

Pressurisation thermique dans l'argile de Boom

Thermal pressurization in Boom clay

Monfared M.¹, Delage P., Sulem J., Mohajerani M.², Tang A.M.

Ecole des ponts ParisTech, Navier/CERMES, Marne la Vallée, France

¹ *now in BG Ingénieurs-conseils, Lausanne, Suisse*

² *now in CurisTech, Lyon, France*

RÉSUMÉ : La pressurisation thermique dans l'argile raide de Boom au sein de laquelle est installé le laboratoire souterrain de recherche du SCK-CEN en Belgique (- 223 m) a été étudiée dans une cellule triaxiale thermo-hydro-mécanique (THM) à cylindre creux spécialement conçue pour les argiles et argilites à faible perméabilité et caractérisée par un court chemin de drainage (10 mm). Un essai de pressurisation thermique a été réalisé sous contraintes initiales proches des contraintes in-situ en augmentant en conditions non drainées la température (de 25 à 65°C à 1°C/h) et en mesurant l'augmentation de pression correspondante. Le coefficient de pressurisation thermique obtenu décroît avec la température entre 0.04 et 0.02 MPa/°C. La phase de refroidissement drainée permet de déterminer une valeur du coefficient de dilatation thermique drainé compatible avec celle de Sultan et al. (2000).

ABSTRACT: The phenomenon of thermal pressurization has been investigated in the Boom clay, the potential host rock presently considered in Belgium for radioactive waste disposal at great depth. Samples from the Mol underground research laboratory (- 223 m) have been used. Tests were conducted in a new hollow cylinder triaxial apparatus specifically developed. This device allows a short drainage length (10 mm) favourable in testing low permeability clays and claystones. A thermal pressurization test was carried out by increasing temperature very slowly (from 25 to 65°C at 1°C/h) in undrained conditions while measuring the changes in pore pressure in a sample submitted to in-situ stress conditions. The thermal coefficient measured decreased from 0.04 to 0.02 MPa/°C, in accordance with literature data. The drained cooling phase carried out afterwards provided a value of the drained thermoelastic coefficient in good agreement with that obtained by Sultan et al. (2000).

MOTS-CLES : argile raide, pressurisation thermique, chauffage, stockage de déchets radioactifs.

KEYWORDS : stiff clay, thermal pressurization, heating, radioactive waste disposal

1 INTRODUCTION

La pressurisation thermique de l'eau interstitielle intervient en conditions non drainées ou faiblement drainées (sols peu perméables) dans les sols fins soumis à une élévation de température, du fait que le coefficient de dilatation thermique de l'eau est significativement plus fort que celui des minéraux. Le coefficient de dilatation thermique α_s du quartz et des minéraux argileux est de l'ordre de $3,4 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ (Palciauskas and Domenico 1982, McTigue 1986), celui de la calcite $1,38 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ (Fei 1995) alors que le coefficient α_w de l'eau vaut $27 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ (Spang 2002).

La pressurisation thermique revêt une importance particulière dans le cas du stockage profond des déchets radioactifs exothermiques à haute activité, où sa connaissance est importante pour le dimensionnement des ouvrages de stockage. En réduisant la contrainte effective, une pressurisation excessive peut engendrer des instabilités dans le champ proche au niveau des galeries. D'autres applications concernent l'impact des techniques de récupération non conventionnelles de pétrole (avec injection de vapeur par exemple) sur les roches imperméables de couverture.

La pressurisation thermique dans l'argile raide de Boom au sein de laquelle est installé le laboratoire souterrain de recherche du SCK-CEN en Belgique (- 223 m) a été étudiée dans une cellule triaxiale thermo-hydro-mécanique (THM) à cylindre creux (diamètres extérieur et intérieur respectivement de 100 et 60 mm, hauteur 70 mm) spécialement conçue pour les argiles et argilites à faible perméabilité (Monfared et al. 2011). Cette cellule est caractérisée par un court chemin de drainage (la demie épaisseur du cylindre) permettant des conditions de drainage satisfaisantes même dans des conditions de très faible perméabilité (10^{-12} m/s pour l'argile de Boom).

Un essai de pressurisation thermique a été réalisé sous contraintes initiales proches des contraintes in-situ (contrainte moyenne de 3.25 MPa et pression interstitielle de 1 MPa) en augmentant en conditions non drainées la température entre 25 et 65°C à un taux de 1°C/h et en mesurant l'augmentation de pression correspondante.

2 DISPOSITIF D'ESSAIS ET MATÉRIAU

2.1 Cellule triaxiale à cylindre creux

Le schéma de la cellule est présenté en Figure 1 (Monfared et al. 2011).

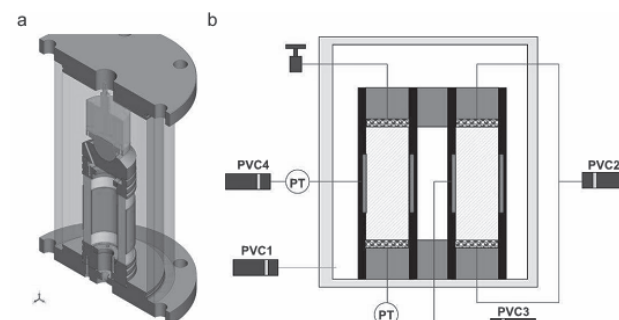


Figure 1. Cellule triaxiale à cylindre creux : a) schéma ; b) connexions aux contrôleurs pressions-volume et capteurs de pression.

Cette cellule permet l'application de conditions « triaxiales » classiques avec l'application d'une pression de confinement analogue à l'extérieur et à l'intérieur du cylindre creux.

Le diamètre extérieur est de 100 mm, l'intérieur de 60 mm et la hauteur de 70 mm. Grâce à des drainages latéraux sur les faces internes et externes de l'éprouvette, la longueur de drainage est réduite à 10 mm (demi épaisseur du cylindre creux), ce qui est essentiel pour assurer des conditions de drainage acceptables dans le cas des argiles et argilites de faible perméabilité (10^{-12} - 10^{-13} m/s) telles que celles considérées comme roches hôtes potentielles dans le stockage des déchets radioactifs.

Le chauffage est obtenu à l'aide d'une résistance électrique placée autour de la cellule de confinement (non représentée sur le Figure) avec un régulateur piloté par une mesure de la température du fluide de confinement (huile silicone), il permet une précision de 0,1°C. L'ensemble est d'isolé thermiquement de la température ambiante

Comme le montre également la Figure 1, l'éprouvette est reliée à 4 contrôleurs pression volume (PVC) pour l'application du confinement (extérieur et intérieur, PVC1), la contre-pression en haut et en bas (PVC2), la contre-pression sur la face interne (PVC3) et externe (PVC4). La pression interstitielle peut être mesurée au niveau de l'embase inférieure et de la face extérieure. L'ensemble de ces conduits et les diverses connexions électriques (LVDTs, température,...) rendent l'embase assez complexe, comme on peut le voir sur la Figure 2.

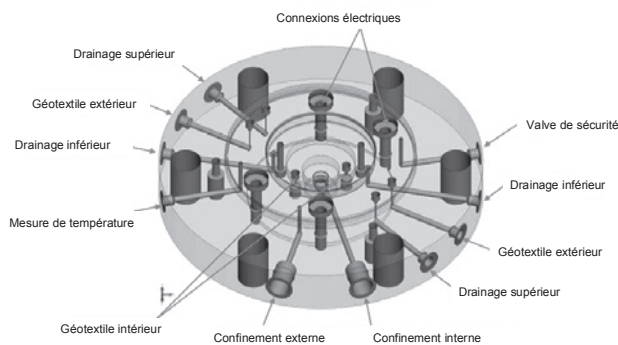


Figure 2. Schéma de l'embase de la cellule.

Les variations de volume sont suivies à l'aide de capteurs LVDT locaux permettant la mesure des déplacements axiaux et radiaux (Figure 3).

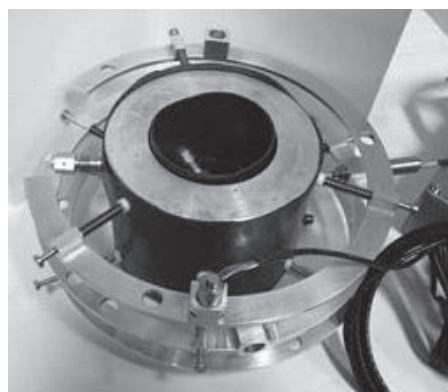


Figure 3. Mesures LVDT des déplacements locaux axiaux et radiaux

2.2 Matériau étudié

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes prélevées dans la galerie de l'essai thermique Praclay excavée dans l'argile de Boom à une profondeur de 223 m dans le laboratoire souterrain du SCK-CEN (Centre d'études nucléaires) de Mol en Belgique (Bernier et al. 2007). Les caractéristiques de l'argile de Boom

sont présentées au Tableau 1. Avec une certaine proportion de smectite (30%), l'argile de Boom présente des propriétés de gonflement.

Tableau 1. Caractéristiques de l'argile de Boom.

Porosité (%)	39
Teneur en eau (%)	25-30
Fraction argileuse (%)	55
Smectite (%)	30
Quartz (%)	25
Felspath, calcite, pyrite (%)	20

La taille de l'éprouvette s'est faite manuellement à la scie à bois à partir de carottes fournies de 100 mm de diamètre. Le cylindre intérieur a été taillé à l'aide d'une scie cloche à bois de 60 mm de diamètre. Pendant la taille, une membrane de néoprène était placée autour de l'éprouvette pour limiter le séchage.

3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Resaturation de l'éprouvette

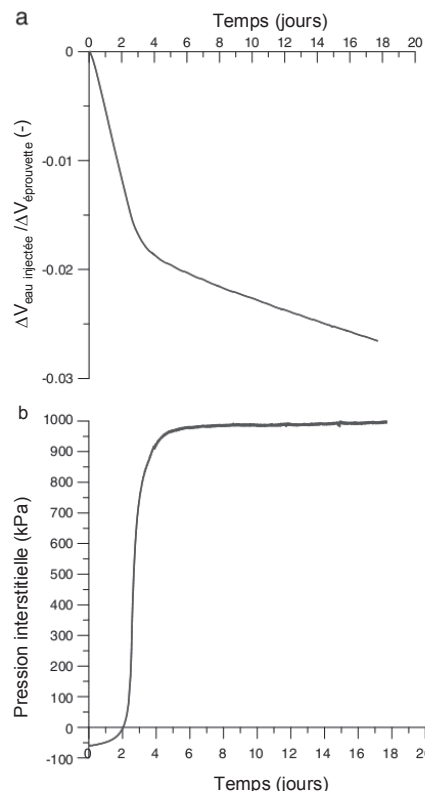


Figure 4. Resaturation de l'éprouvette d'argile de Boom

Afin de minimiser le gonflement (Delage et al. 2007), la saturation de l'éprouvette s'est faite sous contrainte effective en place (état proche de l'isotrope avec un K_0 de 0,9), définie par une contrainte moyenne p de 4,5 MPa et une pression interstitielle u de 2,25 MPa). La saturation s'est faite sous $p = 3,25$ MPa et $u = 1$ MPa en appliquant la contre-pression au sommet et à l'intérieur de l'éprouvette et en la mesurant à la base et sur la face extérieure avec les capteurs présentés en

Figure 1. La Figure 4 présente les variations d'échanges d'eau et de pression mesurées au cours du temps, montrant une bonne saturation après 4 jours à partir d'un état de succion dans l'éprouvette (pression initiale négative due au relâchement de contrainte lors de l'extraction). On observe que le volume injecté ne se stabilise pas malgré la saturation, signe d'une mobilisation de gonflement typique de ce type d'argile (0,5% en 15 jours).

3.2 Essai de chauffage non drainé

L'éprouvette a été soumise à une élévation de température à un taux de 1°C/h entre 25 et 65°C en conditions non drainées, toutes vannes fermées avec mesure de pression interstitielle à la base de l'éprouvette (Figure 1).

3.2.1 Coefficient de pressurisation thermique

La variation de pression interstitielle mesurée pendant cet essai est présentée en Figure 5. La comparaison avec les résultats obtenus par Horseman et al. (1987) avec un appareil triaxial classique est favorable. La pression interstitielle augmente de 1 MPa à 25°C à 2,1 MPa à 65°C.

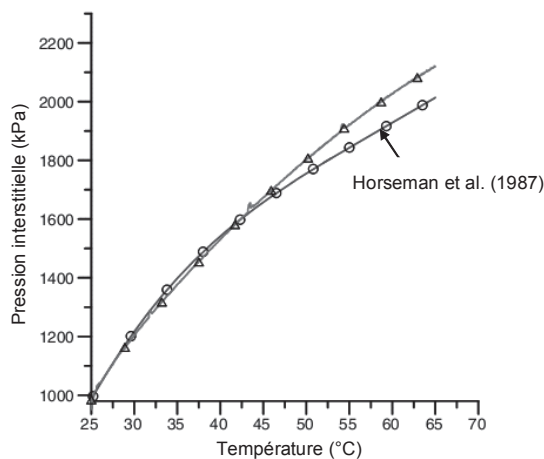


Figure 5. Pression interstitielle thermique, essai non drainé

Les réponses en pression interstitielle de la Figure 5 permettent de tracer les variations du coefficient de pressurisation thermique λ en fonction de la température (Figure 6) qui, correspond à la pente de la courbe.

On observe en Figure 6 que le coefficient de pressurisation thermique mesuré décroît avec la température de 0,04 MPa/°C à 30°C à 0,02 MPa/°C à 60°C. Ces valeurs sont de l'ordre de grandeur de celles trouvées en bibliographie, égales à 0,06 MPa/°C (d'après des calculs effectués par Vardoulakis 2002 à partir de données de Sultan et al. 2000) et à 0,013 MPa/°C d'après Lima et al. (2010). Une telle décroissance a également été observée par Mohajerani et al. (2011) sur l'argilite du Callovo-Oxfordien considérée par l'ANDRA comme une roche-hôte potentielle pour les déchets en France. Une de ses raisons est la variation avec la température du coefficient de pressurisation thermique de l'eau sous la contrainte considérée présentée en Figure 8 (Spang 2002).

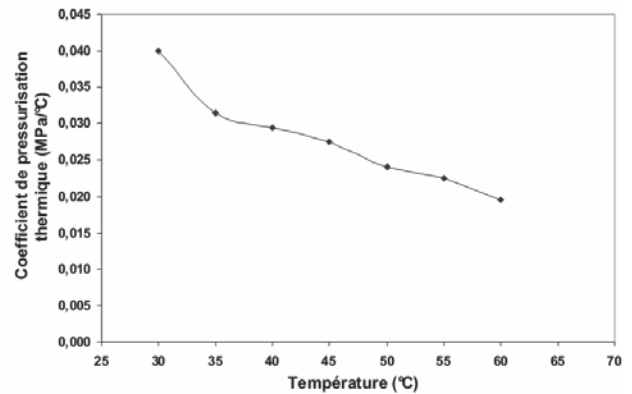


Figure 6. Variations du coefficient de pressurisation thermique avec la température.

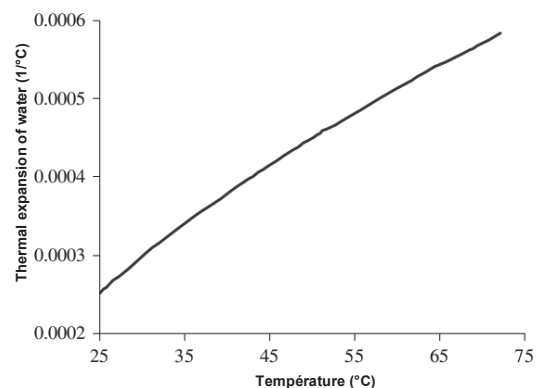


Figure 7. Variations du coefficient de pressurisation thermique de l'eau sous 4 MPa (Spang 2002)

La réponse en pression présentée en Figure 5 dépend en fait du couplage complexe de phénomènes thermiques (caractérisés par les coefficients de dilatation thermique α_i des phases solide et liquide) et mécaniques (caractérisés par les compressibilités des phases solide, liquide et de la compressibilité drainée de l'argile) sachant que ces paramètres varient également en fonction de la température (cf. Figure 7). Il convient de mentionner que la génération de surpressions thermiques pendant le chauffage non drainé engendre une diminution de la contrainte effective qui a pour conséquence un gonflement de nature mécanique.

En l'étape actuelle des travaux, on n'a pas encore d'éléments sur les variations avec la température de la compressibilité drainée de l'argile de Boom et les travaux se poursuivent dans ce sens pour une analyse plus détaillée.

3.2.2 Coefficient de dilatation thermique non drainée

La Figure 8 montre que l'échantillon s'est dilaté linéairement en conditions non drainées de 0,85%.

Cette valeur permet de déterminer le coefficient de dilatation thermique non drainé défini par la relation (1):

$$dV/V = \alpha_u dt \quad (1)$$

avec $\alpha_u = 3,47 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$

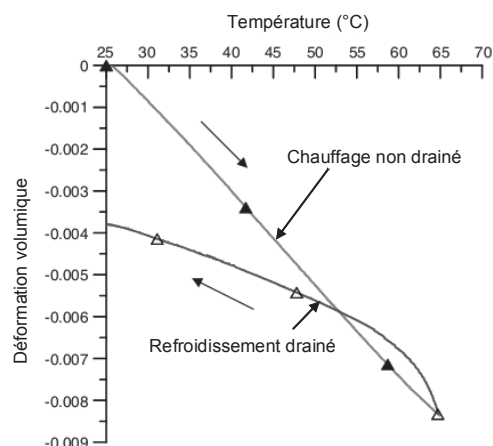


Figure 8. Variations volumiques lors des cycles en température.

3.3 Essai de refroidissement drainé

L'essai de chauffage non drainé a été suivi d'un refroidissement drainé sous les mêmes valeurs de contraintes constantes. Il a permis la dissipation des surpressions thermiques et s'est traduit par une contraction de l'éprouvette de 0,47% (Figure 8).

Il est possible que la courbure en début de refroidissement soit due à des adaptations des capteurs LVDT au changement de sens de déplacement. En utilisant la section linéaire observée entre 55 et 25°C, on obtient un coefficient de contraction thermoélastique (et donc d'expansion thermoélastique) $\alpha_{di} = 1,26 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ comparable à la valeur de $1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ trouvée par Sultan et al. (2002).

4 CONCLUSION

Dans le cadre de recherches sur le comportement thermique de l'argile de Boom, roche-hôte potentielle pour le stockage à grande profondeur des déchets nucléaires en Belgique, un essai de chauffage non drainé suivi par un refroidissement drainé a été conduit sur un appareil triaxial cylindrique creux à faible longueur de drainage destiné à l'investigation expérimentale des phénomènes thermiques dans les argiles et argilites peu perméables.

L'essai réalisé a permis d'identifier des paramètres importants dans l'étude et la modélisation du comportement thermique de l'argile dans le champ proche des galeries;

Une valeur décroissante du coefficient de pressurisation thermique comprise entre 0,004 et 0,002 MPa a été déterminée. Cette décroissance, due en partie aux variations du coefficient de dilatation thermique de l'eau sous la contrainte considérée, résulte également des variations couplées avec la température de divers paramètres (dilatation thermique, compressibilité des phases solide et liquide, compressibilité drainée) qui ne sont pas encore tous identifiés. Les valeurs des paramètres obtenus sont en accord et complètent ceux déjà obtenus dans la bibliographie.

Il en va de même de la valeur de dilatation thermoélastique obtenue après l'essai de refroidissement drainé.

5 REMERCIEMENTS

Les travaux décrits dans cet article proviennent de la thèse du premier auteur, co-financée par la Commission Européenne dans le cadre du projet européen TIMODAZ (F16W-CT-2007-036449, coordonné par Dr. Li Xiang-Ling d'EURIDICE) et l'Ecole des Ponts ParisTech. Nous remercions aussi Dr. Li pour avoir fourni les échantillons d'argile de Boom..

6 REFERENCES

- Delage P., Le T.T., Tang A.M., Cui Y.J., Li X.L. 2007. Suction effects in deep Boom clay block samples. *Géotechnique*, 57 (1), pp 239–244.
- Fei Y. 1995. Thermal expansion. In: Thomas JA (ed) *Mineral physics and crystallography: a handbook of physical constants*. American Geophysical Union Online Reference Shelf 2, 29–44.
- Horseman S.T., Winter M.G., Entwistle D.C. 1987. Geotechnical characterization of Boom clay in relation with the disposal of radioactive waste. Commission of European Communities, EUR 10987.
- Lima A., Romero E., Gens A., Muñoz J., Li X.L. 2010. Heating pulse tests under constant volume on Boom clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2 (2), 124-128.
- McTigue D.F. 1986. Thermoelastic response of fluid-saturated porous rock, *Journal of Geophysical Research*, 91(B9), 9533–9542.
- Mohajerani M., Delage P., Sulem J., Monfared M., Tang A.M., Gatmiri B. 2012. A laboratory investigation of thermally induced pore pressures in the Callovo-Oxfordian Claystone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 52, 112-121
- Monfared M., Delage P., Sulem J., Mohajerani M., Tang A.M. and De Laure E. 2011. A new hollow cylinder triaxial cell to study the behaviour of low permeable materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48 (4), 637-649.
- Palciauskas V.V., Domenico P. A. 1982. Characterization of drained and undrained response of thermally loaded repository rocks. *Water Resour. Res* 18(2), 281–290.
- Spang B. 2002. Excel Add-In for Properties of Water and Steam in SI-Units, <http://www.cheresources.com/staff.shtml>.
- Sultan N., Delage P. & Cui Y.J. 2002. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, Vol. 64, 2-3, 135-145.
- Vardoulakis I. 2002. Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides. *Géotechnique*, 52 (3), 157-171.