
Influence de la variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques d'un limon compacté.

BOUKELIA Ahmed^{1,2}, ROSIN-PAUMIER Sandrine¹, MASROURI Farimah¹

¹ LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France
sandrine.rosin@univ-lorraine.fr

² ESITC de Metz, Metz, France

RÉSUMÉ. L'incorporation d'échangeurs de chaleur aux géostructures pose la question de l'impact des variations de température sur les paramètres géotechniques des sols. Dans cette étude, des essais mini-pressiométriques ont été réalisés sur des massifs de sol compactés dans un modèle réduit thermo-régulé. Un matériau limoneux compacté est soumis à trois cycles thermiques (20-50-20°C). Une diminution nette de la pression limite (P_l) et la pression de fluage (P_f) est mesurée tandis que l'évolution du module pressiométrique (E_M) est beaucoup plus faible. Dans cet interval de température, l'effet de trois cycles de chauffage peut être considéré comme réversible.

ABSTRACT. In geotechnical engineering, the proper design of thermo-active geostructures requires a better understanding of the thermo-hydro-mechanical behaviour of natural and compacted soils. In the present study, mini-pressuremeter tests were conducted in laboratory to characterise compacted soil. The objective was to examine and quantify the influence of temperature cyclic changes on pressuremeter parameters of a compacted loam. Three heating-cooling cycles (20-50 °C) were applied, the obtained results showed a decrease in limit pressure (P_l) and creep pressure (P_f) with increasing temperature for both tested soils, while the variation of the pressuremeter modulus (E_M) was less significant. Through the temperature range tested, a reversibility of the effect of a heating cycle is obtained.

MOTS-CLÉS : Energie géothermique, essais de laboratoire, pressiomètre, température, sol compacté, limon.

KEY WORDS : Geothermal energy, laboratory tests, pressuremeter tests, temperature, compacted soil, loam.

1. Introduction

En géotechnique, l'effet de variation de température sur les propriétés hydriques et mécaniques des matériaux revêt une importance particulière dans les cas de stockage de déchets nucléaires, l'enfouissement de câbles haute tension ou encore la mise en place de géostructures énergétiques [PAH02] [BRA06]. Pour cette dernière application, afin de garantir la durabilité à long terme des constructions, de nombreuses questions se posent sur l'effet de la variation de la température sur les propriétés hydromécaniques du sol. En particulier, plusieurs auteurs ont montré la contraction du domaine de déformation élastique des matériaux dans le cas d'une élévation de la température [CEK04] [MAR02] [UCH09]. Cette évolution pourrait avoir un impact sur la fonctionnalité des structures.

Dans cette étude, des essais mini-pressiométriques sont réalisés dans une cuve de grande taille préparée avec du matériau limoneux compacté. Les résultats permettront d'appréhender l'effet des variations de température sur des paramètres nécessaires pour la modélisation de la capacité portante du sol et de la stabilité des géostructures énergétiques. L'essai pressiométrique est couramment utilisé pour calculer les capacités portantes de fondations profondes [AFN00] [AST99]. Cet essai consiste à introduire dans le matériau une sonde cylindrique équipée d'une membrane flexible susceptible de se dilater radialement. La déformation de la sonde est relevée au fur et à mesure de l'application de paliers de pression croissants. Au cours de la première partie de l'essai, le sol a une réaction linéaire pseudo-élastique, la pente permet de calculer le module pressiométrique du sol E_M . Sous des pressions plus importantes, la déformation plastique du matériau est observée. La pression de fluage, P_f est définie comme la pression seuil entre la phase pseudo-élastique et la phase plastique. Il est donc possible de quantifier une potentielle contraction ou dilatation du domaine élastique en réalisant des essais pressiométriques à différentes températures. Dans cette étude, une méthode expérimentale est présentée afin de réaliser en laboratoire des essais mini-pressiométriques dans des sols compactés homogènes soumis à des variations de température [ESL14].

2. MATERIEL ET METHODE

Cette partie contient tout d'abord une caractérisation du matériau étudié puis une présentation des essais de laboratoire.

2.1 Caractérisation des matériaux

Le matériau testé est un limon, tout d'abord séché, broyé puis tamisé à 2 mm avant d'être quarté et utilisé pour les différentes expérimentations. Le limon contient 80% de quartz, 7% de dolomite, 5% de calcite, 5% de matériaux argileux et 3% de feldspath. La granulométrie est obtenue par tamisage et essais de sédimentométrie, environ 20% des particules sont de la classe des fines (inférieure à 0,002 mm). D'autres paramètres sont mesurés tels que les limites de liquidité ($w_L=27\%$), et de plasticité ($w_P=21\%$), l'indice de plasticité ($IP=6$) [AFN93] et la valeur au bleu de Méthylène (MBV de 1,85 g/100g) [AFN99a]. La teneur en eau optimale ($w_{OPN}=16\%$) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_{dmax}=1,81\text{Mg/m}^3$) sont déterminées par un essai de compactage Proctor normal (Figure 1) [AFN99b]. Selon la norme française pour la classification des sols ce limon est classé A1 [GTR00] et argile légère (CL) selon la normalisation américaine [AST06].

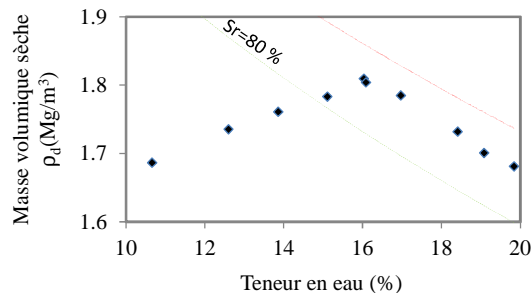


Figure 1. Courbe de compactage (Proctor normal)

2.2 Développements expérimentaux

La réalisation d'essais mini-pressiométriques en laboratoire suppose la constitution d'un massif de sol de grande taille. Pour cela le matériau est compacté dans une cuve en inox de 800 mm de haut et de 600 mm de diamètre. Des tubes de 33,7 mm de diamètre, également en inox sont soudés aux parois extérieures de la cuve et reliés à un thermorégulateur Vulcatherm® qui met en circulation un mélange de 45 % d'eau et de 55% d'un antigel à base de mono éthylène. Des gaines isolantes sont placées sur les tubes afin de limiter la condensation d'eau et les échanges thermiques avec l'atmosphère. Enfin, l'ensemble est placé dans une boîte formée de plaques de polystyrène extrudé de 40 mm d'épaisseur pour renforcer l'isolation (Figure 2a).

Le matériau sous forme de poudre est tout d'abord mélangé à de l'eau afin d'atteindre une teneur en eau cible (16,1%). Le mélange est placé dans un malaxeur MIX120© à vitesse fixe puis stocké dans des fûts pour une durée minimale de 5 jours afin d'assurer une bonne homogénéisation. Le matériau humide est ensuite compacté dans la cuve au moyen d'un compacteur pneumatique. Le compacteur crée des efforts dynamiques sur une plaque métallique de même diamètre que la cuve, et de 4 mm d'épaisseur, afin de répartir l'énergie de compactage sur l'intégralité de la surface du matériau. Le massif est compacté en 11 couches de 70 mm ($\rho_d = 1,72 \text{ Mg/m}^3$), sept sondes thermiques (PT100) sont introduites dans le massif au fur et à mesure du compactage (Figure 2b). Le massif est alors prêt à subir les 3 cycles de chauffage/refroidissement (20°/50° C) appliqués par le thermorégulateur.

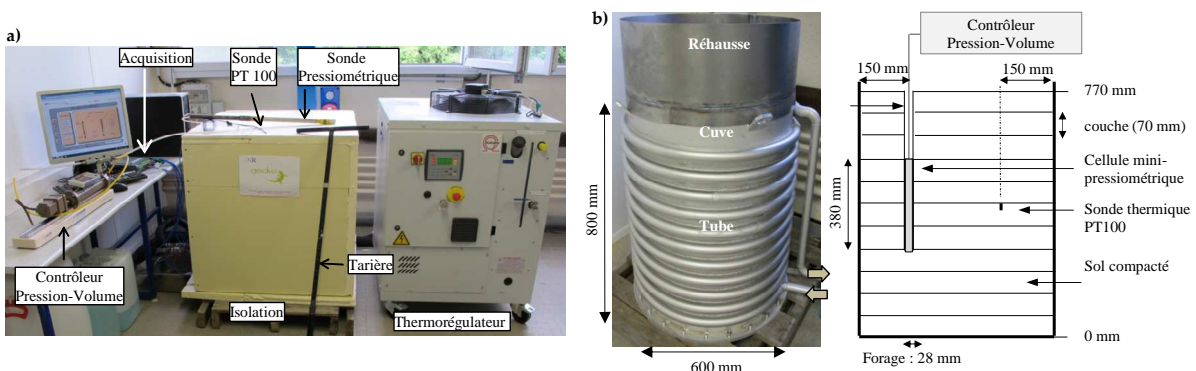


Figure 2. Cuve en modèle réduit et instrumentation associée

Seulement six essais mini-pressiométriques sont réalisés dans chaque cuve pour limiter les effets de bords et l'influence entre les essais. Les points d'essai sont positionnés sur un cercle concentrique à la cuve de rayon deux fois plus petit que celui de cette dernière. Préalablement à chaque essai, un carottage de diamètre égal à la sonde pressiométrique est réalisé à l'aide d'un carottier permettant à la fois d'échantillonner sur une profondeur de 630 mm à l'intérieur du massif et d'insérer la sonde. La carotte est utilisée pour vérifier la teneur en eau et la densité du matériau en fonction de la profondeur. La cellule mini-pressiométrique est insérée dans le forage à mi-hauteur de la cuve. La sonde est connectée à un contrôleur pression/volume GDS®, qui impose des paliers successifs de pression par incréments de 25 kPa en 60 s. L'essai est arrêté lorsque le volume de la sonde atteint 140 000 mm³. Après l'essai pressiométrique, le forage est refermé par du matériau, à la teneur en eau initiale du massif et une nouvelle sollicitation thermique est appliquée. Les résultats sont traités selon la norme NF P94-110-1 [AFN00].

Une série d'essais préliminaires a permis de vérifier la répétabilité des essais et d'estimer l'incertitude de chacun des paramètres mesurés : $E_M : \pm 10\%$, $P_f : \pm 5\%$, $P_l : \pm 5\%$. Pour évaluer l'effet de la température sur la déformation de la membrane, un essai de calibration est réalisé en plaçant la sonde dans une enceinte climatique.

3. RESULTATS

Les résultats des essais mini-pressiométriques réalisés dans le matériau sont présentés dans cette partie. La Figure 3 montre les variations de températures enregistrées par la sonde thermique située à 150 mm du bord du massif, l'équilibre thermique est atteint après 30 h. Deux essais mini-pressiométriques sont réalisés à la fin du 1^{er}, du 2nd et du dernier palier de température : L20a, L20b, puis L50a, L50b et enfin L20c, L20d (Figure 4).

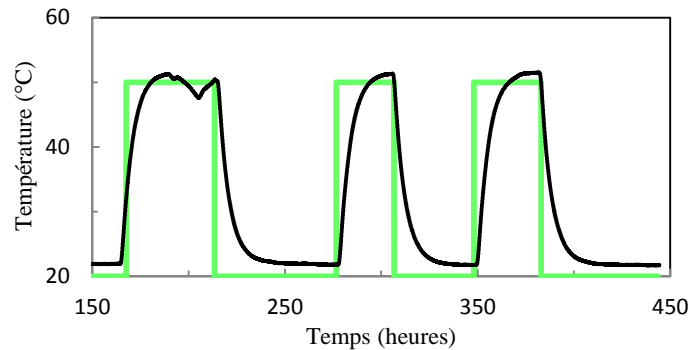


Figure 3. Variations de température imposée et mesurées dans le massif de matériau illitique compacté et chronologie des essais (L20a-b, L50a-b, L20c-d)

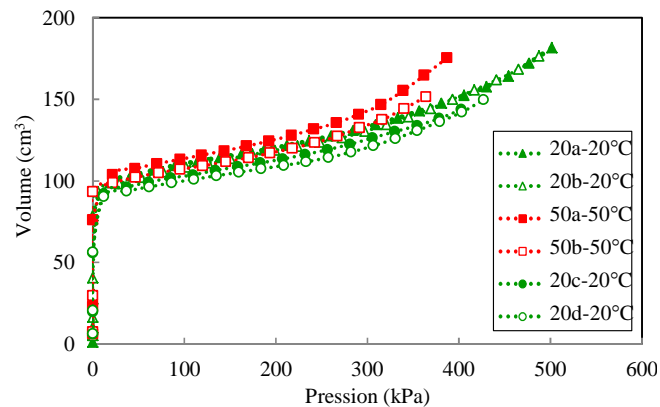


Figure 4. Courbes mini-pressiométriques obtenues dans le massif de limon compacté.

Les paramètres pressiométriques (Tableau 1) sont calculés à partir des courbes pressiométriques (Figure 4). La pression de fluage P_f et les pressions limites P_l du sol diminuent avec l'augmentation de la température mettant en évidence le radoucissement du sol sous l'effet du chauffage. Ce résultat est en accord avec les travaux réalisés à l'aide des essais œdométriques et triaxiaux par [MAR04] [CEK04] [GRA01] [TAN97] [HUE90].

Après les cycles de chauffage-refroidissement, les paramètres pressiométriques reviennent à un état proche de leur état initial (réversibilité du radoucissement). Le chauffage du limon entre 20 et 50 °C diminue la pression de fluage P_f de 22 % et la pression limite P_l de 20 % et le refroidissement augmente les deux paramètres de 15%.

Tableau 1. Paramètres pressiométriques obtenus sur le limon compacté 3 cycles (20-50-20 °C).

Test	T (°C)	Cycle	w (%)	ρ_d (Mg.m ⁻³)	P_f (kPa)	P_l (kPa)	E_M (MPa)
L20a	20	0	16,2	1,71	278	657	5,39
L20b	20	0	16,2	1,72	280	591	5,18
L50a	50	1	15,9	1,74	220	517	4,90
L50b	50	1	16,0	n.c.	218	480	5,46
L20c	20	3	16,3	1,73	270	648	5,63
L20d	20	3	16,2	1,72	250	535	5,85

4. CONCLUSION

L'objectif de ces travaux était de quantifier l'effet des variations de température monotone et cyclique sur les paramètres pressiométriques d'un limon compacté. Pour cela, un dispositif expérimental à l'échelle métrique a été spécifiquement développé. La diffusion de la chaleur dans le massif compacté a été suivie au cours de l'application des cycles thermiques.

Les résultats montrent une diminution de la pression limite P_l , et de la pression du fluage P_f lors d'une augmentation de température tandis que le module pressiométrique E_M évolue plus faiblement. Lors du retour à la température initiale (20°C), une quasi-réversibilité des évolutions est observée.

5. REFERENCES

- [AFN93] AFNOR. NF P94-051 - *Sols : reconnaissance et essais ; Détermination des limites d'Atterberg*. Ass. Fr. de Normalisation, Paris, France, p. 15, 1993.
- [AFN99a] AFNOR NF EN 933-9 - *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9 : Assessment of fines - Methylene blue test*. Ass. Fr. de Normalisation, Paris, France, p. 12, 1999a.
- [AFN99b] AFNOR NF P94-093 - *Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal-Essai Proctor Modifié*. Ass. Fr. de Normalisation, Paris, France, p. 18, 1999b.
- [AFN00] AFNOR NF P94-110-1 - *Sols : reconnaissance et essais Essai pressiométrique Ménard*. Ass. Fr. de Norm., Paris, France, p. 44, 2000.
- [BRA06] Brandl H. « Energy foundations and other thermo-active ground structures. » *Géotechnique*, vol. 56, 2006, 81–122.
- [CEK04] Cekerevac C., Laloui L. « Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. » *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*, vol. 28, 2004, 209–228.
- [ESL14] Eslami H. *Comportement Thermo-hydrromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques*. PhD Thesis, Université de lorraine, France, p. 214, 2014.
- [GRA01] Graham J., Tanaka N., Crilly T., Alfaro M. « Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays. » *Can. Geotech. J.*, vol. 38, 2001, 608–621.
- [GTR00] GTR, 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, p. 102.
- [HUE90] Hueckel T., Baldi G., « Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study. » *J. Geotech. Eng.*, vol. 116, 1990. 1778–1796.
- [MAR04] Marques M. « Viscous behaviour of St-Roch-de-l'Achigan clay, » *Quebec. Can. Geotech. J.*, vol. 38, 25–38. 2004.
- [PAH02] Pahud D. *Geothermal energy and heat storage*. SUPSI-DCT-LEEE Lab. di Energia, Ecologia, Economia Ed., 2002, 1-133.
- [AST99] Standard ASTM, D4719-00 *Standard test method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils*. ASTM Int., West Conshohocken, p. 9, 1999.
- [AST06] Standard ASTM, D2487 *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM Int., West Conshohocken, 2006.
- [TAN97] Tanaka N., Graham J., Crilly T.. « Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures. » *Eng. Geol.*, vol 47, 1997, p.339–350.
- [UCH09] Uchaipichat A., Khalili N. « Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt. » *Géotechnique*, vol. 59, 2009, p. 339–353.