

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Etude expérimentale du comportement thermomécanique des pieux énergétiques dans l'argile

Experimental studies on the thermo-mechanical behavior of energy piles in clay

Anh Minh Tang, Neda Yavari, Van Tri Nguyen, Ghazi Hassen, Jean-Michel Pereira  
*Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, France, anhminh.tang@enpc.fr*

Roxana Vasilescu, Panagiotis Kotronis  
*GeM, Ecole Centrale de Nantes, France*

Pierre-Jean Housse  
*Pinto, France*

Fabien Szymkiewicz  
*GERS, Ifsttar, France*

**ABSTRACT:** The paper presents a study on the thermo-mechanical behavior of energy piles in clay using small-scale and full-scale tests. For the small-scale energy pile, developed in laboratory, thermo-mechanical tests were performed by applying a heating/cooling cycle to the pile under constant axial load. The results show pile head heave during heating and settlement during cooling. Irreversible settlement was observed after the thermal cycle. Tests performed with various axial loads show that the thermal irreversible settlement is greater under a higher axial load. For the full-scale energy pile, 0.4 m in diameter and 12 m long, a heating phase was applied during one month that allows increasing the pile's temperature from the initial value (13°C) to 33°C. The results show that soil temperature measured at 4 m (from the pile axis) was not influenced by this heating phase. The heat flux injected to the soil during this phase was about 700 W. This preliminary test was useful for the design of the future experiments where coupled thermo-mechanical loading program was planned for this project.

**RÉSUMÉ :** L'article présente une étude expérimentale sur le comportement thermomécanique des pieux énergétiques dans des terrains argileux. En modèle réduit, le comportement du pieu (en termes de tassement mesuré à la tête et distribution de contrainte le long du pieu) est observé quand il est soumis à un de chauffage/refroidissement sous une charge axiale constante appliquée à la tête. Les résultats montrent un soulèvement de la tête de pieu pendant le chauffage et un tassement pendant le refroidissement. Un tassement irréversible est observé après le cycle thermique. Les essais réalisés à différentes charges axiales montrent que le tassement irréversible thermique est plus important sous une charge axiale plus grande. A l'échelle réelle, sur un pieu énergétique de 0,40 m en diamètre et de 12 m en longueur, une phase de chauffage pendant un mois a été réalisée. Cette étape permet d'augmenter la température du pieu de 13°C à 33°C. Les résultats montrent que la température du sol mesurée à 4 m (à partir de l'axe du pieu) n'est pas influencée par le chauffage. Le flux de chaleur injecté dans le sol pendant cette phase est de 700 W. Cet essai préliminaire est nécessaire pour la conception des futures expérimentations où un programme de chargement thermo-mécanique est prévu dans ce projet.

**KEYWORDS:** energy pile, model tests, field-scale tests, soil/structure interaction, temperature effects, clay.

## 1 INTRODUCTION

Les pieux énergétiques sont souvent utilisés dans les fondations thermo-actives pour transférer les charges mécaniques des bâtiments vers le terrain et pour assurer l'échange thermique fondation/terrain par un système de pompe à chaleur (Brandl, 2006; De Moel et al., 2010). Les essais en vraie grandeur sur le comportement thermo-mécanique des pieux énergétiques montrent que la variation de la température du pieu modifie l'état de contraintes dans le pieu (Laloui et al., 2006; Bourne-Webb et al., 2012; Amatya et al., 2012; McCartney & Murphy, 2012; Murphy et al., 2014; Wang et al., 2014). Les essais en modèle réduit sur des pieux énergétiques installés dans des sols sableux montrent des résultats contradictoires : Wang et al. (2011) observe une diminution du frottement latéral suite à un chargement thermique tandis que Ng et al. (2015) trouve une augmentation. Les simulations numériques montrent que l'effet de la température sur le comportement mécanique d'un pieu énergétique est principalement lié à sa dilation/contraction thermique (Laloui & Nuth, 2006; Knellwolf et al., 2011; Yavari et al., 2014a).

Pour le cas des sols argileux, plusieurs études ont montré l'effet du changement de température sur ses propriétés mécaniques (Cekerevac & Laloui, 2004; Hong et al., 2013). D'ailleurs, une augmentation de température peut réduire légèrement la résistance de cisaillement à l'interface argile/béton (Stewart et al., 2014; Di Donna et al., 2016; Yavari et al., 2016a). En conséquence, à côté de la dilation/contraction thermique des pieux, d'autres phénomènes sont à considérer pour étudier le comportement thermo-mécanique des pieux énergétiques dans des sols argileux. Par exemple, dans un essai de traction d'un pieu en vraie grandeur, Akrouch et al. (2014) ont observé une augmentation du taux de fluage pendant l'échauffement d'un pieu installé dans une argile très plastique.

Dans ce travail, le comportement thermo-mécanique d'un pieu énergétique installé dans un sol argileux est étudié par un modèle réduit et un essai en vraie grandeur. En modèle réduit, des cycles thermiques sont réalisés sous différentes charges axiales et le déplacement de la tête de pieu est mesuré pendant ces chargements thermo-mécaniques. Pour l'essai en vraie grandeur, les résultats préliminaires sont montrés pour un échauffement réalisé pendant 22 jours.

## 2 ETUDE EN MODELE REDUIT

Plusieurs essais sont réalisés sur un modèle réduit développé au laboratoire. Ce dispositif a été utilisé pour réaliser des essais sur du sable sec (Yavari et al., 2014b). Dans ce travail, des essais sont réalisés avec un pieu installé dans l'argile compactée saturée. Plus de détails sont présentés dans Yavari et al., (2016b).

### 2.1 Description du modèle réduit

Le pieu modèle est composé d'un tube en aluminium creux avec un bout fermé (20 mm de diamètre extérieur) avec une longueur enterrée dans le sol de 600 mm. La surface du tube est couverte par une couche de sable de Fontainebleau (de taille moyenne de 0,23 mm) pour simuler la rugosité de la surface d'un pieu foré.

Pour le montage de l'essai, le pieu est d'abord fixé au milieu d'une cuve cylindrique (540 mm de diamètre intérieur, 850 mm de profondeur). L'argile Kaolin (avec une teneur en eau de 29%) est ensuite compactée par couche dans la cuve pour assurer une densité homogène de 1,45 Mg/m<sup>3</sup> (correspondant à un degré de saturation de 95%). Le massif de sol a été ensuite saturé avant la réalisation des essais. La charge axiale est appliquée sur la tête du pieu via le poids d'un réservoir d'eau et elle est mesurée par un capteur de force installé sur la tête du pieu. Le tassement du pieu est mesuré par un capteur de déplacement installé à la tête du pieu. La température du pieu est contrôlée par une circulation d'eau entre l'intérieur du pieu et un cryostat. Un capteur de température est installé dans le pieu pour suivre sa température réelle. (voir Figure 1).

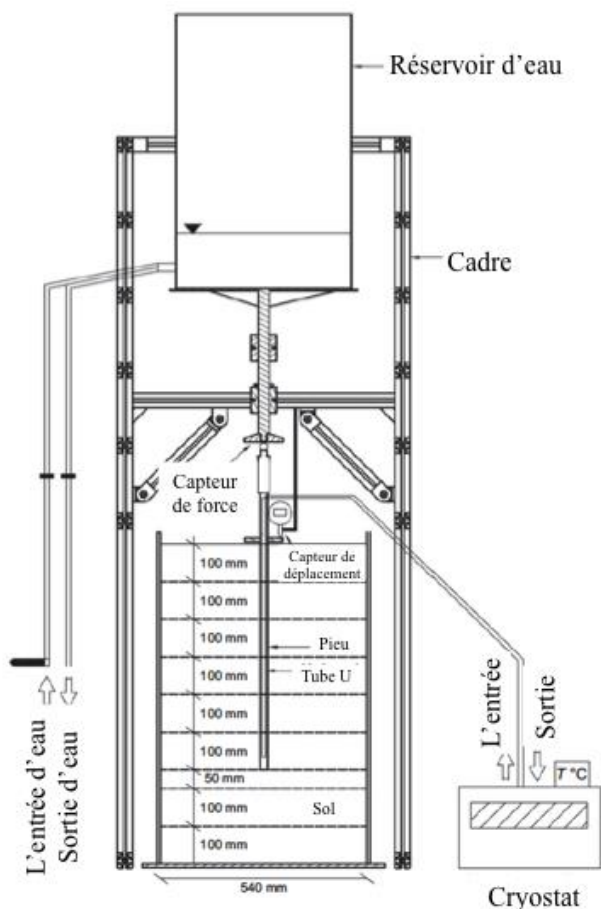


Figure 1. Modèle réduit d'un pieu énergétique.

### 2.2 Comportement sous chargement thermo-mécanique

Pour étudier le comportement du pieu sous chargement thermo-mécanique, la charge axiale est d'abord appliquée à la tête du pieu. Ensuite, la température du pieu, initialement égale à 22°C, est montée à 27°C. Ensuite, elle est diminuée à 22°C, puis 17°C, avant d'être remontée à 22°C. La durée de chaque étape est de 120 min.

La Figure 2 présente les résultats correspondant à ce cycle thermique sous une charge axiale de 100 N (correspondant à 20% de la charge limite qui est de 500 N obtenue au préalable par un essai de chargement mécanique jusqu'à la rupture du pieu). Après l'application de la charge mécanique qui engendre un tassement de 0,01 mm, on observe que l'augmentation de la température engendre un soulèvement de la tête du pieu. Le refroidissement engendre ensuite un tassement et l'échauffement final engendre un soulèvement. Et puis, on observe un soulèvement de la tête de pieu quand la charge mécanique est enlevée à la fin.

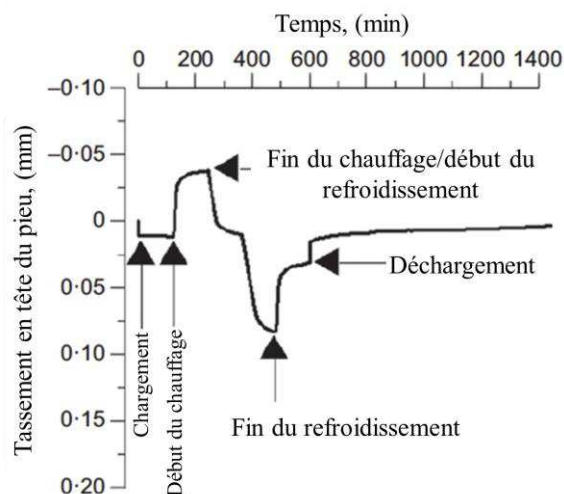


Figure 2. Tassement en tête en fonction du temps pendant un cycle de température sous charge axiale constante de 100 N (20% de la charge limite).

Sur la Figure 3, le tassement de la tête de pieu mesuré pendant le cycle thermique est tracé en fonction de la variation de température (pour les mêmes résultats présentés sur la Figure 2). De plus, on trace la courbe représentant la dilatation thermique d'un pieu en aluminium avec la pointe fixée et le pieu est libre de se dilater (ou se contracter) dans toutes les directions. Le coefficient de dilatation thermique linéaire du pieu est pris égal à  $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Cette représentation est similaire à celle proposée par Kalantidou et al. (2012) et Ng et al. (2014). Les résultats montrent que la relation entre le tassement à la tête du pieu et la courbe de dilatation thermique du pieu est très similaire. Par contre, après un cycle thermique, on peut observer un tassement irréversible de la tête du pieu.

Les essais similaires sont réalisés pour les charges axiales de 150 N, 200 N, 250 N, et 300 N. Sur la Figure 4, le tassement irréversible correspondant à un cycle thermique est tracé en fonction de la charge axiale. Sur cette figure, le tassement thermique irréversible est corrigé pour prendre compte du fluage qui a été observé au préalable lors d'un essai de chargement mécanique. Pour plus de détails, voir l'article Yavari et al. (2016b). Les résultats montrent que, sous une charge axiale de 20% à 60% de la charge limite, un cycle thermique peut engendrer un tassement irréversible de 0,02 mm à 0,07 mm (correspondant à 0,10% et 0,35% du diamètre du pieu, respectivement). Le tassement lié au fluage est négligeable par rapport au tassement irréversible lié au cycle

thermique. D'ailleurs, ce dernier est plus important sous une charge axiale plus grande.

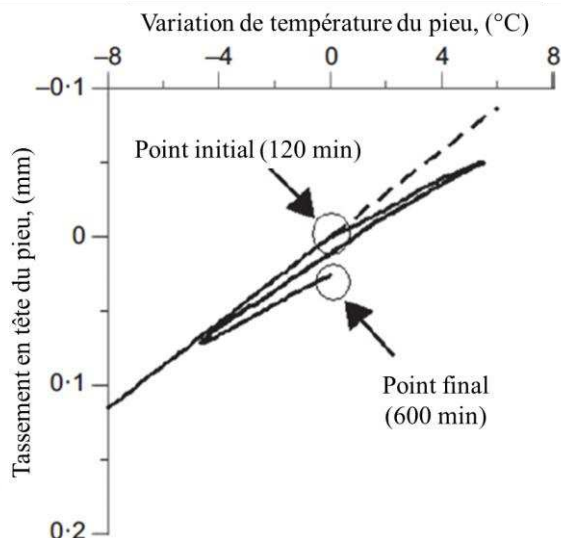


Figure 3. Tassement en tête en fonction de la variation de température pendant un cycle de température sous charge axiale constante de 100 N (20% de la charge limite).

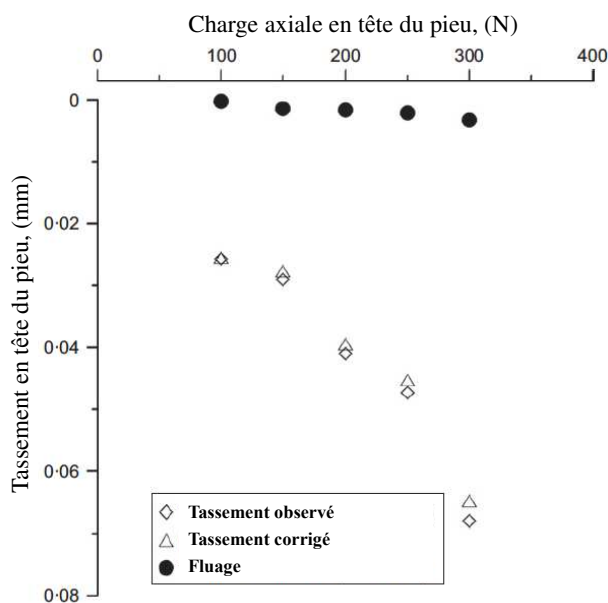


Figure 4. Tassement irréversible en tête lié à un cycle thermique en fonction de la charge axiale.

### 3 ETUDE EN VRAIE GRANDEUR

A fin de vérifier si les conclusions obtenues à travers des essais en modèle réduit peuvent être étendues aux ouvrages réels, deux pieux expérimentaux en vraie grandeur sont réalisés. Chaque pieu est équipé de tube échangeur de chaleur et de plusieurs capteurs de température. Dans la suite, on présente la description détaillée d'un seul pieu et les résultats préliminaires observés sur un essai de chauffage.

#### 3.1 Description du pieu expérimental

Le pieu foré (0,40 m de diamètre et 12 m de longueur) est réalisé dans un terrain argileux. Pendant la réalisation du pieu,

des tubes échangeurs de chaleur sont fixés dans la cage d'armature du pieu permettant un circuit en double-U. Neuf capteurs de température sont insérés à trois niveaux (1 m, 6 m, et 11 m de profondeur) et à trois distances à partir de l'axe (dans l'axe, à 0,10 m et à 0,20 m). Trois autres capteurs de température sont installés dans le terrain à 6 m de profondeur et à 0,5 m, 1 m et 4 m à partir de l'axe du pieu. Le tube échangeur de chaleur est connecté à un cryostat. Le débit du fluide caloporteur est mesuré par un débitmètre installé près du cryostat. Deux autres capteurs de température sont installés à l'entrée et à la sortie du cryostat pour mesurer la variation de la température du fluide lors du passage dans le pieu.

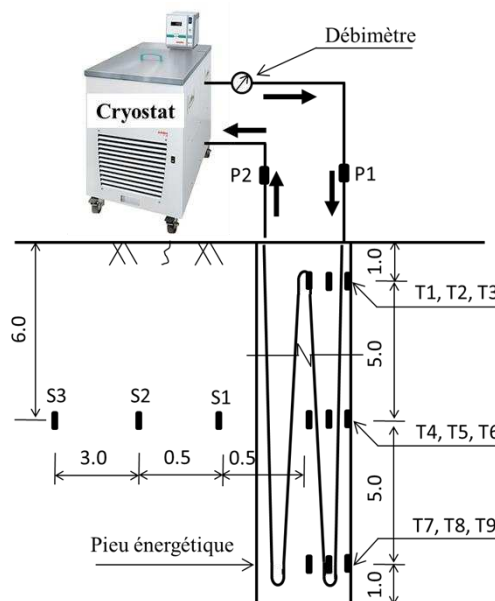


Figure 5. Description du pieu expérimental.

#### 3.2 Résultats préliminaires lors d'une phase d'échauffement

Un essai préliminaire d'échauffement est réalisé pour tester le fonctionnement du système. La variation de température dans le pieu et dans le terrain est présentée sur la Figure 6. Les mesures de température dans le pieu montre que la température du pieu est assez homogène pour chaque profondeur. Dans la Figure 6, on présente la température moyenne correspondant à la profondeur de 6 m (au milieu du pieu). On observe que la température du pieu a augmenté de la valeur initiale (13 °C) à 33 °C après 22 jours. La température du sol mesurée à 4 m à partir de l'axe du pieu (S3) n'est pas influencée par l'échauffement du pieu pendant cette période. La température du sol mesurée à 0,5 m et 1,0 m à partir de l'axe du pieu (à 6 m de profondeur) dépasse 20°C à la fin de cette phase.

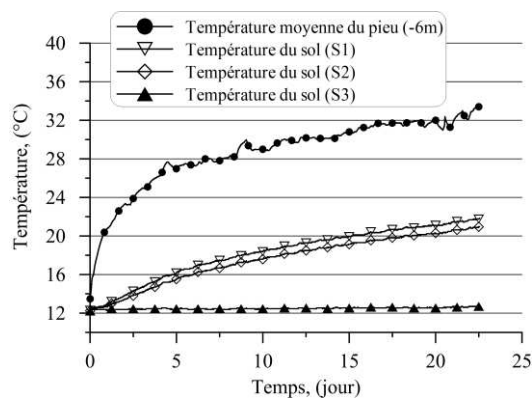


Figure 6. Variation de température avec le temps

Sur la Figure 7, les températures mesurées à l'entrée et à la sortie du pieu sont montrées. L'écart entre ces deux valeurs et le débit du fluide permet de calculer le flux de chaleur injecté dans le sol. Les résultats montrent un flux de l'ordre de 700 W pendant toute la période de cette expérimentation.

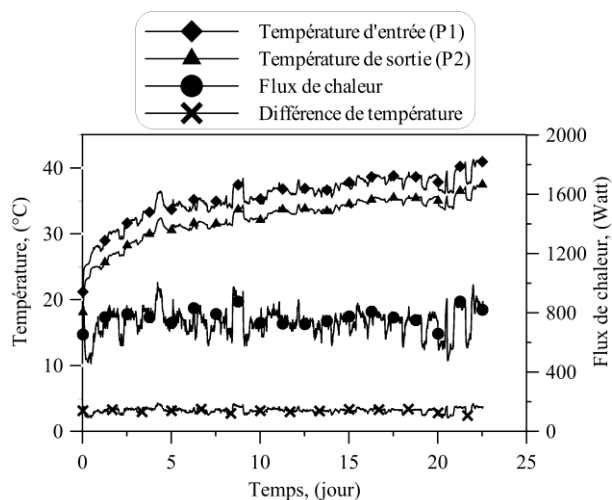


Figure 7. Flux de chaleur injecté dans le sol

Dans la prochaine étape des expérimentations en vraie grandeur, il est prévu d'équiper les deux pieux expérimentaux de capteurs de déplacement en tête et de fibres optique pour mesurer les déformations axiales le long du pieu. En suite, les pieux d'ancrage seront réalisés au tour de ces deux pieux expérimentaux permettant la mise en place d'un système de chargement axial à la tête des pieux. Les essais de chargement thermo-mécanique sont prévus pour ces pieux expérimentaux en vraie grandeur pour confirmer les résultats obtenus sur les essais en modèle réduit.

4 CONCLUSION

Le comportement thermo-mécanique d'un pieu énergétique a été étudié en modèle réduit et à grande échelle. Les essais en modèle réduit ont montré un tassement irréversible lorsque le pieu est subi à un cycle thermique sous une charge axiale constante. De plus, ce tassement est plus grand quand la charge est plus importante. Si le temps nécessaire pour une phase de chauffage est de 2h pour l'essai en modèle réduit, l'essai préliminaire sur le pieu expérimental en vraie grandeur montre qu'une durée de plus de 20 jours est nécessaire. Le chauffage du pieu n'influence pas la température du sol situé à 4 m à partir de l'axe du pieu.

5 REMERCIEMENTS

Les résultats présentés sont obtenus dans le cadre du projet ANR PINRJ (ANR-10-JCJC-0908) et d'une collaboration entre l'Ecole des Ponts ParisTech, l'Ifsttar, l'Ecole Centrale de Nantes, et l'entreprise Pinto.

6 REFERENCES

Akrouh, G. A., Sánchez, M., & Briaud, J.-L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta Geotechnica*, 9(3), 399-412.  
 Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503-519.  
 Bourne-Webb, P. J., Soga, K., & Amatya, B. (2012). A framework for understanding energy pile behaviour. *Géotechnique*, 166(2),

170-177.  
 Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.  
 Cekerevac, C., & Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics*, 28(3), 209-228.  
 De Moel, M., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., & Sun, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2683-2696.  
 Di Donna, A., Ferrari, A., & Laloui, L. (2016). Experimental investigations of the soil - concrete interface : physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(4), 659-672.  
 Hong, P. Y., Pereira, J. M., Tang, A. M., & Cui, Y. J. (2013). On some advanced thermo-mechanical models for saturated clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(17), 2952-2971.  
 Kalantidou, A., Tang, A. M., Pereira, J.-M., & Hassen, G. (2012). Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model. *Géotechnique*, 62(11), 1047-1051.  
 Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 137(10), 890-902.  
 Laloui, L., & Nuth, M. (2006). Numerical Modeling of some features of heat exchanger pile. In *Geotechnical Special Publication*, 153, 189-194.  
 Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763-781.  
 Mccartney, J. S., & Murphy, K. D. (2012). Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations. *DFI Journal: The Journal of the Deep Foundations Institute*, 6(2), 26-38.  
 Murphy, K. D., Mccartney, J. S., Henry, K. S., & Fellow, L. F. (2014). Thermo-Mechanical Characterization of a Full-Scale Energy Foundation. In *From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering Conference* (pp. 617-628). Atlanta, Georgia, United states.  
 Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., Laloui, L., & Liu, H. L. (2014). Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1045-1057.  
 Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., Laloui, L., & Liu, H. L. (2015). Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1045-1057.  
 Stewart, M. A., S. M., Mccartney, J. S. (2014). Centrifuge Modeling of Soil-Structure Interaction in Energy Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4), 04013044.  
 Wang, B., Bouazza, A., & Haberfield, C. (2011). Preliminary observations from laboratory scale model geothermal pile subjected to thermo-mechanical loading. In *Geo-Frontiers 2011 © ASCE 2011 430* (pp. 430-439).  
 Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Haberfield, C., Barry-macaulay, D., & Baycan, S. (2014). Posttemperature Effects on Shaft Capacity of a Full-Scale Geothermal Energy Pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014125.  
 Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2014a). A simple method for numerical modelling of mechanical behaviour of an energy pile. *Géotechnique Letters*, 4(2), 119-124.  
 Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J.-M., & Hassen, G. (2014b). Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica*, 9(3), 385-398.  
 Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2016a). Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(7), 1186-1194.  
 Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J., & Hassen, G. (2016b). Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay. *Géotechnique*, 66(11), 878-887.