

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Effet des contraintes hydromécaniques sur l'espace poreux et la rétention d'eau dans une argile

Effect of hydromechanical stresses on pore space and water retention in a clay

X. Guillot – LMSSMat, Ecole Centrale Paris et CNRS UMR 8579, Châtenay-Malabry, France; CRMD, Orléans, France

M. Al-Mukhtar & F. Bergaya – CRMD-CNRS UMR 6619, Orléans, France

J.-M. Fleureau – LMSSMat, Ecole Centrale Paris et CNRS UMR 8579, Châtenay-Malabry, France

RESUME: Cette communication présente la comparaison des courbes de drainage-humidification (teneur en eau-succion) dans une très large gamme de succions en fonction de la contrainte sous laquelle l'argile a été consolidée. Ces courbes suivent avec une assez bonne approximation une loi logarithmique avec des pentes différentes selon la contrainte appliquée. L'effet de la contrainte diminue à mesure que celle-ci augmente et le matériau présente des caractéristiques hydriques assez similaires pour les plus fortes succions quelle que soit la contrainte. Ces courbes sont également mises en parallèle avec celles issues de résultats d'essais œdométriques mettant en avant des différences selon que la succion est appliquée sous contrainte ou non. Enfin, les volumes macroporeux, issus des analyses de porosimétrie au mercure réalisées sur les échantillons ayant subi ces essais œdométriques, sont présentés et comparés aux volumes poreux totaux. Le comportement de ce matériau argileux aux plus faibles contraintes hydro-mécaniques pourrait être expliqué par les modifications observées au niveau des macropores.

ABSTRACT: This paper presents the comparison of the drying-wetting curves (water content vs suction) in a wide range of succions as a function of the stress under which the clay has been consolidated. These curves generally follow fairly well a logarithmic law with different slopes depending on the stress applied. The stress effect decreases when the stress increases and the material presents hydric characteristics similar enough for the highest succions whatever the stress. These curves are also compared to those derived from oedometric experiments results, highlighting the differences whether the suction is applied under stress or not. Finally, macropore volumes, derived from mercury intrusion analyses carried out on samples submitted to these oedometric experiments, are presented and compared to the total pore volumes. The behaviour of this material under the lowest hydro-mechanical stresses could be explained by the modifications observed at the macropore level.

1 INTRODUCTION

L'intérêt croissant de comprendre le comportement des matériaux non saturés dans une très large gamme de contraintes hydro-mécaniques provoque aujourd'hui le développement de nouvelles techniques d'investigation. Pour le cas des courbes de rétention d'eau par exemple, les chercheurs se sont longtemps contentés d'une gamme de succions réduite (de 0 à quelques centaines de kPa) alors qu'ils s'y intéressent dorénavant jusqu'à de très fortes succions (1000 MPa) (Al-Mukhtar, 1995 ; Vanapalli et al., 1999). Le terme succion est utilisé ici pour désigner la pression interstitielle négative d'échantillons sous contrainte ou non. Dans notre étude, trois techniques complémentaires permettent d'établir les courbes de drainage-humidification dans une très vaste gamme de succions (de quelques kPa à quelques centaines de MPa). L'utilisation de ces techniques dans des cellules œdométriques ouvre également de nouvelles perspectives d'analyse (succions sous contraintes, ordre d'application des succions et des contraintes,...).

Un autre point consiste à tenter d'expliquer les comportements macroscopiques au travers de données concernant la texture ou la structure du matériau, c'est à dire à dire à s'intéresser à des aspects microscopiques. Ainsi, des résultats de porosimétrie au mercure illustreront les modifications de macroporosité engendrées par les contraintes hydro-mécaniques dans un matériau argileux.

2 PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.1 Matériau utilisé

Le matériau retenu dans cette étude est l'argile française FoCa dont les caractéristiques minéralogiques sont reportées dans le tableau 1. Ca^{2+} constitue le principal cation échangeable de la smectite de ce matériau. Ses limites d'Atterberg sont les suivantes : $w_l = 90$; $w_p = 35$; $I_p = 55$.

Tableau 1. Composition minéralogique (Atabek et al., 1991)

Interstratifié smectite / kaolinite	80%
Kaolinite libre	4%
Goethite (6%), quartz (6%), calcite (1,4%), gypse (0,4%), hématite (0,25%)	

2.2 Courbes de drainage-humidification d'échantillons consolidés

Pour réaliser ces courbes de drainage-humidification, le matériau a été préalablement consolidé sous diverses contraintes verticales (0,21 ; 1 et 10 MPa respectivement) dans des moules œdométriques. Les succions souhaitées, qui couvrent une très large gamme grâce aux trois techniques complémentaires retenues, sont alors imposées aux échantillons obtenus : les plaques tensiométriques permettent d'appliquer les plus faibles succions (de 0,1 à 20 kPa), les solutions osmotiques de polyéthylène glycol (PEG), celles allant de 100 à 2000 kPa et les solutions salines, les plus fortes (de 2 à plusieurs centaines de MPa). Il est à noter que, compte-tenu de l'importance de l'interaction eau-argile, tous ces essais ont été réalisés avec de l'eau distillée. Lorsque les échantillons sont équilibrés (après plusieurs semaines), les teneurs en eau massiques des échantillons sont obtenues classiquement par passage à l'étuve à 105°C pendant 24^h et les volumes sont mesurés par pesée hydrostatique. Seuls les résultats de teneur en eau massique (w) en fonction de la succion sont reportés même s'il est classique de représenter l'évolution de la teneur en eau volumique (θ), de l'indice des vides (e) ou encore du degré de saturation (S_r).

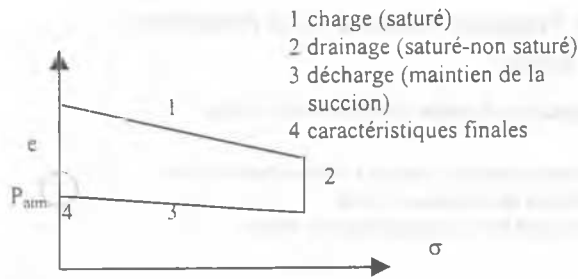


Figure 1. Chemin suivi lors des essais de drainage sous contrainte

2.3 Courbes de drainage-humidification calculées d'après les essais œdométriques

Dans ce cas, les courbes de drainage-humidification sont directement déduites des caractéristiques finales (e , w , γ) des échantillons qui ont subi des essais œdométriques. La succion est imposée aux échantillons sous la contrainte de consolidation souhaitée en utilisant soit les solutions osmotiques, soit les solutions salines (Figure 1), contrairement au cas précédent où les succions étaient imposées alors que les échantillons étaient à la pression atmosphérique.

3 COMPARAISON DES COURBES DE DRAINAGE-HUMIDIFICATION A CONTRAINTE NULLE

Les courbes présentées ici sont celles de la teneur en eau massique (w exprimée en %) en fonction de la succion. Les caractéristiques initiales des échantillons (considérées identiques aux caractéristiques finales après consolidation à l'œdomètre) en fonction de la contrainte subie sont reportées dans le tableau 2. Compte-tenu des teneurs en eau initiales, l'essentiel de ces courbes correspondra à du drainage et le reste à de l'humidification. Il apparaît que ces courbes présentent la même allure quelle que soit la contrainte sous laquelle les échantillons ont été consolidés (Figure 2). En effet, toutes les courbes (à l'exception de celle de la pâte drainée figure 5) suivent avec une assez bonne approximation une loi logarithmique ($y = a \cdot \ln(x) + b$) avec des pentes différentes. Une loi logarithmique a été adoptée afin de simplifier l'interprétation des résultats même si de meilleures équations pourraient les décrire (Fredlund & Xing, 1994). La pente des droites diminue à mesure que la contrainte sous laquelle l'échantillon a été consolidé augmente. Les échantillons équilibrés aux plus fortes succions (>10 MPa) tendent vers des valeurs de teneur en eau identiques. De plus, une forte contrainte (10 MPa) n'a pas plus d'effet qu'une contrainte moyenne (1 MPa) puisque les courbes sont confondues. La courbe d'humidification d'une pâte normalement consolidée et séchée à l'air (avec une succion initiale de l'ordre de 70 MPa) présente la même allure que celles à 1 et 10 MPa (Etile, 2000). Il est donc important de noter l'influence des conditions initiales (des teneurs en eau initiales en particulier) lors de tels chemins de drainage-humidification.

4 INFLUENCE DE LA CONTRAINTE SUR LES COURBES DE DRAINAGE-HUMIDIFICATION

Pour ces essais, les courbes de drainage sont obtenues d'après les caractéristiques finales (après déchargement à la pression

Tableau 2. Caractéristiques après consolidation

σ (MPa)	0,21	1	10
w (%)	54,6	49,7	39,3
e	1,43	1,31	1,04

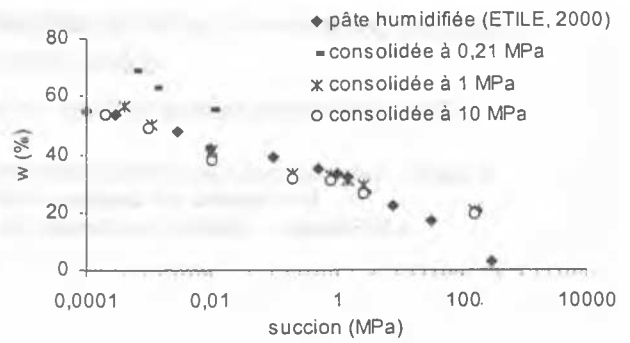


Figure 2. Courbes de drainage-humidification

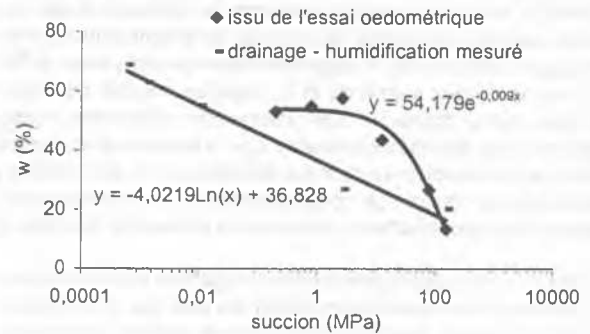


Figure 3. Comparaison à 0,21 MPa des courbes de drainage-humidification

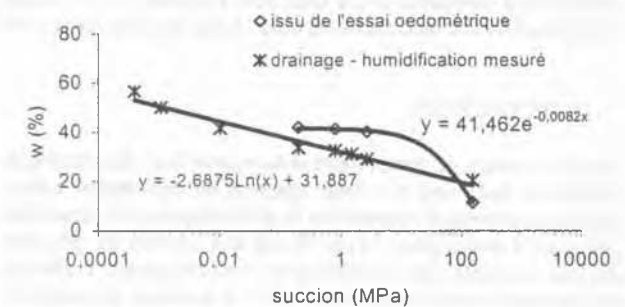


Figure 4. Comparaison à 1 MPa des courbes de drainage-humidification

atmosphérique) des échantillons soumis aux divers tests œdométriques et comparées aux résultats précédents. La zone de non recouvrement des courbes s'explique par le fait qu'aucun essai œdométrique pour des succions inférieures à 200 kPa n'a été réalisé. Ceci n'est pas dérangeant puisque le comportement du matériau est le même en deça de succions de l'ordre du MPa. Alors que les courbes de drainage décrites précédemment suivaient une loi logarithmique, il en va différemment de celles issues des données finales des essais œdométriques qui suivent plutôt des lois exponentielles ($y = a \cdot e^{bx}$) (Figures 3 et 4). Ainsi, le chemin des contraintes hydromécaniques suivi est prépondérant dans le comportement du matériau. Une imposition sous contrainte ou à la pression atmosphérique modifie de manière primordiale ces comportements. Que ces succions soient imposées sous une contrainte de 0,21 ou 1 MPa ne modifie pas l'allure générale de ces courbes. Dans tous les cas, ce ne sont qu'aux plus fortes succions (155 MPa) que les échantillons présentent des caractéristiques similaires. Deux chemins d'application des contraintes différents peuvent donc amener l'échantillon à un état final identique du point de vue macroscopique tandis

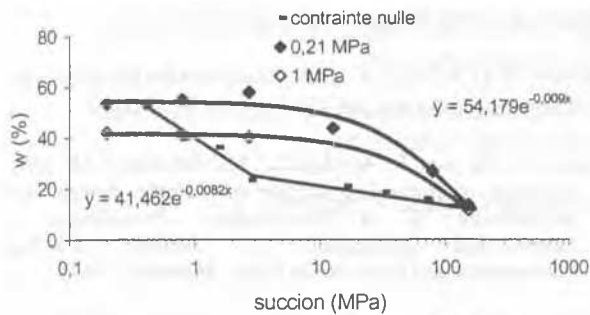


Figure 5. Effet de la contrainte (w - succion)

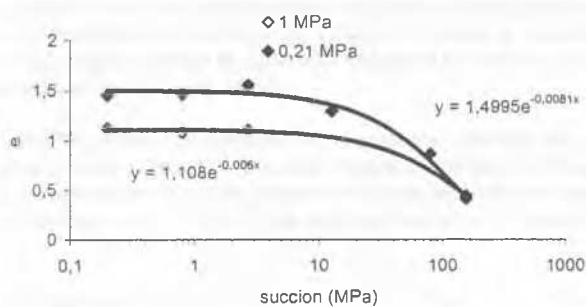


Figure 6. Effet de la contrainte (e - succion)

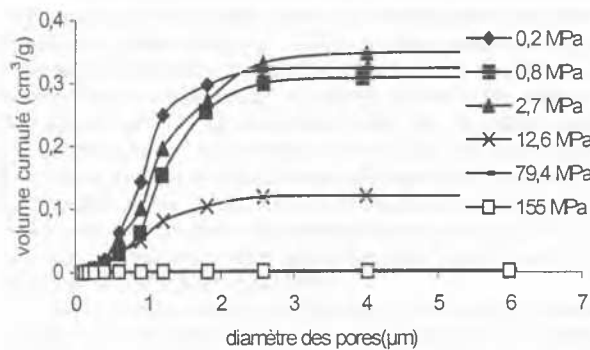


Figure 7. Volumes cumulés (essais à 0,21 MPa) pour des mesures de porosimétrie au mercure

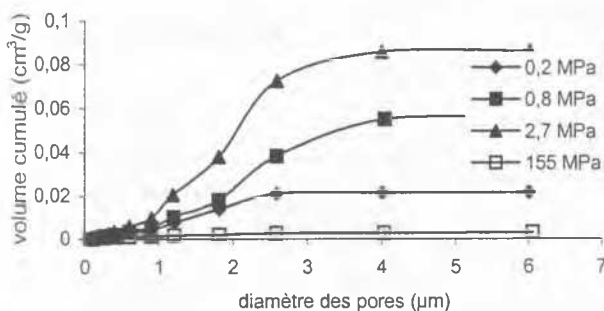


Figure 8. Volumes cumulés (essais à 1 MPa) pour des mesures de porosimétrie au mercure

que ses paramètres microscopiques différeront peut-être de

façon importante. Cela met en évidence une nouvelle fois l'importance de la prise en compte de l'histoire du matériau.

5 COURBES DE DRAINAGE CALCULEES D'APRES LES ESSAIS ŒDOMÉTRIQUES

5.1 Effet de la contrainte

Les résultats des essais réalisés à des contraintes de 0,21 et 1 MPa sont comparés. Les courbes de teneur en eau massique et d'indice des vides en fonction de la succion suivent des lois exponentielles différentes selon la contrainte (Figures 5 et 6). Une fois encore, c'est aux plus fortes succions que les teneurs en eau des échantillons se rejoignent. En revanche, le comportement de la pâte qui n'a pas été consolidée est tout autre puisqu'il n'est pas exponentiel et que la teneur en eau est la plus faible pour la plupart des succions.

L'effet de la succion semble indépendant de la contrainte puisque, pour les résultats d'échantillons consolidés, la diminution de la teneur en eau est essentiellement provoquée par l'augmentation de la contrainte (de 0,21 à 1 MPa), ceci avant même l'imposition de la succion. Par contre, ces contraintes impliquent des réarrangements internes (texturaux) qui empêchent une évacuation correcte de l'eau contrairement à l'essai non consolidé où les teneurs en eau sont inférieures. Nous assistons ainsi à une sorte de piégeage de l'eau et à l'occlusion d'une partie de la porosité. Il semblerait donc que nous soyons en présence de deux mécanismes antagonistes.

5.2 Porosimétrie au mercure

Afin de tenter d'expliquer ces comportements macroscopiques et les réarrangements texturaux supposés, des résultats de porosimétrie au mercure sont présentés. Ainsi, lorsqu'un essai œdométrique est terminé, un échantillon est prélevé et lyophilisé en vue d'être soumis à l'essai de porosimétrie. Il est possible de déterminer une taille de pores en fonction de la pression à laquelle est injectée le mercure via la relation de Washburn ($P_i = -(2\gamma\cos\theta)/r_i$ avec P_i la pression d'injection, γ la tension de surface du mercure, θ l'angle de contact et r le rayon de pores). Ainsi, les courbes du volume cumulé en fonction du diamètre des pores peuvent être tracées. Les courbes relatives aux échantillons soumis à une contrainte de 0,21 MPa ou de 1 MPa sont représentées sur les figures 7 et 8. Ces courbes ont été tracées pour des diamètres allant de 0,1 à 6 μm car nous avons pu constater que cette taille de pores était tout à fait représentative de toute la macroporosité ($d > 0,05 \mu\text{m}$) (Figure 9). Par exemple, la macroporosité supérieure à 6 μm (zone hachurée) reste quasiment constante quelle que soit la succion pour une contrainte de 0,21 MPa.

Le comportement de cette macroporosité demeure assez complexe puisque le matériau présente davantage de macropores pour les succions les plus faibles avec un maximum pour une succion de 2,7 MPa.

6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Afin de vérifier si la macroporosité joue ou non un rôle déterminant dans le comportement du matériau, ces résultats sont comparés à ceux du volume total des vides (Figure 10). Dans le cas de la faible contrainte (0,21 MPa), la macroporosité mesurée représente une part très importante de la porosité totale (environ 75%) et elle est d'autant plus prépondérante que les succions sont faibles même si sa part redevient importante pour une succion de 155 MPa. En revanche, la part de cette macroporosité dans la porosité totale est beaucoup moins marquée pour une contrainte de 1MPa. Ainsi, même si la

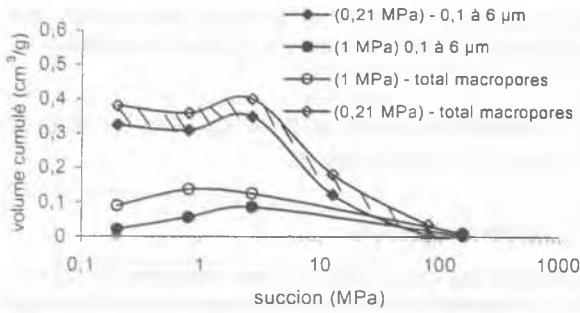


Figure 9. Comparaison des volumes des pores/volumes des macropores

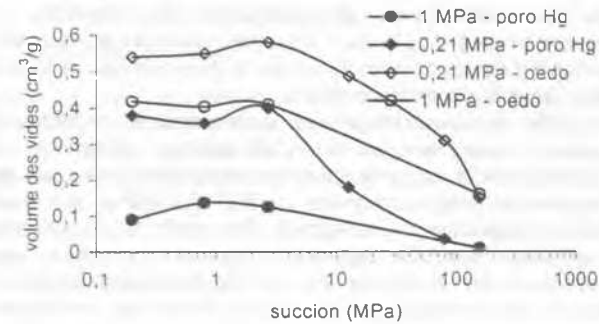


Figure 10. Comparaison du volume des vides déterminé d'après l'essai œdométrique et la porosimétrie au mercure.

macroporosité suit assez bien le comportement de la porosité totale en première approximation dans les deux cas, il apparaît qu'elle pourrait être une source d'explication pour les plus faibles contraintes, tant hydriques que mécaniques. Dans tous les cas, il serait intéressant de corréliser ces résultats de porosimétrie au mercure (donc de macroporosité) à ceux du comportement macroscopique du matériau. En particulier, dans la différence observée entre la porosité totale et la macroporosité, quelle est la proportion de micro-mésopores et de pores occlus ? Dans cette perspective, d'autres analyses sont menées (adsorption de gaz, analyses thermogravimétriques,...) afin d'attribuer aux différents types de pores ainsi qu'aux différents types d'eau leur part respective dans ces comportements. A travers d'autres essais œdométriques, nous avons pu vérifier que lorsque la succion était appliquée avant la contrainte (c'est à dire avec un matériau initialement à l'état de poudre), la diminution de la porosité était essentiellement due à la contrainte plutôt qu'à la succion qui avait une influence mineure sur ce facteur mais majeure sur la distance interfoliaire (Guillot et al., 2001).

Toujours concernant l'ordre dans lequel sont appliquées les contraintes hydromécaniques, il a clairement été mis en évidence les différentes allures des courbes selon que la succion était appliquée sous contrainte ou non : logarithmique lorsque la succion est appliquée à la pression atmosphérique et exponentielle sinon.

7 REFERENCES

- Al-Mukhtar, M., 1996, Water retention behavior of highly compacted active clay soil, *Proceedings of the 2nd Int. Congress on Environmental geotechnics, Osaka-Japon, Kamon eds., A. A. Balkema*, pp. 187-192.
- Atabek, R., Felix, B., Robinet, J.-C., Lahlou, R., 1991, Rheological behaviour of saturated expansive clay materials, *Workshop on stress partitioning in engineered clay barriers, Duke University, Durham NC, 29-31 may 1991*.

Etile, M.-A., 2000, Rapport interne de l'ECP.

Fredlund, D. G. & Xing, A., 1994, Equations for the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, 31: 521-532.

Guillot, X., Bergaya, F., Al-Mukhtar, M., Fleureau J.-M., 2001, Influence of stress and suction on volume changes and microtexture of a Ca-smectite, *Proceedings of International symposium on Suction, Swelling, Permeability and Structure of Clays, Shizuoka* : 69-76.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., 1999, The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till, *Géotechnique 49, No. 2* : 143-159.