

Une bougie poreuse est composée d'un matériau poreux, supposé inerte chimiquement, cylindrique et creux, généralement collé à un tube en PVC fermé hermétiquement par un bouchon par lequel passent un ou deux capillaires. Le problème posé est le suivant (figure 1). Une dépression $P_i^{(*)}$ est appliquée dans une bougie saturée de solution placée dans un sol dont la pression de l'eau, P_{sol} , est supposée uniforme à l'instant initial où l'on procède à la fois à la mise en dépression de la bougie et à sa fermeture. La pression P_{sol} est considérée comme constante à une distance infinie de la bougie. Le différentiel de charge hydraulique qui s'ensuit conduit à un transfert de la solution du sol vers la bougie. L'entrée de la solution dans cette bougie induit une réduction de la dépression P_b à l'intérieur de la bougie en vertu de la loi des gaz parfaits de Boyle-Mariotte.

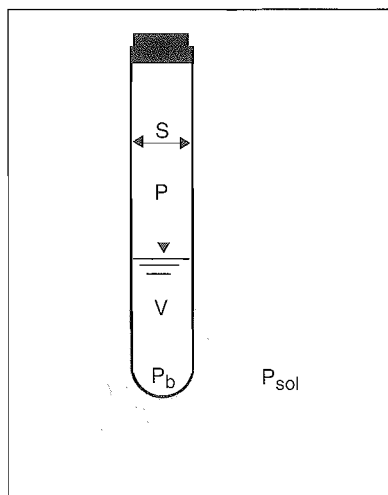


Figure 1 : Schéma d'une bougie poreuse
Sketch of a porous cup

- S : section de la canne
- V : volume de solution prélevé
- P : pression de l'air dans la canne
- P_b : pression de l'eau à la base de la bougie
- P_{sol} : pression de l'eau du sol
- En gris : zone d'influence de la bougie

(*) Dans le texte, le terme *pression* se réfère à une pression absolue ; le terme *dépression* se réfère à la valeur absolue de la pression effective de l'eau. L'unité retenue est la hauteur de la colonne d'eau.

La formulation utilisée est analogue à celle relative aux temps de réponse des systèmes tensiométriques (WATSON, 1967 ; SORMAIL et VACHAUD, 1969). La loi de Darcy est appliquée avec les hypothèses suivantes : (1) la taille de la bougie est suffisamment petite pour que la composante gravitaire du potentiel puisse être négligée et le gradient de charge hydraulique remplacé par un gradient de pression, et (2) la résistance à l'écoulement peut être prise en compte au moyen d'une conductance C , paramètre intégrant à la fois les propriétés du sol et celles de la bougie (conductivité et forme, voir Annexe).

La loi de Darcy peut alors être écrite sous la forme :

$$\frac{dV}{dt} = - C (P_b - P_{sol}) \quad (1)$$

où V est le volume de solution prélevé par la bougie (L^3), C la conductance du système sol-bougie (L^2T^{-1}), P_b la pression à l'intérieur de la bougie (L) et P_{sol} la pression de la solution du sol (L).

Avec les hypothèses suivantes : l'air se comporte comme un gaz parfait ; les conditions sont isothermes ; le système est étanche, la loi de Boyle-Mariotte permet d'écrire :

$$P (V_{air} - V) = P_i \cdot V_{air} \quad (2)$$

où V_{air} désigne le volume d'air initial dans la canne (L^3), P_i la pression d'air initiale dans la canne (L) et P et V la pression d'air et le volume de solution instantanés.

Par ailleurs, la pression P_b à la base inférieure de la céramique est égale à la pression d'air P dans la canne, corrigée de la hauteur de solution prélevée qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres dans certains cas. On considérera que la colonne de solution exerce uniformément sa pression sur la céramique dont la hauteur est dans tous les cas inférieure à dix centimètres :

$$P_b = P + \frac{V}{S} \quad (3)$$

où S : section de la canne (L^2).

La combinaison des équations (1), (2) et (3) donne :

$$\frac{dV}{dt} = - C \left(P_i \frac{V_{air}}{V_{air}-V} + \frac{V}{S} - P_{sol} \right) \quad (4)$$

d'où :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{C}{S} \frac{V^2 - (S \cdot P_{sol} + V_{air}) \cdot V + (P_{sol} - P_i) \cdot S \cdot V_{air}}{V_{air} - V} \quad (5)$$

Le numérateur de la fraction de droite a deux racines positives. La variation du volume de solution prélevé s'annule ($dV/dt = 0$) pour la plus petite d'entre elles qui correspond au volume final prélevé par la bougie V_f . On en déduit :

$$V_f = \frac{1}{2} \left[V_{air} + S \cdot P_{sol} - \sqrt{(V_{air} + S \cdot P_{sol})^2 - 4 V_{air} \cdot S (P_{sol} - P_i)} \right] \quad (6)$$

Soit d'autre part V_2 la deuxième racine du numérateur :

$$V_2 = \frac{1}{2} [V_{\text{air}} + S \cdot P_{\text{sol}} + \sqrt{(V_{\text{air}} + S \cdot P_{\text{sol}})^2 - 4V_{\text{air}} \cdot S (P_{\text{sol}} - P_i)}] \quad (7)$$

Pour intégrer l'équation (5) nous faisons l'hypothèse que *la conductance du système sol-bougie est indépendante du temps* ; après factorisation du numérateur du terme de droite, il vient :

$$\int_0^t dt = \frac{S}{C} \left[\frac{V_f \cdot V_{\text{air}}}{V_f \cdot V_2} \int_0^V \frac{1}{V_f \cdot V} dV + \frac{V_2 - V_{\text{air}}}{V_2 - V_f} \int_0^V \frac{1}{V_2 - V} dV \right] \quad (8)$$

et après intégration, on obtient :

$$t = \frac{S}{C} \left[\frac{V_{\text{air}} - V_f}{V_f \cdot V_2} \text{Log}\left(1 - \frac{V}{V_f}\right) + \frac{V_{\text{air}} - V_2}{V_2 - V_f} \text{Log}\left(1 - \frac{V}{V_2}\right) \right] \quad (9)$$

Les relations (6) et (9) permettent de calculer respectivement le volume final de solution prélevé et le temps d'extraction nécessaire. Dans l'équation (6), *le volume final V ne dépend que des conditions aux limites du système* (pression de l'eau du sol, pression d'air initiale dans la canne, volume d'air initial dans la canne) *et de la section de la canne*. L'influence des trois premiers paramètres sur le volume prélevé V_f est tout d'abord étudiée ; la poussée hydrostatique dans la canne est négligée, ce qui revient à faire tendre S vers l'infini dans l'équation (3). L'équation (5) devient, pour $dV/dt = 0$:

$$V_f(S_{\infty}) = V_{\text{air}} \left(1 - \frac{P_i}{P_{\text{sol}}}\right) \quad (10)$$

Dans ce cas, le volume final V_f varie linéairement avec le volume d'air initial dans la canne V_{air} ainsi qu'avec le rapport des pressions P_i/P_{sol} . En pratique, pour augmenter le volume échantillonné, il est donc possible d'agir : (1) sur le rapport des pressions en diminuant la pression initiale P_i ; (2) en augmentant le volume du système (V_{air}).

Lorsque le poids de la colonne de solution est pris en compte, le volume final de solution prélevé est inférieur à celui obtenu par la relation (10). Toutefois V_f est assez peu sensible à ce paramètre. A titre d'exemple d'après l'équation (6), dans des conditions plausibles d'utilisation : volume d'air de 500 cm³ ; pression initiale d'air dans la canne égale à 7 m ; pression de l'eau du sol de 10 m (soit une dépression d'environ 3,3 m dans la canne et de 0,3 m dans le sol), la section doit être inférieure à 3,29 cm² (soit un diamètre de 2,05 cm) pour que la pression hydrostatique fasse diminuer le volume final de plus de 10 %.

Le temps de prélèvement est donné par la relation (9). L'équation ne peut être mise sous une forme explicite du volume en fonction du temps, mais sa racine $V < V_f$ peut être calculée numériquement pour une valeur donnée de t . La méthode de la tangente de Newton est choisie en raison de la monotonie de la fonction ; l'équation est résolue toutes les minutes.

Lorsque la poussée hydrostatique est négligée, la racine V_2 tend vers l'infini dans l'équation (7), le rapport V/V_2 tend vers 0 et un développement limité du second

logarithme de l'équation (9) peut être effectué ; le volume final prélevé V_f est donné par l'équation (10). Il vient :

$$t(S_{\infty}) = \frac{1}{C} \left[-V_{\text{air}} \frac{P_i}{P_{\text{sol}}^2} \text{Log} \left(1 - \frac{V}{V_{\text{air}} \left(1 - \frac{P_i}{P_{\text{sol}}} \right)} \right) + \frac{V}{P_{\text{sol}}} \right] \quad (11)$$

Cette relation est le produit de deux termes. Le deuxième, entre crochets, est uniquement lié aux conditions aux limites du système. Le temps de prélèvement est particulièrement sensible aux pressions P_i et P_{sol} , et tend vers l'infini lorsque le rapport P_i/P_{sol} tend vers 1. D'autre part, pour P_i/P_{sol} fixé, t augmente lorsque P_{sol} diminue. Par contre, la valeur du volume d'air initial V_{air} agit très peu sur la durée de prélèvement.

Le premier terme est lié aux propriétés hydrodynamiques et géométriques du système céramique-sol caractérisées par le seul paramètre C . Si celui-ci *n'intervient pas dans le calcul du volume prélevé V_f* (équation 6), *le temps de prélèvement lui est en revanche inversement proportionnel.*

Enfin, l'étude de la relation complète (9) permet de déterminer l'influence de la poussée hydrostatique sur t ; la diminution de la section a pour effet principal de ralentir l'écoulement en agissant principalement sur le premier logarithme de l'équation (9).

II - VALIDATION EXPÉRIMENTALE

1) Matériel et méthodes

Afin de valider les résultats théoriques obtenus, des expérimentations ont été réalisées en laboratoire suivant le protocole décrit ci-dessous.

Des cuves cubiques de 0,50 m de côté, ont été remplies d'un sable (sable de Champlan) tamisé à 2 mm et contenant 2 % d'argile et 95 % de sable fin. Ce matériau est utilisé principalement pour ses propriétés non colmatantes envers les bougies poreuses. Sa conductivité hydraulique saturée, K_{sat} , mesurée au perméamètre, vaut $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à 20°C. Les courbes de variation de la teneur en eau et de la conductivité

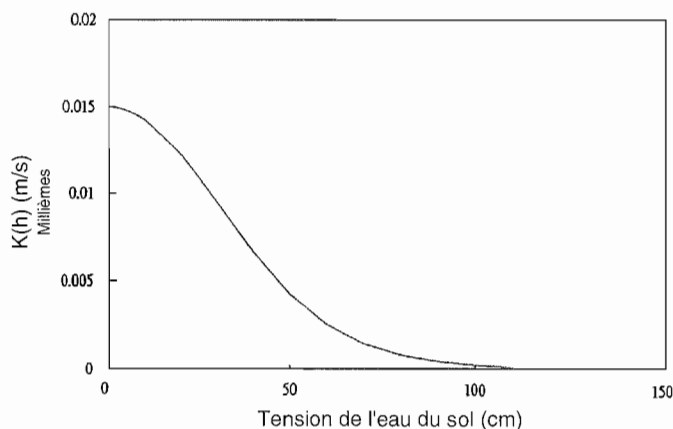
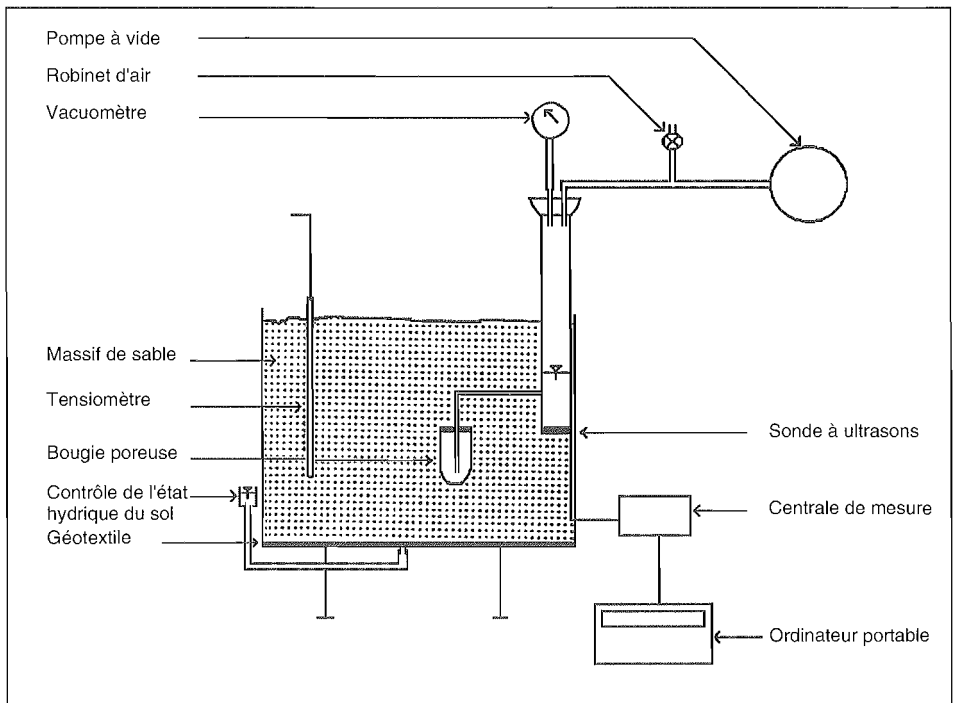


Figure 2 :
Relation conductivité hydraulique-tension de l'eau du sable calée sur le modèle Van Genuchten.
Hydraulic conductivity versus water suction of sand calibrated with Van Genuchten's model.
 $K(h)$: conductivité hydraulique à la tension de l'eau h

hydraulique en fonction de la pression de l'eau du sol ont été déterminées suivant l'approche de VAN GENUCHTEN (figure 2). La densité apparente sèche du matériau dans les cuves est de 1,4.

La bougie utilisée est de taille moyenne (voir Annexe), de conductivité hydraulique à saturation à 20°C de $2,9 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ et de conductance $4,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Le dispositif comporte une sonde à ultra-sons placée dans un tube en PVC et reliée à la bougie (figure 3). La section du tube S est de 15 cm^2 et le volume d'air initial disponible du dispositif V_{air} vaut 500 cm^3 . La pression de l'eau du sol P_{sol} est fixée par l'application d'une dépression à la base de la cuve, sa valeur est mesurée par tensiométrie. Une centrale de mesure enregistre les hauteurs de solution prélevées à un pas de temps de une minute.

Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental
Sketch of the experimental device



Les expériences sont toutes réalisées à 7,14 m (7.10⁴ Pa) de dépression initiale, soit $P_1=3,19 \text{ m}$ (pour $P_{\text{atm}}=10,33 \text{ m}$). La première expérience est réalisée dans de l'eau pure où la conductance C est connue (voir Annexe). La bougie est plongée à 0,07 m de profondeur soit $P_{\text{sol}}=10,40 \text{ m}$. Les prélèvements sont ensuite faits dans le sable porté à quatre états hydriques différents : (1) à $P_{\text{sol}} = 10,40 \text{ m}$ (saturation, bougie à 0,07 m sous la nappe) ; (2) à $P_{\text{sol}} = 9,92 \text{ m}$ (suction de 41 cm) ; (3) à $P_{\text{sol}} = 9,67 \text{ m}$ (suction de 66 cm) et (4) à $P_{\text{sol}} = 9,51 \text{ m}$ (suction de 82 cm).

2) Résultats

Le premier critère de validation est la *volume final prélevé*, dont tous les éléments du calcul sont connus. Les valeurs calculées par l'équation (6) pour les trois premiers états hydriques du sol sont très proches des valeurs mesurées (tableau I). Dans le sol à 9,51 m de pression de l'eau, des entrées d'air dans le tube en PVC, probablement dues à la durée importante du prélèvement (de l'ordre de 24 heures), n'ont pas permis d'obtenir la courbe complète et la valeur du volume final.

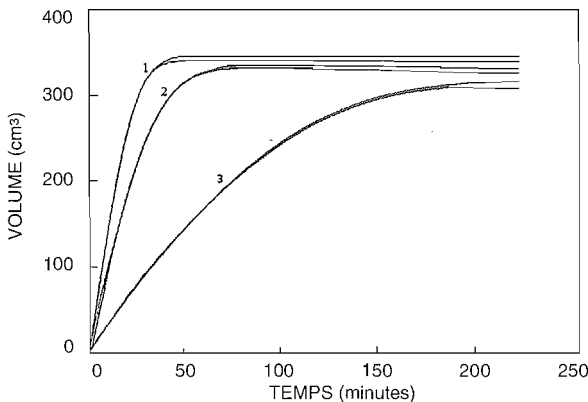
Tableau I : Volumes totaux de solution prélevée calculés par l'équation (6) et mesurés par le dispositif expérimental
Final volumes of extracted water calculated by equation (6) and measured by the experimental device

	Volume calculé (cm ³)	Volume mesuré (cm ³)
Psol = 1 040 cm	343,0	348,8
Psol = 992 cm	335,0	340,5
Psol = 967 cm	331,0	319,0

Le second critère est la comparaison des *courbes de volume de solution prélevée en fonction du temps* mesurées et calculées par l'équation (9). Or la solution obtenue est fonction de la conductance C du système, qui n'est définie analytiquement que lorsque seule la bougie oppose une résistance à l'écoulement, ($C = C_b = F.K_b$, voir Annexe). C'est le cas pour la courbe expérimentale de prélèvement obtenue en sol saturé qui est confondue avec la courbe expérimentale de prélèvement en eau pure.

Le calage de la conductance du système sol-bougie est effectué en calculant le terme entre crochets du membre de droite de l'équation (9) pour chaque valeur de t, en remplaçant le volume V par sa valeur mesurée. La fonction du temps ainsi obtenue

Figure 4 : Courbes expérimentales et théoriques du volume de solution prélevé en fonction du temps
Experimental and theoretical curves of extracted soil solution versus time



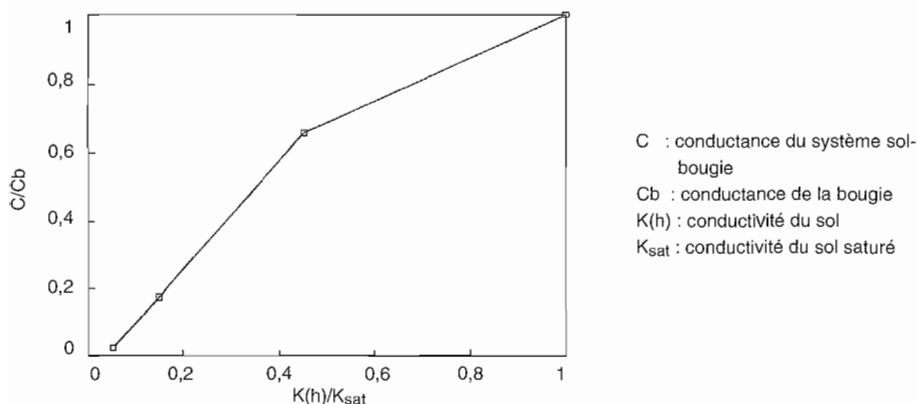
Courbes 1 :
pression de l'eau du sol : 1 044 cm ;
conductance du système $4,4 \cdot 10^{-8}$ m²/s.

Courbes 2 :
pression de l'eau du sol : 992 cm ;
conductance du système $2,9 \cdot 10^{-8}$ m²/s.

Courbes 3 :
pression de l'eau du sol : 967 cm ;
conductance du système $8,1 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

Figure 5 : Variation de la conductance relative du système sol-bougie en fonction de la conductivité relative du sol.

Relationship between relative conductance of soil-cup system and relative soil conductivity.



forme une droite de pente C ajustée par régression linéaire. La valeur de C obtenue dans le cas du sable saturé est de $C = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ proche de la valeur mesurée sur la bougie seule, égale à $4,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Lorsque le sol est asséché, il devient moins conducteur, l'écoulement est ralenti ($C < C_b$) et le volume final extrait diminue. On parvient à un bon ajustement des courbes théoriques sur les courbes expérimentales (figure 4) ; la courbe de prélèvement en sol à 9,51 m de pression de l'eau n'étant pas complète, elle n'est pas présentée.

La représentation graphique du rapport des conductances C/C_b en fonction du rapport des perméabilités du sol K/K_{sat} (figure 5) illustre la forte dépendance entre la conductance du système et la conductivité du sol. *La conductance C du système "sol-bougie" et, par conséquent, la cinétique de prélèvement s'avèrent donc particulièrement dépendantes de la pression de l'eau du sol P_{sol} .*

CONCLUSIONS

Les équations (6) et (9) permettant de déterminer respectivement le volume final de la solution prélevée et l'évolution du volume de solution extrait par une bougie poreuse dans un sol sont donc validées par le travail expérimental réalisé. Ces équations permettent de connaître le poids des différents paramètres d'un prélèvement réalisé par la technique usuelle qui consiste à imposer une dépression qui décroît lors de l'entrée de la solution dans la bougie. Les conclusions sont les suivantes.

1) Le volume final prélevé n'est fonction que des conditions aux limites et initiales imposées au système. Une approximation satisfaisante pour le travail de terrain de la valeur de ce volume est donnée par l'équation (10). Selon cette équation le volume final est proportionnel au volume d'air initial du système et à la différence relative de pression entre le sol et la bougie à l'instant initial. Une augmentation du volume d'air du système permet donc, toutes choses égales par ailleurs, de diminuer la dépression à appliquer. Pour un volume de prélèvement et un volume d'air donnés, cette équation permet de calculer la dépression à appliquer.

2) Le temps de prélèvement varie de manière inversement proportionnelle à la conductance du système sol-bougie. L'expression simplifiée obtenue en négligeant la poussée hydrostatique (Eq. 11) montre que les paramètres qui jouent dans le sens d'une augmentation du volume final prélevé tendent à faire diminuer le temps de prélèvement. De manière générale ce temps de prélèvement est particulièrement sensible à la pression de l'eau du sol.

Un des résultats intéressants est la validation de l'hypothèse selon laquelle la conductance du système sol-bougie est indépendante du temps. En effet, autour de la bougie, le champ de pressions et *a fortiori* celui des valeurs de conductivité hydraulique est fortement transitoire au cours du prélèvement. Ce résultat mérite donc d'être approfondi (i) en vérifiant la validité dans d'autres matériaux moins conducteurs, et (ii) en recherchant l'explication au moyen d'une modélisation plus fine.

Reçu pour publication : Décembre 1992

Accepté pour publication : Juin 1993

BIBLIOGRAPHIE

- ADDISCOTT T.M., 1990 - Measurement of nitrate leaching : a review of methods. *Nitrates, agriculture, eau*. Paris, 7-8 novembre 1990, Calvet, éd., 157-168.
- CHEVERRY C., 1983 - L'extraction de la "solution du sol" par le biais de bougies poreuses : une synthèse bibliographique des problèmes posés par ces dispositifs. *Bulletin du G.F.H.N.*, Nov. 1983, n° 14, 47-71.
- GROSSMANN J., QUENTIN K.E., UDLUFT P., 1987 - Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen - eine Literatustudie - *Z. Pflanzenernähr. Boken.*, 150, 258-261.
- GROVER B. L., LAMBORN R.E., 1970 - Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low soluble concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 34, 706-708.
- HANSEN E.A., HARRIS A.R., 1975 - Validity of soil water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 528-536.
- KONIG R., UDLUFT P., 1992 - Determination of solute transport : the suction cup method. *5th International Drainage Workshop*, Poster Session, 8-15 février 1992 - Lahore - Pakistan, 10 p.
- MORRISON R.D., LOWERY B., 1990a - Sampling radius of a porous cup sampler: experimental results. *Ground Water*, 28 (2), 262-267.
- MORRISON R.D., LOWERY B., 1990b - Effect of cup properties, sampler geometry, and vacuum on the sampling rate of porous cup samplers. *Soil Sci.*, 149 (5), 308-316.
- NAGPAL N.K., 1982 - Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water samplers for nutrient transport studies. *Can. J. Soil Sci.*, 62, 685-694.
- NARASIMHAN T.N., DREISS S.J., 1986 - A numerical technique for modeling transient flow of water to a soil water sampler. *Soil Sci.*, 141(3), 230-236.
- SORMAIL L., VACHAUD G., 1969 - Mesure des potentiels d'humidité dans les sols non saturés au moyen de tensiomètres classiques et osmotiques. *La Houille Blanche*, 8, 849-860.

- VAN DEN PLOEG R.R., BEESE F., 1977 - Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 466-470.
- VAN GENUCHTEN TH., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- WAGNER G.H., 1962 - Use of porous cups to sample soil water within the profile. *Soil Sci.*, 94, 379-386.
- WARRICK A. W., AMOOZEGAR-FARD A., 1977 - Soil water regimes near porous cup water samplers. *Water Res. Research*, 13, 1, 203-207.
- WATSON K.K., 1967 - Response behavior of a tensiometer-transducer system under conditions of changing pore air pressure. *Soil Sci.*, 104 (6), 439-443.

ANNEXE :

CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ET CONDUCTANCE
D'UNE BOUGIE POREUSE**Définitions de la conductivité hydraulique et de la conductance d'une bougie poreuse**

La conductivité hydraulique d'une bougie poreuse est le coefficient de proportionnalité qui relie, d'après la loi de Darcy, le flux (ou vitesse de filtration) qui traverse la céramique au gradient de potentiel total de part et d'autre du matériau.

$$v = - K_b \cdot \text{grad}(h) \quad (1)$$

v ($L.T^{-1}$) représente la vitesse de filtration, K_b ($L.T^{-1}$) la conductivité hydraulique du matériau poreux et h la charge hydraulique.

La conductance d'une bougie poreuse est le rapport du débit qui traverse la céramique à la différence de potentiel total de part et d'autre du matériau.

$$C = \frac{Q}{\Delta H} \quad (2)$$

Q ($L^3.T^{-1}$) représente le débit, C ($L^2.T^{-1}$) la conductance et ΔH la différence de potentiel. La conductance est un paramètre global qui intègre la conductivité hydraulique du matériau et sa forme, il est donc souvent utilisé comme caractéristique hydraulique des bougies poreuses.

En laboratoire, il est possible d'avoir accès à la valeur de la conductivité hydraulique de la bougie poreuse. Deux protocoles sont décrits ci-après : (1) en régime permanent en plongeant la bougie dans un bécher et en imposant une dépression constante, et (2) en régime transitoire par égouttage de la bougie.

Calcul de la conductivité hydraulique d'une bougie poreuse

La céramique, dont les propriétés sont supposées homogènes, est constituée d'un cylindre et d'une demi-sphère (figure 6). Avec l'hypothèse que l'écoulement est radial, le débit prélevé Q se partage en un débit Q_1 qui traverse le cylindre et un débit Q_2 qui traverse la demi-sphère. Dans les deux cas, la section traversée par le liquide n'est pas constante et dépend du rayon r , la variation du gradient de charge est donc une fonction de r .

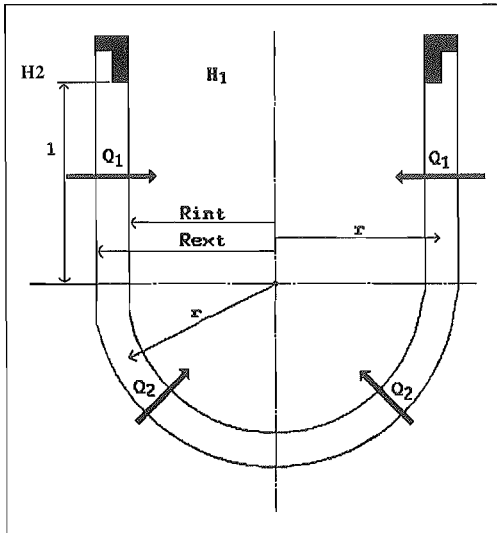


Figure 6 :

Schématisation de l'écoulement à travers une bougie poreuse.

Schematic representation of the flow through the porous cup.

H1 : charge à l'intérieur de la bougie

H2 : charge à l'extérieur de la bougie

Q1 : débit traversant la partie cylindrique de la bougie

Q2 : débit traversant la partie demi-sphérique de la bougie

R_{int} : rayon intérieur

R_{ext} : rayon extérieur

l : longueur de la partie cylindrique de la bougie

r : axes des rayons

Avec l'orientation des axes de la figure 6, la loi de Darcy (1) donne :

$$v(r) = K_b \frac{dh}{dr} \quad (3)$$

$v(r)$ représente la vitesse de filtration à travers le matériau ($L.T^{-1}$).

$$Q = v(r).S(r) \quad (4)$$

Q étant le débit ($L^3.T^{-1}$) et $S(r)$ (L^2) la section traversée par le liquide.

$$\text{Pour la partie cylindrique : } S_1(r) = 2 \pi r l \quad (5)$$

avec l la longueur du cylindre (L).

Il vient donc :

$$Q_1 = 2 \pi K_b l r \frac{dh}{dr} \quad (6)$$

$$\text{Pour la partie demi-sphérique : } S_2(r) = 2 \pi r^2 \quad (7)$$

On obtient de même, en combinant avec les équations (3) et (4) :

$$Q_2 = 2 \pi K_b r^2 \frac{dh}{dr} \quad (8)$$

Formule en régime permanent

La mesure consiste à appliquer, pendant un temps déterminé, une dépression constante H_1 dans la canne d'une bougie poreuse placée dans un bûcher rempli de solution et soumise à une pression extérieure H_2 . La section du bûcher doit être assez grande pour que la variation de niveau de solution soit négligeable. Le débit ainsi prélevé est constant. La variation de charge due à la longueur de la céramique, inférieure à 10 centimètres, est supposée négligeable devant la dépression qui est de l'ordre de plusieurs mètres. Les rayons intérieurs et extérieurs de la bougie sont respectivement notés R_{int} et R_{ext} .

Les équations (6) et (8) peuvent alors être intégrées et on obtient successivement :

$$\int_{H_1}^{H_2} dh = \frac{Q_1}{2 \pi K_b l} \int_{R_{int}}^{R_{ext}} \frac{dr}{r} \quad (9)$$

$$\int_{H_1}^{H_2} dh = \frac{Q_2}{2 \pi K_b} \int_{R_{int}}^{R_{ext}} \frac{dr}{r^2} \quad (10)$$

$$\text{Or } Q = Q_1 + Q_2 \quad (11)$$

Après intégration et recombinaison des équations (9), (10) et (11), et après avoir posé

$$\alpha = \frac{R_{ext}}{R_{int}} \quad (12)$$

$$\text{et } \beta = \frac{l}{R_{int}} \quad (13)$$

$$\text{il vient, finalement : } K_b = \frac{Q}{H_2 - H_1} \frac{1}{2 \pi} \frac{1}{R_{int} \left(\frac{\beta}{L n \alpha} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)} \quad (14)$$

$$\text{Posons } F, \text{ facteur de forme (L) : } F = 2 \pi R_{\text{int}} \left(\frac{\beta}{L n \alpha} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) \quad (15)$$

$$\text{et on obtient : } K_b = \frac{Q}{F (H_2 - H_1)} \quad (16)$$

La relation entre la conductivité hydraulique K_b et la conductance C de la bougie est alors :

$$C = F.K_b \quad (17)$$

Formule en régime transitoire

Le protocole consiste à laisser égoutter une bougie préalablement remplie d'une hauteur de solution H_1 et de mesurer le temps nécessaire pour qu'elle se vide jusqu'à une hauteur H_2 . Le temps d'égouttage ne doit pas être trop long pour pouvoir négliger l'effet de l'évaporation. Le plan de référence est pris à mi-hauteur de la bougie. La charge $h(t)$ ainsi que le débit $Q(t)$ sont alors variables et les équations (6) et (8) deviennent:

$$\int_{h(t)}^0 dh = \frac{Q_1}{2 \pi K_b l} \int_{R_{\text{int}}}^{R_{\text{ext}}} \frac{dr}{r} \quad (18)$$

et

$$\int_{h(t)}^0 dh = \frac{Q_2}{2 \pi K_b} \int_{R_{\text{int}}}^{R_{\text{ext}}} \frac{dr}{r^2} \quad (19)$$

ce qui donne comme pour le régime permanent :

$$K_b = - \frac{Q(t)}{Fh(t)} \quad (20)$$

$$\text{avec } Q(t) = S \frac{dh}{dt} \quad (21)$$

S étant la section intérieure du tube (L^2). Le signe négatif de l'équation (16) est dû à l'inversion du sens de l'écoulement par rapport au régime permanent.

L'équation (20) peut alors être intégrée par rapport au temps entre les niveaux de solution H_1 et H_2 :

$$- \int_{H_1}^{H_2} \frac{dh}{h} = \frac{F.K_b}{S} \int_0^t dt \quad (22)$$

Il vient finalement :

$$K_b = \frac{S}{F} \frac{1}{t} L n \frac{H_1}{H_2} \quad (23)$$

Valeurs mesurées

Les bougies poreuses utilisées sont des bougies du commerce (Nardeux), de trois types

différents. Les principales caractéristiques géométriques ont été mesurées sur trois lots de 10 bougies neuves (tableau II) à une température constante de 20°C.

Tableau II : Caractéristiques géométriques des bougies poreuses.

Geometric characteristics of porous cup samplers.

Type de bougie	Rayon extérieur (cm)	Rayon intérieur (cm)	Longueur (cm)	Porosité totale (%)
petite	1,06 *0,47%	0,48 *0,93%	6,1	34
moyenne	1,51 *0,27%	1 *0,35%	8,24	33
grande	3,2 *0,8%	2,57 *0,58%	7,5	35

*Coefficient de variation

Les deux protocoles ont été testés sur chaque bougie et aucune différence de conductivité hydraulique n'a été observée aux incertitudes de mesure près (tableau III). En revanche, il est à noter que les conductivités mesurées sont très variables, en moyenne, d'un type de bougie à l'autre, bien que les porosités totales soient constantes, et que les résultats au sein d'un même lot - sur des bougies neuves - présentent une dispersion assez élevée. Ces différences de conductivités hydrauliques sont probablement dues à l'hétérogénéité de la taille des pores (CHEVERRY, 1983).

Tableau III : Conductivité hydraulique des bougies poreuses ; moyennes sur 10 bougies.

Hydraulic conductivity of porous cup ; means on 10 cups.

Type de bougie	Facteur de forme F (m)	Conductivité hydraulique moyenne à saturation T = 20°C (10 ⁻⁸ m/s)	Conductance moyenne (10 ⁻⁹ m ² /s)	Coefficient de variation (%)
petite	0,54	1,3	0,7	37
moyenne	1,44	3,0	4,3	17
grande	2,97	2,5	7,5	40

