

Transfert hydrique dans un sol argileux gonflant non saturé : influence du confinement

S. ROLLAND
D. STEMMELÉN
C. MOYNE

LEMETA, UMR 7563
CNRS-INPL-UHP
2, av. de la Forêt-
de-Haye, BP 160
54500 Vandœuvre-
lès-Nancy

Sebastien.Rolland@ensem.
inpl-nancy.fr
Didier.Stemmelen@ensem.
inpl-nancy.fr
Christian.Moyne@ensem.
inpl-nancy.fr

F. MASROURI

LAEGO-ENSG-INPL
rue du Doyen-Roubault
BP 40
54501 Vandœuvre-
lès-Nancy
Farimah.Masrouri@ensg.
inpl-nancy.fr

Résumé

La description des mécanismes d'infiltration et de gonflement dans les sols argileux représente un enjeu important en géotechnique, en agronomie ou dans l'industrie pétrolière. L'objectif de cet article est d'analyser les effets de couplage hydromécanique lors de l'imbibition d'un milieu argileux gonflant soumis à différentes conditions de confinement. Le matériau utilisé est un mélange de bentonite et de limon de Xeulley. Préparé à une teneur en eau massique connue, ce mélange est compacté au moyen d'une technique double-piston, permettant d'élaborer des éprouvettes de sol d'humidité et de masse volumique sèche uniformes. Des essais d'imbibition capillaire ont été réalisés pour trois types de confinement : libre, œdométrique, à volume constant. La technique de gammamétrie double-source est utilisée afin de suivre localement, et de manière non intrusive, l'évolution simultanée de la masse volumique sèche et de la teneur en eau. Une comparaison des trois cinétiques d'humidification est finalement menée à partir d'une caractérisation en terme de diffusivité hydrique, basée sur une description lagrangienne des transferts.

Mots-clés : sol argileux, milieux poreux déformables, compactage, imbibition, gonflement, humidité, gammamétrie double-source, diffusivité, confinement.

Hydraulic transfer in an unsaturated swelling soil : influence of confinement

Abstract

The description of infiltration and swelling mechanisms in clayey soils is of significant interest in geotechnics, agronomy or petroleum industry. The aim of this article is to show the effects of hydromechanical couplings during imbibition in a compacted swelling clay sample, under different confinement conditions. The material is a bentonite-silt mixture, prepared with a known water content and compacted with a dual piston technique. This method allows to produce homogeneous soil samples, in terms of water content and dry bulk density. Experiments related to bottom infiltration are then carried out with three different mechanical boundary conditions : free, oedometric, fixed volume. The non-intrusive dual-energy gamma-ray technique is used to measure the local variation of bulk density and humidity. Finally, the three infiltration kinetics are compared in terms of hydraulic diffusivity, described in a Lagrangian way.

Key words : clayey soil, deformable porous media, compaction, imbibition, swelling, water content, dual-energy gamma-ray technique, diffusivity, confinement.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} février 2004.

Notations

a, a_m	Paramètres du modèle explicite de diffusivité	$[L^2.T^{-1}]$
b, b_m	Paramètres du modèle explicite de diffusivité	
D_m	Diffusivité matérielle	$[L^2.T^{-1}]$
I_p	Indice de plasticité	
\bar{m}	Coordonnée matérielle	$[L]$
N, N_0	Nombre de photons détectés à travers le sol ou à vide	
t	Temps	$[T]$
w	Teneur en eau massique	
w_L	Limite de liquidité	
w_p	Limite de plasticité	
x	Épaisseur de l'éprouvette de sol	$[L]$
z	Coordonnée eulérienne (axe vertical)	$[L]$
μ_e, μ_w	Coefficient d'absorption massique du sol et de l'eau	$[L^2.M^{-1}]$
θ_e, θ_w	Teneur volumique en solide et en liquide	
ρ_d	Masse volumique sèche	$[M.L^{-3}]$
ρ_e, ρ_w	Masse volumique intrinsèque à la phase solide et à la phase liquide	$[M.L^{-3}]$
ξ_m	Variable de Boltzmann matérielle	$[L.T^{-1/2}]$
ψ_w	Potentiel hydrique	$[L]$
exp	expérimentale	
ini	initiale	
sat	à saturation	
sim	simulée	

1

Introduction

De par leur abondante présence dans les sols, la grande diversité de leur nature et de leurs propriétés intrinsèques, les argiles font l'objet de nombreux travaux de recherche appliquée. Dans le domaine de la géotechnique, en particulier, elles sont connues pour leur déformabilité, car elles sont susceptibles de gonfler ou de se rétracter suivant leur degré d'humidité. Il est alors nécessaire d'en tenir compte pour les constructions, afin d'éviter l'apparition d'effets néfastes (Philipponnat, 1991; Vandangeon, 1992; Derriche *et al.*, 1999). De plus, les sols argileux se caractérisent par une faible perméabilité. Cela explique qu'ils soient souvent utilisés en tant que constituants pour la réalisation de barrières étanches dans des sites de stockage. Il apparaît donc essentiel de bien connaître les propriétés hydrauliques et mécaniques de ces milieux, afin de savoir maîtriser leur comportement.

L'objectif du travail présenté ici est de montrer, au moins du point de vue qualitatif, les effets du couplage hydromécanique lors de l'imbibition d'eau dans des milieux argileux gonflants soumis à trois conditions de confinement différentes : libre, œdométrique et à volume constant.

Nous vous proposons tout d'abord de faire une présentation succincte du matériau utilisé, à travers ses constituants et ses caractéristiques géotechniques, ainsi que de la technique de réalisation des échantillons. Notre cellule d'essai permettant de réaliser des imbibitions pour différents degrés de confinement est ensuite décrite avec l'ensemble de son environnement.

Dans l'argile, les transferts hydriques s'accompagnent localement de modification de la masse volu-

mique sèche : à tout instant deux grandeurs doivent donc être déterminées, ce qui nécessite l'utilisation d'un dispositif expérimental approprié. Actuellement, plusieurs techniques non intrusives permettent de répondre au problème. On trouve entre autres le synchrotron X (Garnier *et al.*, 1998), la résonance magnétique nucléaire (Augier *et al.*, 2002), techniques très performantes mais aussi très coûteuses ; la gammamétrie double-source, méthode un peu plus ancienne, mais plus souple d'utilisation, sera utilisée pour notre étude.

Les résultats issus de ces techniques permettent ensuite d'accéder aux propriétés hydrauliques du matériau. Deux modes de description sont généralement adoptés en mécanique des milieux continus : la description eulérienne (Nakano *et al.*, 1986; Angulo *et al.*, 1993) et la description lagrangienne (Philip, 1968; Smiles et Rosenthal, 1968; Angulo *et al.*, 1993). Du point de vue pratique, la première présente des avantages évidents puisque les mesures réalisées le sont dans un repère fixe. Elle est cependant physiquement critiquable, notamment parce qu'elle fait intervenir des termes diffusifs liés à la phase solide (Kirby et Smiles, 1999). Notre choix s'est donc orienté préférentiellement vers l'approche lagrangienne.

Après avoir brièvement validé notre méthodologie sur un milieu poreux de référence (béton cellulaire), nous présentons les résultats obtenus sur des échantillons de sol argileux gonflant. Une comparaison des trois cinétiques d'infiltration est finalement menée à partir d'une caractérisation en terme de diffusivité hydraulique, basée sur une description lagrangienne des transferts.

2

Matériau et mise en forme

2.1

Caractéristiques du matériau

Le sol déformable que nous avons étudié est un matériau reconstitué en laboratoire à partir de deux sols fins. De la bentonite et du limon de Xeuilley sont mélangés, humidifiés et compactés à une pression de compactage donnée.

2.1.1

La bentonite

La bentonite utilisée est une argile industrielle très plastique d'appellation commerciale «bentonite FVO». Une analyse par diffraction aux rayons X montre qu'elle est composée de smectite dioctaédrique de type montmorillonite à compensation calcique, et qu'elle contient 5 à 10 % de quartz et 1 % de calcite. Une analyse par spectroscopie infrarouge confirme cette détermination et met aussi en évidence des traces de kaolinite. Nous avons mesuré une masse volumique des grains valant $\rho_s = 2,66 \pm 0,01 \text{ g.cm}^{-3}$ par pycnométrie à l'hélium.

2.1.2

Le limon de Xeuilley

Le limon utilisé dans ce travail est un limon argileux très plastique prélevé à Xeuilley (situé à 20 km au sud

de Nancy). L'analyse par diffraction X montre que ce limon contient environ 60 % de quartz, 20 % de montmorillonite, 11 % de feldspath, quelques % de kaolinite et de mica. Nous avons mesuré pour ce matériau une masse volumique des grains égale à $\rho_s = 2,69 \pm 0,01 \text{ g.cm}^{-3}$ par pycnométrie à l'hélium.

Nous avons réuni dans le tableau I les valeurs moyennes des limites d'Atterberg mesurées pour ces deux constituants.

TABEAU I Caractéristiques des matériaux utilisés : limites d'Atterberg.
Characteristics of the used materials : Atterberg's limits.

	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)
Limon de Xeuilley	53	30	23
Bentonite FVO	164	64	100

2.1.3

Protocole du mélange et du compactage

Nous avons choisi de mélanger manuellement 60 % de bentonite et 40 % de limon sous forme de poudres sèches, puis d'ajouter très progressivement la quantité d'eau nécessaire tout en malaxant le matériau pour obtenir une teneur en eau massique, w , de 25 %. Le mélange a ensuite été compacté, en appliquant une pression de compactage de 1 MPa, par une technique double-piston (Mesbah *et al.*, 1999). Plusieurs essais ont été réalisés en élaborant le matériau par compactage statique, simple piston, de couches d'épaisseur 1 à 2 cm. Compte tenu de l'hétérogénéité finale des échantillons obtenus par cette méthode, nous avons pris le parti de ne présenter dans cet article que les résultats relatifs aux échantillons compactés par la méthode double-piston. Ainsi ont pu être élaborées des éprouvettes de sol relativement uniformes, de diamètre 11,2 cm, de hauteur 12,0 cm et de masse volumique sèche ρ_d égale à $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$. Nous noterons que la combinaison $\rho_d = 1,50 \text{ g.cm}^{-3}$ et $w = 25 \%$, facilement reproductible, correspond sensiblement au maximum de la courbe de compactage du mélange réalisée par Tabani (1999) (Fig. 1). Cette proportion permet sous charge

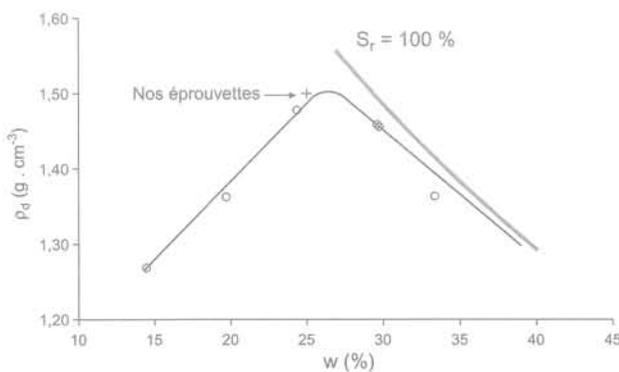


FIG. 1 Courbe de compactage du mélange bentonite-limon (d'après Tabani, 1999).
Compaction curve of the bentonite-silt mixture (from Tabani, 1999).

nulle d'obtenir un gonflement axial d'environ 25 % ou d'obtenir une pression de gonflement de 630 kPa. C'est *a priori* un milieu bien adapté à la mesure par gammamétrie, pour laquelle les phénomènes doivent varier raisonnablement en amplitude ou en temps. De plus, la conductivité hydraulique du matériau n'est pas excessivement faible (voisine de 10^{-11} m/s), ce qui permet de réaliser différentes expériences dans des délais raisonnables (moins de trois mois).

Un carottage est ensuite réalisé pour obtenir des échantillons de diamètre plus adapté à la technique gammamétrique. Cette dernière étape génère une quantité importante de matériau inutilisable pour la suite des essais. Cette quantité est en partie récupérée pour contrôler l'état initial de l'échantillon : mesure par pesée de la valeur de la teneur en eau massique $\langle w^{ni} \rangle$ (méthode par étuvage) et de la masse volumique sèche $\langle \rho_d^{ni} \rangle$ (méthode par immersion dans le kerdane).

2.2

Trois types de confinement

Au cours de ce travail, nous avons réalisé un certain nombre d'essais d'imbibition sur le mélange gonflant, en faisant varier les conditions aux limites mécaniques. Pour ce faire, nous avons dû concevoir une cellule expérimentale instrumentée. Elle est formée d'une base circulaire en inox jouant le rôle de réservoir, facilement alimentée en eau. Afin d'assurer des conditions de type œdométrique, l'éprouvette de sol étudiée est maintenue dans un tube en Plexiglas de diamètre interne 6 cm, lui-même chemisé par un tube en inox. Ces deux tubes s'encastrent sans difficulté dans la base précédemment décrite. L'étanchéité entre la base et les tubes est assurée par deux joints toriques graissés. Une pierre poreuse de diamètre 6 cm et d'épaisseur 1 cm permet de réaliser le contact entre le sol et l'eau du réservoir. Il convient de préciser ici que tous les essais ont été réalisés sous charge d'eau nulle.

Pour le premier essai, nommé *essai libre*, l'éprouvette de sol est libre de se déformer axialement et latéralement. Un simple film plastique enveloppe l'éprouvette afin de limiter le phénomène d'évaporation. Pour cet essai, un capteur de déplacement et un micromètre à balayage laser permettent de mesurer respectivement les gonflements axial et radial de l'éprouvette.

Pour le deuxième essai, ou *essai œdométrique*, l'éprouvette est confinée dans le tube en Plexiglas, ce qui assure un déplacement radial nul en paroi du tube. Cependant, elle reste libre de se déformer dans le sens axial. Les parois internes du tube ont été préalablement graissées de façon à limiter les effets de frottement et par conséquence de freinage. Le capteur de déplacement permet à nouveau de suivre l'évolution du gonflement axial.

Pour le troisième essai, *essai à volume constant*, l'éprouvette ne peut pas se déformer macroscopiquement : elle est confinée dans le tube en Plexiglas et un piston poreux, positionné au sommet de l'éprouvette, bloque le gonflement macroscopique dans le sens axial. Une cellule de force à très faible déplacement (moins de 0,2 mm pour 1 MPa) reliée à ce piston permet d'accéder à la valeur de la pression de gonflement exercée par le milieu argileux dans le sens axial, au cours de son humidification.

Pour les trois essais, une balance de précision a été utilisée afin de mesurer la quantité d'eau absorbée par

le milieu pendant toute la durée de l'expérience. À la fin de l'essai, les éprouvettes sont mesurées, pesées, puis placées à l'étuve. La valeur de la teneur en eau massique ainsi déterminée est ensuite comparée à celle obtenue par gammamétrie.

La figure 2 permet de visualiser schématiquement les différents types d'essai que nous avons réalisés. Nous avons réuni dans le tableau II, les caractéristiques initiales, dimensionnelles et pondérales, des éprouvettes utilisées.

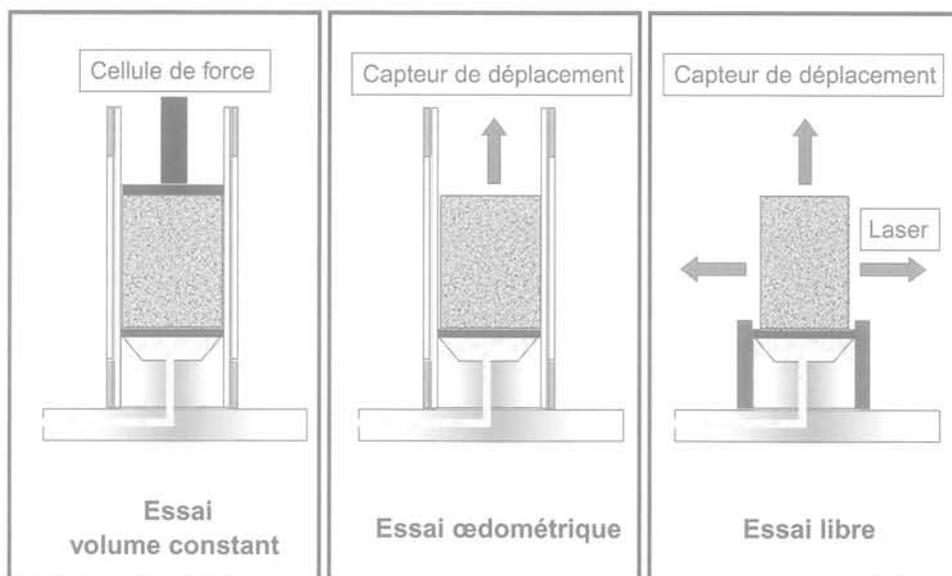


FIG. 2 Schéma des différents types d'essais d'infiltration réalisés. Sketch of the different imbibition tests.

TABLEAU II Caractéristiques des différents essais réalisés. Characteristics of the different tests.

Types d'essai	Hauteur initiale (cm)	Diamètre initial (cm)	$\langle \rho_d^{ini} \rangle$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\langle w^{ini} \rangle$
Volume constant	8,06	6,0	1,52	25 %
œdométrique	8,06	6,0	1,50	25,1 %
Libre	11,50	5,05	1,50	25,2 %

3

Gammamétrie double-source

3.1

Théorie

Afin de suivre localement l'évolution de la teneur en eau et en solide dans un milieu poreux déformable, nous avons fait appel à la technique de gammamétrie double-source (Corey *et al.*, 1971). Deux sources radioactives, Américium (Am^{241}) et Césium (Cs^{137}), émettant chacune des photons γ d'énergies différentes (respectivement 60 keV et 662 keV) sont placées dans un châteaude plomb de façon à créer un double faisceau colinéaire. Ces photons sont collectés, sélectionnés et comptabilisés par un détecteur couplé à un dispositif spectrométrique. Lorsque l'on place un échantillon de sol humide entre les sources et le détecteur, le faisceau γ est atténué suivant une loi de type Beer-Lambert. Pour chacune des deux sources, cette atténuation s'écrit :

$$\begin{cases} N_s^{Am} = N_0^{Am} \exp[-(\mu_s^{Am} \rho_s \theta_s + \mu_w^{Am} \rho_w \theta_w) x] \\ N_s^{Cs} = N_0^{Cs} \exp[-(\mu_s^{Cs} \rho_s \theta_s + \mu_w^{Cs} \rho_w \theta_w) x] \end{cases} \quad (1)$$

Les indices s et w désignent respectivement le sol et l'eau, les μ_i représentent les coefficients d'absorption massique ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). N_0 est le nombre de photons détectés « à vide » (c'est-à-dire en l'absence de l'échantillon de sol), N est le nombre de photons détectés après traversée de l'éprouvette de sol humide, x est l'épaisseur de l'éprouvette traversée par le faisceau γ . Nous noterons que l'atténuation due à l'air a été négligée. Le système ainsi écrit laisse apparaître deux inconnues : la teneur en eau volumique θ_w et la masse volumique sèche ρ_d . Après résolution du système, nous obtenons :

$$\rho_d = \rho_s \theta_s = \frac{\mu_w^{Cs} \ln(N_0^{Am} / N_s^{Am}) - \mu_w^{Am} \ln(N_0^{Cs} / N_s^{Cs})}{x(\mu_s^{Am} \mu_w^{Cs} - \mu_w^{Am} \mu_s^{Cs})} \quad (2)$$

$$\theta_w = \frac{\mu_s^{Am} \ln(N_0^{Cs} / N_s^{Cs}) - \mu_s^{Cs} \ln(N_0^{Am} / N_s^{Am})}{\rho_w x (\mu_s^{Am} \mu_w^{Cs} - \mu_w^{Am} \mu_s^{Cs})} \quad (3)$$

Par ailleurs, il est aussi possible d'obtenir indirectement la teneur en eau massique, w :

$$w = \frac{\rho_w \theta_w}{\rho_d} = \frac{\mu_s^{Am} \ln(N_0^{Cs} / N^{Cs}) - \mu_s^{Cs} \ln(N_0^{Am} / N^{Am})}{\mu_w^{Cs} \ln(N_0^{Am} / N^{Am}) - \mu_w^{Am} \ln(N_0^{Cs} / N^{Cs})} \quad (4)$$

Par la suite, cette grandeur sera principalement utilisée (plutôt que θ_w). En effet, w est le paramètre naturel (avec l'indice d'humidité) qui intervient dans l'écriture des équations de diffusion des sols gonflants, en suivant une description lagrangienne. Il peut très facilement être comparé avec les mesures faites par pesée (méthode par étuvage). De plus, comme le montre la relation (4), cette écriture permet de s'affranchir de la connaissance de l'épaisseur du milieu traversé par le faisceau γ . En général, les valeurs expérimentales sont déterminées avec une incertitude d'environ $\pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ pour la masse volumique sèche ρ_d , et d'environ $\pm 3\%$ pour la teneur en eau massique.

Le système gammamétrique est disposé sur un banc de déplacement; il est alors possible de réaliser des mesures à n'importe quelle hauteur de l'éprouvette de sol. Nous présentons sur la figure 3 un schéma du dispositif expérimental utilisé.

3.2

Détermination des caractéristiques hydrauliques

Les mesures d'humidité et de masse volumique sèche obtenues par gammamétrie présentent un intérêt évident quant à la caractérisation du matériau en terme de diffusivité ou de conductivité hydraulique. Ces propriétés sont parfaitement bien définies dans le cas des milieux poreux non déformables (roches, bétons, sables...). En revanche, leur détermination s'avère plus complexe dans le cas des milieux déformables non saturés car il est indispensable de tenir compte de la nature gonflante du matériau. En 1968, Philip, Smiles

et Rosenthal proposent une description lagrangienne des transferts hydriques dans les sols gonflants avec des conditions de Dirichlet:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial m} \left[D_m(w) \left(\frac{\partial w}{\partial m} \right) \right] \quad \begin{cases} w = w^{\text{sat}} & \text{pour } m = 0 \text{ et } t \geq 0 \\ w = w^{\text{ini}} & \text{pour } m \rightarrow \infty \text{ et } t \geq 0 \\ w = w^{\text{ini}} & \text{pour } m > 0 \text{ et } t = 0 \end{cases} \quad (5)$$

où D_m est la diffusivité matérielle, m est la coordonnée matérielle qui lie le référentiel lagrangien au référentiel eulérien ($dm = \rho_d / \rho_s dz$). Les effets de la gravité sont négligés. L'expression (5) peut être réécrite en lui appliquant une transformation de Boltzmann $\xi_m = mv\sqrt{t}$ en prenant en compte la forte dépendance de la diffusivité D_m avec w :

$$\frac{d^2 w}{d\xi_m^2} = -\frac{1}{D_m(w)} \left[\frac{1}{2} \xi_m \frac{dw}{d\xi_m} + \frac{dD_m(w)}{dw} \left(\frac{dw}{d\xi_m} \right)^2 \right] \quad \begin{cases} w = w^{\text{sat}} & \text{pour } \xi_m = 0 \\ w = w^{\text{ini}} & \text{pour } \xi_m \rightarrow \infty \end{cases} \quad (6)$$

L'hypothèse d'un milieu semi-infini n'est bien sûr valable que si le front d'humidification n'atteint pas la limite supérieure de l'éprouvette. La validation du modèle sera faite en pratique en traçant les évolutions de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann et en vérifiant que les courbes se superposent en un profil unique.

Remarque: afin de simplifier les écritures dans la suite de cet article, $m(z,t)$ pourra être remplacé par m_z , où z est la hauteur issue du repère fixe.

3.3

Identification avec un modèle explicite de diffusivité

Si l'on se donne un modèle explicite de diffusivité, l'équation (6) peut être résolue par un algorithme classique de Runge-Kutta (d'ordre 4). Celui-ci est couplé à

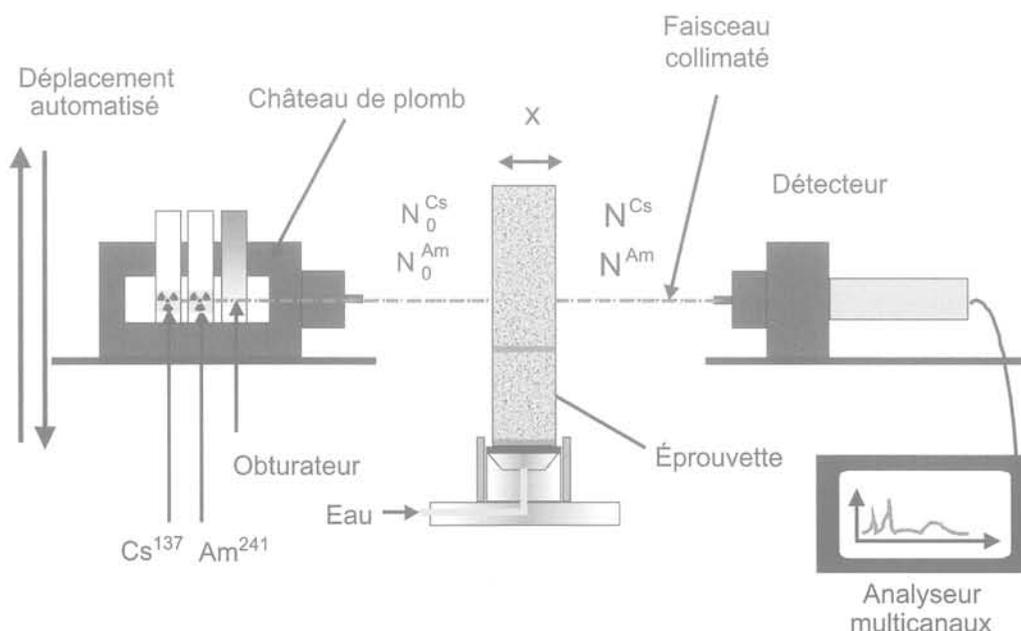


FIG. 3 Schéma du système gammamétrique double-source. Sketch of the dual-energy gamma-ray system.

une méthode du tir de façon à remplacer la condition de teneur en eau imposée au sommet de l'éprouvette ($\xi_m \rightarrow \infty$) par une condition en terme de pente au bas de l'éprouvette ($\xi_m \rightarrow 0$). Une estimation correcte des paramètres du modèle de diffusivité choisi est obtenue en minimisant l'écart quadratique entre les valeurs des teneurs en eau simulées w_{sim} et les valeurs expérimentales w_{exp} (méthode des moindres carrés). La fonction objectif retenue, $f(w_{sim}, w_{exp}) = \sum_{k \text{ mesures}} (w_{sim} - w_{exp})^2$, est minimisée selon un algorithme du Simplex (Press et al., 1986).

Dans notre programme, le modèle explicite de diffusivité matérielle choisi est une simple évolution exponentielle en fonction de la teneur en eau massique w : $D_m(w) = a_m \exp(b_m w)$ où a_m et b_m sont les paramètres à identifier. Le choix de ce modèle peut paraître simpliste vu l'abondante littérature portant sur les modèles de conductivité ou de diffusivité hydraulique des sols. Cependant, ce modèle nous a semblé suffisant pour décrire les transferts d'eau eu égard à la précision des résultats expérimentaux obtenus et, en anticipant sur la suite (Figs. 5, 10, 11, 13 et 14), compte tenu de la qualité acceptable des résultats d'identification finalement trouvés. Dans la pratique, nous identifions la pente de la courbe de Boltzmann en $\xi_m \rightarrow 0$. En revanche, nous imposons la valeur des teneurs en eau pour $\xi_m \rightarrow \infty$ et $\xi_m \rightarrow 0$. Pour $\xi_m \rightarrow \infty$, w est fixée par rapport aux valeurs expérimentales observées avant de lancer l'infiltration ($\approx w^{ini}$), elle sera notée $w_{\xi_m \rightarrow \infty}$. La valeur de la teneur en eau pour $\xi_m \rightarrow 0$, $w_{\xi_m \rightarrow 0}$ est évaluée en prolongeant de visu les courbes de Boltzmann expérimentales, et éventuellement réajustée pour qu'elle corresponde au mieux aux données expérimentales. La pertinence des valeurs imposées est finalement appréciée en superposant sur la représentation $w = f(t)$, les courbes simulées et les courbes expérimentales.

3.4

Critiques de la technique d'identification

En l'état actuel, la procédure d'identification de la diffusivité hydrique pose problème quant aux conditions aux limites imposées lors des essais. Parfaitement valables dans le cas des milieux non déformables, ces conditions ne rendent pas tout à fait compte de la réalité expérimentale. En effet, au début de l'imbibition, l'eau commence à humidifier le bas de l'éprouvette mais en raison du gonflement simultané du milieu, la teneur en eau massique varie conjointement. Il n'est donc pas possible d'imposer une teneur en eau constante durant l'essai par simple mise en contact avec une nappe d'eau dans le cas d'un milieu poreux déformable.

Pour peu que le flux d'eau infiltré soit connu (ce qui est le cas pour nos essais), il est donc préférable d'effectuer l'identification de la diffusivité matérielle en supposant des conditions de type Neumann (et non de type Dirichlet). Le caractère non linéaire de l'équation de diffusion et la condition non homogène imposée ne nous permettent plus de résoudre simplement le problème par transformation de Boltzmann comme auparavant. Il est alors nécessaire de recourir à une résolution numérique de l'équation aux dérivées partielles discrétisée, assortie de ses conditions aux limites (de type Neumann). La procédure d'identification de la diffusivité matérielle peut également être envisagée par une

méthode des moindres carrés couplée à une optimisation par un algorithme du Simplex.

Cependant, l'utilisation d'une méthode de résolution numérique alourdit considérablement la technique d'identification, puisque la solution du problème doit être recalculée numériquement à chaque étape. C'est pourquoi, nous avons privilégié l'utilisation de la technique d'identification, couplée aux conditions de Dirichlet. Un programme numérique intégrant des conditions de Neumann nous a malgré tout permis de contrôler dans le sens direct la validité des ordres de grandeur obtenus. Nous le verrons dans la suite de cet article.

4

Résultats et discussions

4.1

Validation sur un matériau non déformable

Toute la méthodologie a été préalablement testée sur un matériau de référence non déformable, qui se prête bien aux mesures par gammamétrie : le béton cellulaire. Nous avons ainsi réalisé un essai d'infiltration sur un échantillon de hauteur 20 cm et d'épaisseur 5,2 cm. La porosité de l'échantillon (71 %) et sa masse volumique sèche ($\rho_d = 0,52 \text{ g.cm}^{-3}$) ont été mesurées par méthode gravimétrique. Nous présentons sur la figure 5, les courbes d'humidification obtenues sur ce matériau pour quatre hauteurs différentes. La représentation de w en fonction de la variable de Boltzmann classique (z/\sqrt{t}) permet d'obtenir une courbe expérimentale unique, conformément à ce qui est décrit dans la théorie (Fig. 4). Cela signifie physiquement que les phénomènes dans ce type de milieu sont effectivement purement diffusifs et que l'hypothèse consistant à négliger les forces de gravité est pertinente (la faible hauteur de l'échantillon permettait déjà de supposer cette approximation). En utilisant ensuite un modèle explicite de diffusivité, $D(w) = a \exp(bw)$, notre programme d'identification nous permet d'obtenir $a = 2,75 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $b = 9,74$ pour la hauteur $z = 12 \text{ cm}$. Sur la figure 4, la courbe en trait plein permet de juger de la qualité de notre identification. Nous vérifions ensuite sur la figure 5 que le jeu de paramètres identifiés permet effectivement de retrouver l'allure générale de la courbe d'infiltration à la hauteur considérée. Avec ce même jeu de paramètres, nous parvenons également à simuler très correctement les réponses aux hauteurs $z = 4, 8, 16 \text{ cm}$.

Ce travail préalable sur un matériau de référence a permis de mettre en évidence la pertinence du dispositif expérimental, et du traitement des données qui s'ensuit. Qu'advient-il maintenant lorsque l'on travaille sur un matériau déformable ?

4.2

Résultats sur le matériau gonflant

4.2.1

Coefficients d'absorption massique

Les coefficients d'absorption du rayonnement γ de l'eau sont obtenus en utilisant différentes éprouvettes

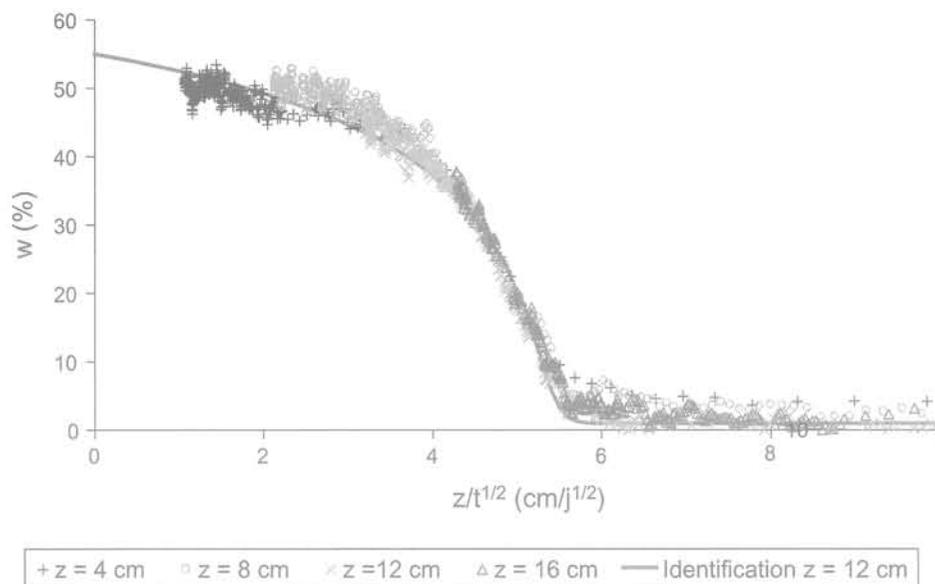


FIG. 4 Évolution de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann ; comparaison des résultats expérimentaux et de la courbe identifiée (béton cellulaire).
Evolution of the water content versus the Boltzmann variable ; comparison of experimental and identified results (cellular concrete).

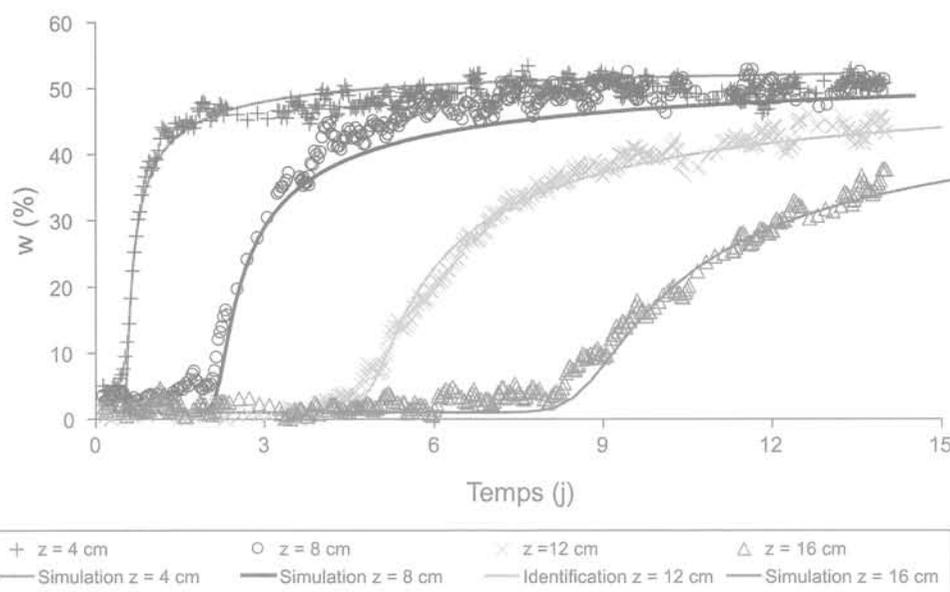


FIG. 5 Courbes d'imbibition obtenues sur du béton cellulaire, avec les résultats de l'identification.
Imbibition curves for the cellular concrete, with the results of identification.

calibrées (utilisées en spectroscopie) d'épaisseur 2 et 5 cm, remplies d'eau distillée et combinées afin d'obtenir successivement des lames d'eau de 2, 4, 9, 14, 19 cm, entre les sources et le détecteur. Les valeurs ainsi déterminées (Tableau III) correspondent assez bien à celles fournies dans la littérature (0,2036 et 0,0858 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour Gardner *et al.*, 1972 ; 0,2040 et 0,0838 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour Angulo, 1989 ; 0,2042 et 0,0820 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour Barataud *et al.*, 1999).

Le protocole utilisé dans le cas de l'eau n'est malheureusement pas envisageable pour déterminer les coefficients intrinsèques à la fraction solide du sol gonflant. En effet, nos premières investigations (Tabani, 1999) ainsi que d'autres travaux (Barataud *et al.*, 1999) déconseillent une détermination des coefficients

sur poudre sèche. Sans que l'on puisse vraiment expliquer toutes les raisons physiques, ces coefficients ne permettent pas par la suite de redonner des profils d'humidité et de densité corrects pour une éprouvette compactée, constituée de cette même poudre. Nous avons donc adopté une autre méthodologie pour ce sol, consistant à calculer directement les coefficients sur les éprouvettes compactées avant infiltration. Nous utilisons l'équation suivante (* représente la source Am ou bien Cs):

$$\mu_s^* = \frac{1}{I} \sum_i \frac{1}{x \cdot \langle \rho_d^{ini} \rangle} \cdot \ln \left(\frac{(N_{0i})^*}{(N_i)^*} \right) - \mu_w^* \cdot \langle w^{ini} \rangle \quad (7)$$

TABEAU III Coefficients d'absorption massique ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).
Mass absorption coefficients ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

Eau	Sol (libre)	Sol (œdométrique)	Sol (volume constant)
$\mu_w^{Am} = 0,2040 \pm 0,0003$	$\mu_s^{Am} = 0,318 \pm 0,002$	$\mu_s^{Am} = 0,325 \pm 0,002$	$\mu_s^{Am} = 0,326 \pm 0,002$
$\mu_w^{Cs} = 0,0807 \pm 0,0001$	$\mu_s^{Cs} = 0,0693 \pm 0,0006$	$\mu_s^{Cs} = 0,0833 \pm 0,0006$	$\mu_s^{Cs} = 0,0780 \pm 0,0006$

où I représente le nombre de points constituant le profil et i correspond au rang du point scruté. Le tableau III récapitule les coefficients utilisés pour les différents essais.

Celui-ci met en évidence un problème, qui n'est apparemment pas abordé dans la littérature, si ce n'est par Barataud *et al.* (1999) et Rolland (2002). Les couples de coefficients obtenus ne sont jamais tout à fait identiques d'une éprouvette à une autre, malgré le fait qu'elles aient quasiment des masses volumiques et des teneurs en eau massiques identiques. Nous émettons deux hypothèses pour expliquer cette constatation :
– les coefficients d'absorption massique ne sont pas mesurés avec une précision suffisante. Il est vrai qu'ils sont déterminés de manière indirecte et qu'un certain nombre de données entrent en jeu (pesée, fluctuations gammamétriques, temps de comptage, étalonnage) ;

– les coefficients d'absorption de l'eau ne sont pas parfaitement définis suivant son état dans le sol (eau libre, eau liée...).

Pour un même essai, cela se traduit à la fin de l'essai, par un léger décalage entre les grandeurs mesurées par gammamétrie et celles obtenues par étuvage (Tableau IV). Cet écart est plus important dans le cas de l'essai libre, car la quantité d'eau imbibée est plus importante elle aussi.

4.2.2

Courbes d'humidification et de gonflement

Nous présentons sur les figures 6 (essai libre), 7 (essai œdométrique), 8 (essai à volume constant), l'évolution de la masse volumique sèche en fonction du temps à deux hauteurs différentes (2,5 cm et 5,5 cm).

TABEAU IV Comparaison des teneurs en eau massiques finales obtenues par gammamétrie et par pesée.
Comparison between water contents determined by gamma technique and by weighting.

	Essai libre	Essai œdométrique	Essai volume constant
Gammamétrie	$\langle w^{fin} \rangle = 43,9 \%$	$\langle w^{fin} \rangle = 42,6 \%$	$\langle w^{fin} \rangle = 32,2 \%$
Pesée	$\langle w^{fin} \rangle = 48,1 \%$	$\langle w^{fin} \rangle = 40 \%$	$\langle w^{fin} \rangle = 30,8 \%$

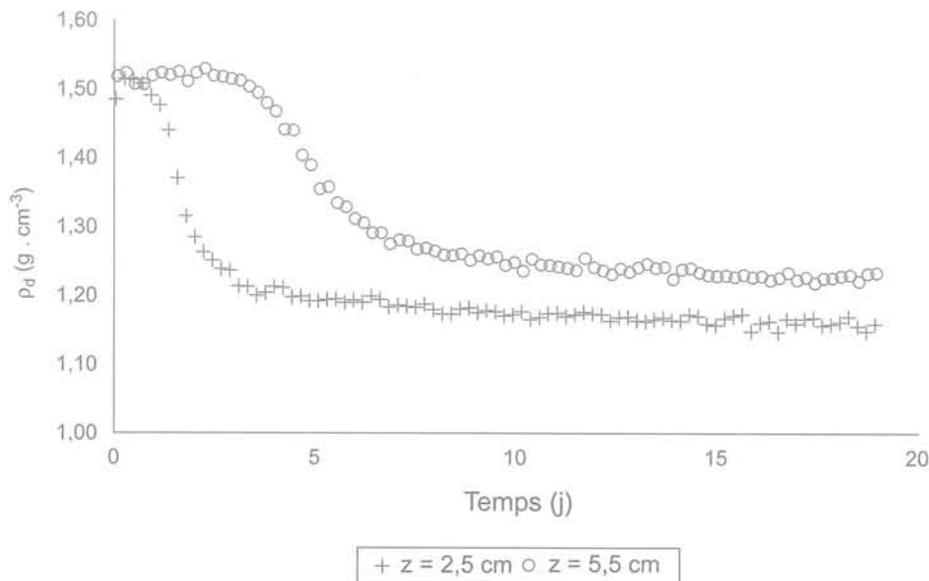


FIG. 6 Évolution de la masse volumique sèche de l'éprouvette de sol pour deux hauteurs différentes dans le cas de l'essai libre.

Variation of the bulk density of our soil sample for two different heights in the case of the free test.

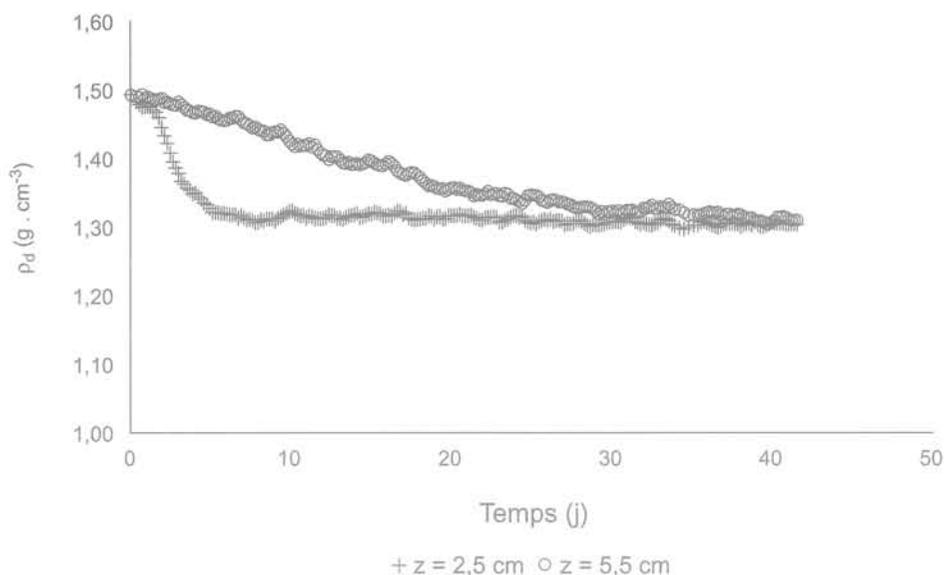


FIG. 7 Évolution de la masse volumique sèche de l'éprouvette de sol pour deux hauteurs différentes dans le cas de l'essai œdométrique.
Variation of the bulk density of the soil sample for two different heights in the case of the oedometric test.

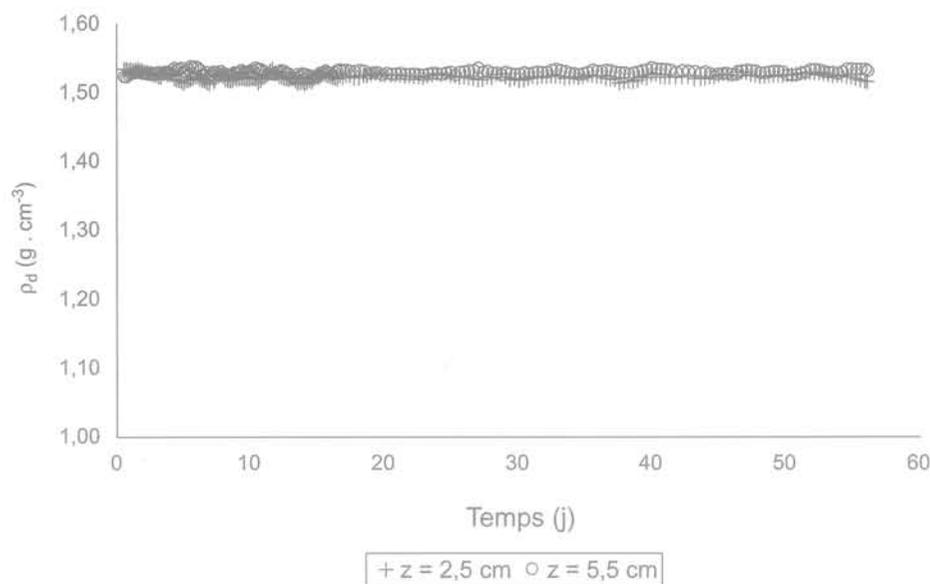


FIG. 8 Évolution de la masse volumique sèche de l'éprouvette de sol pour deux hauteurs différentes dans le cas de l'essai à volume constant.
Variation of the bulk density of the soil sample for two different heights in the case of the constant volume test.

Rappelons que pour les 3 essais, l'état initial du matériau est sensiblement le même (Tableau II). Ces trois courbes traduisent le gonflement local des échantillons suite à l'imbibition d'eau. Une comparaison entre les courbes 6 et 7 montre clairement que le développement des contraintes mécaniques, résultant du gonflement du matériau et de son confinement extérieur, ralentit considérablement le transfert hydrique à l'intérieur du milieu. En effet, pour l'essai œdométrique, la courbe à la hauteur $z = 5,5$ cm, montre qu'il faut au moins deux fois plus de temps que pour l'essai libre pour atteindre un état d'équilibre. Ceci est encore plus vrai pour l'essai à volume constant pour lequel la cinétique d'infiltration varie très lentement. Conjointement, la figure 8 relative à l'essai à volume constant permet de vérifier que le

gonflement local reste très faible, sans toutefois être nul, alors que, dans le même temps (c'est-à-dire environ deux mois), la teneur en eau massique de l'échantillon est passée de 25 % à près de 30 % (Tableau IV).

Les figures 9, 10, 11 illustrent respectivement l'évolution de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann. L'unicité des courbes est relativement bien respectée dans le cas des essais œdométrique et à volume constant. Elle est, en revanche, moins bonne pour l'essai libre pour des hauteurs situées en bas de l'éprouvette. Cela peut s'expliquer de différentes manières. Comme nous l'avons précisé précédemment, les conditions aux limites sont mal assurées en bas de l'éprouvette : l'écoulement dans cette zone ne peut vraisemblablement plus être considéré

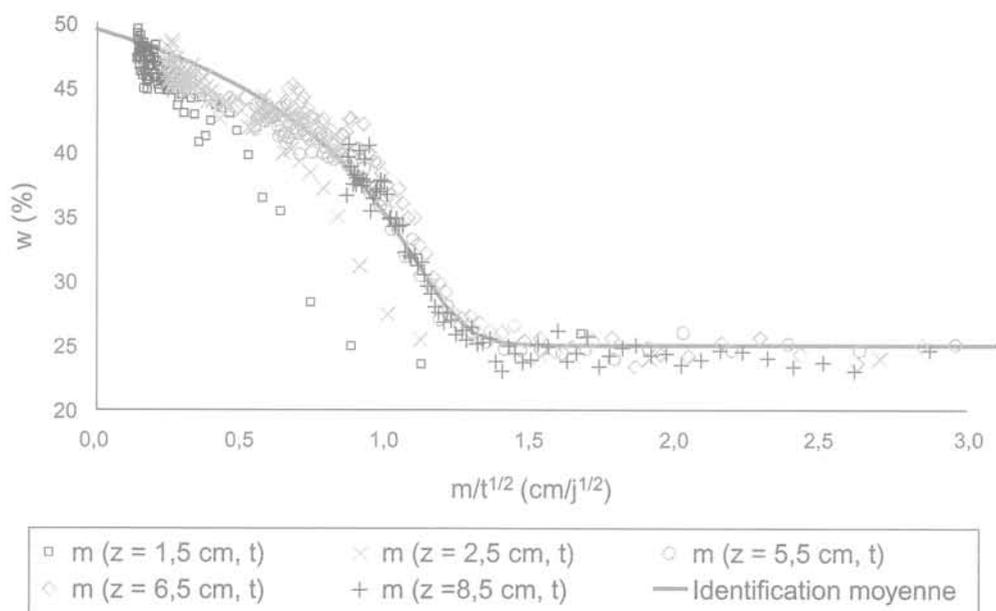


FIG. 9 Évolution de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann matérielle dans le cas de l'essai libre et courbe identifiée.
 Boltzmann representation in the case of the free test and identified curve (material coordinates).

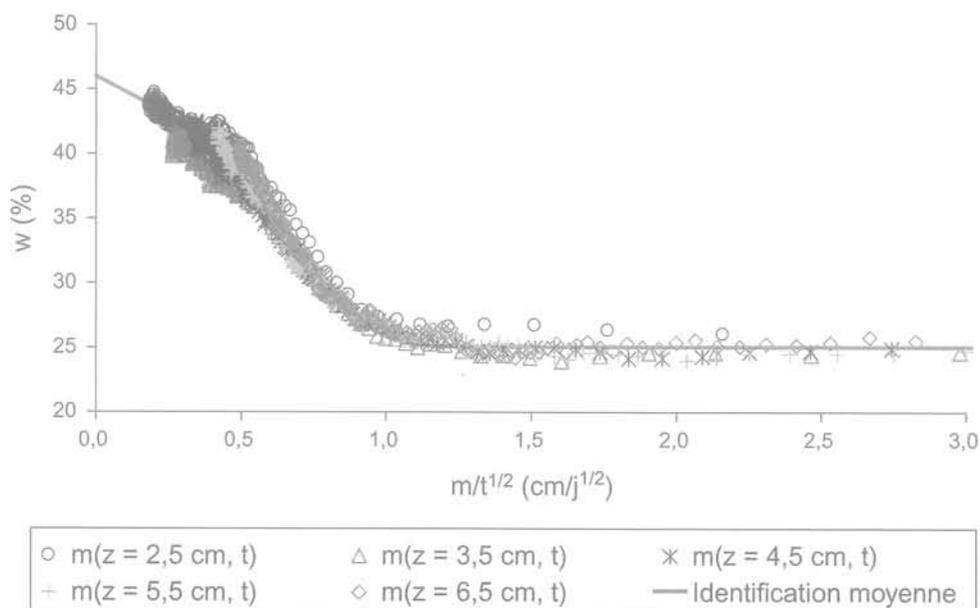


FIG. 10 Évolution de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann matérielle dans le cas de l'essai œdométrique et courbe identifiée.
 Boltzmann representation in the case of the oedometric test and identified curve (material coordinates).

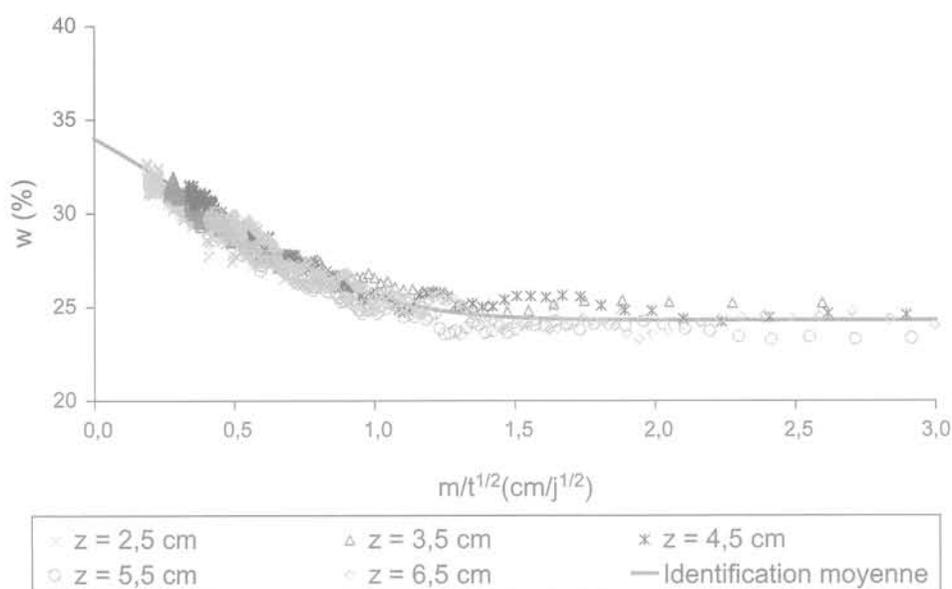


FIG. 11 Évolution de la teneur en eau massique en fonction de la variable de Boltzmann matérielle dans le cas de l'essai à volume constant et courbe identifiée.
Boltzmann representation in the case of the volume constant test and identified curve (material coordinates).

TABLEAU V Récapitulatif des paramètres identifiés à différentes hauteurs de l'éprouvette de sol (essai œdométrique).
Summary of the different identified parameters at different levels of the soil specimen (oedometric test).

Coordonnées matérielles (cm)	$m_{2,5}$	$m_{3,5}$	$m_{4,5}$	$m_{5,5}$	$m_{6,5}$
a_m ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$1,88 \cdot 10^{-13}$	$3,55 \cdot 10^{-12}$	$1,66 \cdot 10^{-11}$	$9,79 \cdot 10^{-13}$	$2,85 \cdot 10^{-13}$
b_m	19,3	11,1	6,6	14,8	17,7
Pente ($s^{1/2} \cdot m^{-1}$)	$-2,33 \cdot 10^{-2}$	$-4,05 \cdot 10^{-2}$	$-5,92 \cdot 10^{-2}$	$-3,09 \cdot 10^{-2}$	$-2,73 \cdot 10^{-2}$
$[w_{\xi m \rightarrow}; w_{\xi m} = 0]$	[45; 26]	[45; 25]	[50; 24,5]	[45; 25]	[45; 25]

comme unidimensionnel. De plus, au cours de l'imbibition, nous avons relevé l'apparition de petites fissures, qui ne sont pas prises en compte dans la modélisation des transferts.

4.2.3

Identification de la diffusivité hydraulique

Afin d'accéder à la diffusivité matérielle du matériau, tout en tenant compte des imperfections visibles sur les représentations de Boltzmann, nous avons identifié les paramètres a_m et b_m sur la gamme de teneurs en eau explorée, pour des hauteurs éloignées

des limites haute et basse de l'échantillon. Nous donnons par exemple les valeurs obtenues dans le cas de l'essai œdométrique dans le tableau V. Les paramètres étant assez différents les uns des autres pour les différentes hauteurs considérées, nous avons tracé sur la figure 12, les courbes de diffusivité en fonction de la gamme de teneur en eau explorée. Toutes conservent le même ordre de grandeur mais les valeurs à l'état initial sont assez dispersées. Cela laisse penser que le concept de diffusivité matérielle n'est pas parfaitement adapté au problème, ou bien que le modèle exponentiel est trop simpliste pour décrire le processus diffusif avec gonflement. Nous en discuterons au paragraphe suivant.

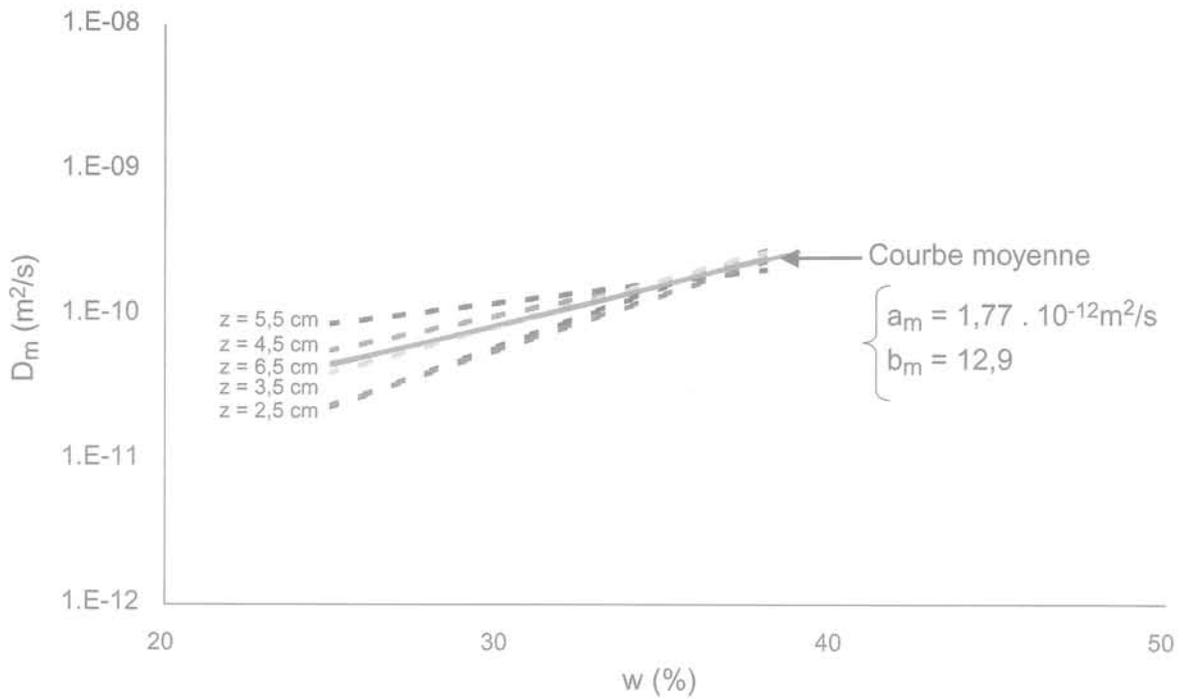


FIG. 12 Courbes de diffusivité en fonction de la teneur en eau pour différents points de mesure (essai œdométrique).
Diffusivity curves versus water content at different measurement points (oedometric test).

La procédure utilisée ensuite consiste à substituer à toutes ces courbes de diffusivité une courbe moyenne donnant un poids égal à toutes les hauteurs examinées :

$$\langle D_m(w) \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 D_m(w, m_i) \quad (8)$$

où i désigne le point de mesure réalisé pour la coordonnée matérielle m_i . On ajuste à nouveau sur cette courbe moyenne un modèle exponentiel ($\langle a_m \rangle = 1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\langle b_m \rangle = 12,9$). La figure 13 permet de contrôler la validité du jeu de paramètres moyens

obtenu : l'allure des courbes d'imbibition simulées correspond plutôt bien aux courbes expérimentales. La figure 14 permet de comparer les courbes expérimentales avec les courbes calculées numériquement, en imposant le flux d'eau infiltrée fourni par la balance (conditions de Neumann) et en injectant simplement le jeu de paramètres moyen précédent. Des différences sont évidemment visibles parce que le programme numérique utilisé n'est qu'une simple résolution de l'équation (5) sans identification et parce que le flux expérimental imposé est imprécis aux temps courts et reste bruité tout au long de l'essai. Cependant, on peut

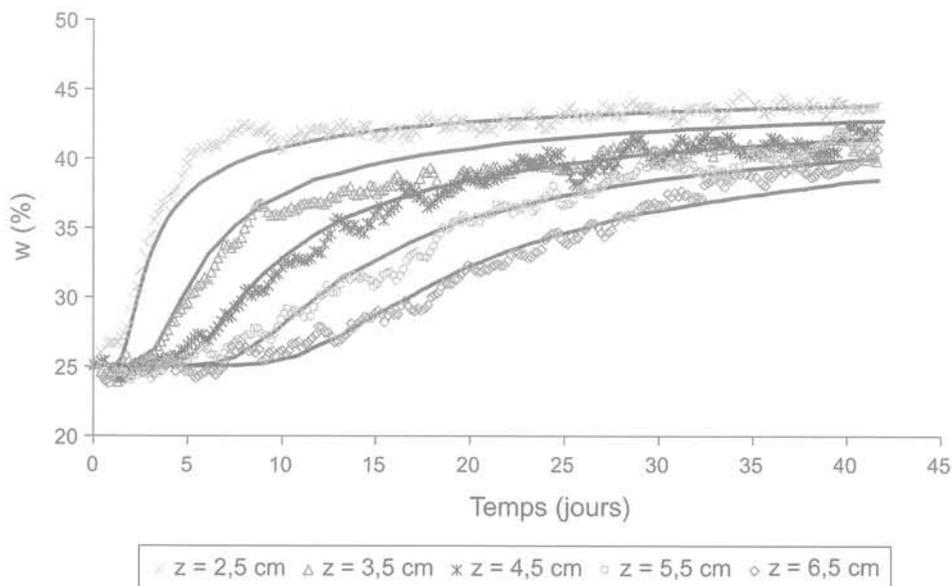


FIG. 13 Courbes d'humidification dans le cas de l'essai œdométrique et résultat de l'identification.
Imbibition curves in the case of oedometric test and result of the identification.

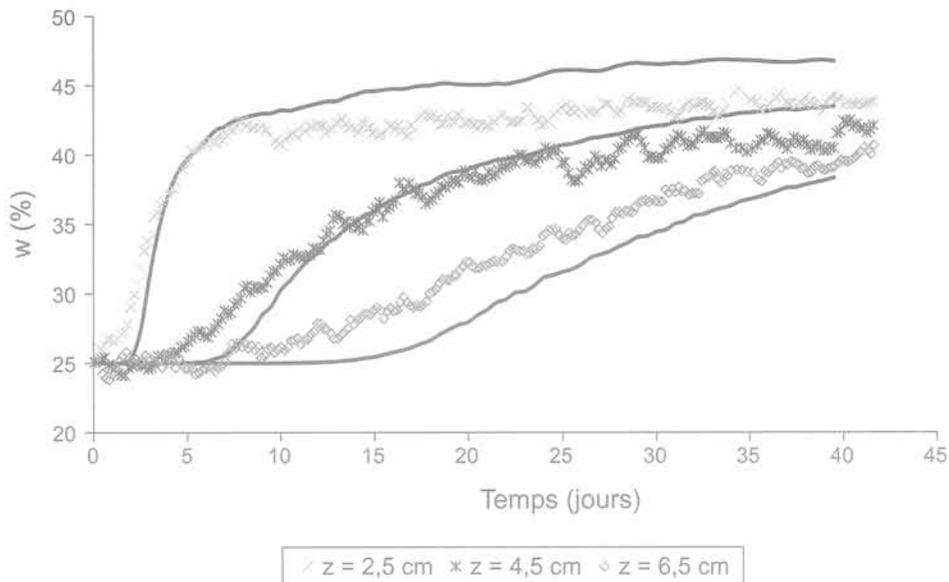


FIG. 14 Courbes d'humidification dans le cas de l'essai œdométrique et résultat direct de l'identification précédente avec des conditions de Neumann.
Imbibition curves in the case of oedometric test and direct result of the previous identification with Neumann conditions.

noter que les ordres de grandeur résultants demeurent acceptables.

3.2.4

Comparaison des trois essais

L'opération a été reconduite pour les deux autres expériences. Cela nous permet de comparer les résultats en terme de diffusivité matérielle (Fig. 15). Mathématiquement, nous rappelons que la diffusivité matérielle est définie par le produit de trois termes (Angulo, 1989):

$$D_m(w) = k_{w/s} \left(\frac{\rho_w \rho_d}{\rho_s^2} \right) \left(\frac{d\psi_w}{dw} \right) \quad (9)$$

Le premier terme représente la conductivité hydraulique (par rapport à la phase solide) au sens de Darcy, le deuxième caractérise l'état de déformation du milieu, et le troisième correspond à la pente de la courbe de rétention. La littérature montre que si la teneur en eau augmente, le premier et le troisième terme peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur, avec un comportement opposé: la conductivité croît tandis que la courbe de rétention décroît. Le deuxième terme diminue lui aussi, mais relativement peu par rapport aux deux autres. Il ne joue donc pas un rôle déterminant dans l'évolution de la diffusivité. Pour un même matériau, le concept de diffusivité matérielle, qui doit tenir compte de l'évolution de ces trois termes, est en théorie une propriété intrinsèque. Pour nos essais, nous aurions donc dû obtenir une superposition des diffusivités autour d'une courbe unique. Cela n'est manifestement pas le cas au regard de la figure 15, ce qui mérite une explication.

Intéressons-nous tout d'abord aux essais œdométrique et libre. Nous observons que si les valeurs des

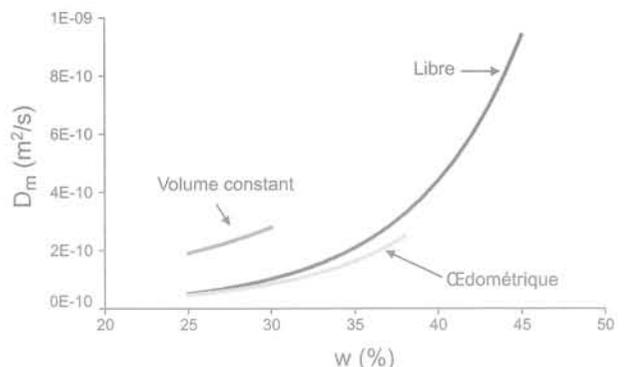


FIG. 15 Comparaison des différents essais en terme de diffusivité matérielle.
Comparison of the different tests in terms of material diffusivity.

diffusivités sont du même ordre de grandeur à l'état initial, elles se différencient assez nettement, suivant le confinement, aux fortes teneurs en eau.

En évoquant une structure multi-échelle du matériau (feuillet, particules, agrégats), se traduisant par différents niveaux de porosité (microporosité, mésoporosité, macroporosité), il est possible d'imaginer, compte tenu des conditions expérimentales, que les phénomènes de gonflement, d'origine microscopique, entraînent une augmentation de la microporosité (voire de la mésoporosité) au détriment de la macroporosité. En effet, l'eau qui pénètre dans l'éprouvette va s'infiltrer d'abord dans l'espace interagrégat, et progressivement dans les espaces interparticulaires et interfoliaires. Cela a pour conséquence:

- un écartement des feuillet, donc un gonflement des particules;

– une répulsion des particules argileuses, expliquée à partir de la théorie de la double couche (Mitchell, 1993).

Dans le cas de l'essai œdométrique, le gonflement macroscopique radial est nul, les espaces interfoliaires et interparticulaires d'une même section vont donc s'accroître au détriment de l'espace interagrégat. Ce mécanisme se traduit évidemment, à l'échelle macroscopique, par une circulation de l'eau rendue plus difficile

pour l'essai œdométrique en fonction du gonflement. La courbe de diffusivité matérielle a donc une amplitude moins prononcée et explore une gamme de teneur en eau plus restreinte que dans le cas de l'essai libre. Ce phénomène de redistribution de la porosité a déjà été observé et interprété identiquement par d'autres auteurs Garnier *et al.* (1998), Tabani (1999), Villar et Lloret (2001). Nous l'avons schématisé sur la figure 16.

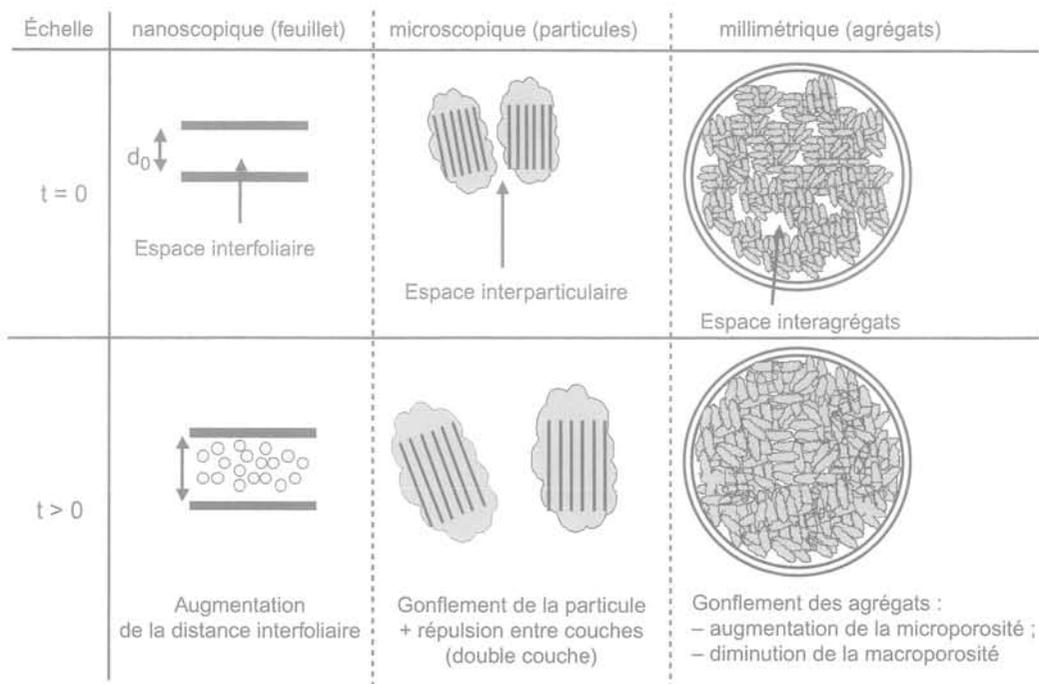


FIG. 16 Les différentes échelles du gonflement. The different scales of the swelling.

Le cas de l'essai à volume constant reste un peu marginal : certes, la gamme de teneur en eau explorée demeure bien plus faible que pour les deux autres essais (25 % ; 30 %), mais les valeurs prises par la diffusivité sont trois fois plus importantes, même à l'instant initial. Pour cet essai, on notera au passage que la notion de saturation a le même sens que pour un matériau indéformable et que la quantité d'eau maximale pouvant pénétrer au sein du matériau est prévisible, conduisant à une teneur en eau à saturation, w^{sat} , voisine de 30 %.

Delage *et al.* (1998) ont travaillé sur des éprouvettes de bentonite fortement compactée. Selon eux, les changements internes de la microstructure durant l'hydratation à gonflement empêché, conduisent à des effets de colmatage des pores, qui ralentissent la progression du front d'humidification. D'autres auteurs avaient déjà formulé, voire vérifié cette hypothèse (Yong et Mohamed, 1992; Komine et Ogata, 1996). Dans notre cas, cela permet d'expliquer la faible variation de la teneur en eau au sein de l'éprouvette, mais ne justifie pas que le front d'humidification ait une progression plus rapide.

Sur la figure 17, relative à l'essai à volume constant, et représentant l'évolution temporelle de la pression de gonflement exercée par l'éprouvette dans le sens axial, on voit une augmentation très brusque au tout début de l'essai d'imbibition. Cela permet d'imaginer que les contraintes mécaniques imposées par le matériau sur lui-même interviennent de manière importante dans le transfert de l'eau. Rien n'interdit de penser que la diffusivité suive une croissance analogue à cette courbe

de pression au voisinage de l'instant initial. Le modèle exponentiel n'est alors évidemment plus adapté pour décrire un éventuel saut de diffusivité aux tout premiers instants de l'imbibition. Une meilleure connaissance microscopique du matériau et le choix d'un modèle de diffusivité plus complexe permettront sans doute de mieux appréhender ce type de mécanisme. Quoi qu'il en soit, ce dernier résultat, assez surprenant, mériterait d'être confirmé par une nouvelle expérience menée dans des conditions parfaitement similaires.

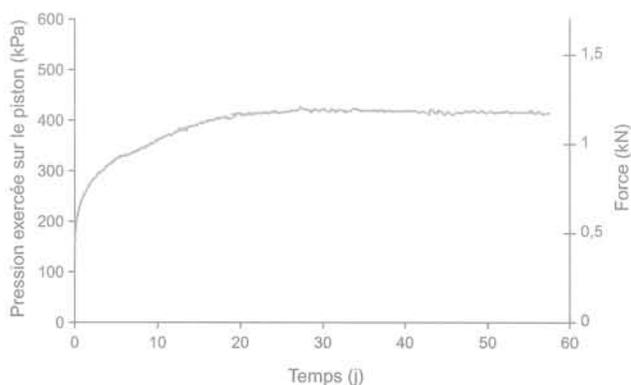


FIG. 17 Évolution de la pression de gonflement dans le sens axial en fonction du temps (essai à volume constant). Swelling pressure in the axial direction versus time (constant volume test).

Conclusion

Ce travail aborde la caractérisation hydraulique des sols argileux gonflants en relation avec les effets de couplage hydromécanique. Après avoir détaillé la composition de notre échantillon et la mise en forme des échantillons ainsi que les différents éléments du dispositif expérimental, des résultats d'imbibition capillaire pour trois modes de confinement (libre, œdométrique et à volume constant) sont présentés et comparés. L'utilisation de la gammamétrie double-source et le recours aux techniques inverses s'avèrent pertinents dans l'identification de la diffusivité hydraulique des échantillons de sols considérés.

L'influence du confinement sur les cinétiques d'infiltration est clairement mise en évidence : plus le degré de confinement est important, plus la cinétique d'imbibition est lente. En terme de diffusivité matérielle, le cas des essais libre et œdométrique peut s'expliquer de manière cohérente. En revanche, l'interprétation de l'essai d'imbibition à volume constant est encore difficile : certaines courbes comme l'évolution temporelle

de la pression de gonflement axiale semblent indiquer que les contraintes mécaniques, très fortes en début d'essai conditionnent de manière très importante le transfert hydrique.

Le bilan de ce travail montre que l'utilisation de l'équation de Philip (1968) et de Smiles et Rosenthal (1968) que nous faisons est un peu trop simpliste pour décrire les transferts hydriques dans un sol gonflant non saturé soumis à des contraintes mécaniques. Le concept de diffusivité ne doit cependant pas être rejeté car les ordres de grandeur sont malgré tout conservés.

Pour aller plus loin dans l'analyse des résultats expérimentaux, il faudrait probablement raffiner la description physique du problème en envisageant par exemple une expression de la diffusivité matérielle qui dépende à la fois de la teneur en eau mais également du tenseur des contraintes.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier bien cordialement Monsieur A. Mesbah de l'ENTPE à Vaulx-en-Velin, pour l'aide apportée dans la mise en œuvre des éprouvettes de sol (compactage double-piston), ainsi que Monsieur J. Yvon du LEM à Vandœuvre-lès-Nancy, pour l'analyse minéralogique de la bentonite.

Bibliographie

- Angulo R. – *Caractérisation hydrodynamique de sols déformables partiellement saturés : étude expérimentale à l'aide de la spectroscopie gamma double-source*. Thèse Mécanique, INPG Grenoble, 1989.
- Angulo R., Gaudet J.P., Thony J.L., Vaucelin M. – « Détermination expérimentale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol gonflant non saturé pour la modélisation des écoulements ». *Revue française de géotechnique*, n° 62, 1993, p. 49-57.
- Augier F., Coumans W.J., Hugget A., Kaasschieter E. F. – « On the risk of cracking in clay drying ». *Chemical Engineering Journal*, vol. 86, n° 1-2, 2002, p. 133-138.
- Barataud F., Moyne C., Stemmelen D. – « Measurement of soil water diffusivity of an undisturbed forest soil using dual-energy gamma radiation technique ». *Soil science*, vol. 164, n° 7, 1999, p. 493-502.
- Corey J.C., Peterson S.F., Wakat M.A. – Measurement of attenuation of ^{137}Cs and ^{241}Am gamma rays for soil density and water content determinations. *Proceed. Soil Science Society of America*, vol. 35, 1971, p. 215-219.
- Delage P., Cui Y.J., Yahia-Aïssa M., Laure (de) E. – « On the unsaturated hydraulic conductivity of a dense compacted bentonite ». *Proceed. of the Second International Conference on Unsaturated Soils/Unsat'98*, Beijing, China, 27-30 August 1998, Beijing, International Academic Publishers. vol. 1, 1998, p. 344-349.
- Derriche Z., Iguechtal L., Tas M. – « Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas ». *Revue française de géotechnique*, n° 89, 1999, p. 55-65.
- Gardner W.H., Campbell G.S., Calissendorf C. – « Systematic and random errors in dual gamma energy soil bulk density and water content measurements ». *Soil Science Society of America*, vol. 36, 1972, p. 393-398.
- Garnier P., Angulo-Jaramillo R., Dicarolo D., Bauters T.W.J., Darnault C.J.G., Steenhuis T.S., Parlange J.Y., Baveye P. – « Dual-energy synchrotron X ray measurements of rapid soil density and water content changes in swelling soils during infiltration ». *Water resources research*, vol. 34, n° 11, 1998, p. 2837-2842.
- Kirby J.M., Smiles D.E. – « Comment on "Dual-energy synchrotron X ray measurements of rapid soil density and water content changes in swelling soils during infiltration" by Patricia Garnier et al. » *Water resources research*, vol. 35, n° 11, 1999, p. 3585-3587.
- Komine P., Ogata N. – « Observation of swelling behaviour of bentonite by new electron microscope ». *ICEG IS-Osaka'96*, International Congress on Environmental Geotechnics 2, Osaka, Japan, Nov. 1996. Rotterdam: Balkema, 1996, p. 563-568.
- Mesbah A., Morel J.C., Olivier M. – « Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents ». *Materials and structures*, London, 1992, vol. 32, 1999, p. 687-694.
- Mitchell J.K. – *Fundamentals of soil behavior*. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1993 (2nd ed.).
- Nakano M., Amemiya Y., Fujii K. – « Saturated and unsaturated hydraulic conductivity of swelling clays ». *Soil science*, vol. 141, n° 1, 1986, p. 1-6.
- Philip J.R. – « Kinetics of sorption and volume change in clay-colloid pastes ». *Australian Journal of Soil Research*, vol. 6, 1968, p. 249-267.
- Philipponnat G. – « Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie ». *Revue française de géotechnique*, n° 57, 1991, p. 5-22.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. – *Numerical Recipes: The Art of the Scientific Computation*. New York: Cambridge University Press, 1986.
- Rolland S. – *Transfert hydrique dans des sols argileux gonflants : influence du confinement*. Thèse de mécanique énergétique, INPL Nancy, 2002.
- Smiles D.E., Rosenthal M.J. – « The movement of water in swelling materials ». *Australian Journal of Soil Research*, vol. 6, 1968, p. 237-248.
- Tabani P. – *Transfert hydrique dans des sols déformables*. Thèse génie civil, hydrosystèmes, géotechnique, INPL Nancy, 1999.
- Vandangeon P. – « Exemples de sinistres en région parisienne ». *Revue française de géotechnique*, n° 58, 1992, p. 7-14.
- Villar M.V., Lloret A. – « Variation of the intrinsic permeability of expansive clays upon saturation ». *Clay science for engineering* Adachi & Fukue (eds), Rotterdam, Balkema, 2001, p. 259-266.
- Yong R.N., Mohamed A.M.O. – « A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays ». *Canadian geotechnical journal*, vol. 29, n° 6, 1992, p. 1060-1070.

