



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Mecanique 331 (2003) 203–210



Comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté sous très fortes succions

Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil under very high succions

Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri *

*Laboratoire environnement géomécanique & ouvrages, École nationale supérieure de géologie,
Institut national polytechnique de Lorraine, rue du Doyen Marcel Roubault, BP 40, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France*

Reçu le 7 mars 2002 ; accepté après révision le 3 février 2003

Présenté par Jean Salençon

Résumé

Cet article présente une étude menée sur un matériau gonflant compacté dans la gamme des succions comprises entre 8,5 et 287,9 MPa. Deux séries d'essais oedométriques à succion contrôlée sont présentées. La première permet la caractérisation de l'évolution de la compressibilité avec la succion. Elle montre que la pression de préconsolidation apparente et la pente de compression plastique sont significativement influencées par la succion. La deuxième série étudie l'influence de sollicitations hydromécaniques complexes sur la compressibilité du matériau qui apparaît très dépendante du chemin hydromécanique. **Pour citer cet article : O. Cuisinier, F. Masrouri, C. R. Mecanique 331 (2003).**

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

This paper presents a study performed on a compacted swelling material in the range of succions comprised between 8.5 and 287.9 MPa. Two series of tests were carried out with succion controlled oedometers. The aim of the first series was to study the compressibility as a function of succion. It showed that the apparent preconsolidation pressure and the plastic compression line are greatly affected by the applied succions. The other series of tests highlighted the influence of complex hydromechanical paths on the compressibility of the studied material that appeared to be greatly influenced by the stress path followed. **To cite this article: O. Cuisinier, F. Masrouri, C. R. Mecanique 331 (2003).**

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Sols ; Sol gonflant ; Succion ; Comportement hydromécanique ; Compressibilité ; Sol compacté ; Sol fin

Keywords: Soils; Swelling soil; Succion; Hydromechanical behaviour; Compressibility; Compacted soil; Fine soil

* Corresponding author.

Adresse e-mail : Farimah.Masrouri@ensg.inpl-nancy.fr (F. Masrouri).

Abridged English version

Because of their very low permeability, compacted swelling soils are used in the construction of engineered barriers in nuclear waste disposal facilities. During their lifetime, these materials undergo wetting or drying cycles, i.e., suction variations. These soils exhibit large volume variations in response to any suction change. However, the relationship between suction changes and compressibility is not well known in swelling soils.

To study this relationship, two independent variables are used: the vertical net stress σ_v^* , defined as the difference between the total vertical stress and the pore air pressure and the suction s , that corresponds to the difference between pore air pressure and pore water pressure [1]. Previous investigations have already identified certain characteristics of the hydromechanical behaviour of swelling soils [2,3].

Among the main suction control techniques, air overpressure [4] and osmotic methods [5] are often used to develop suction control oedometers. However, these techniques are limited to a maximum suction of about 14 MPa [6,7]. Consequently, the knowledge of hydromechanical behaviour is limited to a small suction range whereas the suction of a swelling soil could reach several dozens of MPa. The main aim of the paper is to present a study carried out in the very high suction range with a new suction controlled oedometer using the salt solutions method that allows the imposition of suction up to several dozens MPa [3,6,8].

Moreover, various authors [9,10] have demonstrated the appearance of irreversible deformations when a compacted swelling soil is successively exposed to wetting/drying phases. The second part of the paper describes several tests performed to study the coupling between these phenomena and the mechanical behaviour of the compacted swelling soil.

The basic principle of the saturated salt solutions technique is to introduce a sample inside a hermetic chamber in which the relative humidity is maintained constant by using a saturated salt solution [11,12]. The relative humidity Hr is linked to the suction s , through Kelvin's law (Eq. (1)). In this study, two different devices, having two maximum vertical stresses (1200 and 20000 kPa), were used. These devices were validated with several tests [13].

The studied material was a mixture of silt (40%) and of bentonite (60%) (Table 1). The samples were statically compacted under a vertical pressure of 1000 kPa with a water content of 15%. Under these conditions, the initial unit weight of the samples was close to $12.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$. The initial total suction, measured by the Filter Paper Method [14], was comprised between 20 and 25 MPa.

A microscopic study has shown that the samples initially have a double structure [13]. This is due to the fact that the initial dry density is rather low, the mass water content of the samples is 10% lower than the optimum mass water content of the material.

The swelling potential, defined as the height increase when a sample is fully saturated, and the swelling pressure, i.e., the pressure required to eliminate height variations produced by the wetting, were measured by the free swelling method [15]. They were respectively 17% and 250 kPa.

Fig. 1 shows the stress paths followed in the plan ($\sigma^* - s$). All the tests began at point "A" under a low vertical pressure of about 10 kPa.

This study was carried out using tests WL, L, and DL1 to DL4 (Figs. 1 and 2). They all began with a suction imposition phase, followed by a loading/unloading phase in several stages.

The suction imposition phase has generated a volumetric variation of the samples ($\Delta H/H$ in Table 1). Fig. 2 demonstrates that the mechanical behaviour is highly dependent on the suction applied in the first phase. The apparent preconsolidation pressure $p_0(s)$ reached a constant value above a suction of 38.9 MPa whereas the plastic compression slope decreased with the increase of suction from 8.5 to 287.9 MPa. These parameters were generally supposed to be constant in the range of very high suctions [3,9,16]. This is not obviously the case for the studied swelling material. This could be related to the low density of the tested samples. It would be of interest to complete these test results with other similar tests conducted on samples having a higher initial dry unit weight.

In the tests WDL and DWL a suction cycle under a low vertical stress (10 kPa) is imposed before a loading/unloading phase (Fig. 1). In the test WDL the suction was first decreased to 8.5 MPa and then brought back to its initial value (20.5 MPa). In the test DWL the suction was first increased up to 38.9 MPa and then decreased

down to 20.5 MPa. The suction cycle has induced irreversible swelling deformations in test WDL whereas in test DWL, irreversible shrinkage deformations were induced. In both cases, the difference between the initial and the void ratio at the end of the suction cycle is lower than 1%. The results of the loading/unloading phases are given in Fig. 3 and in Table 1. It can be seen that the path followed affected both the pressure $p_0(s)$ and the slope $\lambda(s)$. The comparison of these results with test *L* shows that after a wetting/drying imposition, the material was softened whereas after a drying/wetting a hardening of the material occurred. This proves the dependence of the slope $\lambda(s)$ on the stress path followed.

A wetting under load test was also performed, this is the LWL test, the E-C part corresponding to wetting under a vertical stress of 800 kPa. The result is compared to test WL in order to study the influence of the stress path followed (Fig. 4).

In the same stress state, $s = 8.5$ MPa and $\sigma^* = 800$ kPa, the deformations recorded were significantly higher in test WL than in test LWL, whereas for non-swelling soils the deformations do not depend on the stress path when the suction is decreased [16].

A study of the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil was carried out in the range of suctions between 8.5 and 287.9 MPa. The results highlighted the extreme sensitivity of the hydromechanical properties of a compacted swelling soil to any variation in suction. The apparent preconsolidation pressure is constant above a suction of 38.9 MPa whereas the slope $\lambda(s)$ decreased on the whole suction range. These results completed data already obtained in the low suction range. The consequences of a wetting/drying cycle on the hydromechanical behaviour were also studied. Both the preconsolidation pressure and the slope of the virgin compression line are highly dependent on the stress path.

1. Introduction

Les sols gonflants compactés, en raison de leur très faible perméabilité, sont utilisés pour la construction de bassins de rétention ainsi que de barrières ouvragées dans les sites de stockage de déchets nucléaires. Après leur mise en place, ces matériaux sont soumis à des sollicitations complexes qui peuvent influencer de manière très importante leurs propriétés hydromécaniques. La compréhension des phénomènes de couplage hydromécanique est donc un enjeu majeur compte tenu des applications sensibles auxquelles sont destinés ces matériaux.

Pour étudier les phénomènes en jeu, l'utilisation de deux variables indépendantes, définies à partir de la contrainte totale σ , de la pression de l'air u_a , et de la pression de l'eau u_w , a été proposée [1]. Il s'agit de la contrainte nette $\sigma^* = \sigma - u_a$ et de la succion $s = u_a - u_w$. De multiples études portant sur des sols gonflants ont permis d'identifier certains traits caractéristiques du comportement hydromécanique des sols gonflants comme par exemple la diminution de la pente de compression plastique $\lambda(s)$ et l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente $p_0(s)$ lorsque la succion augmente [2,3]. Cependant, de nombreuses questions, concernant notamment la compressibilité dans le domaine des succions supérieures à plusieurs MPa ainsi que l'importance du chemin de contrainte, restent en suspens.

L'étude des différents paramètres hydromécaniques ainsi que la caractérisation des couplages hydromécaniques nécessitent la réalisation d'essais permettant de maîtriser les sollicitations hydriques, c'est à dire les variations de succion. Les techniques expérimentales utilisées le plus souvent dans des œdomètres à succion contrôlée, surpression d'air [4] et technique osmotique [5], autorisent uniquement l'imposition de succions comprises entre 0 et quelques MPa, et cela malgré quelques évolutions récentes [6,7]. Or, la succion d'un sol gonflant peut atteindre plusieurs centaines de MPa, l'accès à ce domaine de succion étant réservé aux appareils œdométriques à succion contrôlée par la méthode des solutions salines [3,6,8]. Dans ce contexte, un nouvel appareil œdométrique utilisant cette dernière technique a été développé. Le premier objectif de cet article est d'étudier les modifications du comportement mécanique d'un sol gonflant compacté dans la gamme des fortes succions.

Par ailleurs, différents auteurs ont mis en évidence l'apparition de déformations irréversibles lors de cycles d'humidification/drainage [9,10], une augmentation de succion correspondant à une dessiccation et une réduction

de succion à une humidification. Mais le couplage entre ces sollicitations hydriques complexes et le comportement mécanique n'a été que peu étudié. La deuxième partie de l'article présente les résultats de plusieurs essais permettant une meilleure compréhension de tels couplages hydromécaniques.

2. Œdomètre à succion imposée par solutions salines saturées

Le principe de ce type d'œdomètre est d'enfermer un système équivalent à une cellule œdométrique classique dans une enceinte dont l'humidité relative est maintenue constante grâce à une solution saline saturée [11]. L'humidité relative Hr est reliée à la succion s , par la loi de Kelvin (Éq. (1))

$$s = \frac{RT}{Mg\gamma_w} \ln(Hr) \quad (1)$$

avec γ_w le poids volumique de l'eau ($9,81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$), g l'accélération de la pesanteur, M la masse molaire de l'eau ($18,10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) et R la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et T la température absolue (K). L'utilisation de plusieurs solutions salines saturées permet d'imposer différentes succions. Deux nouveaux appareils, avec deux capacités d'application de pression verticale maximale différentes (1200 ou 20 000 kPa), ont été développés et utilisés pour cette étude.

Le chargement mécanique est appliqué par palier, 1 à 4 jours étant nécessaires pour atteindre l'équilibre des déformations dans l'éprouvette. En revanche, lors de l'imposition de la succion, la stabilisation des déformations n'est atteinte qu'au bout de 3 semaines environ. En conséquence, avec plusieurs paliers de chargement, un essai peut durer plusieurs mois.

Des précautions spéciales ont été prises pour éviter les variations de température, maintenue à $20 \pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ durant chaque essai. En effet, ces variations influencent directement la succion imposée (Éq. (1)) et l'humidité relative imposée par une solution saline fluctue fortement avec la température [12]. De plus, l'incertitude sur l'humidité relative imposée par une solution saline donnée est comprise entre 1 et 2%, ce qui entraîne une incertitude relative sur la succion supérieure à 15% lorsque la succion imposée est en dessous de 8,5 MPa. L'utilisation de cette méthode est donc recommandée pour des succions supérieures à 8,5 MPa [7,11]. Quelques essais ont servi à valider le fonctionnement de ces dispositifs ainsi que la répétabilité des résultats obtenus [13].

3. Matériau étudié et préparation des éprouvettes

Le matériau étudié est un mélange de 40% d'un limon et de 60% de bentonite, la limite de liquidité du mélange w_L étant de 87% et son indice de plasticité I_p de 21%.

Les éprouvettes, de diamètre 7,4 cm ou 5 cm suivant l'appareil, et de hauteur initiale 1 cm, sont préparées par compactage statique sous une contrainte de 1000 kPa avec une teneur en eau initiale de 15%, cette valeur étant proche de la limite de retrait du matériau ce qui permet de réduire la rétraction de l'éprouvette lors d'une dessiccation. Le poids volumique initial est de $12,7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ et la succion totale initiale, mesurée par la technique du papier filtre [14], est comprise entre 20 et 25 MPa.

Une étude microstructurale a permis de montrer que les éprouvettes avaient une structure interne du type double structure [13]. La présence de cette structure est liée à la densité initiale des éprouvettes plutôt faible, le compactage ayant été réalisé à une teneur en eau massique de 10% inférieure à la teneur en eau de l'optimum de compactage.

La méthode du gonflement libre [15] a été utilisée pour déterminer le potentiel de gonflement, le rapport entre la variation de hauteur de l'éprouvette produite par l'humidification sur sa hauteur initiale, et la pression de gonflement, pression nécessaire pour éliminer cette variation de hauteur. Ces grandeurs sont respectivement de 17% et de 250 kPa.

4. Comportement sous très hautes suctions

La Fig. 1 permet de visualiser précisément les chemins de contrainte de tous les essais suivis dans le plan ($\sigma^* - s$). L'état initial est repéré par le point « A ».

4.1. Étude des propriétés hydromécaniques

Dans cette première partie de l'étude, chaque éprouvette a été soumise à une succion différente comprise entre 8,5 et 287,9 MPa sous une faible contrainte verticale constante (10 kPa). Cette phase des essais provoque une variation de hauteur de chaque éprouvette (notée $\Delta H/H$ dans le Tableau 1). Ensuite un chargement/déchargement oedométrique à succion constante est appliqué. Il s'agit des essais WL, L, DL1 à DL4 (Figs. 1 et 2 et Tableau 1).

La Fig. 2 montre que la pente de compression plastique $\lambda(s)$ ainsi que la pression de préconsolidation apparente $p_0(s)$ dépendent fortement de la succion appliquée. Ainsi, il apparaît que la pression $p_0(s)$ décroît de 1200 (essai DL4) à 470 kPa (essai WL) quand la succion diminue de 287,9 à 8,5 MPa, alors que la pente $\lambda(s)$ augmente

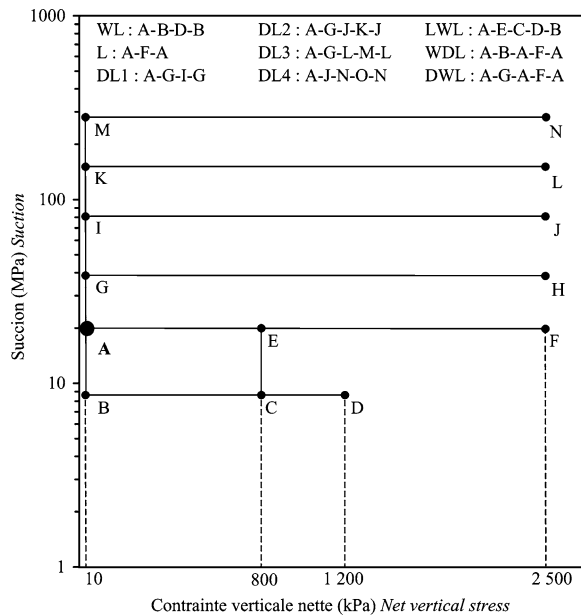


Fig. 1. Chemins de contrainte suivis. W : humidification ; D : dessiccation ; L : chargement/déchargement.

Fig. 1. Stress paths followed. W: wetting; D: drying; L: loading/unloading.

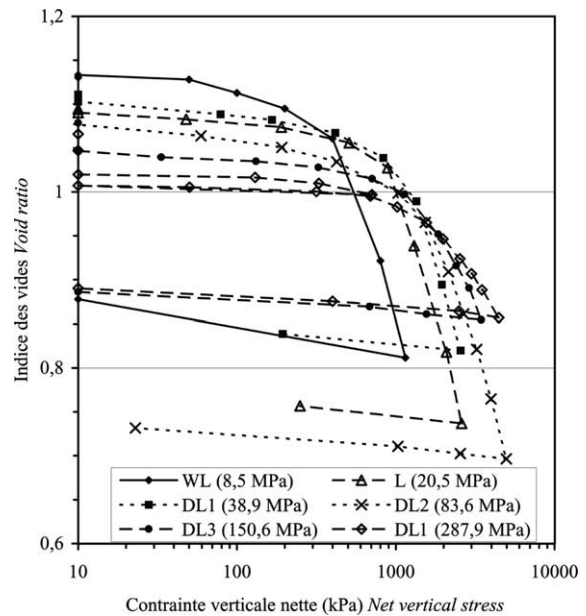


Fig. 2. Compressibilité en fonction de la succion appliquée avant le chargement.

Fig. 2. Compressibility as a function of the suction applied before loading.

Tableau 1
Paramètres hydromécaniques des éprouvettes testées

N° essai	WL	L	DL1	DL2	DL3	DL4	LWL	WDL	DWL
$\Delta H/H$ (%)	0,5	0	-0,4	-1,7	-2,1	-3,1	-	-	-
$p_0(s)$ (kPa)	450	1000	1150	1200	1200	1200	-	850	950
$\lambda(s)$	0,31	0,27	0,26	0,24	0,14	0,09	0,30	0,29	0,19

0,09 à 0,31. Il est intéressant de remarquer que la valeur de la pression $p_0(s)$ se stabilise au-dessus d'une succion appliquée de 38,9 MPa au contraire de la valeur de la pente $\lambda(s)$ qui diminue d'une manière significative jusqu'à la succion maximale appliquée.

Dans la bibliographie, la pente $\lambda(s)$ et la pression $p_0(s)$ sont supposées constantes dans le domaine des très fortes succions [9,10]. Les résultats d'essais présentés dans cette partie sont en contradiction avec ce point, le comportement mis en évidence par ces essais pourrait être une conséquence du poids volumique sec initial des éprouvettes plutôt faible. Des essais supplémentaires avec des éprouvettes plus denses sont nécessaires pour confirmer ce point.

4.2. Caractérisation des couplages hydromécaniques

Le but de cette deuxième partie est d'étudier l'influence de la sollicitation hydrique sur le comportement mécanique. Des essais comprenant un cycle hydrique, augmentation ou diminution de succion suivi d'un retour à la succion initiale, et un essai d'humidification sous contrainte ont été réalisés dans ce cadre.

4.2.1. Influence d'un cycle d'humidification/drainage sur le comportement mécanique

Deux essais œdométriques comportant un cycle hydrique, sous une contrainte verticale de 10 kPa, ont été entrepris. Il s'agit des essais WDL et DWL. Les conditions initiales sont identiques dans les deux essais.

Le cycle hydrique d'humidification/dessiccation a provoqué l'apparition de déformations irréversibles de type gonflement dans le cas de l'essai WDL. Dans le cas de l'essai DWL, un cycle hydrique de dessiccation/humidification a été réalisé, ce qui a induit des déformations irréversibles de type retrait. Dans les deux cas, ces déformations irréversibles sont de l'ordre de 1% de l'indice des vides initial.

La Fig. 3 met en évidence l'influence du cycle hydrique sur le comportement lors du chargement œdométrique. Ces essais font apparaître que la pente $\lambda(s)$ est réduite de manière importante par un cycle hydrique débutant par une dessiccation (Tableau 1). La comparaison des pentes $\lambda(s)$ déterminées dans ces deux essais avec celle

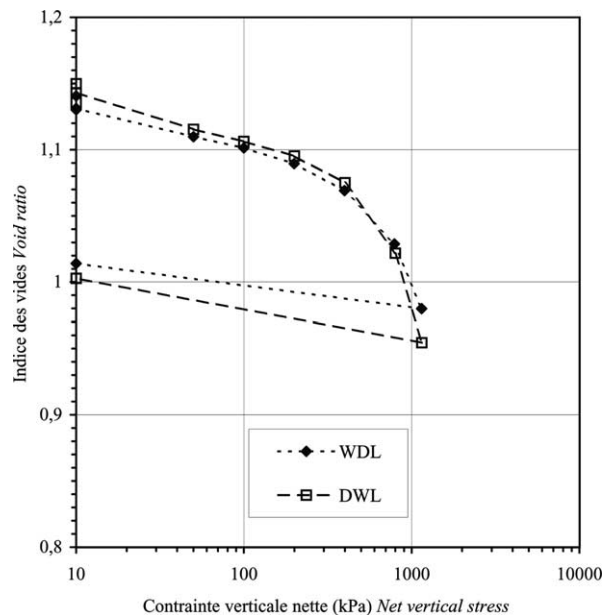


Fig. 3. Compressibilité du matériau après un cycle hydrique.

Fig. 3. Material compressibility after suction cycle.

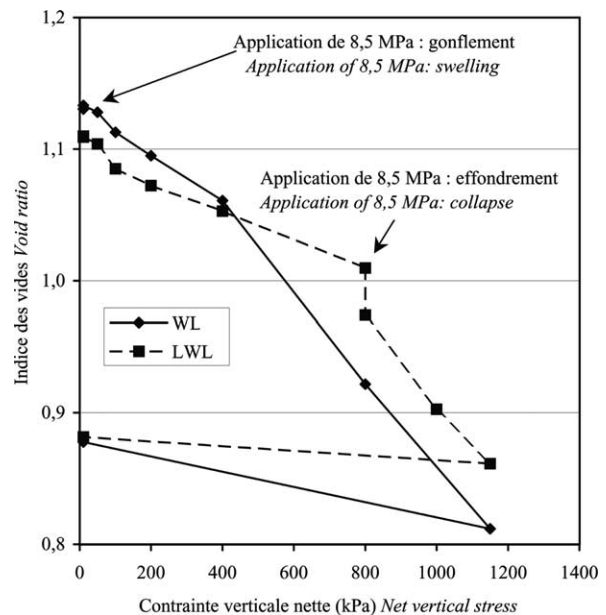


Fig. 4. Influence de la contrainte sur le résultat d'un essai.

Fig. 4. Influence of the stress path on the test result.

obtenue lors de l'essai L permet d'évaluer l'influence des cycles hydriques conduits. Ainsi, si une dessiccation est appliquée en premier, une rigidification du matériau est observée alors qu'une humidification tend à provoquer un léger ramollissement du sol. Ce résultat prouve la dépendance de la pente $\lambda(s)$ vis-à-vis du chemin de contrainte hydrique.

4.2.2. Essai d'humidification sous contrainte

Cet essai est LWL (Fig. 1), la partie E-C du chemin correspondant à l'humidification sous charge verticale de 800 kPa. Les résultats sont reportés dans le Tableau 1 et sur la Fig. 4 où ils sont comparés à l'essai WL où la même sollicitation hydrique a été imposée mais sous une contrainte verticale de 10 kPa.

Un effondrement est observé lorsque l'humidification se fait sous 800 kPa (essai LWL) alors qu'une tendance au gonflement est obtenue lorsque l'humidification est réalisée sous une contrainte de 10 kPa (essai WL). Cette comparaison montre que pour le même état de contrainte, $s = 8,5$ MPa et $\sigma^* = 0,8$ MPa (point C Fig. 1), les déformations enregistrées sont dépendantes du chemin de contrainte car plus importantes dans l'essai WL que dans l'essai LWL. Ce résultat marque la particularité du comportement hydromécanique des sols gonflants par rapport aux sols non gonflants. En effet, dans le cas de sols non gonflants les déformations sont indépendantes du chemin de contrainte suivi lors d'une humidification [15,16].

5. Conclusion

Une étude du comportement hydromécanique d'un matériau gonflant compacté a été réalisée dans le domaine des succions comprises entre 8,5 et 287,9 MPa. Les résultats obtenus montrent que la compressibilité d'un matériau gonflant varie fortement dans cette gamme de succion. Ces résultats ont permis de montrer que la pression $p_0(s)$ se stabilise à une valeur de 1200 kPa pour des valeurs de succion de 38,5 MPa et plus alors que la pente $\lambda(s)$ varie d'une manière importante en fonction de la succion appliquée.

Les conséquences de sollicitations hydriques complexes sur le comportement hydromécanique d'un matériau gonflant ont aussi été étudiées. Il apparaît que la pression $p_0(s)$ ainsi que la pente $\lambda(s)$ sont reliées directement au chemin de contrainte. De même, un cycle hydrique influence de manière significative la valeur de la pente $\lambda(s)$, ce qui marque la particularité des matériaux gonflants par rapport aux matériaux non gonflants.

L'ensemble de cette étude démontre l'extrême sensibilité des propriétés hydromécaniques des sols gonflants à toute variation de succion. Il serait intéressant de poursuivre ces recherches sur le même matériau compacté à une densité différente et/ou avec une structure interne différente pour affiner ces résultats.

Références

- [1] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, *Soils Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York, 1993.
- [2] H. Skandaji, *Déformabilité des sols argileux non-saturés : étude expérimentale et modélisation*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine Nancy, France, 1996.
- [3] F. Bernier, G. Volckaert, E.E. Alonso, M.V.M. Villar, Suction-controlled experiments on Boom Clay, *Engrg. Geology* 47 (1997) 325–338.
- [4] L.A. Richards, Capillary conduction of liquids through porous medium, *Physics* 1 (1935) 318–333.
- [5] G. Kassif, A. Ben Shalom, Experimental relationship between swell pressure and suction, *Géotechnique* 21 (1971) 245–255.
- [6] M.V. Villar, P.L. Martín, Suction-controlled oedometer tests in montmorillonite clay: preliminary results, *Engrg. Geology of Waste Disposal* 11 (1996) 309–312.
- [7] P. Delage, M.D. Howat, Y.J. Cui, The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay, *Engrg. Geology* 50 (1998) 31–48.
- [8] C. Oteo Mazo, J. Saez Auñon, F. Esteban, Laboratory tests and equipment with suction control, in: Alonso, Delage (Eds.), *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 3, Paris, 1995, pp. 1509–1515.
- [9] E.E. Alonso, J. Vaunat, A. Gens, Modelling the hydromechanical behaviour of expansive clays, *Engrg. Geology* 54 (1999) 173–183.
- [10] E.E. Alonso, E. Romero, C. Hoffmann, E. García-Escudero, Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting, in: 6th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, 2001, pp. 513–542.

- [11] O. Cuisinier, F. Masrouri, Study of the hydromechanical behaviour of a swelling soil under high suctions, in: 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Recife, Brazil, 2002, pp. 587–591.
- [12] AFNOR NF X 15-119, Mesure de l'humidité de l'air, 1999, 22 p.
- [13] O. Cuisinier, Comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté dans une gamme étendue de succion, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- [14] ASTM D 5298-94, Measurement of soil potential (suction) using filter paper, 4.09 (1995) 154–159.
- [15] ASTM D 4546-90, One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, 4.08 (1995) 693–699.
- [16] E.E. Alonso, A. Gens, A. Josa, A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique* 40 (1990) 405–430.