

Influence de la température sur le fluage d'une argile compactée

Temperature effect on the creep behaviour of a compacted clay

Nidal Jarad, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri

LEMTA – UMR 7563 CNRS, Université de Lorraine, France, Farimah.Masrouri@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ : L'étude de l'influence des variations de température sur le comportement au fluage des sols compactés argileux est indispensable pour la prédiction des tassements et des déformations des dispositifs d'enfouissement des déchets radioactifs à très long terme. Ce travail est axé sur la compressibilité et le fluage de deux sols compactés : une illite et un sol argileux gonflant. L'impact de la température et de la succion sur les caractéristiques de compactage a été évalué. Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de compression à vitesse de déformation constant (CRS) effectuée dans des cellules œdométriques à température contrôlée. Différentes valeurs de vitesse de déformation allant de 0,002%/min à 0,02%/min ont été appliquées, dans une gamme de température comprise entre 5 et 70°C. Les résultats ont montré que les indices de compression et de gonflement sont peu sensibles à une variation de la température, cette observation étant valable pour les deux sols compactés utilisés. L'augmentation de température entraîne en revanche une baisse de la pression de préconsolidation et une augmentation significative de l'indice de fluage.

ABSTRACT: The impact of temperature on the creep deformation of compacted clayey soils is a major issue in the prediction of the very long term settlement of soils used as engineered barriers for the disposal of high and long-life radioactive wastes at great depth. This paper is focused on the creep behavior of two compacted materials, illite and a swelling clayey soil, as a function of temperature and suction. Specific temperature controlled oedometric cells have been developed to perform constant rate of strain (CRS) consolidation tests under different strain rates (0.002%/min to 0.02%/min) within a temperature range of 5 to 70°C. Results indicated that the compression and swelling indices could be considered independent of temperature and strain rate with both materials. With temperature increase, the preconsolidation pressure decreased, and creep index increased. This can be related to a soil softening behavior under high temperatures.

MOTS CLÉS : Consolidation, fluage, température, coefficient de perméabilité, argile compactée.

1 INTRODUCTION

Dans un certain nombre de problématiques comme le stockage des déchets radioactifs, les sondes géothermiques, le stockage thermique dans des aquifères et l'enfouissement des câbles de haute tension, il est indispensable de prendre en compte l'impact de la température sur le comportement hydromécanique des sols fins. Pour cette raison, de nombreux travaux ont été effectués pour apprécier les effets de changement de température (Kholghifard et al., 2014).

Ainsi, la température peut avoir un effet important sur les paramètres de consolidation des sols argileux. Towhata et al. (1993), Boudali et al. (1994) et Marques et al. (2004) ont effectué des essais œdométriques thermo-régulés sur plusieurs argiles. Leurs résultats montrent une diminution de l'indice des vides sous l'effet de l'augmentation de la température. Tandis que Kholghifard et al. (2014) n'ont pas constaté d'effet de la température sur la variation de l'indice des vides. Burghignoli et al. (2000) expliquent que la variation de l'indice des vides est due essentiellement au réarrangement des grains, la variation de la température, l'histoire de chargement, l'histoire de la température et le temps de chauffage.

Certaines études montrent que le chauffage de sol diminue la contrainte de préconsolidation (Sultan et al., 2002; Moritz, 1995). Contrairement à Mon et al., (2013) qui ont observé une augmentation de la contrainte de préconsolidation avec l'augmentation de la température. La variation des propriétés initiales des éprouvettes telles que l'indice des vides initial et la structure de l'argile peuvent être des raisons de divergences des résultats.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la température sur les paramètres de consolidation à court et à long terme de deux sols argileux compactés. Dans des cellules œdométriques thermorégulées l'effet de la vitesse de déformation a été étudié pour des températures comprises entre 5 et 70 °C.

2 MATERIAUX ET METHODES

2.1 Matériaux

Deux argiles saturées et compactées ont été étudiées. L'argile A contient essentiellement de l'illite (77%), des proportions de calcite et de kaolinite de 12 et 10%, ainsi que des traces de quartz et de feldspath. L'illite est une argile non gonflante. L'argile B est un matériau composé de smectite et de kaolinite. Les limites d'Atterberg et les courbes de compactage Proctor pour les deux argiles ont été déterminées (tableau 1). Près de 85% des particules d'argile A ont un diamètre inférieur à 2 µm, et les 15% restants ont un diamètre compris entre 2 et 20 µm. Près de 72% des particules d'argile B ont un diamètre inférieur à 20 µm, et les 28 % restants ont un diamètre compris entre 2µm et 0,08 mm. Les argiles A et B sont classées comme A3, et A2 respectivement selon la classification du GTR (2000).

2.2 Préparation de l'éprouvette

Les sols ont été compactés sous charge statique à la teneur en eau optimale et la densité maximale en une seule couche pour former des éprouvettes de 71,4 mm de diamètre et de 20 mm de hauteur.

Table 1. Caractéristiques des argiles A et B.

Type de sol	Argile A	Argile B
Limite de liquidité (%)	65	43,5
Limite de plasticité (%)	34	19,7
Indice de plasticité (%)	31	23,8
Teneur en eau optimale (%)	31,3	16,5
Masse volumique sèche maximale (Mg/m ³)	1,43	1,74
Densité des grains	2,65	2,65

2.3 Dispositif expérimental

L'ensemble du système comprend le bâti de charge, la cellule œdométrique, le dispositif d'application de température. L'éprouvette est introduite dans la cellule œdométrique (figure1). La pression d'eau interstitielle est mesurée à la base de l'éprouvette. Le chargement externe est appliqué à l'aide d'un piston. Le dispositif de régulation thermique alimente le corps de la cellule œdométrique en liquide thermique via des tubes recouverts d'isolants. Un contrôleur pression-volume applique une pression interstitielle à la base de l'éprouvette.

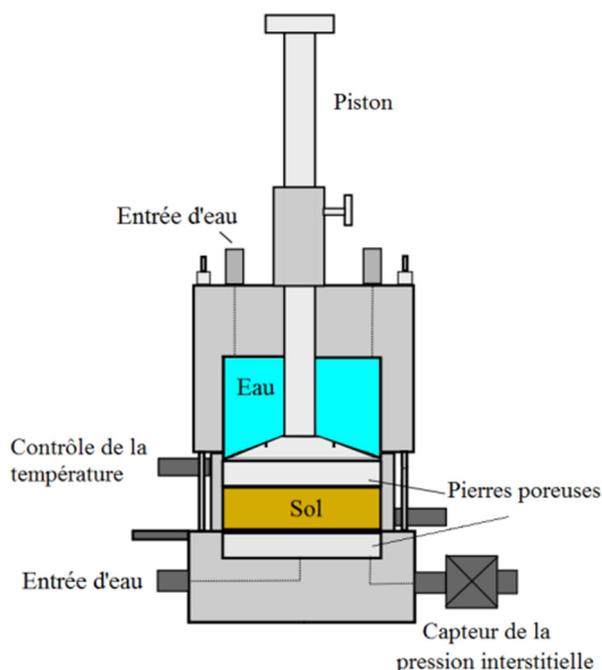


Figure 1. Détail de la cellule œdométrique.

2.4 Procédures expérimentales

Pour la saturation de l'éprouvette, une pression interstitielle de 10 kPa a été appliquée à sa base. Une fois la saturation achevée, l'éprouvette a été amenée à la température désirée en 48 h, puis l'essai CRS, consolidation à vitesse de déformation constante, a été effectué. Le drainage est autorisé uniquement par la surface supérieure de l'éprouvette. L'éprouvette a été chargée verticalement à partir de 10 kPa jusqu'à 5120 kPa à des vitesses de déformation de 0,002 %/min ; 0,01%/min ; et 0,02 %/min. Pour observer l'influence de la chaleur, l'argile "A" a été testée sous des températures de 20 ; 47,6 et 69,2°C à chaque vitesse de déformation, tandis que l'Argile "B" a été testée pour les températures la plus basse et la plus élevée (5,53 et 69,2° C) à chaque vitesse de déformation.

2.5 Interprétation des résultats

Une distribution parabolique de la pression interstitielle est considérée à travers l'échantillon au cours de l'essai CRS. La contrainte effective peut être évaluée comme suit (Wissa et al. 1971) :

$$\sigma = \sigma - \frac{2}{3}u \tag{1}$$

où σ est la contrainte totale, et u est la pression interstitielle à la base de l'éprouvette.

Les paramètres mesurés lors des essais isothermes de consolidation du CRS effectués à diverses températures ont été utilisés pour déterminer la conductivité hydraulique des sols k_t à des températures et des vitesses de déformation $\dot{\epsilon}_t$ différentes par la méthode indirecte (ASTM, 2008):

$$k_t = \frac{\dot{\epsilon}_t H_t H_0 \gamma_w}{2u} \cdot \frac{1}{10000} \tag{2}$$

où H_t est la hauteur à un moment spécifique t ; et H_0 est la hauteur initiale de l'éprouvette.

3 RESULTATS

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure 2. La figure 2a présente la déformation en fonction de la contrainte effective verticale sous différentes températures pour les essais CRS à une vitesse de déformation de 0,01%/min pour les deux matériaux. L'argile A montre une déformabilité croissante avec l'augmentation de la température, alors que la déformabilité de l'argile B, qui est moins plastique et plus dense, ne semble pas affectée par la variation de la température.

La figure 2b montre la surpression interstitielle en fonction de la contrainte effective verticale pour différentes températures. Pour l'argile A, par exemple, à une vitesse de déformation de 0,01%/min, la surpression interstitielle générée à 69,2°C est 2,5 fois plus petite qu'à température ambiante. Pour l'argile B, à la même vitesse de déformation, la surpression interstitielle générée à 5°C est 2,7 fois plus grande que celle générée à 69,2 °C. En général, à une vitesse de déformation donnée, plus la température est élevée, plus la surpression interstitielle générée à la base de l'éprouvette est petite.

3.1 Influence de la température sur l'indice de compression et l'indice de fluage

La figure 2c montre les valeurs des indices de compression et de fluage à différentes températures. Les valeurs des indices de compression sont comprises entre 0,188 et 0,213 pour l'argile A à des températures entre 20 et 70 °C, tandis que pour l'argile B, à des températures de 5 et 70 °C, elles varient entre 0,182 et 0,205. Les valeurs de l'indice de fluage, qui traduit le comportement à long terme des matériaux, à différentes températures sont comprises entre 0,012 et 0,0223 pour l'argile A, et entre 0,0061 et 0,0064 pour l'argile B. En conséquence, les indices de compression pour ces deux argiles pourraient être considérés comme indépendants de la température et de la vitesse de déformation. Les résultats indiquent que les indices de fluage des argiles A et B ne sont pas affectés par l'augmentation de la température.

3.2 Influence de la température sur la pression de préconsolidation

Pour les essais effectués sur les argiles A et B la pression de préconsolidation diminue quasi linéairement avec l'augmentation de la température. Cependant cette diminution est beaucoup moins marquée pour l'argile B (Figure 2d).

3.3 Influence de la température sur le coefficient de perméabilité

La figure 3(a) montre la variation du coefficient de perméabilité à la saturation et de la perméabilité intrinsèque avec la température pour les deux argiles. À une vitesse de déformation donnée et dans la gamme des températures testées, le coefficient de perméabilité de l'argile augmente avec l'augmentation de la température. Par exemple, pour l'argile B à une vitesse de déformation de 0,01%/min, le coefficient de perméabilité à 69,2 °C augmente jusqu'à environ 3 fois par rapport à celui obtenu à 5,53 °C. Ces résultats montrent que le coefficient de perméabilité dépend de la température, alors que la variation de la perméabilité intrinsèque avec la température reste négligeable. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs (Towhata et al., 1993; Tsutsumi & Tanaka, 2012).

3.4 Influence de la température sur le coefficient de consolidation et le coefficient de compressibilité volumique

Les résultats de la figure 3(b) montrent l'influence de la température sur le coefficient de consolidation (C_v) à différents taux de déformation à un indice de vide donné. Pour l'argile A, à 69,2 °C le C_v est de $1,36 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, cette valeur baisse à $5,05 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la température ambiante de 20°C. Pour l'argile B on constate également une baisse de la valeur de C_v de $1,04 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à 69,2 °C, à $3,36 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ à 5,53 °C. Ces résultats montrent qu'à un taux de déformation donné, le coefficient de consolidation augmente avec l'augmentation de la température. À des températures élevées, la diminution de la viscosité de l'eau interstitielle augmente le coefficient de consolidation au même titre que le coefficient de perméabilité.

La Figure 3 (b) montre également la variation du coefficient de compressibilité volumique (m_v) avec la température à différentes vitesses de déformation pour les argiles étudiées à un indice de vide donné. Par exemple, pour l'argile A à une vitesse de 0,01%/min, la valeur de m_v varie de $3,15 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$ à 20°C jusqu'à $4,44 \times 10^{-5}$ à 69,2°C. De même, pour l'argile B, m_v à 5,53°C est de $1,21 \times 10^{-4}$ et à 69,2°C il reste quasiment inchangé avec $1,26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$. Ces résultats indiquent que la variation du coefficient de compressibilité volumique avec la température reste négligeable.

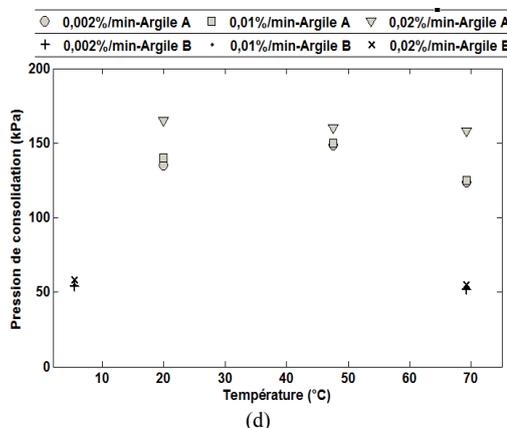
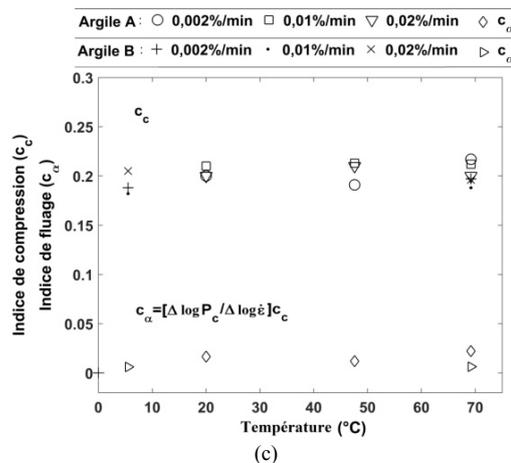
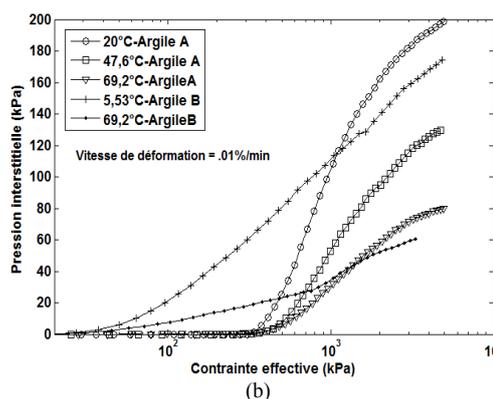
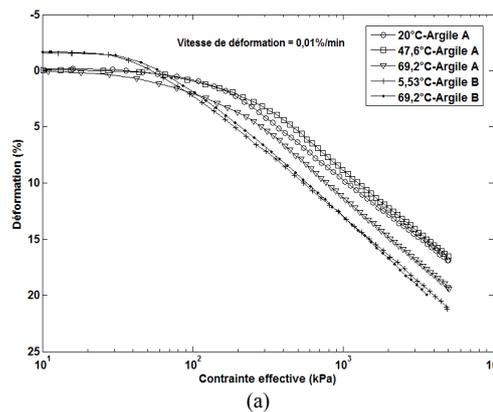


Figure 2. L'effet de la température sur (a) la déformation, (b) la surpression interstitielle, (c) l'indice de compression et de fluage, et (d) la pression de préconsolidation.

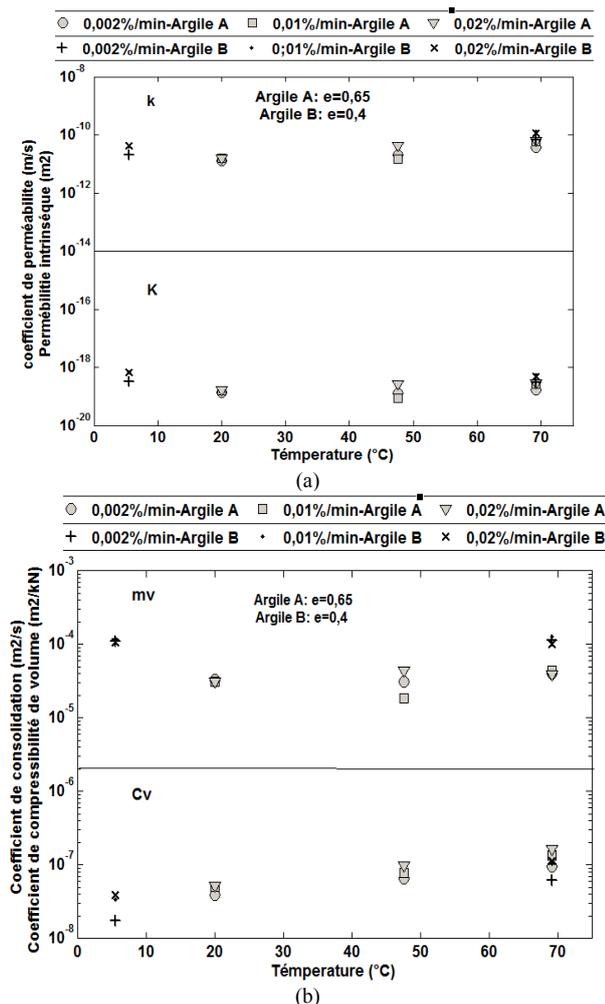


Figure 3. L'influence de la température sur (a) le coefficient de perméabilité et la perméabilité intrinsèque, (b) le coefficient de consolidation et le coefficient de compressibilité volumique.

4 CONCLUSION

Les résultats de cette étude expérimentale effectuée sur deux argiles compactées et saturées dans des cellules œdométriques thermorégulées pour étudier l'influence de la température dans la gamme de 5 à 69,2°C sur les caractéristiques de consolidation de l'argile, peuvent être résumés comme suit :

- La variation de l'indice de compression (Cc) avec la température et la vitesse de déformation est négligeable pour les deux sols étudiés.
- Les indices de fluage (C α) des argiles A et B ne sont pas affectés par l'augmentation de la température.
- La pression de préconsolidation diminue avec l'augmentation de la température. À des températures plus élevées, le domaine élastique diminue (radoucissement) en raison de la réduction de la viscosité.
- Le coefficient de perméabilité (k) à la saturation augmente avec la température, tandis que la perméabilité intrinsèque (K) est indépendante de la température. La réduction de la viscosité qui se produit lorsque les augmentations de température entraînent une conductivité hydraulique plus élevée.
- La déformation de l'argile A varie légèrement avec la température, tandis qu'elle est moins influencée par la

température pour l'argile B qui est plus dense. En conséquence, non seulement la nature, mais également la densité de l'argile a un effet sur son comportement thermo-hydro-mécanique.

- Le coefficient de consolidation (Cv) augmente avec la température en raison de l'augmentation du coefficient de perméabilité (k) avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, la variation du coefficient de compressibilité volumique (mv) peut être considérée comme négligeable.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASTM. 2008. D4186-06 *Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading* (American Society of Testing Materials). West Conshohocken, PA: ASTM International.

Boudali M., Leroueil S. and Srinivasa Murthy B.R. 1994. *Viscous behaviour of natural clays*. In: Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1, 411-416, New Delhi, India.

Burghignoli A., Desideri A. and Milizia S. 2000. *A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils*. Can. Geotech. J 37, 764-780.

Kholghifard M., Ahmad K., Ali N., Kassim A., Kalatehiari R. and Babakanpour F. 2014. *Temperature effect on compression and collapsibility of residual granitic soil*. GRADEVINAR 66(3), 1-10.

Mon E.E., Hamamoto K., Kawamoto S., Komatsu T. and Møldrup P. 2013. *Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer*. GSTF International Journal of Geological Sciences (JGS) 1(1).

Marques M. E., Leroueil S. and Almeida M.S. 2004. *Viscous behaviour of St Roch-de-l'Achigan clay*. Quebec, Can. Geotech. J., vol. 41, pp 25-38.

Moritz L. 1995. *Geotechnical properties of clay at elevated temperatures*. Swedish Geotechnical Institute (SGI), Linköping, Sweden.

Sultan N., Delage P. and Cui Y.J. 2002. *Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay*. Engineering Geology 64 (2-3), 135-145.

GTR. 2000. *Réalisation des remblais et des couches de forme* (p. 102). Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (In French).

Towhata I., Kuntiwattanakul P. and Seko I. 1993. *Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests*. Soils and Foundations 33(4), 170-183.

Tsutsumi, A., Tanaka, H., 2012. *Combined effects of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils*. Soils and Foundations 52, 207-215.

Wissa A.E.Z., Christian J.T., Davis E.H. and Heiberg S. 1971. *Consolidation at constant rate of strain*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 97(SM10), 1393-1413.