Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 12 juin 1969

MESURE DES POTENTIELS D'HUMIDITÉ DANS LES SOLS NON SATURÉS AU MOYEN DE TENSIOMÈTRES CLASSIQUES ET OSMOTIQUES

PAR L. SORMAIL * ET
G. VACHAUD **

Principe Technologie sommaire du tensiomètre classique

[1, 2, 3 et 4]

L'étude des mouvements de l'eau dans un milieu poreux humide est conditionnée par la connaissance des gradients de potentiel d'énergie libre qui les provoquent. Pour accéder à la connaissance de ces potentiels, il s'agit d'utiliser un instrument de mesure se mettant localement en équilibre avec l'eau qui l'environne, et traduisant matériellement son niveau d'énergie libre.

Le tensiomètre à eau, classique (fig. 1), est constitué essentiellement par une petite *réserve d'eau R*, limitée par rapport au milieu par une *paroi poreuse P*, et dont l'état de pression est mesuré par un *manomètre M*, auquel elle est reliée, par un *circuit de liaison L*.

L'eau R a deux rôles :

- elle se met en équilibre de pression avec la phase moyenne d'eau du sol à son voisinage. Cette mise en équilibre se réalise par transfert à travers la paroi poreuse P qui permet à l'eau de filtrer localement dans le sol sans que l'air entre dans la réserve lorsque la dépression augmente;
- elle transmet hydrostatiquement la pression à mesurer au manomètre M.

1/ Schéma de principe du dispositif tensiométrique (fonctionnement dans l'eau).

Principle of tensiometer system operation (in water).

Le principe même de cette mesure montre que l'équilibre réalisé avec l'eau du sol n'est qu'un *équilibre mécanique*, c'est-à-dire que l'on ne tient pas compte, dans le bilan d'énergie libre que l'on prétend faire, des termes *osmotiques* et *thermiques* dont les gradients peuvent provoquer aussi des écoulements.

L'établissement de l'équilibre entre l'instrument de mesure et le milieu exige un transfert d'eau par la capsule poreuse. De la rapidité et de l'importance de ce transfert va dépendre la qualité de la mesure tensiométrique.

L'analyse systématique du fonctionnement du tensiomètre permettra de dégager d'une part les conséquences technologiques que la recherche d'une bonne mesure impose et d'autre part les critiques de bases qui doivent être envisagées dans l'interprétation des mesures.

* Assistant à la Faculté des Sciences de Toulouse. Institut de Mécanique des Fluides, Toulouse.

** Chargé de Recherches au C.N.R.S. Docteur ès sciences physiques. Laboratoire de Mécanique des Fluides, Grenoble.

Réponse théorique d'un tensiomètre en présence d'eau libre

Formulation théorique de la réponse.

Dans ces conditions de fonctionnement (fig. 1) la surface externe de la capsule poreuse est au contact d'un milieu à conductivité hydraulique infinie.

Soient :

t : le temps;

$\psi_s(t)$: la pression sur la surface externe de la capsule poreuse;

$\psi_T(t)$: la pression à l'intérieur de la réserve;

K' : conductance de la capsule poreuse définie par l'équation :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = K' (\psi_s - \psi_T)$$

ΔV étant le volume écoulé à travers la capsule poreuse pendant le temps Δt sous la différence de charge $\psi_s - \psi_T$;

S : coefficient de sensibilité du traducteur.

La variation de volume ΔV de la réserve a provoqué une variation de lecture $\Delta\psi_T$ au manomètre. Par définition :

$$\frac{\Delta\psi_T}{\Delta V} = S$$

Nous faisons apparaître simplement l'équation différentielle traduisant le fonctionnement global de l'instrument en présence d'eau libre :

$$\Delta V = \frac{1}{S} \Delta\psi_T = K' (\psi_s - \psi_T) \Delta t$$

$$\frac{1}{K'S} \frac{\Delta\psi_T}{\Delta t} = \psi_s - \psi_T$$

En posant $\tau = (1/K'S)$ homogène à un temps et appelée *constante de temps de réponse*, il vient :

$$\tau \frac{d\psi_T}{dt} = \psi_s - \psi_T$$

Cette équation différentielle a pour solution :

$$\psi_T = e^{-t/\tau} \left[\int \frac{1}{\tau} \psi_s e^{t/\tau} dt + C \right] \quad (1)$$

Fonction de transfert du tensiomètre.

Reprenons l'équation différentielle de base :

$$\psi_s = \psi_T + \tau \frac{d\psi_T}{dt}$$

et considérons ψ_s comme grandeur d'entrée et ψ_T comme grandeur de sortie.

La transformation de Laplace nous donne :

$$\bar{\psi}_s = \bar{\psi}_T + \tau [p\bar{\psi}_T - \psi_T(0_+)]$$

En partant de l'équilibre initial $\psi_{s,t=0} = \psi_{T,t=0} = 0$

et en tenant compte de l'inertie du manomètre, nous constatons :

$$\psi_T(0_+) = 0$$

d'où la fonction de transfert :

$$\frac{\bar{\psi}_T}{\bar{\psi}_s} = \frac{1}{1 + \tau p}$$

Nous sommes en présence d'un système classique, dit du premier ordre, dont la constante de temps est :

$$\tau = \frac{1}{K'S}$$

Il faut noter qu'en fait l'information connue est la loi $\psi_T(t)$ et qu'en conséquence, pour remonter à la loi $\psi_s(t)$ il faut envisager la fonction transfert inverse :

$$\frac{\bar{\psi}_s}{\bar{\psi}_T} = 1 + \tau p$$

Nous pouvons ainsi associer à un système tensiométrique, une constante de temps et une fonction transfert.

Par application de calcul opérationnel, il est donc théoriquement possible de reconstituer la loi $\psi_s(t)$ si l'on connaît la loi $\psi_T(t)$ [3, 4, 5].

Considérons le cas d'un échelon de pression $\Delta\psi_0$ dans l'eau externe, se produisant à partir d'un équilibre initial avec $\psi_s(0) = \psi_T(0) = 0$.

Il vient :

$$\bar{\psi}_s = \frac{\Delta\psi_0}{p}$$

(p : variable de Laplace)

d'où :

$$\bar{\psi}_T = \frac{\Delta\psi_0}{p} \frac{1}{1 + \tau p} = \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{(1/\tau) + p} \right) \Delta\psi_0$$

c'est-à-dire :

$$\psi_T = \Delta\psi_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

La représentation graphique de la loi $(\psi_T/\Delta\psi_0)$ en fonction de t est une portion d'exponentielle dont la pente à l'origine est $1/\tau$ (fig. 3).

Nous retiendrons dans ce cas les valeurs caractéristiques suivantes :

$t = \tau$	$\psi_T = 0,63 \Delta\psi_0$
$t = 3,0 \tau$	$\psi_T = 0,95 \Delta\psi_0$
$t = 4,6 \tau$	$\psi_T = 0,99 \Delta\psi_0$

En conclusion : quelle que soit l'allure cinétique des phénomènes, le système qui permettra de connaître le plus fidèlement les variations de tension ou de pression dans le milieu environnant la capsule sera celui offrant la constante de temps, de réponse $\tau = (1/K'S)$ la plus réduite.

Analyse critique de la réponse

Dans ce qui précède, la constante de temps de réponse τ est le produit de deux caractéristiques, l'une de la capsule poreuse (K') et l'autre du traducteur (S). En fait la bougie poreuse et le capteur de pression sont séparés par le circuit de liaison, dont l'influence sur les caractéristiques dynamiques de la réponse n'est pas négligeable. Reprenant le schéma de la figure 1, nous allons envisager successivement les différents éléments : capsule, circuit, capteur, pouvant jouer un rôle dans le fonctionnement dynamique du tensiomètre.

Influence de la capsule poreuse.

COEFFICIENT DE CONDUCTANCE K' .

1. Par *définition* nous avons posé :

$$K' = \frac{1}{\psi_s - \psi_T} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

ΔV : volume écoulé à travers la capsule pendant le temps Δt , sous une différence de charge $\psi_s - \psi_T$;

K' : est exprimé habituellement en $\text{cm}^3/\text{s}/\text{mbar}$.

2. La *mesure* de cette caractéristique est simple à réaliser, par des essais de débit à charge constante à travers la bougie.

Nous devons faire les remarques suivantes :

— La valeur K' peut décroître avec le volume d'eau écoulé par suite du colmatage des pores qui ont un diamètre de l'ordre du μ . Cette possibilité est accentuée lorsqu'il y a de fréquents mouvements d'eau entre le sol et le tensiomètre. Nous voyons apparaître ici une nouvelle raison de limiter ces transferts d'eau au maximum entre l'instrument de mesure et le sol.

— La conductance K' peut être fortement influencée par la présence de bulles d'air occlus dans les pores du matériau de la bougie. Au préalable de toute mesure, il faut donc chercher à saturer au maximum celle-ci, mais il est très difficile de conserver ces conditions idéales de fonctionnement et beaucoup d'anomalies verront leur origine dans ce piégeage accidentel.

3. *Facteurs agissant sur K' .*

Le transfert d'eau à travers un élément de la paroi poreuse saturée va obéir à la loi de Darcy :

$$q = -ak^* \frac{d\psi}{dx}$$

k^* : conductivité hydraulique ou perméabilité à l'eau du matériau que nous considérerons comme constante au travers de la paroi saturée sous toute son épaisseur ;

ψ : charge hydraulique ;

x : abscisse à travers la paroi ;

q : débit ;

a : aire de l'élément poreux traversé.

En intégrant cette expression sur l'épaisseur de la paroi filtrante, nous obtenons l'expression du débit global :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = K' (\psi_s - \psi_T)$$

quelle que soit la forme de la capsule (disque plan, cylindre, sphère, cône) avec :

$$K' = A \cdot K_a \quad K_a = k^* \cdot f$$

A : aire externe de la capsule poreuse ;

K_a : conductance par unité d'aire externe ;

f : fonction des dimensions géométriques de la capsule.

La capsule poreuse présente dans son fonctionnement une analogie avec le transfert de chaleur à travers un conducteur parfait. Cette analogie à des problèmes de transmission de chaleur sera confirmée lors de l'étude de l'influence du sol et permettra d'appliquer des résultats connus en thermique théorique [5, 6].

La recherche de τ réduit nous incite à utiliser le matériau poreux de plus grande conductivité possible, mais une *limite importante* existe : le *phénomène dit d'entrée d'air*.

4. Le tensiomètre est en effet destiné à mesurer des *dépressions d'eau* dans un sol non saturé où coexiste une phase gazeuse (air-vapeur d'eau) que nous supposons à la pression atmosphérique p_0 . Dans ces conditions, nous appellerons *pression critique d'entrée d'air* la dépression au-delà de laquelle l'air peut pénétrer dans les pores de la capsule poreuse.

Un calcul peut être mené, *a priori*, en tenant compte du diamètre moyen des pores d .

En appliquant la loi de *Laplace*, cette dépression limite aurait pour valeur :

$$p_0 - \psi_c = \frac{4 \sigma \cos \theta}{d}$$

Dans le cas de l'eau :

$$\cos \theta = 1 \quad \sigma = 72 \text{ dynes/cm}$$

Mais il est conseillé de procéder à une détermination expérimentale systématique de cette limite par suite de l'influence de la non-homogénéité du matériau poreux des cellules filtrantes commerciales (obtenues par filtrage). Au-delà de cette pression critique, les indications du tensiomètre désamorcé sont pratiquement inutilisables. Il faut noter qu'il y a antagonisme entre la recherche d'une pression d'entrée d'air élevée (pour pouvoir mesurer les fortes succions) et l'obtention d'une bonne valeur de K' (gros diamètres de pore).

5. *Exemple.*

Comme ordre de grandeur, nous pouvons mentionner les résultats suivants :

Bougie filtrante « Chamberland » (cylindre longeur : $L = 5 \text{ cm}$, diamètre : $D = 1 \text{ cm}$).

Type L 5 (pores $1,5 \mu$) : $K' = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{mbar}$. Pression critique théorique : 700 mbars. Pression critique expérimentale : 400 à 500 mbars.

Type L 3 (pores 3μ) : $K' = 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{mbar}$.

Les valeurs expérimentales sont des valeurs moyennes. On constate en effet un manque de stabilité de la valeur K' pour les bougies à pores fins par suite de l'occlusion d'air dans ces matériaux à forte porosité.

Nous retiendrons que le paramètre K' est de l'ordre de 10^{-4} à $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{mbar}$ pour les bougies filtrantes classiques.

Influence du circuit de liaison.

Le calcul effectué dans le chapitre précédent peut être étendu en tenant compte de l'élasticité des tubes de liaison. Le volume d'eau transféré peut être décomposé en deux quantités :

ΔV_1 : volume monopolisé par l'élasticité du circuit;
 ΔV_2 : volume absorbé par le manomètre.

Ce calcul, en supposant que la variation élastique des parois obéit à la loi de Hooke, conduit à l'équation différentielle [7] :

$$\lambda \tau \frac{d\psi_T}{dt} = \psi_S - \psi_T$$

avec :

$$\tau = \frac{1}{K'S}$$

constante de temps du système capsule-manomètre

$$\lambda = 1 + S \frac{\pi L D^3}{4 e E}$$

facteur d'amortissement.

Le circuit étant considéré comme un tube de diamètre D , de longueur L , d'épaisseur de paroi e et de module d'élasticité E .

L'ensemble bougie-manomètre se comporte donc effectivement comme un système du premier ordre et le rôle du circuit revient à faire passer la sensibilité propre du manomètre de S à S/λ .

L'expression de λ conduit à des conclusions évidentes quant au choix technologique d'une installation où l'on recherche une valeur de $\lambda \tau$ la plus faible possible.

Les valeurs numériques rencontrées en fait incitent à ne pas négliger cette influence, surtout dans le cas d'installation comportant des manomètres à grande sensibilité (type capteur électrique).

Exemple :

Circuit tube Rilsan :

$E = 32.10^5$ mbar/cm² $e = 0,1$ cm
 $L = 200$ cm $D = 0,5$ cm

Si $S = 4.10^4$ mbars/cm³ (capteur électrique),
 $\lambda = 3,4$.

Si $S = 10^3$ mbars/cm³ (manomètre à mercure),
 $\lambda = 1,22$.

Influence du traducteur de pression.

Définition.

Le coefficient de sensibilité du manomètre ou traducteur de pression est par définition :

$$S = \frac{\Delta \psi_T}{\Delta V}$$

où :

$\Delta \psi_T$ représente la variation de pression indiquée par le manomètre;

ΔV représente le volume d'eau nécessaire à ce traducteur pour que la pression indiquée varie de $\Delta \psi_T$.

Un manomètre sera d'autant plus satisfaisant dans un montage tensiométrique que le coefficient S sera plus grand, pour deux raisons :

- rapidité de la réponse : $\tau = (1/K'S)$;
- déplacer un volume d'eau le plus restreint

possible pour ne pas modifier les conditions de la mesure (dans le cas où la bougie est implantée dans le sol).

L'unité pratique de S est le mbar/cm³.

Le calcul de S est extrêmement simple pour un tube en U avec mercure, où nous retiendrons :

$$S = \frac{\Delta \psi_T}{\Delta V} = \frac{34,6}{d^2} = \text{cte}$$

S en mbars/cm³;

d diamètre du tube capillaire en cm.

Exemple :

Pour un tube capillaire en U de 1,2 mm de diamètre intérieur :

$$S = 2,4 \times 10^3 = 2\,400 \text{ mbars/cm}^3$$

Dans le cas des capteurs de pression électriques ou des jauges Bourdons, il faut remarquer au préalable que le déplacement de la membrane élastique qui traduit la variation de pression ne correspond pas rigoureusement à une loi :

$$(\Delta \psi_T / \Delta V) = \text{cte.}$$

On peut cependant admettre une loi de ce type en n'utilisant qu'une fraction de l'échelle de mesure du manomètre et conserver :

$$S = \frac{\text{Intervalle de pression mesurable}}{\text{Variation de volume de la chambre de mesure}}$$

3/

4/ Schéma de principe du dispositif tensiométrique (fonctionnement dans le sol).

Principle of tensiometer system operation (in the ground).

Exemple :

- manomètre électrique : capteur Schlumberger ACB;
 - plage de mesure ± 200 mbars;
 - variation de volume d'une chambre 10^{-2} cm³.
- d'où :

$$S = \frac{400}{10^{-2}} = 4 \cdot 10^4 \text{ mbars/cm}^3$$

Conclusion.

L'expérimentateur a donc la possibilité de définir et calculer le paramètre τ qui caractérise l'installation tensiométrique et ses performances, à partir des caractéristiques des différents éléments qui la composent. Il est prudent cependant de ne considérer cette approche que comme destinée à donner un « ordre de grandeur » et, d'autre part, de vérifier le comportement global de l'installation en la testant sur la réponse à un échelon de pression imposée [7] (fig. 2). La valeur de τ ainsi mesurée risque d'ailleurs d'être modifiée en changeant les

conditions d'implantation de la bougie [6]. Envisager une correction précise des mesures obtenues au tensiomètre en tenant compte des valeurs de τ théoriques ou expérimentales apparaît assez illusoire et le devient complètement en considérant le comportement dans le sol, comme nous le verrons par la suite.

Considération sur le fonctionnement du tensiomètre en milieu poreux

Aspect théorique [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11] (fig. 4).

Considérons les caractéristiques suivantes du milieu poreux et du tensiomètre :

θ : teneur en eau volumique;

k : conductivité capillaire (fonction de θ , hystérésis);

$D = k \partial\psi/\partial\theta$: diffusivité;

Tableau 1

Cas d'un tensiomètre cylindrique

Capsule poreuse. . .	Cylindre de longueur : L Rayon extérieur : R Conductance unitaire : K'_a Conductance totale : $K' = A \cdot K'_a = 2 \pi R L K'_a$
Capteur.	Sensibilité : S
Terrain.	Conductivité capillaire : $k(\theta)$ Diffusivité : $D = k(\partial\psi/\partial\theta)$

On utilise les paramètres adimensionnels (Carslaw - Jaeger - Koitsch) :

$$t_0 = \frac{Dt}{R^2} \quad n = 2 \pi R^2 \left(\frac{\partial\theta}{\partial\psi} \right) SL \quad \xi = \frac{k}{R K'_a}$$

En procédant à un essai d'échelon interne $\Delta\psi_0$, à partir d'un état d'équilibre $\psi_T = \psi_S = 0$ (voir figure 3) :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = 1 - F(\xi, n, t_0)$$

F a été calculé et porté en abaques pour certaines valeurs de ξ, n, t_0 [6, 9, 11].

On peut retenir les simplifications suivantes :

1° Cas $\xi = 0$ (conductance très grande de la cellule).

pour t_0 petit :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = 1 - 4 RSLk \sqrt{\frac{\pi t}{D}}$$

pour t_0 grand :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = \frac{1}{4 \pi kSLt}$$

2° Cas $\xi \neq 0$.

pour t_0 petit :

$$\frac{\Delta t}{\Delta\psi_0} = 1 - 2 \pi RSLK'_a t = 1 - K'St$$

pour t_0 grand :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = \frac{1}{4 \pi kSLt} + \frac{1}{t^2} f(\xi, n, t_0)$$

Formulation du piézomètre (Hvorslev - Pennman).

Pour un cylindre :

$$F = \frac{2 \pi L}{2,3 \log(L/2R) + \sqrt{1 + (L^2/4R^2)}}$$

La réponse est de la forme :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = e^{-SEkt}$$

Exemple :

Cas d'une argile ($k = 10^{-8}$ cm/s) dans laquelle est implanté un tensiomètre de longueur $L = 10$ cm, de rayon $R = 0,5$ cm associé à un manomètre de sensibilité $S = 10^3$ mbars/cm³ (cas d'un tube capillaire avec mercure), il vient avec :

$$\frac{\psi_T}{\Delta\psi_0} = \frac{1}{4 \pi kSLt}$$

(cas de t_0 grand)

$t_{0,90}$: temps au bout duquel $\psi_T/\Delta\psi_0 = 0,1$ (voir fig. 3);

$t_{0,90} = 8\,000$ s (qui correspondrait à $\tau_{0,90} = 2\,600$ s, mais ce paramètre n'a plus de signification car la réponse n'est plus du premier ordre).

$\psi_s(x, t)$: pression (ou tension) interstitielle au point défini par l'abscisse x ;
 V_a : débit d'eau unitaire à travers la bougie (vers la réserve R);
 K'_a : conductance unitaire de la bougie poreuse;
 A : surface extérieure de la bougie;
 $K' = AK'_a$: conductance totale de la bougie;
 S : sensibilité du manomètre associé;
 $\psi_T(t)$: pression lue au manomètre.

Lors d'échanges entre le tensiomètre et le sol environnant, les relations suivantes sont théoriquement vérifiées.

(N.B. : Nous supposons que k et D sont invariables autour de la bougie poreuse.)

Dans le sol :

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \psi_s(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi_s(x, t)}{\partial x^2}$$

(équation de diffusion)

Au contact bougie-sol :

$$K'_a [\psi_s(0, t) - \psi_T(t)] = k \frac{\partial \psi_s(0, t)}{\partial x}$$

($x = 0$ quel que soit t)

Dans le système de mesure :

$$\frac{1}{S} \frac{d\psi_T}{dt} = K' [\psi_s(0, t) - \psi_T(t)]$$

A la limite, la succion est celle du milieu ambiant :

$$\psi_s(x, t) = \psi_s \infty$$

pour $x = \infty$ quel que soit t et $t = \infty$ quel que soit x .

Formellement, les différents cas qui peuvent se présenter : soutirage ou injection à partir du tensiomètre, échelon de pression et remise à l'équilibre, etc., seront différenciés par les conditions initiales.

Il apparaît donc que le système tensiométrique ne se comporte plus comme un système de premier ordre. Les paramètres k et D jouent un rôle dans la dynamique de réponse du tensiomètre à des échelons de pression par exemple.

A titre indicatif, nous avons porté en tableau 1 un résumé des résultats et des simplifications que l'on peut retenir dans le cas d'un tensiomètre cylindrique en réponse à un échelon de pression (Carslaw - Jaeger - Klute - Garner - Socero).

Mentionnons aussi la formulation que l'on pourrait appliquer au tensiomètre analogue à celle d'un piézomètre dans un sol de perméabilité k , en négligeant la conductance de cellule et en supposant que le système reste du premier ordre (Hvorslev-Pennman).

La réponse à un échelon de pression est de la forme : $(\psi_T / \Delta\psi_0) = e^{-SFkt}$

$\psi_T = \psi_{sol} = 0$ pour $t = \infty$ (à l'équilibre);

$\Delta\psi_0$ = échelon imposé;

F = facteur de forme de la cellule poreuse (dimension L).

Il sera donc utile dans une première étape d'appliquer ces résultats légèrement élaborés et faciles à mettre en œuvre, pour juger de l'allure de la réponse du tensiomètre à un échelon de pression et de l'influence du sol.

CONCLUSION.

Au cours de mouvements d'eau dans les sols non saturés, les caractéristiques de réponse du

5/ Evolution de la réponse du tensiomètre en présence de sable sec.

Tensiometer response curve for dry sand.

6/ Evolution de la réponse du tensiomètre en présence de sable humide.

Tensiometer response curve for moist sand.

6 bis/ Evolution de la réponse du tensiomètre en présence de sable humide.

Tensiometer response curve for moist sand.

tensiomètre vont être modifiées par suite des variations de θ , k et D au voisinage du tensiomètre. Dans le cas des sables, on pourrait s'attendre à une forte variation des caractéristiques de la réponse au cours d'un drainage par exemple par suite de l'allure des courbes $k(\theta)$ et $D(\theta)$.

Dans le cas des argiles, les considérations de tassement, compte tenu du module de compressibilité m_v du sol argileux, fournissent un facteur supplémentaire de modification de k , donc du comportement du tensiomètre.

Observations expérimentales : cas du sable.

Les essais réalisés l'ont été dans le cadre d'un contrat d'incitation entre la D.G.R.S.T. et des laboratoires de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse.

Cas du sable sec.

Le sable utilisé a les caractéristiques suivantes :
— diamètre des grains : 93 % des grains sont tels que :

$$80 \mu < d < 125 \mu$$

- porosité : 43 %;
- perméabilité : $K_0 = 5 \times 10^{-3}$ cm/s (environ);
- masse volumique des grains solides : 2,63 g/cm³.

Le montage expérimental est schématisé figure 2. On provoque des échelons de pression à l'intérieur du circuit de liaison pour étudier la mise à l'équilibre du tensiomètre. Celui-ci est mis au contact du sable sec. La réaction du tensiomètre est reproduite figure 5. En fait, lors de la mise en eau du tensiomètre, plusieurs échelons de pression avaient été imposés auparavant. Il existait donc une certaine couche humide autour de la capsule poreuse. On constate cependant :

- au début une amorce de réponse rapide dont la dynamique s'apparente à celle du fonctionnement en présence d'eau libre (courbe 2 de la figure 5);
- puis entre 0,1 et 10³ mn une loi de la forme $\psi_T = A \log t + B$;
- enfin une stabilisation relativement brutale de la succion mesurée (— 110 mbars).

Cas du sable en humidification croissante.

L'expérience précédente a été renouvelée dans le même sable en l'humidifiant progressivement. Les enregistrements de réponse du tensiomètre sont portés figures 6 et 6 bis.

Cas d'un sable drainé.

Le sable utilisé dans cette série avait des caractéristiques différentes (granulométrie entre 100 μ et 400 μ ; $k_0 = 6,1 \times 10^{-3}$ cm/s; porosité = 36 %).

Nous avons porté dans le tableau 2 les résultats des tests des tensiomètres.

Ce tableau permet de suivre la déformation de la réponse du tensiomètre en comparaison d'un système du premier ordre.

Analyse de ces résultats.

Nous pouvons dégager les points suivants :

— Pour les très faibles teneurs en eau, le tensiomètre ne se désamorce pas et semble se mettre en équilibre « forcé » comme si ce tensiomètre avait émis un bouclier d'humidité. La valeur de la succion indiquée est de toute évidence inférieure à la succion réelle, très grande, dans le milieu presque sec. Elle correspond à une succion locale au voisinage immédiat de la paroi poreuse.

— C'est seulement à partir d'une certaine teneur en eau limite (de l'ordre de 6 %) que les indications

Tableau 2

	θ	$\Delta\psi_0$ { ψ initial — ψ final } en mbars	$\tau_{0,63}$ en s	$\tau_{0,90}$ en s	$\tau_{0,95}$ en s	$\tau_{0,99}$ en s
Tensiomètre n° 1	28 %	62	4,5	4,9	4,9	5,5
	28 %	— 2,8	4,2	4,9	4,9	4,5
	12 %	+ 116,5	6	6,7	7,3	8,7
	12 %	— 42	10	10	10	10
	8 %	+ 143	10	52,2	130	445
	8 %	+ 14,15	215	252	277	213
Tensiomètre n° 2	26 %	+ 64	1,7	1,4	1,5	1,7
	21 %	+ 130	1,6	1,2	1,4	1,5
	14 %	+ 147	1,5	2,2	4,4	15,5

du tensiomètre semblent s'ordonner et dépendre directement des suctions réelles dans le milieu.

— D'autre part, les tests effectués en cours de drainage (tableau 2) montrent effectivement une variation très sensible du temps de réponse, mais que l'on peut difficilement relier à des paramètres précis.

— On notera enfin la non-symétrie du comportement en phase d'injection ou de soutirage vis-à-vis du milieu.

Cas de l'argile.

En plus de l'influence de la variation de la perméabilité en fonction de la teneur en eau déjà observée dans le cas d'un milieu sableux, le fonctionnement du tensiomètre placé dans de l'argile va être sensible à l'état de contrainte lié à l'indice des vides. L'effet de consolidation entraîne une variation de perméabilité même en milieu saturé. Pour juger de l'effet de consolidation sur la mesure tensiométrique nous avons procédé à l'expérience suivante (fig. 7).

Une pâte argileuse constituée, l'argile de Mielan très remaniée est placée dans une petite colonne en Altuglass de hauteur 40 cm, à la teneur en eau de 42,7 %. Un tensiomètre était situé à 14 cm de profondeur. Par un essai préalable dans l'eau, le temps de réponse global du tensiomètre est évalué à 5,4 s. Après la mise en place de l'argile avec une légère compaction, le temps de réponse est passé à 150 s. On exerce alors une surpression mécanique de 1,2 bar au sommet de la colonne. On observe conformément à la théorie de Terzaghi une mise en pression de l'eau (qui atteint son maximum au bout de 90 mn) puis un phénomène de dépression qui correspond au tassage du massif (teneur en eau finale = 41 %) qui semble s'achever selon le tensiomètre au bout de 5 000 mn.

Si l'on procède alors à un essai caractérisant le temps de réponse, on trouve une valeur proche de 1 300 s.

Ainsi, pour atteindre les 99 % d'un échelon de pression, il faudrait attendre :

$4,6 \times 5,4 \text{ s} = 25 \text{ s}$ si le tensiomètre était en présence d'eau libre;

700 s dans l'argile très peu compacte;

6 000 s dans l'argile comprimée à 1,2 bar.

Il convient de noter que nous sommes encore loin des conditions de compaction des argiles naturelles où il faut s'attendre à des réponses fortement ralenties par rapport au comportement propre du tensiomètre.

Conclusion.

La nécessité d'une vérification permanente des caractéristiques dynamiques de la réponse d'un tensiomètre, s'impose nettement par suite des fortes variations de k et D dans le sol. Une approche théorique peut fournir des ordres de grandeur, mais la détermination expérimentale régulière de cette réponse pour le tensiomètre *in situ*, est indispensable à l'interprétation correcte des résultats obtenus.

Limites d'utilisation du tensiomètre classique.

Nous avons fait apparaître une limite d'utilisation du tensiomètre : la pression critique d'entrée d'air correspondant à la désaturation de la paroi-poreuse.

Il existe une seconde limite; la théorie du tensiomètre classique suppose en effet une continuité d'eau liquide entre l'eau du sol et l'eau du manomètre. Mais au-delà d'une certaine dépression (pratiquement 700 mbars) l'eau va caviter dans le système de mesure. Il y a vaporisation partielle qui anéantit la validité des mesures. Or les suctions dans les zones arides peuvent atteindre des valeurs supérieures à 10 bars (rappelons que le « point de flétrissement » utilisé classiquement par les agronomes — correspond à une suction de 10 bars et définit la valeur limite de la dépression d'eau que peuvent supporter les racines des plantes).

D'autre part nous avons signalé que le tensiomètre classique ne permettait pas de tenir compte de la composante osmotique du potentiel total.

Si l'on veut connaître cette composante, il faut utiliser des membranes imperméables aux ions ou cations dissous dans l'eau du sol.

Ces considérations suggèrent l'utilisation d'un appareil de mesure relativement différent du tensiomètre classique : le tensiomètre osmotique.

Le tensiomètre osmotique

Principe du tensiomètre osmotique.

Supposons que l'on dispose d'une membrane osmotique, semi-perméable à un solvant (eau) mais ne laissant pas passer les molécules de soluté (sel). Si l'on met en relation, par l'intermédiaire de cette membrane, une solution eau + sel (solution 1) et le solvant pur (solution 2), et si les deux solutions sont soumises à la même pression atmosphérique, il se produit instantanément un écoulement du solvant pur vers la solution 1. Si l'on veut rétablir l'équilibre, il faut appliquer sur la solution 1 une pression π_0 donnée par :

$$\pi_0 = - \frac{[\mu_1 - \mu_0]}{V_1^0} \quad (1)$$

où :

μ_1 est le potentiel chimique de la solution 1;

μ_0 est le potentiel chimique du solvant pur pris comme référence;

V_1^0 le volume molaire du soluté dans la solution 1.

Considérons maintenant le cas (fig. 8) où la solution 1 est enfermée dans un récipient dont le fond est constitué d'un diaphragme élastique, l'ensemble étant initialement au repos.

Si à un temps $t = \tau$ donné on met en contact la solution saline avec le solvant pur, du solvant va rentrer dans la solution 1. Son volume va donc augmenter, et le diaphragme se déformer. La déformation du diaphragme produira une augmentation de pression sur la solution 1, l'écoulement s'arrêtera lorsque la pression créée par le diaphragme sera égale à la pression osmotique π_0 donnée par (1), à condition que la variation de concentration de la solution 1 entre l'état initial et l'état final soit négligeable. Si le diaphragme est muni d'un dispositif de mesure de pression, on peut ainsi obtenir la valeur de π_0 et celle de $(\mu_1 - \mu_0)$.

Si l'on recommence la même expérience en utilisant comme solution 2 l'eau d'un sol, donc

7/ Evolution de la pression interstitielle dans un milieu argileux. Consolidation.

Interstitial pressure curve for a clay medium. Consolidation.

8/ Principe général du tensiomètre osmotique.

Schematic design of an osmotic tensiometer.

9/ Détail des tensiomètres osmotiques utilisés pour les essais.

Detail of osmotic tensiometer used for the series of experiments.

Dimensions en millimètres.

affectée d'un potentiel chimique $\mu_2 < \mu_0$; la déformation du diaphragme sera, en conséquence, moindre et l'on pourra obtenir μ_2 , ou la succion correspondante de l'eau, à partir de $(\pi_0 - \pi)$, π étant la valeur de la pression d'équilibre mesurée dans ce second cas.

Si, enfin, la succion de l'eau est égale — en terme de pression — à la pression osmotique π_0 , ou si les potentiels chimiques de l'eau du sol et de la solution 1 sont égaux, il n'y aura aucun écoulement, et le diaphragme restera en position neutre.

On peut ainsi théoriquement mesurer des valeurs de la succion de l'ordre de plusieurs dizaines de bars en utilisant des solutions osmotiques de plus en plus concentrées.

Il est bon cependant de signaler les obstacles qui pourront surgir :

1. Si la membrane osmotique n'est pas absolument étanche, $(\mu_1 - \mu_0)$ variera au cours du temps, et il faudra procéder à des étalonnages constants du tensiomètre, puisque toutes les mesures se feront à partir de $(\pi_0 - \pi)$.

2. La température intervient directement dans l'expression de V_1^0 et de μ . Elle pourra également jouer dans la dilatation du diaphragme.

3. Si l'augmentation de volume de la solution 1 n'est pas négligeable, la concentration de la solution de référence pourra varier entre le début et la fin des essais. Il sera donc important de tenir compte de ce facteur.

4. Le temps de réponse de l'appareil sera fonction de la facilité avec laquelle le solvant pourra rentrer dans la solution 1. Si ce temps de réponse est du même ordre de grandeur que les fluctuations de succions *in situ*, il peut être permis de douter des possibilités d'utilisation des résultats obtenus.

Problèmes posés par la réalisation d'un tensiomètre osmotique.

Des essais ont été réalisés dans le cadre d'un contrat d'incitation entre le Bureau d'Etude Permanent des problèmes de l'eau et les Laboratoires de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble. Nous pouvons résumer ainsi les options choisies et les résultats obtenus.

Appareillage de mesure (voir fig. 9).

Le choix des capteurs de pression s'imposait par suite des impératifs suivants :

- la mesure de la pression doit se faire rapidement tout en prévoyant un appareil pouvant être enterré, donc non accessible;
- les variations de volume de la chambre de mesure doivent être le plus faibles possible; le volume d'eau passant du sol dans la chambre de mesure a en effet une triple influence :
 - sur la concentration de la solution,
 - sur la variation de la teneur en eau du sol dans la zone de mesure,
 - sur le temps de réponse de l'appareil;
- la chambre de mesure doit être suffisamment rigide pour que seul le diaphragme se déforme sous l'effet de variations de pression.

Choix des membranes et solutions osmotiques.

La difficulté essentielle provient du choix du couple « membrane-solution osmotique » : il faut en effet que la membrane soit absolument imperméable au soluté, pour que la concentration de la

10/ Réponse d'une solution de carbowax 6000 en contact avec de l'eau pure.

Evolution of the osmotic pressure given by a solution of Carbowax 6000 in contact with pure water.

11/ Pression osmotique pour différentes concentrations de soluté.

Theoretical value of the osmotic pressure for different concentration of solutes.

12/ Solution de CaCl_2 avec une membrane d'acétate de cellulose. Evolution de la pression osmotique et des pertes de masse.

Solution of CaCl_2 with a membrane of cellulose-acetate. Evolution of osmotic pressure and mass losses.

solution 1 — ou la pression osmotique de référence π_0 — demeure constante. La membrane doit également être imperméable aux sels qui peuvent être dissous dans le sol. Enfin, membrane et solution osmotique ne doivent pas avoir d'interactions chimiques.

Ce choix serait grandement facilité si l'on connaissait la nature exacte du mécanisme de filtration à travers les membranes semi-perméables. Signalons les quatre hypothèses retenues par Spiegler (1966) pour expliciter ce mécanisme :

- distillation du solvant à travers la membrane;
- mécanisme de filtration : la membrane ne laissant passer que les molécules de taille inférieure à une dimension caractéristique, qui pourrait être la dimension moyenne des « pores » de cette membrane;
- phénomènes de tension de surface au niveau de la double couche;
- migration des molécules de solvant par liaison entre atomes d'hydrogène.

Aucune de ces hypothèses ne semble cependant avoir de support expérimental précis.

A défaut d'une connaissance exacte du transfert, nous nous sommes rabattus sur l'empirisme : on connaît en effet, depuis longtemps, les propriétés osmotiques du couple « Visking-Carbowax » (Lagerwerff, Ogata et Eagle (1961), Kemper-Evans (1963), Zur (1966), Peck-Rabbidge (1966)), ainsi que celles du couple « Acétate de cellulose-Eau salée » (Spiegler (1966), Duriau (1966)). Nous avons effectué des essais systématiques avec ces deux couples « membrane-solution ».

Couple Visking-Carbowax.

Les essais ont donc été effectués avec une membrane de Visking (triacétate de cellulose) et une solution de polyéthylène-glycol (Carbowax) de masse moléculaire 6 000.

Pour une solution organique non ionisée, on peut exprimer la formule (1) sous la forme :

$$\pi_0 = \gamma \cdot RT \cdot m_p$$

où :

γ est le coefficient d'activité du polymère, qui varie très fortement avec sa concentration (pour le polyéthylène-glycol de masse moléculaire 6 000, γ varie de 1,29 pour une concentration de 20 g/l à 5 pour une concentration de 200 g/l);

m_p est la molarité (moles/l).

On trouvera, figure 11, la loi $\pi = f(m_p)$ du Carbowax 6 000.

Le graphique donné, figure 10, est un exemple typique de courbe de réponse obtenue en mettant en contact le capteur avec une solution d'eau pure. Le retard de la réponse est dû essentiellement à la difficulté pour l'eau de diffuser dans la solution osmotique.

On notera que la valeur expérimentale de π_0 est assez différente de la valeur théorique. Ceci est essentiellement dû à la valeur réelle de la masse moléculaire, souvent assez inférieure à sa valeur théorique, et de l'incertitude attachée à la détermination du coefficient d'activité γ .

Il faut cependant noter un certain nombre de facteurs qui portent à éliminer systématiquement ce couple.

a) Instabilité chimique de la membrane et de la solution : la membrane se décompose en milieu acide ou sous l'effet des bactéries présentes dans le sol; le degré de polymérisation de la solution peut varier dans le temps.

b) Réaction mutuelle Visking-Carbowax.

c) Membrane de Visking perméable aux anions et cations de l'eau du sol.

d) Influence importante de la température intervenant sur la valeur du coefficient d'activité.

Couple acétate de cellulose-chlorure de calcium.

Devant les problèmes soulevés par l'instabilité du polyéthylène-glycol, nous avons essayé d'utiliser des membranes en acétate de cellulose avec une solution de sel minéral : chlorure de calcium.

Dans le cas de solutions diluées ionisées, la valeur de pression osmotique peut être approchée par :

$$\pi_0 = RT \cdot v \cdot m_p$$

ou :

v est le nombre d'ions par mole de solution;
 m_p la molarité de la solution.

On trouvera, figure 11, la valeur de la pression osmotique théorique d'une solution de CaCl_2 en contact avec de l'eau pure, avec une membrane parfaite.

Ces membranes sont utilisées depuis longtemps pour désaliniser l'eau de mer par osmose inverse. Il faut cependant noter que l'on n'arrive jamais à obtenir des membranes imperméables à 100 % aux ions de soluté. Le problème est peu important pour la désalinisation, puisque l'eau potable peut être légèrement salée. Pour le problème qui nous intéresse, il est nécessaire d'avoir une membrane absolument imperméable au soluté, pour ne pas avoir de variation de la concentration de la solution, tout en ayant une perméabilité suffisante au solvant (eau) pour ne pas avoir des temps de réponse trop importants.

Les essais ont été effectués avec des membranes de diacétate livrées par la S.R.T.I. (*). L'on peut tirer les conclusions suivantes de l'ensemble des résultats que nous avons obtenus :

- les valeurs théoriques ne sont pas atteintes;
- les membranes vieillissent. Ce vieillissement se traduit par une diminution de leur propriété de semi-perméabilité;
- les pertes d'ions sont d'autant plus importantes que la concentration initiale des solutions est plus importante.

Les résultats d'essai reportés figure 12 sont relatifs à une membrane d'acétate, vieille de un mois, en contact avec une solution de CaCl_2 -0,5 N. La courbe $X(t)$ représente le poids de CaCl_2 passant à travers la membrane, et mesuré par conductimétrie dans la solution extérieure au tensiomètre. Y_0 représente le poids de CaCl_2 initialement dissous dans la solution osmotique. V_1 et V_2 sont les volumes relatifs de la solution osmotique et de la solution externe. $\pi(t)$ est la valeur de la pression osmotique indiquée par le capteur de pression. Au bout d'une semaine, la pression osmotique, initialement fixée théoriquement à 15 bars, ne vaut plus que 0,4 bar.

Conclusion.

Le résultat des essais effectués est donc relativement négatif. Nous pensons qu'il est cependant utile d'avoir souligné les problèmes que l'on peut rencontrer avec chaque type de couple membrane-solution.

La conclusion qui s'impose est la nécessité de développer un type de membrane inerte mais relativement perméable au solvant. Toute la technologie de la mesure repose, en effet, sur la membrane semi-perméable. Tant que l'on ne sera pas assuré de la perméabilité complète de la membrane vis-à-vis du soluté, et de sa stabilité chimique, tout en ayant cependant un transfert relativement facile du solvant à travers cette membrane, il ne semble pas que l'on puisse envisager un tensiomètre osmotique suffisamment fiable.

Il est intéressant de noter les efforts effectués dans ce sens par la S.R.T.I., et tendant à développer une membrane en caoutchouc silicone complètement inerte, absolument imperméable aux liquides et *a fortiori* aux ions dissous et ne laissant passer que la phase vapeur.

La diffusion de vapeur étant cependant fonction du gradient de pression osmotique, on arrive à des temps de réponse extrêmement longs (de l'ordre de plusieurs jours) ce qui peut conduire à un déphasage, suivi d'un écrêtage de pression tel que l'interprétation des résultats risque d'être impossible.

Autre point important qui est, en fait, la différence fondamentale entre la membrane en caoutchouc silicone et les autres types de membrane étudiés : le transfert de liquide se fait dans un cas en phase vapeur, dans l'autre en phase liquide. On est donc ramené avec les membranes silicones à une mesure de la succion à partir de la valeur de la pression de vapeur de l'eau. Quand on connaît l'influence de la température sur la relation $\psi = f(p/p_0)$ et les difficultés rencontrées avec les psychromètres (Rawlins, 1966) (rappelons qu'une variation de (p/p_0) de 1 à 0,99 produit une variation de succion de 0 à 15 bars, ce qui amène à utiliser des bains régulés en température à 10^{-3}°C), on peut émettre quelques doutes sur l'exploitation des résultats obtenus avec ce type de membrane.

Bibliographie

Tensiomètres classiques

- [1] RICHARDS (L.-A.). — Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Scien.*, vol. 68, 1949.
- [2] VACHAUD (G.). — Temps de réponse des tensiomètres. Rapport interne B.E.P., 1968.
- [3] WATSON (K. K.). — Non continuous porous media flow. Rapport spécial, *Water Resources Res.*, 1965.
- [4] KLUTE (A.), GARDNER (W. R.). — Tensiometer response time. *Soil Sci. Am. Proc.*, mai 1961.
- [5] CARSLAW (H. S.), JAEGER (J. C.). — Conduction of heat in solids. *Oxford Press*, 1947.

(*) Société de Recherches Technique et Industrielle, 17, rue de la Reine, 92 - Boulogne.

- [6] GARDNER (W.R.).
 a) Measurement of capillary conductivity and diffusivity with a tensiometer. *Trans. Intern. Congr. Soil Sci.*, 7^e Congr., 1961.
 b) Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 20, p. 317-320.
- [7] KORTSZCH (R.). — Détermination de la conductivité capillaire et de la diffusivité d'un sol *in situ*. Traduction (rapport interne B.E.P. 1968) d'une communication présentée au Symposium 1967, Haïfa (A.I.H.S.).
- [8] PENMAN (A.D.). — A study of the response time of various types of piezometer. Dans *Pore pressure and suction in soils*, Edition Butterworths, 1961, Londres.
- [9] SORMAIL (L.), THIRRIOT (C.). — Rapport interne D.G.R. S.T. « Contrat n° 67 00 575 ». Utilisation des tensiomètres pour l'étude des mouvements d'eau dans le sol (1968).
- [10] SORMAIL (L.). — Quelques considérations sur l'emploi des tensiomètres. *Bulletin A.I.H.S.*, XIV, 3, 6-1969.
- [11] SOEIRO, DESSAINT. — Quelques problèmes posés par la mesure des pressions interstitielles dans le sol. *Bulletin A.I.H.S.*, XIV, 3, 6 1969.

Tensiomètre osmotique

- [13] ALEXANDROWICZ (Z.). — Light scattering measurement of the osmotic activity of a polyethylene glycol solution. *J. of Polymer Science*, XL, p. 107-112 (1959).
- [14] BANIN (A.), DAVEY (B.G.) and Low (P.R.). — Effect of membrane pore size on the measurement of water tension in bentonite suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 32, p. 306-309 (1968).
- [15] DURIAU (Y.). — Osmose inverse. *Annales des Mines* (1966).
- [16] KEMPER (W.D.), EVANS (N.A.). — Movements of water as affected by free energy and pressure gradients. III : Restriction of solute by membranes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 27, p. 485-490 (1963).
- [17] LAGERWERFF (J.V.), OGATA (G.) and EAGLE (H.E.). — Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol. *Science*, v. 133, p. 1486-1487 (1961).
- [18] MOKADY (R.S.). — Phosphate determination in presence of polyethylene glycol. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 31, p. 819 (1967).

- [19] PECK (A.J.), RABBIDGE (R.M.). — Soil water potential. Direct measurement by a new technique. *Science*, v. 151, p. 1325-1326 (1966).
- [20] RAWLINS (S.L.). — Theory for thermocouple psychrometers used to measured water potential in soils. *Agr. Meteorol.*, 3, 293-310 (1966).
- [21] SPIEGLER (K.S.). — Principles of desalinisation. *Academic Press*, New York.
- [22] ZUR (B.). — Osmotic control of the matric soil water potential. I. Soil water system. *Soil Sci.*, v. 102, p. 394-398 (1966).

Discussion

Président : M. A. HOUEURT

M. SORMAIL présente la communication. M. le Président le remercie et ouvre le débat.

A la demande de M. VACHAUD, M. SORMAIL précise que les temps de réponse de l'ordre de 2 000 secondes se rapportent à l'ensemble sol-tensiomètre puisque la mesure implique un transfert d'eau de la capsule poreuse vers le sol ou vice-versa.

Quel est l'ordre de grandeur des volumes ainsi transférés dans le cas d'un tensiomètre osmotique, demande M. le Président ?

Pour un volume de tensiomètre de 0,214 cm³ le dV/V était de l'ordre de 0,003 (V étant la flèche maximale du diaphragme), répond M. VACHAUD.

M. RÉMÉNÉRAS suggère de réaliser une mesure par une méthode de zéro en utilisant les gradients de pression produits — au moins dans les terrains à grains très fin — par l'électroosmose. On peut penser qu'un très faible courant électrique suffirait pour produire un gradient égal et de sens inverse à ceux existant dans le terrain.

Cela suppose qu'il est possible de mesurer le débit par un moyen qui reste à préciser, répond M. VACHAUD...

M. le Président clôt la discussion en remerciant les personnalités qui l'ont suscitée et animée.

Abstract

Non-saturated soil moisture potential measurement by conventional and osmotic tensiometer

As used in the physics of unsaturated porous media a tensiometer is an instrument which measures the free energy level in terms of pressure of environmental water by balancing it locally. The interpretation and improvement of this type of measurement requires accurate knowledge of the mechanism involved in achieving equilibrium between the tensiometer and its porous environment. It is this mechanism which is analysed.

The transfer function of a conventional water tensiometer with a response time $\tau = 1/K'S$ is shown and the effect of each part of the tensiometric system is considered, i.e. a manometer of sensitivity S , the circuit, and a porous plug of conductance K' .

For a tensiometer in a porous medium this notion has to be completed in terms of the properties of the latter. A systematic check on the dynamic behaviour of the tensiometer is then essential.

The underlying feature of the osmotic tensiometer is that it measures in terms of pressure the difference in chemical potential between a solution and the dissolvent, in this case water. Measured suction values are apt to be very high. The emphasis is laid on practical design problems.