Comportement hydromécanique des sols gonflants soumis aux cycles hydriques

**H. NOWAMOOZ,
F. MASROURI**

Laboratoire Environnement
Géomécanique et Ouvrages
ENSG-INPL
Rue du Doyen Marcel-Roubault
BP 40
54501 Vandœuvre-lès-
Nancy Cedex
Farimah.Masrouri@ensg.
inpl-nancy.fr
Hossein.Nowamooz@ensg.
inpl-nancy.fr

Résumé

Cet article rapporte les résultats d'études expérimentales effectuées à l'œdomètre avec imposition de succion par la méthode osmotique sur des matériaux gonflants compactés et naturels. Plusieurs cycles de séchage/humidification ont été appliqués sur deux matériaux sous trois faibles charges mécaniques constantes. Pendant ces cycles, les éprouvettes manifestent un retrait ou un gonflement cumulé. Les résultats montrent que dans les deux cas, les déformations volumiques convergent vers un état d'équilibre où le sol présente un comportement réversible. L'ensemble de ces résultats a été analysé dans le cadre du modèle élastoplastique (BExM) proposé par Alonso et al. (1999) qui prend en compte l'accumulation des déformations lors de l'application de différents chemins de chargement.

Mots-clés : sols gonflants, gonflement, retrait, essai cyclique, œdomètre osmotique.

Hydromechanical behaviour of the swelling soils under suction cycles

Abstract

This article presents an experimental study performed on two different expansive soils (molded and natural) using oedometer tests by imposing suction variations with the osmotic technique. Several successive swelling and shrinkage cycles were applied under different values of constant vertical net stress. During the suction cycles, the cumulative swelling or shrinkage strains were observed. On the other hand, the natural samples presented cumulative swelling strains. At the end of the suction cycles, the volumetric strains reached an equilibrium stage which indicates an elastic behavior of the samples. Test results were analyzed within the framework of the elastoplastic model (BExM) proposed by Alonso et al. (1999) which takes into account the accumulation of strains for the different applied stress paths.

Keywords: Expansive soils, swelling, shrinkage, cyclic test, osmotic oedometer.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

L'objectif de ce travail est de compléter les connaissances expérimentales sur le comportement hydromécanique des sols gonflants rencontrés dans les travaux de génie civil, de géotechnique et de géotechnique de l'environnement afin de mieux en tenir compte dans les modèles de calcul. De nombreux travaux ont montré l'intérêt de réaliser des essais œdométriques pour caractériser le potentiel et la cinétique de gonflement des sols. Ils ont révélé également l'influence de l'humidification ou du séchage sur le gonflement ou le retrait, avec des pertes ou des augmentations de rigidité des éprouvettes.

Les sols gonflants sont constitués des particules argileuses du type smectite, en général ces particules s'associent aux autres constituants du sol pour former des agrégats. Deux niveaux structuraux ont alors été observés par Pusch (1982), Gens et Alonso (1992) : la microstructure qui correspond aux agrégats, et la macrostructure qui correspond à l'arrangement des agrégats entre eux (Fig. 1). La même double structure a été identifiée pour certaines argiles compactées utilisées dans les barrières ouvragées de déchets nucléaires par Atabek *et al.* (1991) sur l'argile de FoCa, Romero *et al.* (1999) sur l'argile de Boom et Cui *et al.* (2002) sur un mélange d'argile et de sable.

FIG. 1 Deux niveaux structuraux des particules argileuses (Gens et Alonso, 1992).
Two structural levels of the clayey particles (Gens & Alonso, 1992).

Des cycles d'humidification/séchage effectués sur des éprouvettes au laboratoire montrent qu'après quelques cycles hydriques d'une part, un état d'équilibre où le comportement du matériau est élastique et réversible peut être atteint, et d'autre part, que des déformations volumiques de retrait cumulé ou de gonflement cumulé sont obtenues. Day (1994), Subba Rao *et al.* (2000) et Tripathy *et al.* (2002) ont réalisé des essais cycliques sur un sol gonflant compacté. Leurs essais montrent que l'état réversible est atteint au bout de quatre ou cinq cycles d'humidification et de séchage. Les expériences effectuées par Dif et Bluemel (1991), Al-Homoud *et al.* (1995) et Alonso *et al.* (2005) montrent que les variations de volume des sols gonflants présentent des retraits cumulés pendant les cycles hydriques. Ce comportement a été expliqué par le réarrangement continu des particules du sol qui engendre une microstructure moins active. En revanche, Chu et Mou (1973) et Pousada (1984) observent un effet contraire dont un gonflement cumulé pendant un nombre de cycles successifs.

Une campagne d'essais œdométriques à succion contrôlée de longue durée a permis de recueillir en continu des mesures de déformation de deux types de sol, compacté et naturel, pendant plusieurs phases d'imbibition et de dessiccation afin d'étudier en particulier le phénomène d'accumulation de retrait ou de gonflement et son influence sur les paramètres mécaniques de ces matériaux. Ces résultats ont été analysés

dans le cadre du modèle élastoplastique (BExM) proposé par Alonso *et al.* (1999) qui prend en compte cette accumulation des déformations lors de l'application de différents chemins de chargement hydrique.

2

Technique expérimentale

Les études expérimentales des cycles d'humidification/séchage sur les matériaux gonflants étudiés ont été menées dans des œdomètres osmotiques proposés par Kassif et Ben Shalom (1971) et modifiés par Delage *et al.* (1992) (Fig. 2). La méthode osmotique est basée sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable et d'une solution aqueuse de molécules organiques de Polyéthylène Glycol (PEG) avec une masse molaire de 6 000 ce qui permet d'imposer une succion maximale de 8,5 MPa (Delage *et al.*, 1998 ; et Cuisinier & Masrouji, 2005).

3

Influence des cycles hydriques

Dans le cadre de cette étude, un sol compacté au laboratoire quasi sec et proche de sa limite de retrait, et un sol naturel saturé provenant du site du Deffend

FIG. 2 Schéma de principe du dispositif œdométrique osmotique.
Schematic of the oedometer device using osmotic solutions.

ont été retenus. L'influence de cycles hydriques sur le comportement de ces deux différents types de sol argileux a été étudiée sous trois contraintes mécaniques constantes. Ces contraintes sont inférieures à la pression de préconsolidation de chaque matériau, de sorte que la plastification des éprouvettes sous chargement mécanique ne soit pas atteinte.

3.1

Sol compacté

Le matériau étudié est un mélange de 60 % d'une bentonite calcique et de 40 % du limon de Xeuilley. Les différentes caractéristiques géotechniques du mélange sont données dans le tableau I. Le limon et la bentonite, initialement sous forme de poudres tamisées à 400 µm, sont mélangés puis humidifiés à une teneur en eau massique de 15 %. Cette valeur est proche de la limite de retrait du mélange. Le mélange humide a ensuite été conservé 7 jours dans un récipient hermétique. Après cette période, les éprouvettes ont été préparées par compactage statique à une vitesse de 1,14 mm·min⁻¹ sous une contrainte verticale de 1 000 kPa directement dans l'œdomètre utilisé. La masse volumique initiale étant de 1,27 ± 0,01 Mg m⁻³, le degré de saturation initial est ainsi proche de 35 %. La masse volumique sèche initiale relativement basse permet d'obtenir un matériau compacté présentant initialement une double structure marquée : les éprouvettes comprennent des agrégats entre lesquels existent des macropores. Un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé pour évaluer la distribution de la dimension de pores du mélange compacté (Delage et Lefebvre 1984, Romero *et al.* 1999). La figure 3 présente le volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores. Cette distribution de pores manifeste deux niveaux structuraux distincts qui est la caractéristique fondamentale de ce type de matériau : micro et macros-

structure (Alonso *et al.*, 1987). Le diamètre de pores qui sépare la micro- et la macrostructure est égal à 0,15 µm, d'après la loi de Jurin-Laplace ce diamètre correspond à une succion d'environ 2 MPa. Le sol présente une macrostructure dominante avec la valeur maximale de diamètre de 7,5 µm. Le diamètre dominant correspondant à la microstructure est de 0,011 µm.

La hauteur initiale des éprouvettes est de 10 ± 0,5 mm et leur diamètre de 70 mm. La succion totale initiale mesurée par la technique de papier filtre est comprise entre 20 et 25 MPa (ASTM 1995a). La méthode du gonflement libre a été utilisée pour déterminer le potentiel de gonflement, le rapport entre la variation de hauteur de l'éprouvette produite par la saturation sur sa hauteur initiale, et la pression de gonflement, pression nécessaire pour éliminer cette variation de hauteur (ASTM, 1995b). Ces grandeurs sont respectivement de 15 % et de 220 kPa.

TABLEAU I Caractéristiques géotechniques du mélange compacté.
Properties of the compacted soil.

Matériau	Mélange
Limite de liquidité (%)	87
Indice de plasticité (%)	22
Densité des grains solides	2,69

Les chemins de contrainte suivis de trois essais effectués (O1, O2 et O3) sont indiqués sur la figure 4 et dans le tableau II. L'état initial est représenté par le point A qui correspond à l'état des éprouvettes après compactage une fois insérées dans l'œdomètre. La pression verticale appliquée est de l'ordre de 10 kPa. Le point B représente la succion de 8 MPa à la même pression verticale initiale pour les trois éprouvettes. A partir du point B, trois charges différentes ont été appliquées aux trois éprouvettes : 15 kPa (point C) pour essai O1, 30 kPa (point D) pour essai O2 et 60 kPa (point E) pour

FIG. 3 Volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores pour le matériau compacté, essai de porosimétrie au mercure.
Distribution of incremental pore volume for the compacted soil, mercury intrusion porosimeter test.

essai O3. Ces trois points sont les points de départ des cycles de succions appliquées. Par la suite, trois cycles successifs d'humidification ($s = 0$ MPa) et de dessiccation ($s = 8$ MPa) ont été appliqués (tableau II). Le choix de cet intervalle de succion est fait en fonction de la valeur de succion de 2 MPa qui correspond au rayon des pores délimitant la micro- et la macrostructure. De cette manière, les cycles de succion appliqués

influencent ces deux niveaux structuraux. Pour des commodités de représentation, les données obtenues avec une succion nulle seront reportées à une succion de 0,01 MPa. La faible perméabilité du matériau argileux étudié nécessite une période longue pour atteindre l'état équilibre avec l'imposition de succion par la méthode osmotique. La réalisation complète de chaque essai a duré deux mois.

TABLÉAU II Description des chemins suivis pour le sol compacté.
Description of the followed stress paths for the molded soil.

O1	O2	O3
A-B-C ₁ -F ₁ -C ₂ -F ₂ -C ₃ -F ₃ -C ₄	A-B-D ₁ -G ₁ -D ₂ -G ₂ -D ₃ -G ₃ -D ₄	A-B-E ₁ -H ₁ -E ₂ -H ₂ -E ₃ -H ₃ -E ₄

FIG. 4 Chemins de contrainte dans le plan $(\sigma'_v - \log s)$ pour le sol compacté.
Description of $(\sigma'_v - \log s)$ plan for the molded soil.

Les déformations volumiques des trois essais effectués sont présentées sur les figures 5a à 5c où les déformations dues au retrait sont considérées négativement. Le premier cycle d'humidification (A-B) produit un gonflement pour chacune des trois éprouvettes. En revanche, les éprouvettes manifestent un retrait cumulé lors des cycles successifs suivants. Enfin, les

déformations volumiques convergent vers un état d'équilibre, autrement dit, le sol présente un comportement totalement réversible. Cette convergence est complètement atteinte pour les deux premières éprouvettes (O1 et O2). Toutefois, pour l'essai O3, un ou deux cycles supplémentaires auraient été nécessaires pour atteindre cet état élastique.

FIG. 5 Déformations volumiques des éprouvettes soumises à des cycles de suction sous différentes contraintes verticales a) 15 kPa, b) 30 kPa et c) 60 kPa pour le sol compacté.
 Volumetric deformations in cyclic controlled-suction paths under the vertical stresses a) 15 kPa, b) 30 kPa and c) 60 kPa for the molded soil.

Pour observer le comportement réversible du sol, les déformations volumiques de gonflement ou de retrait dues à chaque cycle de succion ont été présentées en fonction du nombre de cycle sur la figure 6 pour l'essai O2. Quand le nombre de cycle augmente, la différence entre le retrait et le gonflement volumique de deux cycles de succion consécutifs d'humidification/séchage tend vers zéro, et un état stable élastique du matériau est atteint au dernier cycle de succion appliquée.

FIG. 6 Évolutions de retrait/gonflement sous des cycles de suctions ($\sigma_v = 30$ kPa) pour le sol compacté.
Evolution of swelling and shrinkage with the number of suction cycles ($\sigma_v = 30$ kPa) for the molded soil.

3.2

Sol du site du Deffend

Le site étudié se trouve sur la commune de Mignauloux-Beauvoir (Vienne), au lieu-dit du Deffend, à envi-

ron 4 km au sud-est de Poitiers. Un carottage de 7 m à cet endroit a fait l'objet d'une étude géologique et géotechnique dans le cadre du projet ANR ARGIC (Vincent *et al.*, 2006). Le sol fortement argileux se trouve entre 6,10 m et 6,40 m de profondeur. La densité sèche du sol varie entre 1,15 et 1,25 et sa teneur en eau massive initiale est entre 41 et 45 %. La succion totale initiale a été mesurée par la technique du papier filtre (ASTM 1995a), elle est comprise entre 400 et 700 kPa pour ces profondeurs. Les différentes caractéristiques géotechniques de ces matériaux sont présentées dans le tableau III. La mesure du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement à la profondeur de 6,25 m a été réalisée en utilisant la méthode de gonflement libre (ASTM, 1995b). L'éprouvette présente une masse volumique sèche initiale de 1,20 Mg/m³ et une teneur en eau initiale de 41 % environ. Le potentiel de gonflement et la pression de gonflement sont respectivement de 7 % et de 225 kPa.

Un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé pour approcher la distribution de la dimension de pores du matériau naturel avec une densité sèche de 1,15 (Fig. 7). La limite entre la micro- et la macrostructure est de 0,65 μ m, elle correspond à une succion d'environ 0,5 MPa. La microstructure a un diamètre de 0,015 μ m et le diamètre correspondant aux pores macroscopiques est de 60 μ m.

TAB. III Caractéristiques géotechniques du matériau étudié du site du Deffend.

Properties of the natural soil in the experimental site of Le Deffend.

Limite de liquidité (%)	85,6
Indice de plasticité (%)	31,9
Densité des grains solides	2,60
Pourcentage de passant au tamis de 80 μ m	99 %
Fraction argileuse (<0,002 mm)	72 %

FIG. 7 Volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores pour le sol naturel du Deffend, essai de porosimétrie au mercure.
Distribution of incremental pore volume for the natural soil of Le Deffend, mercury intrusion porosimeter test.

Les essais œdométriques (D1, D2 et D3) ont été conduits sur ce sol à la profondeur entre 6,25 m et 6,35 m. L'état initial du sol est représenté par le point A sur la figure 8 pour les trois essais. Ce point correspond à une masse volumique sèche initiale de 1,22 Mg/m³ et à une teneur en eau initiale de 43 % environ. La hauteur initiale des éprouvettes est de 11,6 mm et leur diamètre est de 70 mm. La succion initiale du sol est 0,5 MPa. La pression verticale initiale appliquée est de l'ordre de 10 kPa. Trois différentes charges ont été appliquées

aux trois éprouvettes : 20 kPa (point B) pour l'essai D1, 40 kPa (point C) pour l'essai D2 et 60 kPa (point D) pour l'essai D3. Puis, trois cycles successifs d'humidification ($s = 0$) et de dessiccation ($s = 2$ MPa) ont été appliqués, ces cycles influencent aussi bien la micro que la macrostructure de ce sol. Les chemins de contrainte suivis de trois essais (D1, D2 et D3) sont indiqués sur la figure 8 et dans le tableau IV. Ces essais (D1, D2 et D3) avec l'imposition de succion par la méthode osmotique ont duré dix semaines.

TAB. 4 Description des chemins suivis pour le sol naturel du site du Deffend.
Description of the followed stress paths for the natural soil of Le Deffend.

D1	D2	D3
A-B-E-H ₁ -E ₁ -H ₂ -E ₂ -H ₃ -E ₃	A-C-F-I ₁ -F ₁ -I ₂ -F ₂ -I ₃	A-D-G-J ₁ -G ₁ -J ₂ -G ₂ -J ₃ -G ₃ -J ₄

FIG. 8 Chemins de contrainte dans le plan ($\sigma'_v - \log s$) pour le sol naturel du site du Deffend.
Description of ($\sigma'_v - \log s$) plan for the natural soil of Le Deffend.

Les déformations volumiques des trois éprouvettes sont présentées sur les figures 9a à 9c où les déformations dues au retrait sont considérées négativement. Contrairement à ce qui a été observé pour le sol compacté, les éprouvettes manifestent un gonflement cumulé lors des cycles successifs et les déformations volumiques convergent vers un état d'équilibre. Un comportement totalement réversible est atteint pour l'essai D3, alors qu'un ou deux cycles supplémentaires auraient été nécessaires pour les essais D1 et D2 afin d'atteindre complètement cet état élastique.

4 QUELQUES TRAITS DU MODÈLE BExM

Différents modèles élastoplastiques ont été développés pour décrire le comportement des sols non saturés (Alonso et al., 1987 ; Karube et Kato, 1989 ; Kohgo et al., 1991 ; Gallipoli et al., 2003 ; Wheeler et al., 2003...). Alonso et al. (1987, 1990) ont proposé un modèle élastoplastique pour les sols non saturés non gonflants BBM (*Barcelona Basic Model*). Ce modèle est une extension du modèle de Cam-Clay modifié (Roscoe et Burland, 1968) dans le domaine des sols non saturés, il a été révisé pour les sols gonflants sous l'appellation BExM (*Barcelona Expansive Model*) (Gens et Alonso, 1992 ; Alonso et al., 1999).

Ce modèle considère deux niveaux structuraux dans le milieu : micro- et macrostructure. La microstructure est supposée saturée et ses déformations sont engendrées par les variations de contrainte effective. Cette hypothèse permet de construire dans le plan ($p_0 - s$) une ligne NL (*Neutral Line*) d'équation $p_0 + s = \text{const.}$ qui représente les états pour lesquels il n'y a aucune déformation microstructurale (Fig. 10). Cette ligne est orientée à 45° par rapport à l'axe de la succion, elle sépare pour la microstructure, la zone de gonflement de la zone de retrait.

L'ensemble des surfaces de charge de ce modèle est représenté sur la figure 10. En première approximation, deux surfaces SI (*Suction Increase*) le seuil d'un retrait irréversible et SD (*Suction Decrease*) le seuil d'un gonflement irréversible sont prises parallèles à la NL. La courbe LC permet de décrire l'augmentation de la pression moyenne nette de préconsolidation (p_0) en fonction de la succion appliquée :

$$\frac{p_0}{p_c} = \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\lambda(s)}{\lambda(0)}} \text{ avec } \lambda(s) = \lambda(0)[r + (1-r)\exp(-\beta s)] \quad (1)$$

où p_0^* est la pression moyenne nette de préconsolidation sous une succion nulle, p_c est une pression de référence, κ est le coefficient de compressibilité élastique, $\lambda(s)$ est la pente de compression vierge à succion constante, $\lambda(0)$ est la pente de compression vierge à succion nulle, r est un paramètre lié à la rigidité du sol et β un paramètre contrôlant le taux d'augmentation de la rigidité avec la succion.

FIG. 9 Déformations volumiques des éprouvettes soumises à des cycles de succion sous différentes contraintes : a) 20 kPa, b) 40 kPa et c) 60 kPa pour le sol naturel du Deffend. Volumetric deformations in cyclic controlled-suction paths under the vertical stresses: a) 20 kPa, b) 40 kPa and c) 60 kPa for the natural soil of Le Deffend.

Déformations élastiques : dans ce modèle, les déformations élastiques engendrées par les cycles de succion sont issues seulement de la microstructure, i.e. les déformations macrostructurales élastiques induites par ces cycles ont été considérées comme étant négligeables. Les déformations élastiques volumiques (microstructurales) induites par la variation de succion de la valeur initiale s_i à la valeur finale s_f sont déterminées à partir de l'équation suivante :

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa_m}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p + s_f}{p + s_i} \right) \quad (2)$$

où (κ_m) est l'indice de compressibilité élastique de la microstructure et e_0 est l'indice des vides initial du sol. L'indice (κ_m) est la pente élastique de l'état d'équilibre atteint après plusieurs cycles de succion.

FIG. 10 Surface de charge du modèle BExM (Alonso et al., 1999).
Yield surface of BExM model (Alonso et al., 1999).

Déformations plastiques : d'après le modèle élastoplastique, les déformations plastiques macrostructurales sont produites par les déformations élastiques microstructurales (couplage micro/macrostructure) lors des cycles de succion. La déformation plastique

($d\epsilon_v^p$) induite par la variation de succion imposée peut être calculée par la différence entre la déformation totale mesurée et la déformation élastique obtenue par l'équation 2.

Dans ce modèle pour les essais œdométriques, la pression moyenne nette (p_0) est remplacée par la contrainte verticale nette appliquée (σ_{v0}). Par ailleurs, les valeurs de σ_{v0}^* à des succions différentes sont représentées par la contrainte verticale de préconsolidation saturée (σ_{v0}^*), autrement dit, la courbe de LC est considérée comme étant une droite verticale ($\sigma_{v0} = \sigma_{v0}^*$).

L'activation des surfaces de charge SI et SD, provoque l'activation de la courbe LC, l'inverse n'étant pas vrai. Le changement des valeurs de σ_{v0}^* dû à l'activation de LC pourrait être estimé à partir de la déformation plastique mesurée :

$$\frac{\Delta \sigma_{v0}^*}{\sigma_{v0}^*} = (1 + e) \frac{\Delta \epsilon_v^p}{(\lambda(0) - \kappa)} \quad (3)$$

La figure 11 présente de manière schématisque ($d\epsilon_v^p/d\epsilon_v^e$) en fonction de (σ_v/σ_{v0}^*). Elle montre l'accumulation des déformations lors de l'application de différents cycles de séchage/humidification. La valeur de (σ_v/σ_{v0}^*)_{eq} correspond à l'état d'équilibre et à la déformation plastique nulle.

FIG. 11 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification.
Evolution of the plastics strains during the wetting/drying cycles.

Pour les rapports de (σ_v/σ_{v0}^*) inférieurs à (σ_v/σ_{v0}^*)_{eq}, les déformations plastiques de l'humidification prédominent les déformations plastiques du séchage, ce qui aboutit à un gonflement global à la fin des cycles de succion. Dans ce cas, le radoucissement du matériau diminue la pression de préconsolidation (σ_{v0}^*) et en conséquence le rapport (σ_v/σ_{v0}^*) augmente.

Pour les valeurs de (σ_v/σ_{v0}^*) supérieures à (σ_v/σ_{v0}^*)_{eq}, les déformations plastiques durant le séchage prédominent celles issues de l'humidification et produisent un retrait global à la fin des cycles de séchage/humidification. Ce retrait rigidifie le sol et augmente la

valeur de σ_{v0}^* en produisant la diminution de la valeur de (σ_v/σ_{v0}^*).

5

Interprétation des résultats

L'indice de compressibilité élastique κ_m qui est fonction de la charge appliquée a été défini pour les deux matériaux (Fig. 12).

FIG. 12 Indice de compressibilité élastique pour les matériaux étudiés.
Elastic compression index for the studied soils.

Les courbes de compressibilité obtenues par la méthode de gonflement libre (suction nulle) pour les deux matériaux étudiés permettent d'obtenir la

pente de compression vierge sous une suction nulle $\lambda(0)$, la contrainte verticale de préconsolidation sous une suction nulle σ_{v0}^* et la pente de déchargement κ (tableau V). Les valeurs mesurées de $((de_v/de_v^*))$ sont présentées en fonctions de (σ_v/σ_{v0}^*) sur la figure 13 pour les trois essais O1, O2 et O3 correspondant au sol compacté. Ces courbes montrent que les déformations plastiques convergent vers un état d'équilibre représenté par le point M avec le rapport $(\sigma_v/\sigma_{v0}^*)_{eq} = 0,14$. Une structure plus rigide du sol est engendrée par le retrait volumique cumulé lors des cycles de suction.

TABLEAU V Paramètres de la surface de charge (LC) pour les matériaux étudiés.

Parameters of the (LC) yield surface for the studied soils.

Paramètre	σ_{v0}^* (kPa)	κ	$\lambda(0)$
Mélange compacté	60	0,04	0,19
Matériau naturel du Deffend	220	0,03	0,12

FIG. 13 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification pour le sol compacté.
Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the molded soil.

En ce qui concerne le sol du Deffend, les éprouvettes présentent un gonflement cumulé lors des essais D1, D2 et D3. L'état initial du sol se trouve côté gauche du point d'équilibre sur la figure 14 représenté par le point N avec le rapport $(\sigma_v/\sigma_{v0}^*)_{eq} = 0,50$. Les cycles de suction ramollissent le sol et la valeur de σ_{v0}^* diminue lors des cycles de séchage/humidification.

L'ensemble des résultats montre que la macro- et la microstructure initiale du sol, la densité et la teneur en eau initiales du matériau, ainsi que sa pression de préconsolidation sont des facteurs importants qui influencent fortement les déformations volumiques d'un sol soumis à des cycles hydriques. Le point d'équilibre du matériau obtenu en général après quatre ou cinq cycles hydriques est dépendant également de la gamme de variation de suction. L'intensité de la charge appliquée influence le nombre de cycles nécessaires pour atteindre le point d'équilibre.

En ce qui concerne le sol compacté, les variations de suction influencent la microstructure du sol qui produit le retrait cumulé plastique de la macrostructure lors des cycles de séchage/humidification. En état d'équilibre, le volume macrostructural atteint sa valeur minimale. L'augmentation de la charge appliquée influence l'intensité du retrait du premier cycle de séchage/humidification.

Sous l'influence des cycles hydriques, le sol naturel qui présentait une microstructure dominante cumule un gonflement macrostructural. Lorsque la charge appliquée augmente, l'intensité du gonflement final obtenue après plusieurs cycles hydriques diminue.

En pratique, pour un sol gonflant chargé par les différentes parties des bâtis individuels, les variations climatiques induisant des sollicitations hydriques dans un intervalle de suction qui influence à la fois la micro- et la macrostructure, créent des retraites et gonflements différentiels nuisibles pour ce type de construction.

FIG. 14 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification pour le sol naturel du Deffend.

Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the natural soil of Le Deffend. Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the natural soil of Le Deffend.

6

Conclusion

Dans cet article sont présentés les résultats d'une campagne d'essais réalisée dans des œdomètres osmotiques sur deux matériaux compacté et naturel.

Dans un premier temps, l'influence des cycles d'humidification/séchage sur le comportement hydromécanique d'un mélange de bentonite-limon compacté a été étudiée. L'application de plusieurs cycles hydriques sur ce sol gonflant à l'état non saturé, en induisant un retrait cumulé, permet de le rigidifier et de lui attribuer un comportement élastique.

Dans un second temps, les cycles de d'imbibition dessiccation appliqués sur le sol argileux du site du

Deffend ont induit un gonflement cumulé, ce qui a ramolli ce matériau tout en le mettant dans un état élastique réversible.

Il est difficile de prévoir *a priori* si les cycles de succion vont engendrer un retrait ou un gonflement cumulé dans un matériau. En revanche, le modèle BExM permet d'analyser le comportement du sol lors de ce type de sollicitation et d'expliquer l'existence d'un état d'équilibre au terme d'un ensemble de cycles appliqués.

REMERCIEMENTS

Une partie de ces travaux a été réalisée dans le cadre du projet de recherche national : Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions (ARGIC) financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR).

- Al-Homoud A.S., Basma A.A., Husein Malkawi A.I., Al Bashabsheh M.A. - Cyclic swelling behavior of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 121, 1995, p. 562-565.
- Alonso E.E., Gens A., Hight D.W. - General report. Special problem soils. *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dublin, vol. 3, 1987, p. 1087-1146.
- Alonso E.E., Gens A., Josa A. - A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, vol. 40, 1990, p. 405-430.
- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A. - Modeling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, vol. 54, 1999, p. 173-183.
- Alonso E.E., Romero E., Hoffmann C., García-Escudero E. - Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting. *Engineering Geology*, vol. 81, 2005, p. 213-226.
- ASTM D 5298-94 - Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper, vol. 4.09, 1995 a, p. 154-159.
- ASTM D 4546-90 - One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, vol. 4.08, 1995 b, p. 693-699.
- Atabek R.B., Felix B., Robinet J.-C., Lahlou R. - *Rheological behaviour of saturated expansive clay materials*. Workshop on stress partitioning in engineered clay barriers, Duke University, Durham, NC, 1991.
- Chu T.Y., Mou C.H. - Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils*, Haifa, vol. 2, 1973, p. 177-185.
- Cui Y.J., Yahia-Aissa M., Delage P. - A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. *Engineering Geology*, vol. 64, 2002, p. 233-250.
- Cuisinier O., Masroui F. - Hydromechanical behavior of a compacted swelling soil over a wide suction range. *Engineering Geology*, vol. 81, 2005, p. 204-212.
- Day R.W. - Swell-shrink behavior of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, 1994, p. 618-623.
- Dif A.E., Blumel W.F. - Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 14, 1991, p. 96-102.
- Delage P., Lefebvre G. - Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 21, 1984, p. 21-35.
- Delage P., Suraj Da Silva G.P.R., De Laune E. - Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer. *Proc. of the 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, Dallas, 1992, p. 206-211.
- Delage P., Howat M.D., Cui Y.J. - The relationship between suction and the swelling properties in a heavily compacted swelling clay. *Engineering Geology*, vol. 50, 1998, p. 31-48.
- Gallipoli D., Gens A., Sharma R., Vaunat J. - An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 123-135.
- Gens A., Alonso E.E. - A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 29, 1992, p. 1013-1032.
- Kassif G., Ben Shalom A. 1971. Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique*, vol. 21, 1971, p. 245-255.
- Karube D., Kato S. - Yield functions of unsaturated soils. *Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, 1989, p. 615-618.
- Kohgo Y., Nakano M., Miyazaki T. - Elastoplastic constitutive modelling for unsaturated soils. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, 1991, p. 631-636.
- Pousada E. - *Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succión controlada*. Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Espagne, 1984.
- Push R. - Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na-bentonite. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 19, 1982, p. 381-387.
- Roscoe K.H., Burland J.B. - On the generalized stress-strain behaviour of the wet clay. Heyman J., Leckie F.A. (Eds), *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1968, p. 535-609.
- Romero E., Lloret A., Gens A. - Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, vol. 54, 1999, p. 117-127.
- Subba Rao K.S., Rao S.M., Gangadhara S. - Swelling behaviour of a desiccated clay. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 23, n° 2, 2000, p. 193-198.
- Tripathy S., Subba Rao K.S., Fredlund D.G. - Water content - Void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 39, n° 4, 2002, p. 938-959.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M., Masroui F., Oppenheim E., Heck J.V., Ruau N., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - *Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti*. Rapport final du projet RGC&U, BRGM/RP-54862-FR, octobre, 2006.
- Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R. - Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 41-54.