PROPRIETES DE RETENTION ET DE COMPRESSIBILITE D'UNE ARGILE NATURELLE GONFLANTE

RETENTION AND COMPRESSIBILITY PROPERTIES OF A NATURAL SWELLING CLAY

An-Ninh TA[1], Anh-Minh TANG[1], Yu-Jun CUI[1], Altin MANTHO[1], Kai CUI[2]
1 Université Paris-Est, Institut Navier, ENPC-CERMES, Paris, France
2 Institut National de la Recherche Agronomique, Unité d'agronomie de Laon-Péronne

RÉSUMÉ – L'argile verte de Romainville a été étudiée. Ses propriétés de rétention d'eau sont d'abord caractérisées avec mesure simultanée de la teneur en eau massique et du volume. Sa compressibilité a été ensuite étudiée par l'essai oedométrique à succion contrôlée. Les résultats obtenus ont montré une forte sensibilité à l'eau et un haut potentiel de retrait - gonflement.

ABSTRACT – The green clay from Romainville has been studied. The water retention properties were first characterized by simultaneous measurement of gravimetric water content and volume. The compressibility was then studied by suction controlled oedometric test. The results showed a high water sensibility and important swell/shrink potential.

1. Introduction

Depuis 1989, les sinistres liés au retrait-gonflement des argiles sont indemnisés dans le cadre de la loi sur les catastrophes naturelles. Le coût lié à ces indemnisations était estimé en 2002 à 3,3 milliards d'euros par la Caisse Centrale de Réassurance, ce qui en fait le deuxième poste après les inondations (environ 40% des indemnisations pour toutes les catastrophes naturelles). Du point de vue de la mécanique des sols non saturés, ces risques sont liés aux tassements et soulèvements différentiels. Ces mouvements du sol sont dus au retrait du sol par le séchage ou au gonflement du sol par l'humidification. Ainsi, afin de mener à bien les analyses de ces risques, il est nécessaire de bien comprendre les propriétés de rétention d'eau et de compressibilité des sols en question.

Dans le cadre du projet ANR-RGCU « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions » - ARGIC, on a caractérisé l'argile verte de Romainville prélevée à l'Est de Paris lors de l'excavation pour la réalisation de la fondation d'un bâtiment. Dans ce travail, ses propriétés de rétention d'eau et de compressibilité ont été étudiées.

2. Matériaux et méthode

2.1. Matériaux

L'argile verte de Romainville a été prélevée en bloc pendant un projet de construction d'un bâtiment à l'Est de Paris (Figure 1).



Figure 1. Plan de localisation des prélèvements

Sa teneur initiale en eau naturelle était de 38%. La succion initiale a été mesurée avec un tensiomètre ; elle était d'environ 40 kPa. Les techniques de tamisage et de sédimentométrie ont été utilisées pour déterminer la courbe granulométrique. Le résultat a montré que les grains fins d'un diamètre inférieur à 80 μm représentent 92% et la fraction argileuse (< 2 μm) représente 68%. La limite de liquidité est de 95% et celle de plasticité est de 41%. Selon le diagramme de Casagrande, l'argile de Romainville est classée comme argile très plastique. La teneur en carbonate est assez élevée : 13%. L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X a montré que la fraction argileuse est composée d'illite et de smectite. La surface spécifique mesurée est de 340 m²/g. Les caractéristiques principales sont récapitulées dans le Tableau I.

Tableau I. Caractéristiques de l'argile verte de Romainville

Limite de liquidité (%)	95
Limite de plasticité (%)	41
Indice de plasticité	54
Fraction argileuse (%<2 μm)	68
Composition de l'argile	Illite et smectite
Teneur en carbonate (%)	13
Surface spécifique, S (m²/g)	340

2.2. Méthodes

Deux techniques de contrôle de succion ont été utilisées : osmotique et phase vapeur. Dans la technique osmotique (Kassiff and Ben-Shalom 1971 ; Cho et al. 2000 ; Komine and Ogata 2003), le sol a été mis en contact avec une solution PEG ayant une concentration connue à travers une membrane semi-perméable. Cette membrane permet aux molécules d'eau de traverser librement mais elle empêche les molécules de PEG qui sont plus grandes que les mailles de la membrane d'entrer dans le sol. A l'équilibre, la succion dans le sol est égale à la succion osmotique de la so-

lution PEG. En contrôlant la concentration de la solution PEG, on peut contrôler la succion du sol. Dans la technique par phase vapeur, le sol est mis en contact avec l'air ayant une humidité relative contrôlée par une solution saline saturée (Tessier 1984 ; Delage et al. 1998 ; Tang and Cui 2005). A l'équilibre, la succion dans le sol est égale à la succion imposée par l'air calculée à partir de l'humidité relative selon la loi de Kelvin.

Afin de déterminer la courbe de rétention d'eau, deux petits échantillons cubiques (de 15 à 20 mm de côté) ont été découpés directement à partir d'un bloc de sol naturel. Ensuite, ils ont été séchés par l'application des paliers de succion croissants en utilisant la méthode par phase vapeur : s = 6,1 ; 13,1 ; 24,9 ; 82 ; 113 ; 136 ; et 216 MPa. L'indice des vides et le degré de saturation à l'équilibre à chaque succion ont été déterminés.

En ce qui concerne les essais oedométriques, les échantillons ont été découpés avec un carottier métallique (10 mm de hauteur et 70 mm de diamètre). Le carottier et l'échantillon ont été ensuite installés directement dans la cellule œdométrique. Tout d'abord, ils ont été tous soumis à une faible contrainte verticale : 25 kPa. Ensuite, les quatre succions ont été appliquées : s = 0 (échantillon saturé à l'eau distillée), s = 500 kPa (méthode osmotique), s = 9 et 39 MPa (méthode par phase vapeur) sur quatre échantillons. Après avoir atteint l'état d'équilibre avec la succion, la contrainte verticale a été augmentée par paliers jusqu'à 800 kPa puis diminuée. Pour l'essai à s = 0, après avoir atteint l'équilibre, plusieurs cycles de chargement et de déchargement ont été appliqués. La procédure d'essai définie dans la Norme (AFNOR 1997) a été suivie.

3. Résultats

3.1. Courbes de rétention d'eau

Les courbes de rétention d'eau obtenues sur deux échantillons pendant le séchage sont présentées sur la Figure 2. On observe d'abord une bonne similarité entre les deux courbes, montrant d'une part la répétitivité de l'essai et d'autre part l'homogénéité du sol. On trouve que le volume du sol a diminué significativement lors de l'augmentation de la succion de 40 kPa, l'état initial, jusqu'à 24,9 MPa (l'indice des vides a diminué de 1,02 à 0,42). La diminution de volume pendant le séchage (augmentation de succion) a été moins importante dans la gamme de fortes succions (s > 24,9 MPa). En ce qui concerne le degré de saturation, le sol restait saturé (S_r = 100%) à une succion inférieure à 13,1 MPa. Cette valeur, qui est assez élevée, correspond au point d'entrée d'air. Le degré de saturation à une grande succion de 216 MPa reste important (30%), montrant la plasticité importante de cette argile.

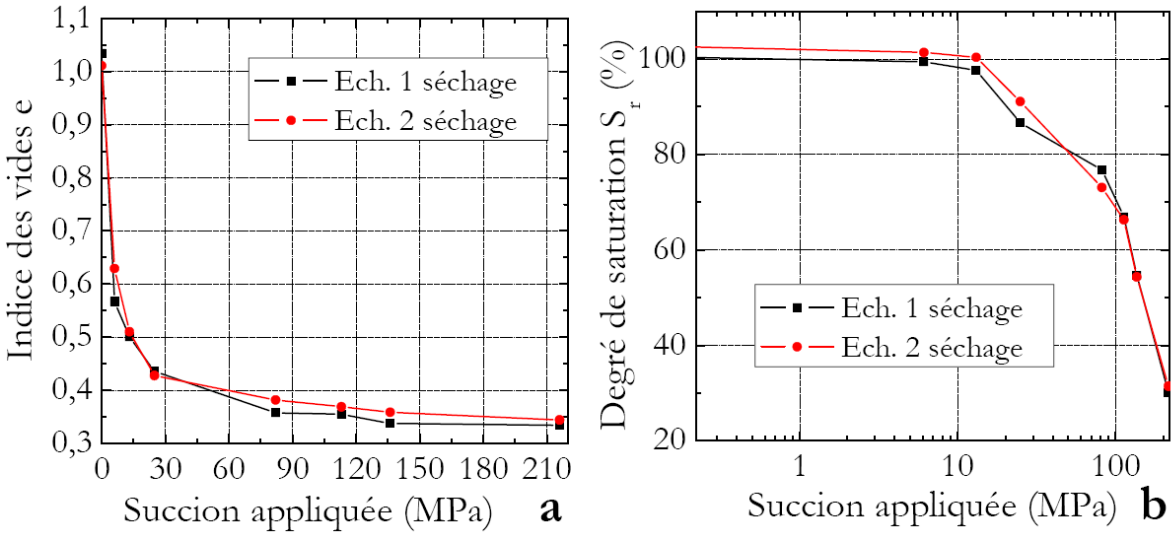


Figure 2. Variation de l'indice des vides (a) et du degré de saturation (b) en fonction de la succion appliquée pendant le séchage

3.2. Retrait et gonflement sous sollicitations hydriques à l'oedomètre

A l'oedomètre, l'application des succions a provoqué une variation de hauteur de chaque échantillon. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.

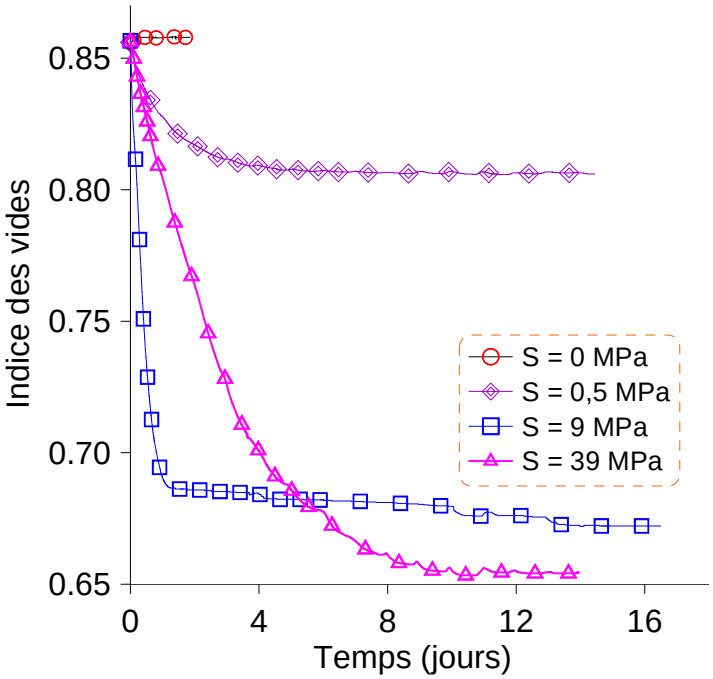


Figure 3. Déformation sous sollicitations hydriques

Pour l'essai s = 0, un gonflement de 0,1% est observé. Pour les trois autres essais, des retraits importants sont bien observés. Ils sont de 2,67% (s = 500 kPa), 9,84% (s = 9 MPa), et 10,76% (s = 39 MPa). Le temps nécessaire pour que le sol atteigne son état d'équilibre a été de 2 jours (s = 0), 7 jours (s = 500 kPa), 10 jours (s = 9 MPa), et 14 jours (s = 39 MPa).

3.3. Compressibilité à différentes succions

Le résultat des courbes de compressibilité de l'argile verte à l'état saturé est présenté sur la Figure 4. Le premier chargement représente bien un comportement élasto-plastique : une partie élastique suivie par une partie plastique plus compressible. Par contre, une augmentation importante de la pente des courbes de déchargement est remarquée. C'est le comportement typique d'un sol gonflant (AFNOR 1997). Suivant cette norme, les paramètres de compressibilité ont été déterminés : P_0 = 140 kPa ; C_s = 0,053 ; C_c = 0,306. On note que le rechargement n'a pas suivi les courbes de déchargement.

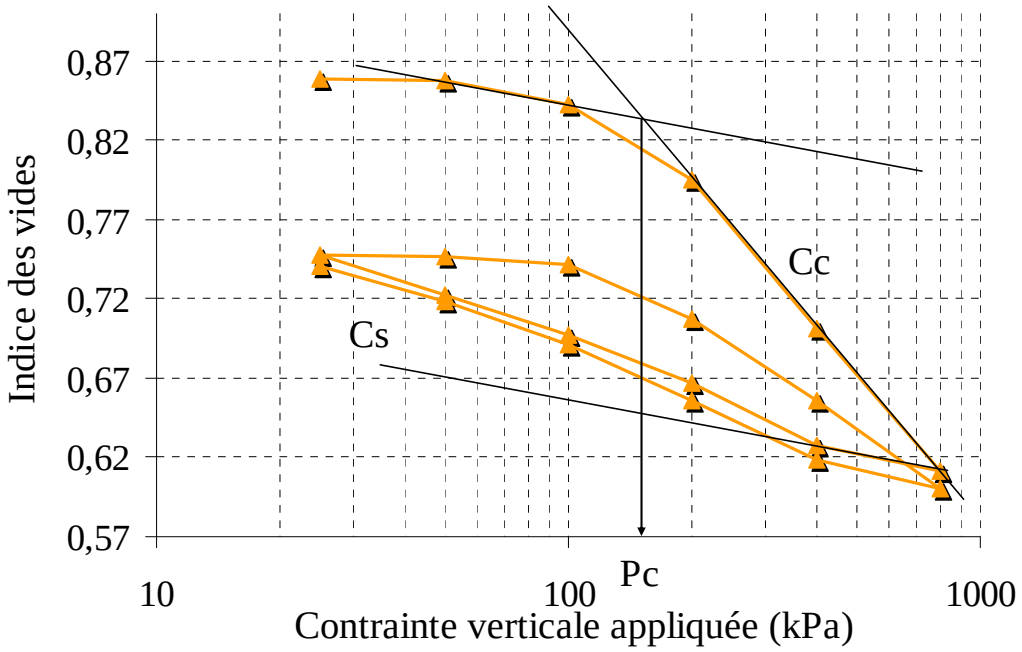


Figure 4. Indice des vides en fonction de la contrainte verticale appliquée pour l'essai à s = 0

L'indice des vides à l'état d'équilibre correspondant à chaque contrainte appliquée est présenté sur la Figure 5. Un comportement élasto-plastique a été observé pour les essais à 0 et 0,5 MPa de succion. La pression de préconsolidation déterminée à s = 0,5 MPa est de 190 kPa, plus importante que celle à s = 0 (140 kPa). L'indice de compression, C_c, à s = 0,5 MPa (C_c = 0,245) est plus petit que celui à s = 0 (C_c = 0,306).

En ce qui concerne les courbes de compression à fortes succions (s = 9 et 39 MPa), le passage du comportement élastique au comportement plastique n'est pas très clair. La pression de préconsolidation correspondant à ces succions était probablement plus importante que la contrainte maximale appliquée (800 kPa).

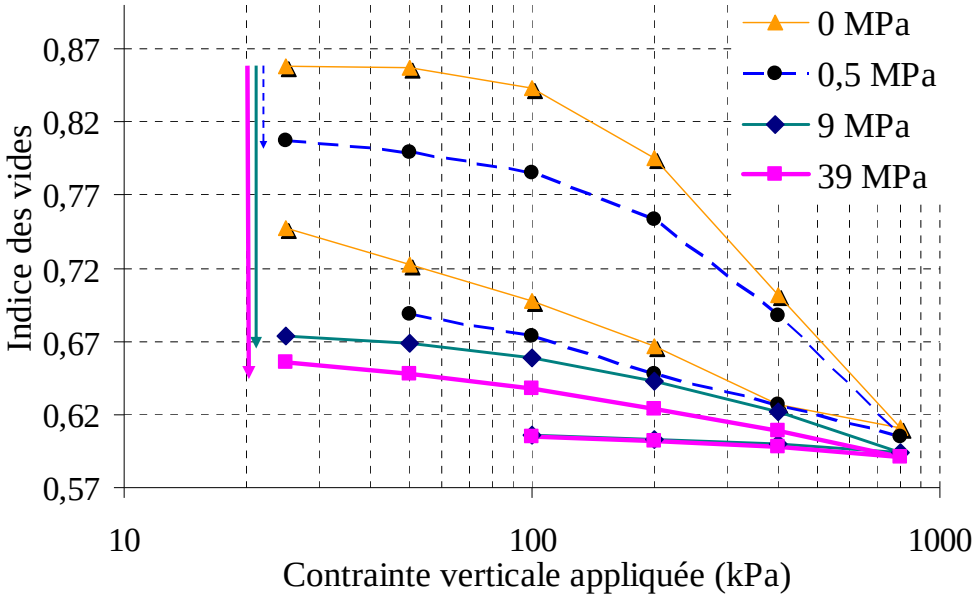


Figure 5. Courbes oedométriques à différentes succions

4. Discussion

Les résultats ont montré une forte aptitude au retrait - gonflement de l'argile verte de Romainville. La courbe de rétention d'eau indique un retrait total de 33% de déformation volumique (l'indice des vides a diminué de 1,02 à 0,35) pendant un séchage de l'état initial à une succion de 216 MPa. Un tel retrait explique les importants dégâts observés sur les constructions bâties sur ce sol pendant les périodes de sécheresse ou de fortes précipitations.

La valeur de succion correspondant au point d'entrée d'air (13,1 MPa) observée sur la Figure 2b est en concordance avec les résultats de la Figure 2a. En effet, au dessous de cette valeur, la variation volumique du sol en fonction de la succion est très importante. Elle peut atteindre 25% de variation volumique (l'indice des vides a diminué de 1,02 à 0,50 quand la succion était de 13,1 MPa). Au-delà de cette valeur, la variation volumique due à la variation de succion devient faible. La succion initiale du sol mesurée était de 40 kPa et le sol était dans l'état saturé. Dans une période normale, l'argile se trouve souvent dans son état saturé (la succion in situ inférieure au point d'entrée d'air). Cela signifie que le sol in-situ se trouve dans la zone très sensible au retrait - gonflement.

L'indice des vides initial des échantillons utilisés dans les essais oedométrique (0,85) était plus petit que celui des échantillons utilisés pour déterminer la courbe de rétention d'eau. Cela peut être expliqué par le séchage du bloc de sol prélevé pendant le stockage malgré une protection par une couche de paraffine. Pendant l'essai à s = 0, le sol a été humidifié sous une faible contrainte de 25 kPa. Malgré cela, le sol n'a pas pu gonfler et retrouver son état initial (e = 1,02). L'indice des vides du sol à la fin du gonflement était de 0,86. Ceci est en concordance avec les observations de Komine et Ogata (2003) qui ont montré que le gonflement est très sensible à la contrainte appliquée.

La durée nécessaire pour que le sol atteigne son état d'équilibre a été de plusieurs jours (Figure 3). Cette durée relativement longue pour une hauteur

d'échantillon de 10 mm peut être expliquée par une faible perméabilité des argiles gonflantes. Dans les travaux de Cho et al. (2000), plusieurs jours ont été nécessaires pour saturer les échantillons de bentonite compactée. En fait, la durée de l'expérimentation dépend non seulement de la nature du sol mais aussi de la hauteur de l'échantillon, et de la technique d'imposition de la succion (osmotique ou par vapeur, vitesse de circulation de la solution ou de la vapeur).

Si l'on compare l'indice des vides obtenu à la fin de la phase d'imposition de succion pour les deux types d'essais, on trouve que celui des essais oedométriques (e = 0,67 pour s = 9 MPa, et e = 0,65 pour s = 39 MPa) a été plus important que celui de la courbe de rétention d'eau (Figure 2, e < 0,65 pour s > 6,1 MPa). En fait, le volume des échantillons utilisés pour déterminer la courbe de rétention d'eau a été mesuré en pesant les échantillons dans un pétrole (Kerdane). La précision de cette méthode est assez bonne (Delage et al. 2007). Par contre, l'indice des vides des échantillons dans l'oedomètre a été calculé à partir de la variation de la hauteur de l'échantillon mesurée par un comparateur (0,001 mm de précision). Le calcul a été fait en supposant que le retrait radial du sol était négligeable. Cette hypothèse a donc sous-estimé le retrait volumique du sol. Par conséquent, l'indice des vides calculé dans l'oedomètre a été plus important que celui dans la courbe de rétention d'eau.

L'effet de la succion sur la compressibilité (Figure 5) est similaire à certains résultats existant dans la littérature pour les sols gonflants (Lloret et al. 2003 ; Tang et al. 2008) : l'augmentation de la succion augmente la pression de préconsolidation et diminue l'indice de compression C_c.

5. Conclusions

Les propriétés hydro-mécaniques de l'argile verte de Romainville ont été étudiées. Une forte aptitude au retrait - gonflement sous l'effet des sollicitations hydriques a été observée. Un retrait de 33% de variation volumique a été constaté durant un séchage jusqu'à une succion de 216 MPa. La courbe de rétention d'eau a montré une forte succion au point d'entrée d'air (13,1 MPa). En dessous de cette valeur, la variation du volume du sol due à la variation de succion était très importante. Les essais oedométriques à succion contrôlée ont montré une forte influence de la succion sur la compressibilité du sol. La pression de préconsolidation a augmenté de 140 kPa (à s = 0) à 190 kPa (à s = 0,5 MPa), elle a dépassé 800 kPa à s = 9 MPa.

6. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR-RGCU « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions » - ARGIC.

7. Références bibliographiques

AFNOR (1997) Sols : Reconnaissance et essais - Essai oedométrique _ Partie 1: Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. Association Française de Normalisation (P 94-090-1).

Cho, W.-J., Lee J.-O., Kang C.-H. (2000) Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository. Annals of Nuclear Energy 27 (14), 1271-1284.

Delage, P., Howat M. D., Cui Y. J. (1998) The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Engineering Geology 50 (1-2), 31-48.

Delage, P., Le T. T., Tang A. M., Cui Y. J., Li X. L. (2007) Suction effects in deep Boom Clay block samples. Geotechnique 57 (2), 239-244.

Kassiff, G., Ben-Shalom A. (1971) Experimental relationship between swell pressure and suction. Géotechnique 21 (3), 245-255.

Komine, H., Ogata N. (2003) New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. Canadian Geotechnical Journal 40 (2), 460-475.

Lloret, A., Villar M. V., Sanchez M., Gens A., Pintado X., Alonso E. E. (2003) Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. Geotechnique 53 (1), 27-40.

Tang, A.-M., Cui Y.-J. (2005) Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. Canadian Geotechnical Journal 42 (1), 287-296.

Tang, A.-M., Cui Y. J., Barnel N. (2008) Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay. Geotechnique 58 (1), 45-54.

Tessier , D. (1984) Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Université de Paris VII. PhD