



HAL
open science

Utilisation des micropsychrometres pour la mesure du potentiel hydrique du sol

Laurent Bruckler, J.C. Gaudu

► **To cite this version:**

Laurent Bruckler, J.C. Gaudu. Utilisation des micropsychrometres pour la mesure du potentiel hydrique du sol. Journées de physique, Dec 1987, Les Arcs, France. hal-02780019

HAL Id: hal-02780019

<https://hal.inrae.fr/hal-02780019>

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Utilisation des micropsychromètres pour la mesure du potentiel hydrique du sol

L. BRUCKLER et J.-C. GAUDU (INRA)

The physical principle of psychrometric measurement is presented together with two simulation models of psychrometric responses (psychrometric and dew-point methods). According to these models, good agreement was obtained between forecast and experimental data. Experimental data are provided to show that the psychrometric measurements were little by non-isothermal conditions.

I. INTRODUCTION

L'intérêt des micropsychromètres à effet PELTIER pour la mesure du potentiel de l'eau réside, pour une grande part, dans la gamme des valeurs de potentiel accessibles avec cette technique (plusieurs dizaines de bars). Pour les végétaux, cette gamme contient l'ensemble des valeurs de potentiels foliaires ou racinaires couramment observés ; pour les mesures effectuées sur le sol, elle permet de sortir des limites imposées par la tensiométrie.

Pour cette raison essentielle, la psychrométrie a suscité beaucoup de travaux, notamment depuis ceux de SPANNER (1951) qui indiquaient les possibilités, théoriques et techniques, offertes par cette méthode. Globalement, ces travaux peuvent être classés selon 3 grands axes :

A. Les recherches relatives aux bases physiques du fonctionnement des psychromètres qui devaient déboucher sur la modélisation de la réponse psychrométrique, c'est-à-dire de la relation entre la force électromotrice délivrée par le thermocouple et le potentiel de la phase gazeuse (RAWLINS, 1966 ; PECK, 1968, 1969 ; SCOTTER, 1972).

B. La mise au point de modalités techniques de mesures en laboratoire, sur le sol ou sur les végétaux (MONTEITH & OWEN, 1958 ; MILLAR, 1971a, b ; MILLAR, 1974 ; SLACK & RIGGLE, 1980).

C. L'utilisation de la mesure psychrométrique in situ, ou plus généralement en conditions non isothermes (RAWLINS & DALTON, 1967 ; MERRILL & RAWLINS, 1972 ; VALANCOGNE & DAUDET, 1974).

Dans ce cas, les problèmes posés sont relatifs au sens de la mesure : en effet, la démonstration théorique ou expérimentale de la validité ou de la non-validité de la mesure in situ n'est pas facile, puisque les résultats acquis ne peuvent être corrélés

avec ceux d'une technique indépendante et suffisamment précise sur une gamme de plusieurs dizaines de bars. De plus, les variations de température, qui peuvent a priori perturber la mesure, induisent aussi des variations réelles de l'humidité relative de la phase gazeuse, c'est-à-dire de la variable à mesurer.

II. PRINCIPE DE LA MESURE PSYCHROMETRIQUE

La mesure psychrométrique ne concerne que la phase gazeuse d'un milieu donné : de ce fait, il est abusif de parler a priori de mesure du "potentiel hydrique d'un sol" puisqu'en toute rigueur la mesure se ramène à celle d'une humidité relative ou d'une pression partielle de vapeur d'eau : il n'y a coïncidence entre les deux termes de potentiel de l'eau du sol et d'humidité relative que dans le cas où l'équilibre entre les différentes phases est réalisé, ce qui ne constitue pas a priori le cas général, surtout en conditions non isothermes. Si l'on considère le cas idéal où l'équilibre entre les phases "solide + liquide" et gazeuse est réalisé à une température T_0 , on pourra caractériser cette phase gazeuse par trois grandeurs :

- sa pression partielle de vapeur d'eau p ,
- son humidité relative $H_r = p/p_0(T_0)$,

$p_0(T_0)$ étant la pression de vapeur saturante à la température T_0 ,

- son potentiel hydrique ψ , tel que :

$$\psi = \frac{RT_0}{Mg} \ln(p/p_0) \quad (1)$$

- ψ = potentiel [L]
- R = constante des gaz parfaits $\{ML^2T^{-2} \text{ mole}^{-1}K^{-1}\}$
- M = masse molaire de l'eau $\{M \text{ mole}^{-1}\}$
- g = accélération de la pesanteur $[L T^{-2}]$

Le principe de la mesure consiste à déterminer $(p/p_0(T))$ pour la phase gazeuse située dans la chambre interne du psychromètre et supposée en équilibre avec le milieu extérieur (fig. 1). La chambre de mesure, délimitée par une capsule poreuse, renferme un thermocouple chromel-constantan (Cr/Cst), qui comporte une jonction de "mesure" et une jonction de "référence", constituée en réalité de deux plots de cuivre, et dont la température doit rester constante tout au long de la mesure (forte chaleur massique).

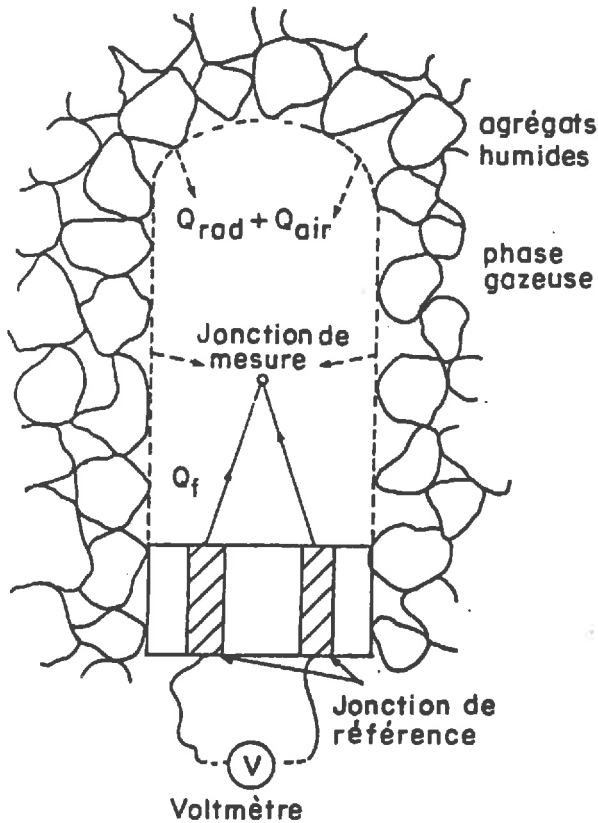


Figure 1 - Représentation schématique d'un micropsychromètre (Q_f , Q_{rad} , Q_{air} : voir texte)

Le matériel utilisé est de type Wescor (microvoltmètre HR 33 T).

Dans une première phase, à partir de l'état initial A du système, on refroidit la soudure de mesure par effet PELTIER jusqu'à condensation d'une infime quantité d'eau sur celle-ci (fig. 2, parcours AB). Si le refroidissement est prolongé au-delà de la température du point de rosée T_r , la masse d'eau condensée sur la soudure de mesure augmente (fig. 2, parcours BC). A partir de l'arrêt du refroidissement, deux méthodes de mesure sont alors possibles en utilisant le matériel cité plus haut :

- dans la méthode psychrométrique dite "classique", on laisse la soudure de mesure se réchauffer librement. Du fait de l'évaporation, la soudure de mesure prend une température d'équilibre T_e telle que $T_r < T_e < T_0$:

dans ce cas, l'évaporation a lieu à une température supérieure à la température du point de rosée T_r , car cette dernière caractérise précisément un équilibre liquide-vapeur, c'est-à-dire l'absence d'évaporation. On détermine enfin la relation $T_0 - T_e = f(p/p_0(T_0))$, par étalonnage expérimental ou modélisation.

- dans la méthode psychrométrique dite "du point de rosée", après arrêt du refroidissement et réchauffement de la soudure jusqu'au point de rosée (fig. 2, parcours CB), un dispositif électronique permet de compenser par effet PELTIER le réchauffement de la soudure dû aux flux radiatifs et conductifs vers la soudure de mesure : celle-ci tend alors à prendre une température d'équilibre égale à T_r . Dans ce cas, on mesure un abaissement de température $T_0 - T_r = f(p/p_0(T_0))$.

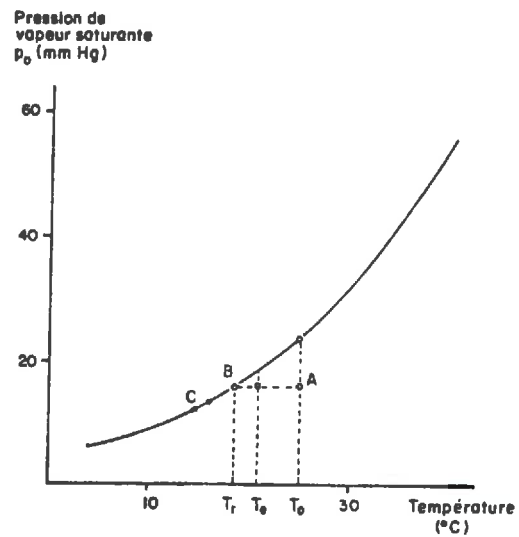


Figure 2 - Pression de vapeur saturante en fonction de la température et principe de mesure des micropsychromètres.

III. MODELISATION DE LA REPONSE PSYCHROMETRIQUE

Les deux méthodes présentées, correspondant à des situations physiques différentes, répondent à deux modélisations bien distinctes.

A. Méthode psychrométrique classique

Lors de la phase d'évaporation de l'eau condensée, la soudure se trouve à une température T_e , alors que le milieu environnant reste sensiblement à la température initiale T_0 . Cette différence de température ($T_0 - T_e$) induit un ensemble de flux énergétiques du milieu extérieur vers la soudure.

Pour modéliser la réponse du psychromètre, RAWLINS (1966) propose d'analyser le bilan d'énergie au niveau de la soudure.

On distingue trois flux du milieu extérieur vers la soudure :

- un flux de type radiatif, des parois de la chambre psychrométrique vers la jonction de mesure (dQ_{rad}/dt),
- un flux de type conductif à travers le volume d'air de la chambre (dQ_{air}/dt),
- un flux de type conductif le long des fils du thermocouple (dQ_f/dt).

Dans le même temps, l'évaporation de la masse d'eau condensée correspond à un flux de chaleur latente (dQ_{evap}/dt).

L'écriture du bilan énergétique au niveau de la soudure s'écrit alors :

$$\frac{dQ_{\text{rad}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{air}}}{dt} + \frac{dQ_f}{dt} = \frac{dQ_{\text{evap}}}{dt} \quad (2)$$

De (2), on déduit alors l'expression de l'abaissement de température ($T_o - T_e$) ou de la force électromotrice correspondante U aux bornes du thermocouple correspondant à un potentiel ψ de la phase gazeuse.

B. Méthode du point de rosée

Contrairement au cas précédent, la stabilisation de la température au point de rosée implique qu'il y a équilibre strict "liquide-vapeur" et qu'il n'y a ni vaporisation, ni condensation : l'apport énergétique du milieu extérieur se trouve ainsi totalement compensé par l'extraction de chaleur du thermocouple par effet PELTIER. La modélisation se ramène dans ce cas à l'obtention d'une relation physique entre l'abaissement de température ($T_o - T_r$) et le potentiel de l'eau ψ correspondant à une pression partielle réelle de la vapeur d'eau p :

On a ainsi :

$$p = p_o(T_r) \quad (3)$$

et d'après la loi de Kelvin :

$$p = p_o(T_o) \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right) \quad (4)$$

La combinaison de (3), (4) permet d'écrire :

$$p_o(T_r) = p_o(T_o) \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right) \quad (5)$$

soit encore :

$$p_o(T_r) - p_o(T_o) + p_o(T_o) = p_o(T_o) \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right) \quad (6)$$

En approchant la pente de la courbe de pression de vapeur saturante $p'_o(T_o)$ par :

$$p'_o(T_o) = \frac{p_o(T_o) - p_o(T_r)}{T_o - T_r} \quad (7)$$

on aura finalement :

$$(T_o - T_r) = \frac{p_o(T_o)}{p'_o(T_o)} \cdot [1 - \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right)] \quad (8)$$

L'équation (8) peut s'exprimer également par rapport à la force électromotrice lue U :

$$U = \alpha \frac{p_o(T_o)}{p'_o(T_o)} \cdot [1 - \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right)] \quad (9)$$

Enfin, en utilisant la relation de Clausius-Clapeyron

$$p'_o(T_o) = p_o(T_o) \cdot \frac{L}{RT_o^2} \quad (10)$$

On pourra aussi écrire :

$$U = \frac{RT_o^2}{L} [1 - \exp\left(\frac{Mg}{RT_o} \cdot \psi\right)] \quad (11)$$

C. Comparaison des deux méthodes

Les principales caractéristiques des deux méthodes et des modèles correspondants sont les suivantes :

1. La réponse psychrométrique U ou ($T_o - T_e$) caractérisant la première méthode dépend des caractéristiques géométriques et physiques du psychromètre. (fig. 3)

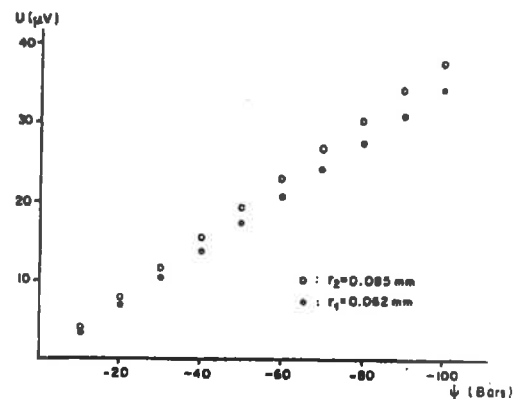


Figure 3 - f.e.m. calculée en fonction du potentiel de l'eau pour 2 rayons de la soudure de mesure (méthode psychrométrique classique).

2. L'abaissement de température ($T_o - T_r$) étant supérieur à ($T_o - T_e$), la méthode du point de rosée fournit nécessairement des forces électromotrices U plus élevées : cette dernière méthode est donc la plus sensible.

3. Les deux méthodes de mesures sont sensibles aux variations de température du milieu, soit directement (T_o), soit indirectement, par l'intermédiaire des paramètres dépendant de T_o . Après calculs, il s'avère cependant que la méthode psychrométrique classique est beaucoup plus sensible que la méthode du point de rosée : les exigences relatives à la connaissance de la température réelle du milieu sont donc beaucoup plus importantes pour la première méthode (fig. 4).

Sur l'ensemble de ces trois points, la méthode

du point de rosée apparaît nettement plus performante que la méthode classique.

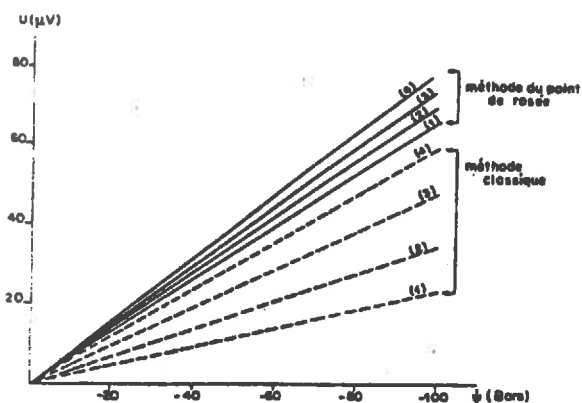


Figure 4 - f.e.m. calculée en fonction du potentiel de l'eau pour deux méthodes de mesures (méthode classique et point de rosée).

IV. ETALONNAGE DES PSYCHROMETRES : VALIDATION DES MODELES ET PROBLEMES POSES

L'étalonnage s'effectue par mise en équilibre de la chambre psychrométrique avec une phase gazeuse à potentiel connu, fixé par une solution de NaCl (LANG, 1967). La température est contrôlée au 1/100e de degré, au moins dans le cas où le bain thermostaté est à 20°C, température d'ambiance de la pièce de travail. Deux techniques d'étalonnage sont utilisées :

- dans le cas des psychromètres à céramique (WESCOR, PCT 55-15) protégés par une capsule dont le système poral est fin, on plonge directement le psychromètre dans la solution. Cette technique a l'avantage de placer la chambre de mesure dans des conditions thermiques relativement stables.

- dans le cas des psychromètres à grille, protégés par une simple trame métallique (WESCOR, PST 55-15), la chambre est nécessairement placée en phase gazeuse au-dessus de la solution.

La comparaison entre la prévision des relations $U = f(\psi)$ et l'étalonnage expérimental selon les deux méthodes donne des résultats très satisfaisants (fig. 5).

Il apparaît ainsi :

- que, dans la méthode classique, les hypothèses de calcul proposées par RAWLINS semblent tout à fait adéquates et que les psychromètres ont des caractéristiques géométriques très proches les unes des autres ;
- que, dans la méthode du point de rosée, la convergence vers la température T_r est correctement assurée.

Cette conclusion reste d'ailleurs valide lorsqu'on élargit à gamme des températures d'étalonnage testées.

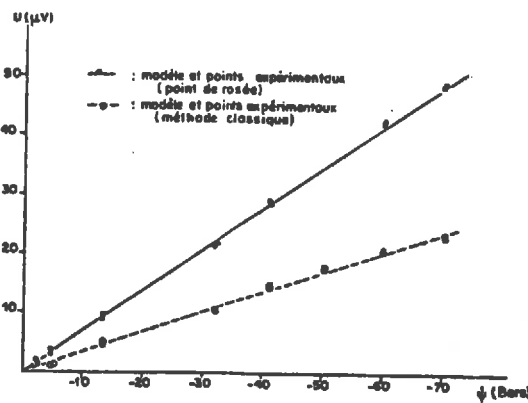


Figure 5 - Courbes d'étalonnage théorique et expérimentale.

V. ANALYSE DES SOURCES D'ERREURS LIEES A LA NON-ISOTHERMIE

A. Analyse des effets thermiques proprement dits

1. Dispositif expérimental

Un psychromètre à céramique est plongé dans une solution à potentiel connu et l'ensemble est soumis à des variations thermiques (échauffement ou refroidissement). On a réalisé deux manipulations :

- manipulation 1 : échauffement de la solution (20 à 25°C),
- manipulation 2 : refroidissement de la solution (25 à 20°C).

L'avantage lié à l'utilisation d'un psychromètre à céramique plongé dans la solution réside dans le fait que la solution affleure sur la paroi interne de la capsule psychrométrique et que les problèmes éventuels de barrière de diffusion sont ainsi totalement éliminés.

2. Résultats expérimentaux

Quelle que soit la méthode de mesure, les valeurs observées restent très proches de la valeur théorique du potentiel de la solution. En moyenne, les écarts observés sont de plus ou moins 1 bar, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la précision de la mesure elle-même : la variation de température dans le temps n'induit donc que des perturbations faibles.

B. Rôle de la capsule poreuse vis-à-vis de la diffusion gazeuse.

1. Dispositif expérimental

Trois manipulations sont réalisées en disposant les psychromètres dans une phase gazeuse (~ 100 cm³) au-dessus d'une solution à potentiel connu. Dans les trois cas, on soumet le dispositif à un échauffement intense (> 5°C/h).

Manipulation 3 : thermocouple nu, sans capsule poreuse, placé dans une phase gazeuse échauffé de 20 à 27°C.

Manipulation 4 : thermocouple nu plus thermocouple avec grille, placés dans une phase gazeuse échauffée de 20 à 25°C.

Manipulation 5 : thermocouple nu plus thermocouple avec céramique, placés dans une phase gazeuse échauffée de 20 à 30°C.

2. Résultats expérimentaux

En partant d'une situation initiale de 40,8 bar à 20°C, si la vapeur d'eau ne transitait absolument pas à travers les parois poreuses (grille ou céramique), la diminution théorique de $p/p_0(T)$ devrait conduire à une valeur absolue de potentiel supérieure à 80 bar dès 20,5°C. Dans ce cas, on devrait très rapidement accéder à des valeurs de potentiel situées hors de la gamme de mesure psychrométrique (70 à 80 bar). De même, tout caractère limitant de la capsule poreuse vis-à-vis de la diffusion devrait se traduire par une augmentation permanente de la valeur absolue du potentiel.

Les manipulations 3, 4, 5, étant réalisées dans des conditions thermiques différentes, nous avons normalisé les données afin de comparer plus facilement les 3 manipulations : soit X_i une valeur de potentiel lue à un moment quelconque, pour un psychromètre et une manipulation (3, 4 ou 5). On remplacera la série des X_i par la série des Y_i avec

$$Y_i = X_i / \bar{X}_i, \text{ en posant}$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

La figure 6 donne les distributions de fréquences des valeurs Y_i dans le cas des thermocouples nus, à grille ou à céramique : globalement et quel que soit le cas expérimental analysé, les fluctuations des réponses psychrométriques sont faibles et normales. On constate que, dans le cas où le thermocouple est protégé par une capsule poreuse, les fluctuations sont comparables aux fluctuations aléatoires du thermocouple nu (CV = 3,5 à 5 p.cent). Non seulement chaque point mesuré reste toujours dans la gamme de mesure psychrométrique même pour des échauffements > 5°C/h, mais aucune augmentation progressive de la valeur absolue de la mesure n'est mise en évidence.

La présence de la capsule poreuse, quelle que soit sa nature, ne semble donc pas induire de perturbation de la mesure dans la gamme des amplitudes thermiques testées. L'ensemble de ces conclusions est d'ailleurs compatible avec celles de VALANCOGNE & DAUDET (1974) sur les problèmes thermiques et celles de RAWLINS & DALTON (1967) sur l'ensemble des aspects diffusifs et thermiques en psychrométrie. (fig. 6)

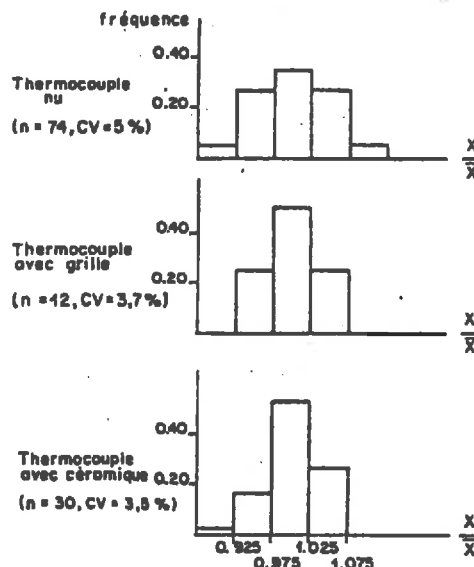


Figure 6 - Effet de la nature de la capsule sur la réponse psychrométrique. Histogramme des valeurs X_i/\bar{X}_i

X_i : potentiel hydrique mesuré au temps i

\bar{X}_i : potentiel hydrique moyen pendant la durée de l'expérience

VI. CONCLUSION

L'analyse des mesures psychrométriques permet de dégager plusieurs points importants :

La réponse psychrométrique expérimentale en conditions isothermes est conforme à la prévision donnée par les modèles. Pour la méthode du point de rosée, il apparaît donc que la convergence vers le point de rosée est bien assurée. Pour la méthode classique, l'adéquation entre les prévisions et les résultats indique que les paramètres géométriques des psychromètres obtenus auprès du constructeur sont fiables et que la fabrication technique des psychromètres est homogène puisque tous les psychromètres correspondent à un étalonnage pratiquement unique.

Pour les deux méthodes, il est donc envisageable de limiter considérablement, voire supprimer, les procédures d'étalonnage.

Globalement, la technique psychrométrique apparaît utilisable dans une large gamme de situations expérimentales, sa plus importante limitation résultant dans la précision de la mesure proprement dite. Elle constitue ainsi un atout important en physique du sol dans tous les cas où la tensiométrie n'est plus utilisable. En ce qui concerne le comportement respectif des phases liquide et gazeuse, on conçoit que l'équilibre thermodynamique instantané de ces phases ne soit réalisé que lorsque la taille des agrégats devient infiniment petite.

Dans le cas contraire, qui est aussi le cas général, il semble tout à fait envisageable que cet équilibre ne concerne que la zone la plus périphérique des agrégats. A cet égard, l'utilisation des modèles de transfert de masse et de chaleur dans les sols, qui suppose l'équilibre instantané des phases indépendamment de la taille des éléments structuraux, pose un problème théorique et pratique important.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRUCKLER L., 1984. Utilisation des micropsychromètres pour la mesure du potentiel hydrique du sol en laboratoire et in situ. *Agronomie*, 4(2), 171-182.
- DURAND R., 1970. Utilisation des thermocouples. 131-141. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*. I.N.R.A., Paris, 544 p.
- KYTE J.R., MADDEN A.J., PIRET E.L., 1953. Natural convection heat transfer at reduced pressure. *Chem. Eng. Progr.*, 49, 653-662.
- LANG A.R.G., 1967. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40°C. *Aust. J. Chem.*, 20, 2017-2023.
- MERRIL S.D., RAWLINS S.L., 1972. Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Sci.*, 113, 2, 102-109.
- MILLAR B.D., 1971a. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. I. Thermocouple psychrometry and an improved instrument design. *J. Exp. Bot.*, 22, 73, 875-890.
- MILLAR B.D., 1971b. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. II. Operation and calibration. *J. Exp. Bot.*, 22, 73, 891-905.
- MILLAR B.D., 1974. Improved thermocouple psychrometer for the measurement of plant and soil water potential. III. Equilibration. *J. Exp. Bot.*, 25, 89, 1070-1084.
- MONTEITH J.L., OWEN P.C., 1958. A thermocouple method for measuring relative humidity in the range 95-100 %. *J. Sci. Instrum.*, 35, 443-446.
- PECK A.J., 1968. Theory of the Spanner psychrometer. 1. The thermocouple. *Agric. Meteorol.*, 5, 433-447.
- PECK A.J., 1969. Theory of the Spanner psychrometer. 2. Sample effects and equilibration. *Agric. Meteorol.*, 6, 111-124.
- RAWLINS S.L., 1966. Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plant samples. *Agric. Meteorol.*, 3, 293-310.
- RAWLINS S.L., DALTON F.N., 1967. Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31, 297-301.
- SCOTTER D.R., 1972. The theoretical and experimental behaviour of a Spanner psychrometer. *Agric. Meteorol.*, 10, 125-136.
- SLACK D.C., RIGGLE F.R., 1980. Effects of Joule heating on thermocouple psychrometer water potential determinations. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 23, 1, 877-883.
- SPANNER D.C., 1951. The Peltier effects and its use in the measurement of suction pressure. *J. Exp. Bot.*, 2, 145-168.
- VALANCOGNE C., DAUDET F.A., 1974. Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : Problèmes posés par la température. *Ann. Agron.*, 25(5), 733-751.