

Utilisation de la tensiométrie en situation non-isotherme

Laurent BRUCKLER

avec la collaboration technique de

Jean-Claude GAUDU

Station de Science du Sol, Centre de recherches agronomiques d'Avignon,
Domaine Saint-Paul, B.P. 91, 84140 Montfavet

SOMMAIRE

On analyse les différentes sources de variation d'origine thermique sur la mesure tensiométrique. Les facteurs de variation classiquement pris en compte (tension interfaciale air/eau par exemple) ne suffisent pas à rendre compte des mesures obtenues in situ dans des situations à forte variation thermique (15 °C/j). Sur la base de l'existence d'inclusions d'air dans le sol au contact de la bougie tensiométrique, on propose une interprétation possible des phénomènes observés.

INTRODUCTION

L'utilisation de la tensiométrie présente en physique du sol un caractère très général : cette technique est notamment utilisée pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols (AHUJA and al., 1976), l'analyse du bilan hydrique (DAUDET and al., 1976) ou celle de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques (CARVALLO and al., 1976).

Lorsqu'on effectue la mesure en laboratoire ou dans des couches relativement profondes de sol, les conditions expérimentales sont sensiblement isothermes. Dans ce cas, il est parfaitement légitime, sans commettre d'erreur importante, d'admettre que cette mesure est indépendante de la température.

Par contre, dans le cas où la tensiométrie est utilisée dans des couches plus superficielles de sol (0-25 cm), la non-isothermie devient la règle générale et il est courant d'observer des variations thermiques diurnes supérieures à 15 °C ou 20 °C, en été, dans les 10 premiers centimètres de sol.

Dans de tels cas, les réponses tensiométriques aux différentes heures du jour peuvent présenter des variations apparemment incohérentes. Ainsi, on observe au cours d'une journée à forte évapotranspiration potentielle, une augmentation du potentiel mesuré sous sol nu (diminution de la hauteur de mercure) alors que le sol est soumis à un dessèchement continu (fig. 1). Ce phénomène ne semble pas pouvoir être affecté à l'appareil de mesure proprement dit : en effet, si l'on compare les profondeurs $z = -4$ cm et $z = -10$ cm par exemple, la seule différence entre les deux dispositifs correspondants résulte finalement des 6 cm de sol qui les sépare, car toute la partie restante du circuit hydraulique a pratiquement la même localisation spatiale, la même longueur, et est soumise aux mêmes fluctuations thermiques. L'objet de ce travail est de proposer une analyse des différentes sources de perturbation, d'origine thermique, sur la mesure tensiométrique.

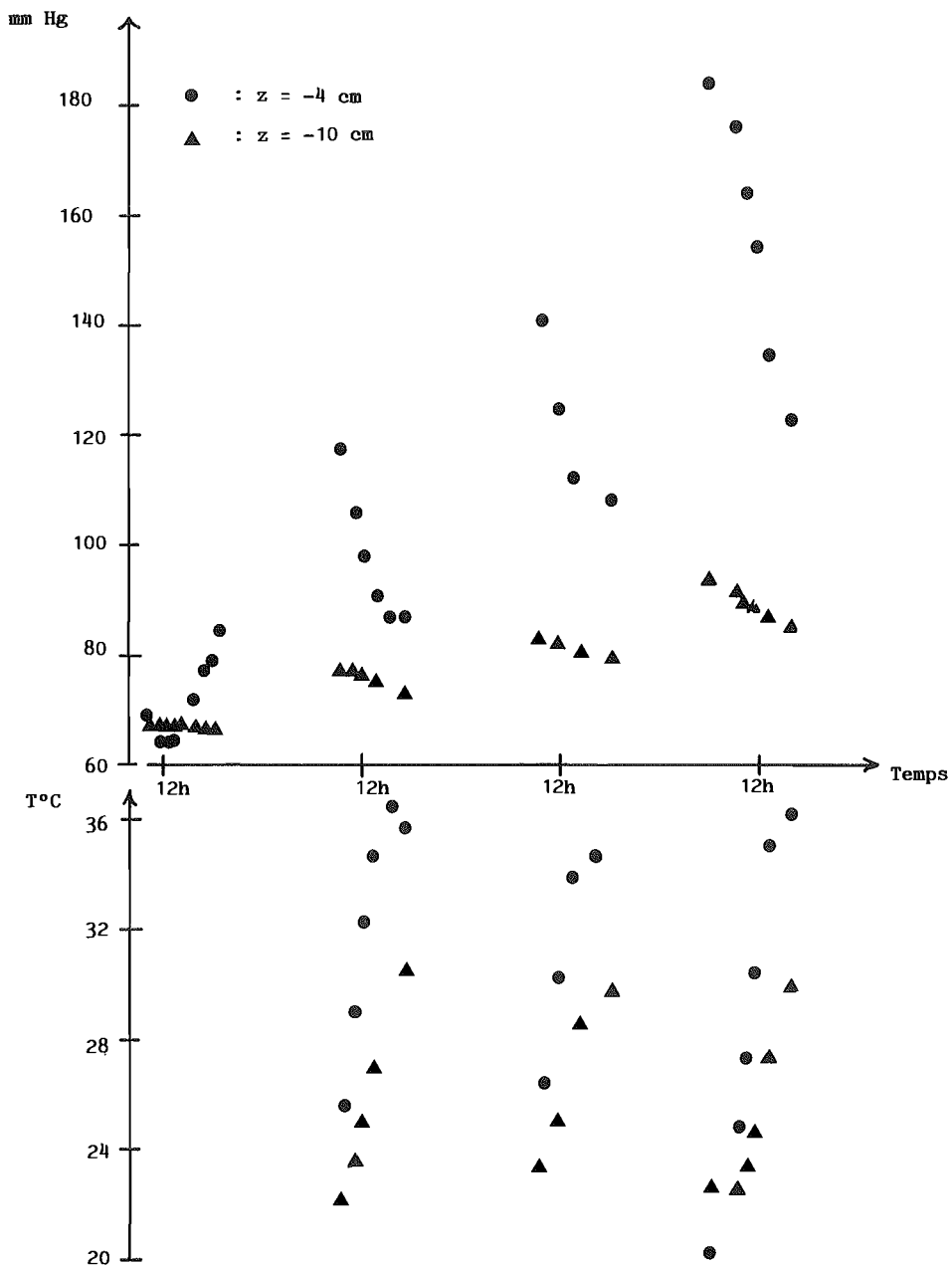


FIGURE 1 : Hauteurs des colonnes de mercure (mm Hg) et température en fonction du temps (mesures in situ).

Lengths of the mercury columns (mm Hg) and temperatures versus time (Fields experimental data).

I. RAPPELS GÉNÉRAUX

En supposant une bougie tensiométrique et une surface de référence situées à une même cote, la hauteur d'ascension h du mercure dans un tube capillaire relié à une bougie poreuse est donnée par :

$$h = \frac{P_a - P_w}{(\rho_m - \rho_w) g} \quad (1)$$

P_a : pression atmosphérique [$ML^{-1}T^{-2}$]

P_w : pression effective de l'eau [$ML^{-1}T^{-2}$]

ρ_m : masse volumique du mercure [ML^{-3}]

ρ_w : masse volumique de l'eau [ML^{-3}]

g : accélération de la pesanteur [LT^{-2}]

Si, pour un potentiel donné, on réduit le système poral du sol à un pore unique, r étant le rayon de courbure du ménisque, on aura :

$$P_w = P_a - \frac{2 \sigma}{r} \quad (2)$$

σ : tension interfaciale eau/air [MT^{-2}]

r : rayon de courbure du ménisque [L]

(on suppose que l'angle de raccordement est nul)

En combinant (1) et (2), il vient :

$$h = \frac{2}{r} \frac{\sigma}{(\rho_m - \rho_w) g} \quad (3)$$

ou encore

$$h = \frac{2}{r} \frac{\sigma(T)}{[\rho_m(T) - \rho_w(T)] g} \quad (4)$$

T : température absolue.

On admet généralement que les grandeurs $\rho_m(T)$ et $\rho_w(T)$ sont invariantes en fonction de la température, ce qui est parfaitement justifié compte-tenu des ordres de grandeur de variations de $\rho_m(T)$ et $\rho_w(T)$ (tableau 1).

Seule la variation liée au terme $\sigma(T)$ est parfois prise en considération : bien que faible, cette dernière n'est cependant pas négligeable dans le cas des fortes amplitudes thermiques (tableau 1). Au total, le rôle des fonctions $\rho_m(T)$, $\rho_w(T)$, $\sigma(T)$ reste finalement limité, voire négligeable pour les faibles variations thermiques.

Tableau 1 : Variations (%), en fonction de la température, des masses volumiques du mercure (ρ_m), de l'eau (ρ_w) et de la tension interfaciale eau/air (σ).

Variations (%) of the mercury (ρ_m), water (ρ_w) densities and air-water interfacial tension versus temperature.

Température °C	Variation ρ_m (%)	Variation ρ_w (%)	Variation σ (%)
10	-0,18	-0,15	-2,0
20	-0,18	-0,26	-2,2
30	-0,18	-0,34	-2,3
40	-0,18	-0,34	-2,3

Le problème de l'interprétation des données expérimentales du type de celles présentées sur la fig. 1 reste alors entier. Nous proposons de donner une interprétation de ces résultats en analysant les conséquences de l'existence d'inclusions d'air dans le système poral au contact de la bougie sur la mesure tensiométrique. Au préalable, nous justifierons le choix de cette hypothèse de travail.

II. CONDITIONS D'EXISTENCE DES INCLUSIONS D'AIR

La figure 2 permet de comparer les courbes de retrait expérimentale et théorique d'un sol argileux ($A = 55\%$) pour lequel les données de la fig. 1 ont été obtenues. La courbe expérimentale est obtenue après pulvérisation d'eau sur les agrégats à pression atmosphérique et le décalage systématique entre les deux courbes peut s'interpréter par un piégeage de l'air. Cependant, en toute rigueur, ce décalage correspond à une condition nécessaire mais non suffisante. En effet, on peut toujours supposer qu'une valeur élevée du terme $1/\gamma_d$ correspond à une surestimation du volume de l'agrégat ou du massif lors de la mesure de celui-ci : Rappelons que le mode opératoire (MONNIER et al., 1973) consiste à mesurer le volume de pétrole déplacé par immersion d'un agrégat ou d'un massif préalablement humecté par le même liquide, puis ressuyé à l'aide d'un papier filtre : Si le ressuyage est incomplet, il y a surestimation du volume de l'agrégat.

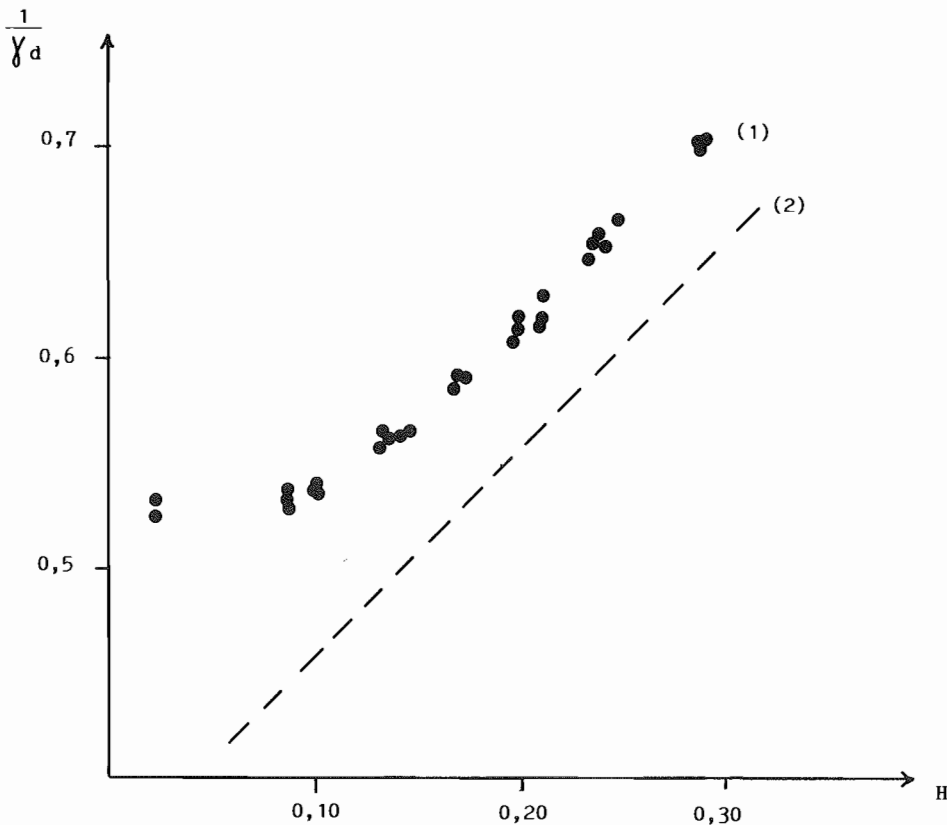


FIGURE 2 : Inverse de la densité d'agrégats en fonction de la teneur en eau massique ($A = 55\%$)

- (1) Courbe expérimentale
- (2) Droite de saturation théorique

Inverse of the aggregates bulk density versus gravimetric water content ($A = 55\%$)

- (1) Experimental data
- (2) Theoretical curve without air

Pour justifier l'hypothèse posée sur la présence d'inclusions d'air, sachant que sa condition nécessaire de validité est remplie, on peut avancer les arguments suivants :

a) De nombreux modèles théoriques ou expérimentaux de percolation, sur des réseaux variés, font très généralement apparaître des inclusions d'air au cours de la percolation.

b) On observe pour certaines textures une superposition des droites de saturation théorique et expérimentale, ce qui semble minimiser les artefacts liés à la méthode de mesure. De plus, pour le sol choisi ($A = 55\%$), même sous vide, et à un potentiel d'environ -3 mbar, la droite expérimentale est encore au-dessus de la droite théorique de saturation : or, à -3 mbar, le rayon des pores correspondant est égal à $0,48$ mm. Il est donc certain que dans ce cas, ces pores sont vidés au moment du ressuyage sur papier filtre, ce qui correspond à une sous-estimation du volume de l'agrégat, donc, à une sous-estimation du terme $1/\gamma_a$.

Au total, il apparaît que l'existence d'inclusions d'air, sans être générale, est vérifiée pour un certain nombre de textures. On peut, en outre, penser que la teneur en matières organiques, et la mouillabilité de celles-ci, peuvent intervenir de façon prépondérante sur ces phénomènes.

III. ANALYSE THÉORIQUE DU RÔLE DES INCLUSIONS D'AIR SUR LA MESURE TENSIMÉTRIQUE EN CONDITIONS NON ISOTHERMES

Il semble difficile de proposer à proprement parler un modèle théorique à caractère général, rendant compte du phénomène décrit. Nous nous bornerons à analyser deux cas qui constituent des approximations, plus ou moins sommaires, de la réalité. Dans un premier temps, nous analyserons le rôle des inclusions d'air sur la mesure tensiométrique dans le cas où le volume d'air piégé est invariant. Dans un 2^e temps, nous proposerons un schéma théorique pour lequel le volume d'air piégé est variable.

A. CAS OU LE VOLUME D'AIR PIÉGÉ EST INVARIANT

1^o Problème général

Supposons un volume de sol à une humidité volumique et à un potentiel donnés. L'existence d'inclusions d'air, supposées sphériques et de rayon r , au niveau du sol en contact avec la bougie permet d'écrire :

$$P_w = P_i - \frac{2 \sigma}{r} \quad (5)$$

P_i : pression interne de l'inclusion d'air [$ML^{-1}T^{-2}$]

En combinant (1) et (5), il vient alors :

$$h = \frac{P_a}{(\rho_m - \rho_w) g} + \frac{2 \sigma(T)}{r \cdot (\rho_m - \rho_w) g} - \frac{P_i(T)}{(\rho_m - \rho_w) g} \quad (6)$$

d'où l'on tire, en supposant ρ_m , ρ_w , P_a constantes :

$$dh = \frac{2}{(\rho_m - \rho_w) g r} \cdot \frac{\partial \sigma(T)}{\partial T} \cdot dT - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \cdot \frac{\partial p_i(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (7)$$

$$\text{ou} \quad dh = dh_1 + dh_2 \quad (8)$$

Le premier terme dh_1 correspond à la variation induite par la fonction $\sigma(T)$. On remarquera que dh_1 dépend de r qui est inconnu; seule est accessible la variation relative dh_1/h_1 telle que :

$$\frac{dh_1}{h_1} = \frac{1}{\sigma(T)} \cdot \frac{\partial \sigma(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (9)$$

Le second terme dh_2 correspond à la variation induite par la fonction $p_i(T)$, pression interne de l'inclusion d'air. En fonction de la température cette valeur p_i présentera 2 sources de variations : d'une part, augmentation de pression liée à un échauffement, d'autre part vaporisation de l'eau à l'intérieur de l'inclusion.

2^o Rôle de la pression interne p_i sur la mesure tensiométrique

Dans le volume d'air inclus v , on prendra en considération de façon distincte :

— un nombre de moles n_i de gaz autres que la vapeur d'eau, indépendant de la température (on néglige les effets de solubilisation des gaz);

— un nombre de moles n_2 de vapeur d'eau dépendant de la température par vaporisation de l'eau à l'intérieur de l'inclusion en cas d'échauffement.

En appliquant la loi des gaz parfaits, on aura simultanément ;

$$p_1 v = n_1 RT \quad (10)$$

$$p_2 v = n_2 RT \quad (11)$$

$$p_i v = n_i RT \quad (12)$$

avec

$$n_i = n_1 + n_2 \quad (13)$$

$$p_i = p_1 + p_2 \quad (14)$$

p_1, p_2 , pressions partielles relatives à n_1, n_2 .

D'après (12) et (13), il vient :

$$v dp_i = n_1 RdT + n_2 RdT + RT dn_2 \quad (15)$$

En supposant que la pression partielle p_2 est sensiblement égale à la pression de vapeur saturante p_o (quasi saturation de l'atmosphère interne de l'inclusion), on écrira ;

$$p_2 = p_o = p_o(T) \quad (16)$$

Comme d'autre part,

$$dn_2 = \left(\frac{\partial n_2}{\partial p_2} \right)_T \left(\frac{\partial p_2}{\partial T} \right) \cdot dT \quad (17)$$

En combinant (11), (16) et (17), il vient alors :

$$dn_2 = \frac{v}{RT} \cdot \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (18)$$

En combinant finalement (15) et (18), on aura :

$$dp_i = \frac{n_i R}{v} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (19)$$

soit :

$$dp_i = \frac{P_i}{T} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (20)$$

Et en combinant le second terme de (7) et (20), on exprimera dh_2 comme suit :

$$dh_2 = - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \left[\frac{p_i(T)}{T} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \right] \quad (21)$$

L'expression (21) amène quelques remarques :

a) Le terme dh_2 est constitué de 2 termes : l'un et purement lié à l'effet de la variation de température sur la pression interne de l'inclusion, l'autre correspond aux phénomènes de vaporisation ou de condensation.

b) Les termes $p_i, T, \frac{\partial p_o(T)}{\partial T}$ étant tous positifs, l'échauffement se traduit par une diminution de la hauteur d'ascension h (dh_2 négative).

c) Le terme p_i est inconnu : en effet, la connaissance de p_i à partir de l'équation (5) suppose la valeur de r connue. On peut alors reformuler l'expression (21) de la façon suivante :

D'après (14), (16) et (21) :

$$dh_2 = - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \left[\frac{p_i(T)}{T} \cdot dT + \frac{P_o(T)}{T} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \right] \quad (22)$$

Et en posant $p_i(T) > p_a$ (cas général d'une inclusion), il vient :

$$dh_2 < - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \left[\frac{P_a}{T} \cdot dT + \frac{P_o(T)}{T} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \right] \quad (23)$$

Si on pose finalement $p_o(T) \ll p_a$, dh_2 prendra la forme simplifiée ;

$$dh_2 < - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \left[\frac{P_a}{T} \cdot dT + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \right] \quad (24)$$

ou encore, sous forme intégrale :

$$\int_{T_0}^{T_1} dh_2 < -\frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} [p_a \int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T} + \int_{T_0}^{T_1} \frac{\partial p_0(T)}{\partial T} \cdot dT] \quad (25)$$

Le tableau 2 donne les valeurs correspondant à l'expression (25) en posant $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Les ordres de grandeur obtenus sont tout à fait considérables, notamment pour le premier terme du second membre de l'expression (25). La figure 3 indique de plus que la forme intégrale (25) dépend de T_0 , bien que cette dépendance ne soit pas considérable.

REMARQUES

1. Si on suppose une masse de sol en contact avec une bougie tensiométrique, celle-ci peut présenter simultanément des inclusions d'air (p_i), et des pores ouverts sur l'atmosphère (p_a). Si il y a modification de la pression de l'eau en un point suite à un échauffement par exemple, il y a nécessairement transmission des pressions au sein de la phase liquide. Il en découle que la pression effective de l'eau au niveau des pores ouverts sur l'atmosphère doit être modifiée, par modification du rayon de courbure ou de l'angle de raccordement par exemple, de façon à obtenir un nouvel état d'équilibre.

2. Les calculs précédents ne montrent pas l'existence d'un volume minimal d'inclusions d'air nécessaire à la modification de la pression effective de l'eau. Par contre, rappelons qu'ils supposent l'invariance du volume d'air piégé, ainsi que la continuité de la phase liquide.

B. CAS OU LE VOLUME D'AIR PIÉGÉ EST VARIABLE

Un modèle peut-être plus réaliste du rôle des inclusions d'air sur la mesure tensiométrique nécessite la prise en compte des variations du volume d'air inclus en fonction des variations de température. Une représentation schématique de ce système peut être obtenue en assimilant, pour les besoins de l'analyse, le système poral à une pore conique fermé à son sommet (fig. 4) : quand la température augmente, la pression extérieure p_e restant inchangée et égale à la pression atmosphérique, on passe de l'état (1) à l'état (2) avec déplacement du volume d'eau, et, corrélativement, variation des rayons de courbure des ménisques, donc, de la pression effective de l'eau p_w qui se rapproche ainsi de p_e . Le phénomène va dans le même sens que dans l'hypothèse précédente tout en faisant intervenir des paramètres supplémentaires :

- volume d'air piégé (v_a);
- volume d'eau présente dans le pore (V_w);
- angle au sommet du cône (2α).

1. Analyse théorique du modèle

Nous présenterons les hypothèses simplificatrices choisies ainsi que les principaux résultats théoriques et numériques obtenus.

α) Hypothèses simplificatrices

- le mélange gazeux contenu dans le volume piégé se comporte comme un gaz parfait;
- la pression partielle de la vapeur d'eau dans le volume V_a est égale à la pression de vapeur saturante à la température considérée;
- on néglige les variations du volume V_w liées à la vaporisation de l'eau;
- les angles de raccordement des ménisques aux parois du pore conique sont nuls.

β) Analyse théorique du modèle

On se reportera à la figure 5 et à ses notations. L'analyse théorique de ce modèle conique amène à développer indépendamment, puis à combiner, les différentes relations imposées par le système physique. On distingue ainsi :

- d'une part, des relations géométriques qui décrivent les conditions dépendantes de la géométrie particulière du système. On exprime ainsi les paramètres de teneur en eau (θ_w) et en air (θ_a), en fonction des rayons externe (R_e) et interne (R_i) (Tableau 3);

Tableau 2 : Contribution des différents termes de l'équation (25) à la variation de hauteur de mercure en fonction de l'échauffement ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$). Modèle à volume d'air constant.

Partial contribution of the two terms of eq. (25) to the total mercury length variation with increasing temperature. Model with constant air volume.

Accroissement de température (°C)	Variation cumulée de la hauteur de mercure liée à l'échauffement de l'air (mmHg)	Variation cumulée de la hauteur de mercure liée à la vaporisation de l'eau (mmHg)	Variation cumulée totale de la hauteur de mercure (mmHg)
2	- 5,6	- 2,4	-8,0
4	-11,2	- 5,1	-16,2
6	-16,7	- 8,1	-24,8
8	-22,2	-11,5	-33,7
10	-27,7	-15,3	-43,0
12	-33,1	-19,6	-52,7
14	-38,5	-24,5	-63,0
16	-43,8	-30,0	-73,8
18	-49,1	-36,2	-85,3
20	-54,4	-43,2	-97,6

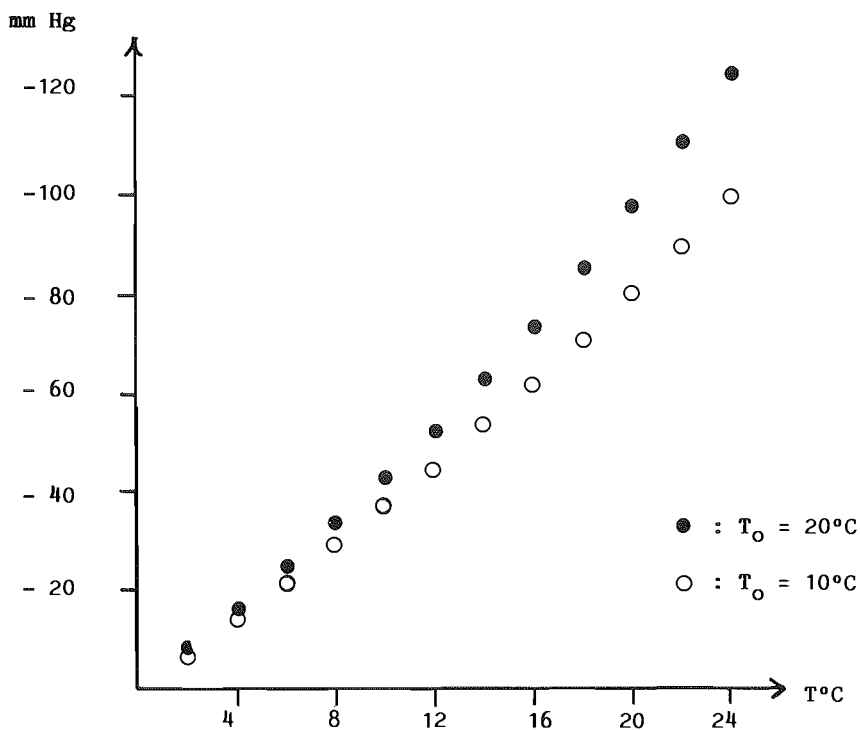


FIGURE 3 : Variation de la hauteur de la colonne de mercure en fonction de l'accroissement de température selon (25)

Variation of the mercury column length versus increasing temperature according to eq. (25)

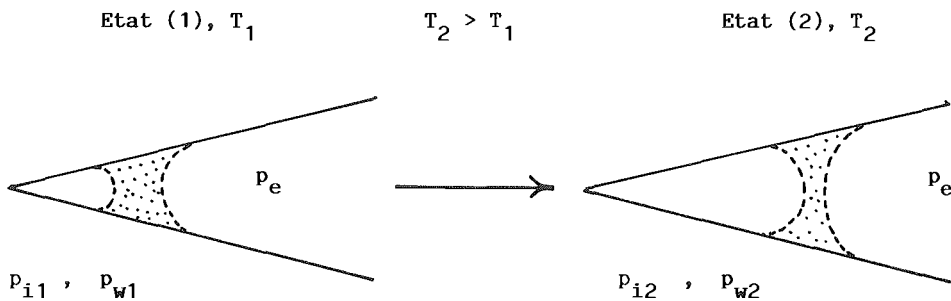


FIGURE 4 : Représentation schématique du modèle à pore conique

Schematic diagram of the conic pore model

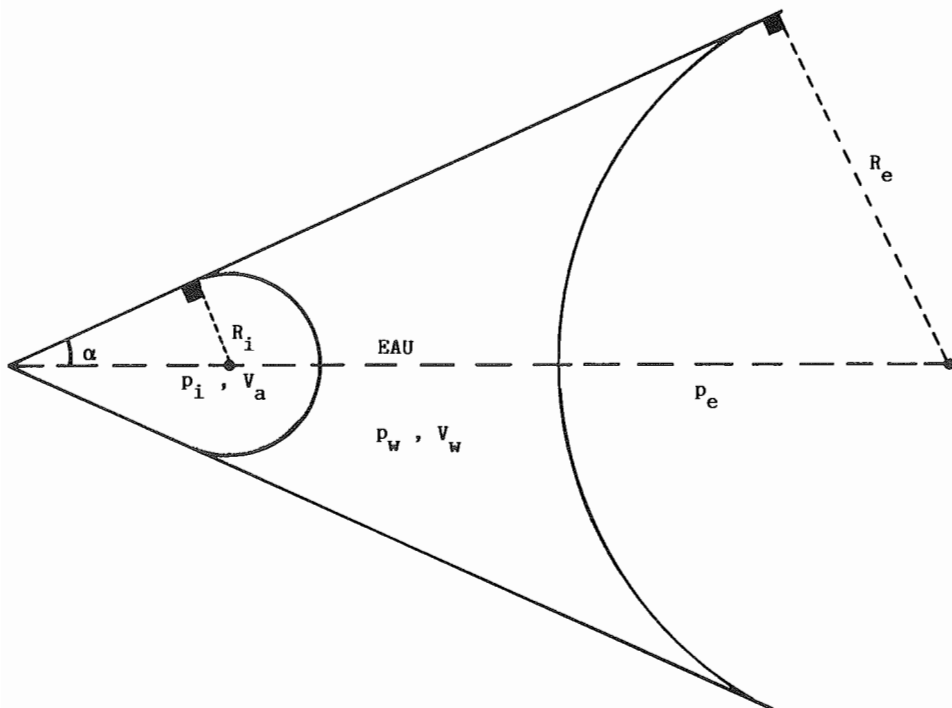


FIGURE 5 : Notations utilisées pour le modèle à pore conique
 Used symbols according to the conic pore model.

— d'autre part, des relations qui décrivent le comportement hydrostatique et thermodynamique du système à chaque instant. Les lois de base sont fournies par les relations hydrostatiques au niveau des ménisques externe et interne, et par la loi des gaz parfaits appliquée au volume d'air inclus (V_a) (Tableau 4).

Enfin, l'utilisation des relations entre rayons de courbure des ménisques et potentiel matriciel de l'eau, permet de relier les paramètres géométriques (R_e et R_i) et les teneurs en eau et en air (θ_w, θ_a) au potentiel matriciel Ψ_m du système étudié (Tableau 5).

La combinaison de ces équations (Tableaux 3, 4, 5) aboutit à l'expression différentielle de la pression effective de l'eau dp_w en fonction de dT :

$$dp_w = \frac{p_i \frac{dT}{T} + \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} dT - \left[\frac{3p_i X R^3}{\sigma(T)} + \frac{2}{R_i} (1 - X R^3) \right] \frac{\partial \sigma(T)}{\partial T} dT}{1 + X R^3 \left[\frac{3p_i R_e}{2 \sigma(T)} - R \right]} \quad (26)$$

avec

$$R = R_e/R_i \quad (27)$$

d'où l'on tire :

$$dh = - \frac{dp_w}{(\rho_m - \rho_w) g} \quad (28)$$

$$\text{et } d\Psi_m = \frac{dp_w}{\rho_w g} \quad (29)$$

Tableau 3 : Relations géométriques pour le modèle conique.

Geometrical relations according to the conic model.

Grandeurs calculées	Expression algébrique
Paramètres géométriques constants	$X_1 = \frac{\cos^3 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} + 3 \sin \alpha - \sin^3 \alpha - 2 \quad (3.1)$
	$X_2 = \frac{\cos^3 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} + 3 \sin \alpha - \sin^3 \alpha + 2 \quad (3.2)$
	$X = X_1/X_2$ $X_3 = \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha - 1 \quad (3.3)$
	$X_4 = \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha + 1 \quad (3.4)$
Condition d'intersection nulle de R_e et R_i	$X_3 R_e - X_4 R_i \geq 0 \quad (3.5)$
Volume d'eau (V_w) Teneur en eau volumique (θ_w)	$V_w = \frac{\Pi}{3} [X_1 R_e^3 - X_2 R_i^3] \quad (3.6)$ $\theta_w = n \cdot \frac{X_1 R_e^3 - X_2 R_i^3}{X_1 R_{e \max}^3} \quad \begin{array}{l} n : \text{porosité totale} \\ R_{e \max} : \text{Rayon externe max.} \end{array} \quad (3.7)$
Volume d'air (V_a) Teneur en air volumique (θ_a)	$V_a = \frac{\Pi}{3} X_2 R_i^3 \quad (3.8)$ $\theta_a = n \cdot \frac{X_2}{X_1} \left[\frac{R_i}{R_{e \max}} \right]^3 \quad \begin{array}{l} n : \text{porosité totale} \\ R_{e \max} : \text{Rayon externe max.} \end{array} \quad (3.9)$

Tableau 4 : Relations physiques pour le modèle conique
 Physical relations according to the conic model

Forme algébrique	Forme différentielle
Relation hydrostatique au niveau du ménisque interne $p_i - p_w = 2 \frac{\sigma(T)}{R_i} \quad (4.1)$	$dp_i - dp_w = \frac{2}{R_i} \left[\frac{\partial \sigma(T)}{\partial T} \cdot dT - \frac{1}{R_i} \sigma(T) \cdot dR_i \right] \quad (4.5)$
Relation hydrostatique au niveau du ménisque externe $p_e - p_w = 2 \frac{\sigma(T)}{R_e} \quad (4.2)$	$-dp_w = \frac{2}{R_e} \left[\frac{\partial \sigma(T)}{\partial T} \cdot dT - \frac{1}{R_e} \sigma(T) \cdot dR_e \right] \quad (4.6)$
Relation entre pression effective de l'eau et ascension capillaire $h = \frac{p_a - p_w}{(\rho_m - \rho_w) g} \quad (4.3)$	$dh = - \frac{1}{(\rho_m - \rho_w) g} \cdot dp_w \quad (4.7)$
Loi des gaz parfaits $p_i V_a = n_i RT \quad (4.4)$	$p_i dV_a + V_a dp_i = n_i RdT + RT dn_i \quad (4.8)$ <p>ou</p> $p_i dV_a + V_a dp_i = n_i RdT + V_a \frac{\partial p_o(T)}{\partial T} \cdot dT \quad (4.9)$ <p>(dn_i n'est lié qu'à la vaporisation de l'eau supposée saturante)</p>

Tableau 5 : Relations utilisant le potentiel matriciel ψ_m pour le modèle coniqueRelations using water potential ψ_m according to the conic model.

Grandeur calculée	Expression algébrique
Potentiel matriciel (m)	$\psi_m = \left[\frac{n}{\theta_w + \theta_a} \right]^{\frac{1}{3}} \psi_{\max} \quad (5.1)$ <p>ψ_{\max} = potentiel d'entrée d'air</p>
Rayon de courbure du ménisque externe (m)	$R_e = \frac{-2 \cdot \sigma(T)}{\psi_m \rho_w g} \quad (5.2)$
Rayon de courbure du ménisque interne (m)	$R_i = X \left[\left(\frac{\psi_{\max}}{\psi_m} \right)^3 - \frac{\theta_w}{n} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{-2 \sigma(T)}{\psi_{\max} \rho_w g} \right) \quad (5.3)$
Pression interne de l'inclusion d'air (N m ⁻²)	$p_i = p_a + \rho_w g \left[\psi_m - \psi_{\max} \left(\frac{\theta_a}{n} \cdot X \right)^{-\frac{1}{3}} \right] \quad (5.4)$
Teneur en air inclus (sans dim.)	$\theta_a = n \left[\frac{\psi_{\max}}{\psi_m} \right]^3 - \theta_w \quad (5.5)$

2. Résultats numériques

Le calcul de (26), (28) ou (29), par différences finies, pour des variations $\Delta T < 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ est effectué en utilisant les fonctions ajustées $\sigma(T)$ et $\frac{\partial p_o(T)}{\partial T}$ suivantes :

$$\sigma(T) = 10^{-3}(-0,153 T + 117,53) \quad (\text{N m}^{-1}) \quad (30)$$

$$\frac{\partial p_o(T)}{\partial T} = 6,868 \cdot 10^{-5} e^{0,0498 T} (\text{N m}^{-2}\text{K}^{-1}) \quad (31)$$

Le tableau 6 donne, pour différentes valeurs de la teneur en eau (θ_w) et en air (θ_a) la valeur calculée du potentiel de l'eau correspondante. On remarquera que le modèle géométrique choisi impose une gamme de variation limitée du terme Ψ_m pour une assez large gamme de variation du terme θ_w .

Tableau 6 : Potentiel matriciel ψ_m (m) en fonction de la teneur volumique en eau (θ_w) et en air (θ_a).

Water potential ψ_m versus water (θ_w) and air (θ_a) contents.

$\theta_w \backslash \theta_a$	0.02	0.04	0.06
0.02	-4.64	-4.05	-3.68
0.05	-3.85	-3.54	-3.31
0.10	-3.22	-3.06	-2.92

Le tableau 7 donne un exemple complet des variations de hauteur de mercure calculées pour une amplitude thermique maximale de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. On observe une chute de la hauteur de colonne de mercure, avec cependant des ordres de grandeurs nettement inférieurs à ceux obtenus dans le modèle précédent à volume d'air inclus constant. De plus, la contribution du terme lié à la tension superficielle de l'eau est la plus importante, la vaporisation de l'eau jouant évidemment un rôle de plus en plus déterminant au fur et à mesure que la température s'élève.

Enfin, le tableau 8 généralise ce type de résultat pour une gamme de teneurs en eau et en air initiales imposées au système : les ordres de grandeur des chutes totales de hauteur de mercure restent identiques. Ces résultats mettent clairement en évidence que les résultats calculés dépendent à la fois des contraintes géométriques imposées au système et de l'état initial de ce dernier.

CONCLUSION

Quel que soit le cas théorique envisagé, on aboutit à des résultats qualitatifs qui vont dans le même sens que l'expérience. Malgré tout, il est difficile de parler de modèle physique, dans la mesure où les hypothèses choisies restent arbitraires : on peut ainsi trouver une infinité de solutions possibles au problème, toujours tronquées ou simplifiées par rapport à la réalité du phénomène. L'intérêt du schéma théorique revient ici à tester la cohérence entre des réponses expérimentales qui ne semblent pas constituer des artefacts, et des phénomènes physiques généralement ignorés dans le cadre de la mesure tensiométrique.

L'analyse théorique de modèles plus complexes et le calage de ceux-ci sur des manipulations contrôlées en laboratoire permettrait peut-être de dégager des règles et des ordres de grandeur de correction de la mesure tensiométrique en situation non isotherme. Malgré tout, il faut souligner que ce phénomène n'a pas un caractère général et qu'il dépend du type de sol choisi. C'est sans doute l'une

Tableau 7 : Variation de la hauteur de la colonne de mercure en fonction de l'accroissement de température selon (28).

Variation of the mercury column length versus increasing temperature according to equation (28).

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \theta_w = 0.05 \quad \theta_a = 0.02 \quad \psi_m = -3.8 \text{ m} \quad \psi_{max} = -2 \text{ m}$$

Température (°C)	Variation cumulée de hauteur de mercure (mmHg)	Contribution à la variation totale de hauteur de mercure (%)			Teneur volumique en air (sans dim)
		Augmentation de pression liée à l'échauffement (%)	Vaporisation de l'eau (%)	Variation de la tension superficielle (%)	
22	- 1.6	14.4	5.3	80.3	0.021
24	- 3.3	14.5	6.0	79.4	0.022
26	- 4.9	14.7	6.8	78.5	0.024
28	- 6.6	14.8	7.7	77.5	0.025
30	- 8.3	14.9	8.7	76.4	0.026
32	-10.1	14.9	9.8	75.3	0.027
34	-11.8	15.0	10.9	74.1	0.029
36	-13.6	15.0	12.2	72.8	0.030
38	-15.4	14.9	13.6	71.4	0.032
40	-17.2	14.9	15.2	70.0	0.033

Tableau 8 : Variation de la hauteur de colonne de mercure (mm) pour différentes valeurs de la teneur en eau (θ_w) et de la teneur en air (θ_a).

Variations of the mercury column length (mm) according to different values of water (θ_w) and air (θ_a) contents.

$\theta_w \backslash \theta_a$	0.02	0.04	0.06
0.020	-23.7	-22.3	-21.0
0.050	-17.2	-17.4	-17.1
0.100	-13.2	-13.6	-13.7

des raisons qui fait que ce problème n'est pas développé ; de même, la technique tensiométrique est le plus souvent utilisée en conditions proches de l'isothermie et avec des fréquences de relevés qui peuvent parfois être faibles et masquer ce type de phénomènes. D'une façon plus générale, la température intervient dans la quasi-totalité des mesures effectuées en physique du sol, soit par l'appareillage proprement dit, soit par la nature de la grandeur à mesurer. De ce fait, le passage de situations quasiment isothermes à des situations fortement non-isothermes nécessite une analyse préalable de la sensibilité de la technique choisie vis-à-vis de la température.

SUMMARY

USE OF THE TENSIOLOGY IN NON-ISOTHERMAL CONDITIONS

This paper analyses the mean sources of variation on the tensiometry measurements, according to non isothermal conditions. The mean classical sources of variation taken into account (air-water interfacial tension for exemple) are unable to provide a satisfactory interpretation of the field measurements with high temperature changes. According to the hypothesis of air included in the soil in the vicinity of the porous ceramic, theoretical explanations are proposed.

First, a model with a constant air volume included in the soil provides a possible explanation of the experimental data (table 2). Second, a more complicated model that takes into account the variation of the gaseous phase volume is presented: In the case of a conic pore model with air and water inside (fig. 4, 5) it's possible to obtain geometrical (table 3) and physical relations (tables 4, 5) describing the model. Calculations show that an increasing temperature provides a variation of the water potential measurements (tables 7, 8). Finally, the first and the second model give theoretical results that are in the same order of magnitude than the experimental data. In fact, a complete explanation or prevision of the effect of temperature according tensiometry measurements needs probably more complicated models and more experimental data with high controlled laboratory conditions.

Bibliographie

- AHUJA LR, EL SWAIFY S.A., RAHMAN A., 1976 - Measuring hydrologic properties of soil with a double-ring infiltrometer and multiple-depth tensiometers. J. Soil Sci. Soc. Am. 40 (4), 494-499.
- CARVALLO H.O., CASSEL D.K., HAMMOND J., BAUER A., 1976 - Spatial variability of in situ unsaturated hydraulic conductivity of Maddock sandy loam. Soil Sci., 121, 1, 1-8.
- DAUDET F.A., VALANCOGNE C., 1976 - Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique. Ann. agron., 27(2), 165-182.
- MONNIER G., FIES J.-C., STENGEL P., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux : Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. agron., 24(5), 533-545.
- OSTER J.-D., WILLARDSON L.-S., SCHILFGAARDE J., VAN GOERTZEN J.-O., 1976 - Irrigation control using tensiometers and salinity sensors. Transactions of the ASAE, 19, 2, 294-298.
- ROYER J.-M., VACHAUD G., 1975 - Field determination of hysteresis in soil water characteristics. Soil Sci. Soc. Am. proc. 39, 2, 221-223.
- VALANCOGNE C., DAUDET F.-A., 1977 - Etude in situ du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier. Ann. agron., 28(2), 137-157.

