HAL
open science

Influence de la variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques de sols compactés

S. Rosin-Paumier, Ahmed Boukelia, Hossein Eslami, Farimah Masrouri

To cite this version:

S. Rosin-Paumier, Ahmed Boukelia, Hossein Eslami, Farimah Masrouri. Influence de la variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques de sols compactés. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sep 2017, Seoul, Corée du Sud. hal-01817496

HAL Id: hal-01817496

https://hal.science/hal-01817496v1

Submitted on 18 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence de la variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques de sols compactés

Effect of temperature cyclic variation on pressuremeter parameters of compacted soils.

Sandrine Rosin-Paumier & Farimah Masrouri
LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, France, sandrine.rosin@univ-lorraine.fr

Ahmed Boukelia & Hossein Eslami
LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine & ESITC de 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. Le dimensionnement des capacités portantes des fondations profondes peut être basé sur les résultats d'essais pressiométriques ou pénétrométriques. Dans cette étude, des essais mini-pressiométriques ont été réalisés sur des massifs de sol compactés dans un modèle réduit thermo régulé. Un matériau argileux est soumis à un cycle de réchauffement (20-40-20°C) tandis qu'un matériau limoneux 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) sur chaque sol est mesurée tandis que l'évolution du module pressiométrique (E_M) est beaucoup plus faible. Dans ces intervalles de température, l'effet des cycles de chauffage est réversible. La normalisation des résultats montre une similarité des évolutions pour les deux matériaux.

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. For design purposes, mechanical parameters are usually obtained by pressuremeter in-situ tests. In the present study, mini-pressuremeter tests were conducted in laboratory to characterise compacted soils. The objective was to examine and quantify the influence of temperature cyclic changes on pressuremeter parameters of two different compacted soils. A heating-cooling cycle (20-40-20 °C) was applied to a clayey compacted soil, and three heating-cooling cycles (20-50 °C) were applied to a compacted loam. 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. These results were quite similar for both studied materials and the application of several thermal cycles did not modify the reversibility of the evolution.

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

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 (Rutqvist et al. 2002), l'enfouissement de câbles haute tension (De Lieto Vollaro et al. 2011) ou encore la mise en place de géostructures énergétiques (Pahud 2002, Brandl 2006). Pour cette dernière méthode, 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 (Tanaka et al. 1997; Graham et al. 2001; Cekerevac et Laloui 2004; Marques 2004; Uchaipichat et Khalili 2009). 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 argileux ou 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 (AFNOR 2000; Standard ASTM 1999). 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 développée afin de réaliser en laboratoire des essais mini-pressiométriques dans des sols compactés homogènes soumis à des variations de température (Eslami 2014). Ces essais sont réalisés sur des matériaux argileux et des matériaux limoneux et les résultats sont comparés entre eux.

2 MATERIAUX ET METHODES

Cette partie contient tout d'abord une caractérisation des matériaux étudiés puis une présentation des essais de laboratoire.

2.1 Caractérisation des matériaux

Les matériaux testés sont un matériau illitique et un limon. Les matériaux sont tout d'abord séchés, broyés puis tamisés à 2 mm avant d'être quartés et utilisés pour les différentes expérimentations. Le matériau illitique contient 77% d'illite, 10% de kaolinite, 12% de calcite et des traces de quartz et de feldspath. Le limon contient 80% de quartz, 7% de dolomite, 5% de calcite, 5% de matériaux argileux et 3% de feldspath. La

distribution de la taille des particules contenues dans le matériau illitique a été déterminée à l'aide d'un granulométre laser Mastersizer 2000© (AFNOR 2009). La granulométrie du limon est obtenue par tamisage et essais de sédimentométrie. Environ 85% des particules du matériau illitique sont de la classe des fines (inférieure à 0,002 mm) contre seulement 20% du limon. Les autres paramètres mesurés tels que les limites de liquidité (w_L), et de plasticité (w_P), l'indice de plasticité (IP) (AFNOR 1993) et la valeur au bleu de Méthylène MBV (AFNOR 1999a) sont présentés en Tableau 1.

Tableau 1, Paramètres de caractérisation des matériaux étudiés

Matériau	w_P %	w_L %	IP	MBV g/100g	w_{OPN} %	ρ_{dmax} Mg/m^3
Matériau illitique	34	65	31	5,41	31	1,43
Limon	21	27	6	1,85	16	1,81

La teneur en eau optimale (w_{OPN}) et la masse volumique sèche maximale (ρ_{dmax}) sont issus d'essais de compactage Proctor normal (Figure 1) (AFNOR, 1999b). Pour une même énergie de compactage, la masse volumique sèche du limon est significativement supérieure à celle du matériau illitique, en accord avec leurs caractéristiques granulométriques et minéralogiques. Selon la norme française pour la classification des sols le matériau illitique est classé comme A3 et le limon comme A1 (GTR, 2000). Selon la normalisation américaine (Standard ASTM, 2006), ces matériaux sont respectivement une argile lourde (MH) et une argile légère (CL).

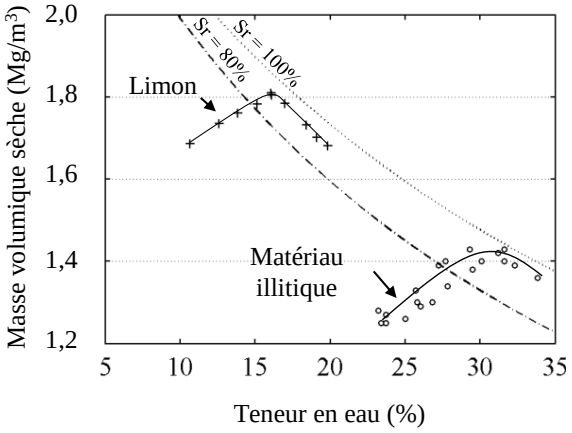

Figure 1, Courbes de compaction des matériaux étudiés.

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 (Figure 2a). 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 boite formée de plaques de polystyrène extrudé de 40 mm d'épaisseur pour renforcer l'isolation.

Les matériaux sous forme de poudre sont tout d'abord mélangés à de l'eau afin d'atteindre une teneur en eau cible. 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, 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 sollicitations thermiques appliquées par le thermorégulateur (Tableau 2).

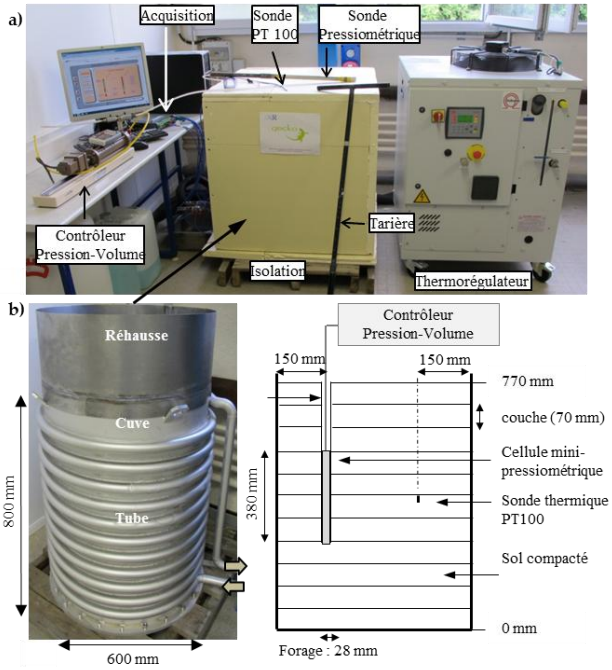

Figure 2, Cuve en modèle réduit et instrumentation associée

Tableau 1, Caractéristiques des essais.

Matériau	w %	ρ_d Mg/m^3	T_{min} °C	T_{max} °C	Nb cycles
Matériau illitique	30,5 ± 0,5	1,31 ± 0,01	20	40	1
Limon	16,1 ± 0,2	1,72 ± 0,02	20	50	3

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 de 380 mm de longueur et 280 mm de diamètre est insérée dans le forage. Le centre de la sonde est positionné à 400 mm de profondeur, 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 mm^3. 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 (AFNOR 2000).

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 : ±10%, P_f : ±5%, P_ℓ : ±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 illitique compacté puis dans le limon sont présentés successivement puis comparés dans cette partie.

3.1 Matériau illitique

La première série d'essais débute à 20°C, le sol est ensuite chauffé à 40 °C puis refroidi à 20 °C, la Figure 3 montre les variations de température enregistrées par la sonde thermique placée à 150 mm du bord du massif (Figure 2b). L'équilibre thermique est atteint après 65 h. Des mesures de teneur en eau et de masse volumique sèche sur les éprouvettes carottées dans le massif permettent de vérifier la stabilité de ces paramètres au cours de l'application des cycles.

Deux essais mini-pressiométriques sont réalisés à la fin de chaque palier de température : I20a, I20b, puis I40a, I40b et enfin I20c, I20d. L'essai I20a n'est pas exploitable du fait d'une légère fuite, les résultats des 5 autres essais sont représentés en figure 4.

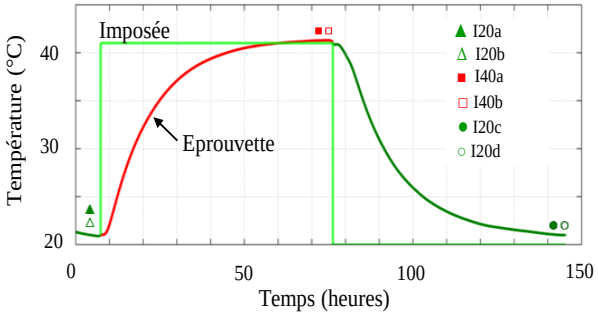

Figure 3, Variations de température imposées et mesurées dans le massif de matériau illitique compacté et chronologie des essais (I20a-b, I40a-b, I20c-d).

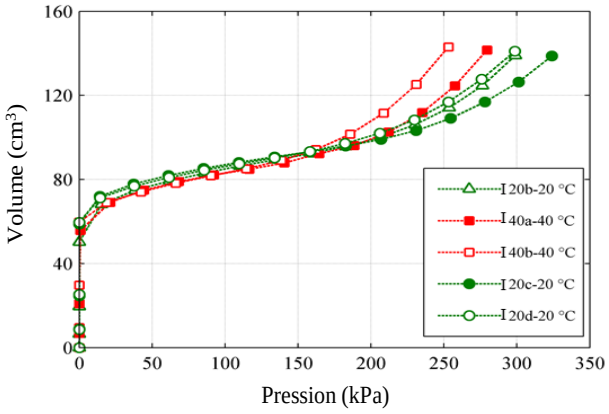

Figure 4, Courbes mini-pressiométriques obtenues dans le massif de matériau illitique compacté.

Les paramètres pressiométriques (E_M, P_ℓ et P_f) sont déterminés à partir de ces courbes (Tableau 3). Les valeurs de P_ℓ et P_f diminuent significativement entre les essais à 20°C et les essais à 40 °C, ce qui signifie que le matériau subit un radoucissement *(softening)* sous l'effet du réchauffement. En revanche, les pressions limites mesurées à 20°C en fin d'essai (20c-d) sont très proches des valeurs initiales (20b) ce qui montre une bonne réversibilité des évolutions. Une évolution similaire est observée pour la pression de fluage et dans une moindre mesure pour le module pressiométrique.

Tableau 3, Paramètres pressiométriques obtenus sur le matériau illitique compacté (20-40-20 °C).

Test	T °C	Cycle	w %	ρd Mg.m^{-3}	P_f kPa	P_ℓ kPa	E_M MPa
I20b	20	0	31	1,31	194	355	3,54
I40a	40	1	30,1	1,31	166	321	4,16
I40b	40	1	30,4	1,31	165	288	3,25
I20c	20	1	31,1	1,31	197	379	4,54
I20d	20	1	31,1	1,32	178	352	3,89

3.2 Limon

La seconde série d'essais débute à 20 °C, puis le sol est soumis à 3 cycles de chauffage-refroidissement dans un intervalle de 20° à 50°C. La Figure 5 montre les variations de températures enregistrées par la sonde thermique (150 mm du bord du massif), l'équilibre thermique est atteint après 30 h. Deux essais mini-pressiométriques sont réalisés à la fin du 1er, du 2nd et du dernier palier de température : L20a, L20b, puis L50a, L50b et enfin L20c, L20d (Figure 6).

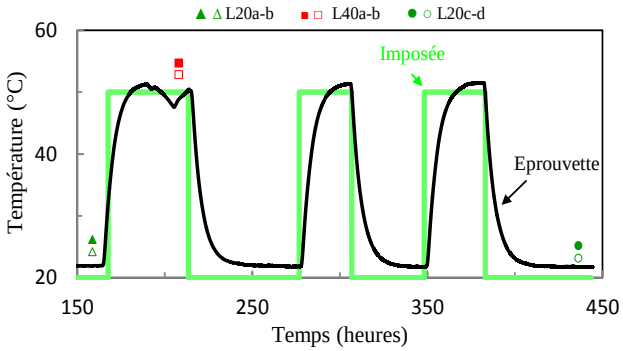

Figure 5, Variations de température imposée et mesurées dans le massif de matériau illitique compacté et chronologie des essais (L20a-b, L40a-b, L20c-d).

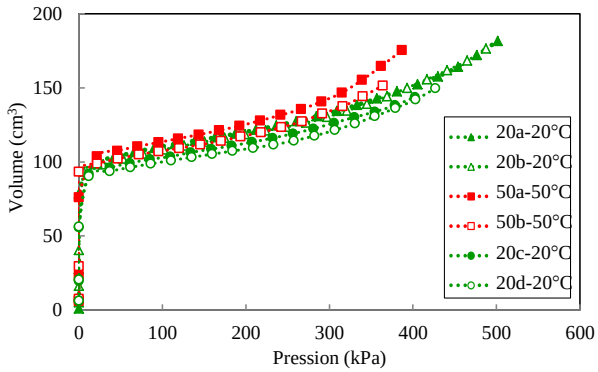

Figure 6, Courbes mini-pressiométriques obtenues dans le massif de limon compacté.

Tableau 4, Paramètres pressiométriques obtenus sur le limon compacté 3 cycles (20-50-20 °C).

Test	T °C	Cycle	w %	ρd 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

Les paramètres pressiométriques (Tableau 4) diminuent sensiblement avec l'augmentation de la température indiquant, comme pour le matériau illitique, un radoucissement du matériau. À la fin des cycles, les paramètres pressiométriques reviennent à leurs valeurs initiales, ce qui confirme la réversibilité des évolutions dans l'intervalle 20-50°C investigué pour ce matériau.

4 DISCUSSION

Les résultats obtenus sur le matériau illitique sont inférieurs à ceux obtenus sur le limon :

- P_f matériau illitique = 70 % P_f limon;
- P_ℓ matériau illitique = 57 % P_ℓ limon;
- E_M matériau illitique = 67 % E_M limon.

Pour pouvoir comparer l'effet de la température et des cycles thermiques sur les paramètres pressiométriques, les valeurs sont normalisées par rapport aux valeurs mesurées à 20 °C avant l'application des cycles thermiques.

Tableau 5, Valeurs normalisées des paramètres pressiométriques du matériau illitique et du limon.

Essai	T °C	Cycle	$P_{n.f}$	$P_{n.\ell}$	$E_{n.M}$
I20b	20	0	1,00	1,00	1,00
I40a-b	40	1	0,85	0,86	1,05
I20a-b	20	1	0,97	1,03	1,19
L20a-b	20	0	1,00	1,00	1,00
L50a-b	50	1	0,78	0,80	0,98
L20c-d	20	3	0,93	0,95	1,09

La pression de fluage P_f et les pressions limites P_ℓ des deux sols 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 Marques (2004), Cekerevac et Laloui (2004), Graham et al. (2001), Tanaka et al. (1997), et Hueckel et Baldi (1990).

Après les cycles de chauffage-refroidissement, les paramètres pressiométriques reviennent à leurs états initiaux (réversibilité du radoucissement). Le chauffage du matériau illitique entre 20 et 40 °C diminue la pression de fluage P_f de 15 % et la pression limite P_ℓ de 14 % et le refroidissement augmente les deux paramètres de 12% et 17 % respectivement. Pour le limon, le chauffage de 20 à 50°C diminue le P_f de 22 % et le P_ℓ de 20 % et le refroidissement à 20 °C augmente ces paramètres de 15 %.

La comparaison de ces deux matériaux a permis de remarquer que les variations des paramètres pressiométriques normalisés en fonction de la variation de la température est quasi-linéaire, et ce, malgré la différence de la minéralogie et des états initiaux. Selon cette tendance une simple régression linéaire pourrait être utilisée pour déterminer les valeurs des paramètres pressiométriques en fonction de la température :

$$P_f(T) = P_f(20) \times (1{,}1431 - 0{,}0072T) \text{ pour } 20 < \mathrm{T}(°\mathrm{C}) > 50$$

$$\mathrm{P}_\lambda(T) = \mathrm{P}_\lambda(20) \times (1{,}1335 - 0{,}068T) \text{ pour } 20 < \mathrm{T}(°\mathrm{C}) > 50$$

5 CONCLUSION

L'objectif de cet article était de quantifier l'effet d'une variation de température monotone ou cyclique sur les paramètres pressiométriques de différents sols compactés. 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 réversibilité des évolutions est observée. La comparaison des résultats obtenus pour le matériau argileux et le limon montre des évolutions du même ordre de grandeur pour ces deux sols malgré leurs différences minéralogiques et granulométriques.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient C. Fontaine du laboratoire IC2MP (Poitiers, France) pour les analyses minéralogiques et la région Lorraine pour son soutien.

7 REFERENCES

AFNOR 1993. NF P94-051 - Sols : reconnaissance et essais ; Détermination des limites d'Atterberg. Ass. Fr. de Normalisation, Paris, France, p. 15.

AFNOR 1999a. 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.

AFNOR 1999b. 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.

AFNOR 2000. NF P94-110-1 - Sols : reconnaissance et essais Essai pressiométrique Ménard. Ass. Fr. de Norm., Paris, France, p. 44.

AFNOR 2009. ISO 13320: Particle size analysis – Laser dif-fraction methods. Association Française de normalization, 60p.

Brandl H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* (56), 81–122.

Cekerevac C. et Laloui L. 2004. Experimental study of ther-mal effects on the mechanical behaviour of a clay. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* (28), 209–228.

De Lieto Vollaro R., Fontana L. et Vallati A., 2011. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils. *App. Th. Eng.* (31), 772–778.

Eslami H. 2014. Comportement Thermo-hydromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques. PhD Thesis, Université de lorraine, France, 214p.

Graham J., Tanaka N., Crilly T. et Alfaro M. 2001. Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays. *Can. Geotech. J.* (38), 608–621.

GTR, 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, p. 102.

Hueckel T. et Baldi G., 1990. Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study. *J. Geotech. Eng.* (116), 1778–1796.

Marques M. 2004. Viscous behaviour of St-Roch-de-l'Achigan clay, *Quebec. Can. Geotech.* J. (38), 25–38.

Pahud D. 2002. Geothermal energy and heat storage. SUPSI-DCT-LEEE Lab. di Energia, Ecologia, Economia Ed., 1-133.

Rutqvist J. et al. 2002. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow heat transfer. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sc.* (39), 429–442.

Standard ASTM 1999. D4719-00 Standard test method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils. ASTM Int., West Conshohocken, p. 9.

Standard ASTM, 2006. D2487 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Int., West Conshohocken.

Tanaka N., Graham J. et Crilly T. 1997. Stress-strain behav-iour of reconstituted illitic clay at different temperatures. *Eng. Geol.* (47), 339–350.

Uchaipichat A. et Khalili N. 2009. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt. *Géotechnique* (59), 339–353.