

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES PIEUX ENERGETIQUES DANS DES CONDITIONS REELLES D'EXPLOITATION

ENERGY PILES BEHAVIOR IN REAL EXPLOITATION CONDITIONS

Roxana Vasilescu^{1,3}, Panagiotis Kotronis¹, Christophe Dano², Anne-Laure Fauchille¹ et Philippe Gotteland⁴

¹ Ecole Centrale de Nantes, GeM- MEO, 1 rue de la Noë 44000 Nantes, France.

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France.

³ Entreprise PINTO, 48 Rue Jules Verne, 35300, Fougères, France.

⁴ Fédération Nationale des Travaux Publics, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France.

RÉSUMÉ – Les pieux géothermiques sont des fondations profondes qui, en plus de reprendre les charges de la structure, fonctionnent aussi comme échangeurs de chaleur. Afin de mieux comprendre l'impact de l'exploitation géothermique de la fondation, une campagne expérimentale de mesures de déformation et de température en conditions réelles a été réalisée sur des pieux instrumentés sous une station d'épuration (STEP) à Sept-Sorts (Seine-et-Marne, France).

ABSTRACT – Energy piles are deep foundations which additionally to their structural role are also used as heat exchangers. In order to assess the impact of the geothermal activation of the foundation, an experimental campaign was carried on full scale instrumented energy piles under real exploitation conditions at Sept Sorts (Seine-et-Marne, France).

1. Introduction

Les pieux géothermiques sont des fondations profondes à double fonction: elles reprennent les charges de la structure et sont des échangeurs thermiques (Brandl 2006). La température du sol est généralement constante au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5m (Williams et Gold Veuillez 1977) et se situe autour de 13°C en France (Tang et al. 2017; Vasilescu et al. 2018). Pour profiter de cette énergie contenue dans le sol, les pieux sont équipés d'un système de tubes dans lequel la circulation, en circuit fermé, d'un fluide caloporteur permet l'échange thermique entre les pieux et le sol afin de chauffer ou rafraichir le bâtiment selon la saison. Au fil des saisons, ces pieux sont soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement entraînant respectivement des cycles de dilatation et de contraction, qui participent à l'augmentation de déplacements verticaux et la modification de la contrainte verticale dans les pieux (Laloui et al. 2003; Brandl 2006; Bourne-Webb et al. 2009; McCartney et Murphy 2012), de la résistance du sol (Bourne-webb et al. 2012) ou de manière plus générale à des modifications du comportement thermomécanique du sol (Di Donna et al. 2015; Di Donna and Laloui 2015; Yavari et al. 2016).

Malgré le nombre croissant d'études sur les pieux géothermiques ces dernières années, les retours d'expérience disponibles sur le comportement mécanique et thermique des géostructures thermiques en phase d'exploitation sont peu fréquents. Afin de mieux comprendre l'influence de chargements thermiques dus à l'activation géothermique sur le comportement des pieux, une campagne expérimentale de mesures de déformation et de

température à l'échelle réelle a été réalisée sur des pieux instrumentés sous une station d'épuration à Sept-Sorts (Seine-et-Marne, France).

2. Site de Sept Sorts

Dans le cadre de la restructuration de station d'épuration (STEP) de la commune de Sept Sorts, un système de fondations sur pieux géothermique a été prévu afin d'assurer le nécessaire en chauffage et rafraîchissement du bâtiment des bureaux de la STEP.

Dans le contexte particulier de ce projet, au regard des hypothèses géotechniques retenues et des descentes des charges, des inclusions rigides ont été réalisées sous le bâtiment de bureaux tandis que le système de pieux énergétiques supporte le bâtiment de prétraitement.

Le bâtiment de prétraitement a une empreinte au sol d'environ 15m x 40m et est fondé sur 100 pieux forés à la tarière creuse de diamètre 420mm et 9m de profondeur sous le radier. Ils sont équipés de cages d'armature 6HA14 sur toute la hauteur. Les caractéristiques mécaniques et thermiques des sols sous le bâtiment de prétraitement sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres géotechniques du sol sous le bâtiment de prétraitement.

Géologie	Pression limite nette pl^* (MPa)	Module Pressiométrique E_M (MPa)	Cohésion effective c' (kPa)	Angle de frottement ϕ (°)	Conductivité thermique λ (W/m/°C)	Capacité thermique du terrain C_s (J/Kg°C)
Alluvions modernes	0.5	5	0	30	0.6-1.8	1.8-2.0
Marne et caillasses altérées	1.0	11	5	25	1.5-2.5	2.2
Marne et caillasses	2.0	30	10	25	1.5-2.5	2.2
Calcaire grossier	>5	100	50	30	1.2-2.5	2.1-2.4

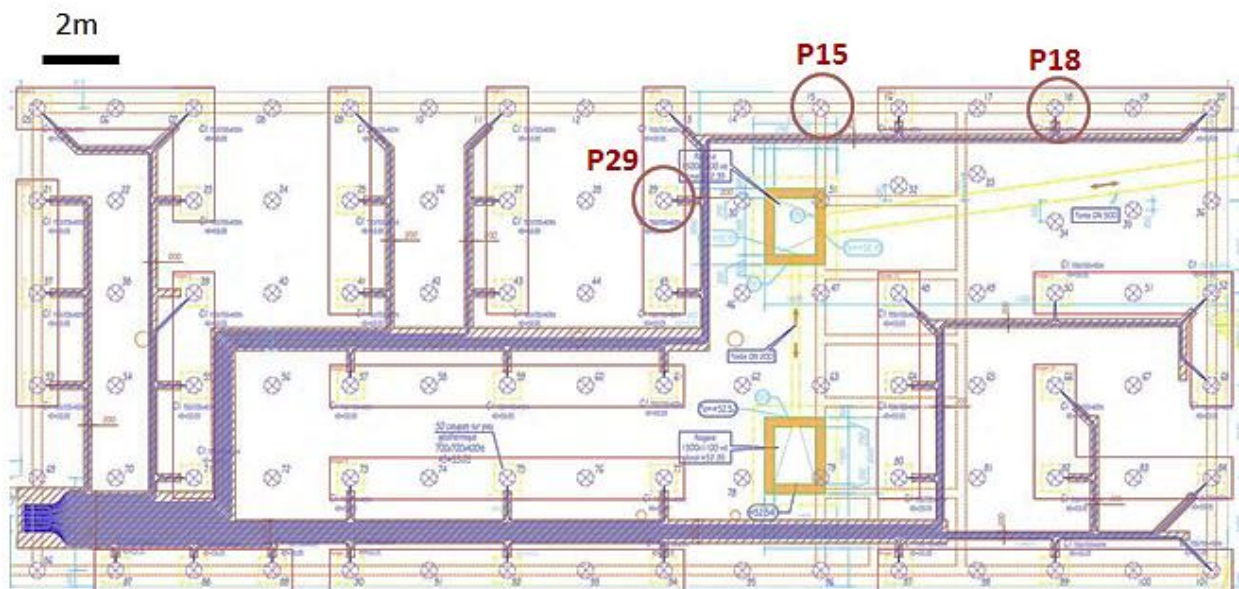


Figure 1. Localisation des pieux géothermiques P18 et P29 et du pieu P15 sur le plan du réseau géothermique (Vasilescu et al. 2018).

Quarante-cinq de ces pieux sont équipés de tubes en PEHD 25x3mm installés dans des configurations en W fixés sur les armatures (Figure 2). Les 45 pieux énergétiques ont été organisés en 15 groupes de 3 pieux installés en série (Figure 1) et reliés, par des réseaux horizontaux, à un collecteur dans la limite Est du bâtiment (Vasilescu et al. 2018). Des

tubes de diamètre 40mm ont été mis en place afin d'acheminer le fluide caloporteur, un mélange de 10% de glycol et 90% d'eau, du niveau des collecteurs jusqu'au local chaufferie du bâtiment d'exploitation.

Une pompe à chaleur (PAC) RWEYQ8T de Daikin a été installée afin d'assurer une puissance de 25kW en chauffage et 22.4kW en refroidissement pour assurer 100% des besoins en chauffage et climatisation du bâtiment de bureaux de 340m² de la STEP.

3. Instrumentation

Trois pieux (deux pieux énergétiques, P18 et P29 et un pieu conventionnel, P15) ont été instrumentés lors de la construction de ce bâtiment (Figure 1).

Les pieux géothermiques P29 et P18 ont été instrumentés par le CEREMA avec 7 extensomètres à corde vibrante, modèle ECV 150, fournis par Glotzl France Géotechnique. Les extensomètres, placés en position longitudinale par rapport à l'axe du pieu, ont été accrochés aux cages d'armature et noyés dans le béton frais lors du coulage (Figure 2). Chaque corde vibrante est équipée d'un capteur de température afin de pouvoir suivre l'évolution de la température au cours du temps. Le pieu P15, non géothermique, a également été instrumenté pour servir de référence aux deux pieux géothermiques, ainsi que pour évaluer l'effet de la température et des déformations de pieux géothermiques sur les autres pieux de fondation.

Tableau 2 : Spécifications des extensomètres à corde vibrante

Longueur de corde	150 mm
Gamme	3000 $\mu\text{m/m}$
Sensibilité	1 $\mu\text{m/m}$
Précision	0.1 % FS
Température d'utilisation	-20°C – 80°C
Coefficient de dilatation thermique	11.8 E10 ⁻⁶
Mesure de température	thermistance
Précision sur la mesure de température	1°C

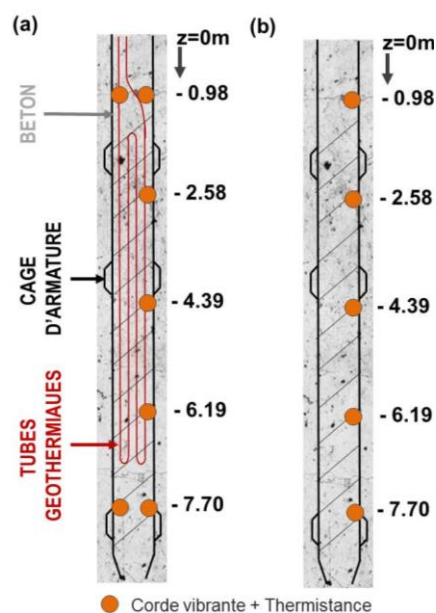


Figure 2. (a) Position des capteurs dans les pieux énergétiques P18 et P29 et (b) position des capteurs dans le pieu classique P15.

Des capteurs de température PT100 ont également été installés sur les circuits d'entrée et sortie du collecteur afin d'estimer la chaleur extraite avec la PAC. Un autre capteur PT100 a été utilisé pour enregistrer la température atmosphérique. Ces capteurs PT100 ont une précision de 0.3°C.

4. Résultats

Suite au phasage des travaux de rénovation de la STEP de Sept Sorts, le bâtiment de prétraitement a été finalisé et mis en service en octobre 2017 alors que le bâtiment de bureaux à climatiser a été finalisé en décembre 2018, ce qui a permis une année complète de monitoring du comportement de la fondation thermoactive avant son activation géothermique pour une comparaison précise de l'effet de l'exploitation géothermique de la fondation.

La pompe à chaleur a été mise en service en décembre 2017. Cependant, en raison de divers problèmes d'exploitation (réparation nécessaire sur les tubes de connexion entre les deux bâtiments, un dysfonctionnement sur une des pompes de circulation), la PAC a dû être arrêtée plusieurs fois jusqu'en juillet 2018. À partir de ce moment, le système de pompe à chaleur géothermique a été utilisé pour couvrir 100% des besoins du bâtiment en chauffage et en rafraîchissement sans autre incident.

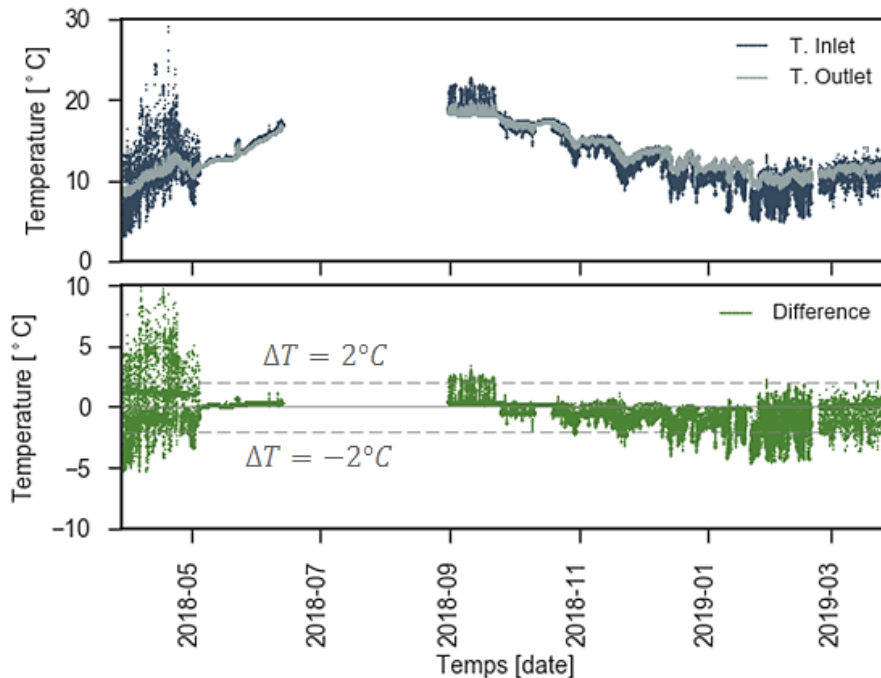


Figure 3. (a) Température du fluide caloporteur dans le circuit d'entrée ($T.inlet$) et de sortie ($T.outlet$) des réseaux géothermiques au niveau des manifolds, (b) Différence de température entre le circuit d'entrée et de sortie ($T.inlet - T.outlet$).

L'évolution de la température du fluide échangeur de chaleur à l'entrée ($T.inlet$) et sortie ($T.outlet$) des réseaux géothermiques est présentée sur la Figure 3. Afin d'extraire de la chaleur en période froide, le fluide caloporteur à une température plus basse que la température du sol est injecté dans le réseau géothermique. L'échange thermique se traduit par une température de sortie, $T.outlet$, plus élevée. Plus la différence entre la température d'entrée et de sortie est grande, plus la valeur de l'énergie extraite est grande. Brandl (2006) stipule qu'une différence de température de 2°C est suffisante pour le bon fonctionnement de la pompe à chaleur. La Figure 3 (b) indique une différence de température moyenne de 5°C, reflétant le potentiel d'un bon échange de chaleur. Cette valeur est plus importante pendant les périodes de température extrême. Vu que les

températures ont été remarquablement chaudes pour la saison (meteofrance.fr) en avril et mai 2018 des transitions fréquentes entre un fonctionnement de la pompe à chaleur en mode « chauffage » et « rafraîchissement » ont été observés.

Les déformations axiales observées ont été corrigées pour tenir compte de l'effet de la température sur les cordes vibrantes (1). Ensuite, l'effet des variations de la température sur la déformation des pieux a été déterminé à partir de la déformation axiale totale, en soustrayant la déformation axiale due au poids propre de la structure, supposée égale à la déformation observée au moment de la mise en service du bâtiment de prétraitement (2).

Les valeurs de déformation positives indiquent l'extension du pieu et les valeurs de déformation négatives correspondent à la compression du pieu.

$$\varepsilon_{obs} = \varepsilon + \alpha_s \Delta T \quad (1)$$

ou ε_{obs} représente la déformation observée, ε est la déformation obtenu à partir de la modification de la fréquence fondamentale de la corde vibrante (affiché par le système d'acquisition des données), α_s est le coefficient de dilatation thermique de la corde vibrante (Tableau 2) et ΔT est la variation de la température.

$$\varepsilon_{Th} = \varepsilon_{obs} - \varepsilon_M \quad (2)$$

ou ε_{Th} représente la déformation axiale due aux variations de température, ε_{obs} est la déformation observée et ε_M la déformation axiale due au poids propre de la structure.

Les résultats après la première année « non-géothermique » (Figure 4) confirme des constats déjà signalés dans la littérature: une variation de température peut être enregistrée dans les premiers 5m de sol, mais, au-dessous de ce niveau, la température se stabilise et reste constante autour de 13°C. La mise en service de la pompe à chaleur dans ce cas engendre une modification du profil de température le long de pieu (Figure 4) : en raison de la circulation du fluide caloporteur la température est constante sur la longueur du pieu équipé des réseaux géothermiques (tubes géothermiques installés sur 7m). La variation de la température dans le pieu est par contre inférieure à 10°C, et a donc le même ordre de grandeur que la variation de température dans les pieux avant l'activation géothermique, due à la variation saisonnière de la température de l'air.

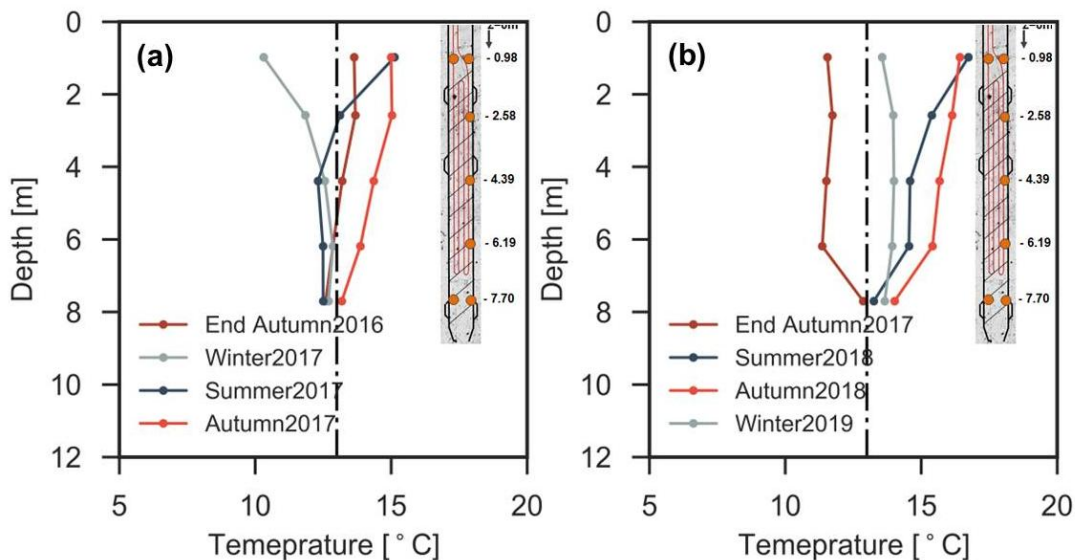


Figure 4. Evolution de la température avec la profondeur selon les saisons pour le pieu P18 : (a) Avant l'activation géothermique, (b) Après l'activation géothermique.

La même tendance peut être observée pour les valeurs de déformation des pieux (Figure 5). Des déformations dues à des changements saisonniers de température de l'ordre de $\pm 40\mu\text{m}/\text{m}$ qui diminuent avec la profondeur peuvent être observées avant l'activation géothermique de la fondation alors que pendant l'année des observations après la mise en service de la pompe à chaleur, la totalité de la longueur du pieu équipé de tubes géothermiques subit des déformations comprises entre $\pm 25\mu\text{m}/\text{m}$. Ces valeurs de déformation sont cependant très faibles et restent bien au-dessous de la limite élastique du béton ($\sim 460\mu\text{m}/\text{m}$ pour un béton C30/37).

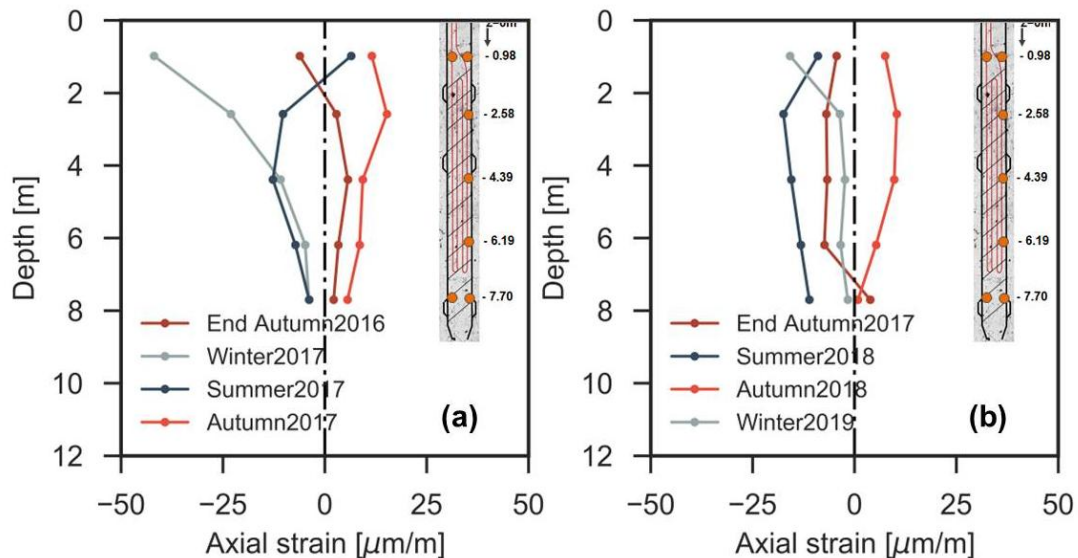


Figure 5. Evolution de la déformation avec la profondeur selon les saisons pour le pieu P29 : (a) Avant l'activation géothermique, (b) Après l'activation géothermique.

5. Conclusions et perspectives

Afin de mieux comprendre l'influence de chargements thermiques cycliques sur le comportement des pieux et du sol alentour, une campagne expérimentale de mesures de déformation et température à l'échelle 1 a été réalisée sur des pieux instrumentés sous une station d'épuration à Sept-Sorts. Pour ce projet 45 des 100 pieux de fondations ont été équipés de réseaux géothermiques afin d'assurer 100% du besoin en chauffage et refroidissement du bâtiment des bureaux de la STEP (environ 350m²). L'évolution des déformations et des températures de trois pieux (deux pieux géothermiques et un pieu classique) a été suivie pendant un an avant la mise en service de la pompe à chaleur et pendant plus de un an et demi après l'activation géothermique afin de quantifier l'impact de l'exploitation géothermique de la fondation. Les résultats montrent que les valeurs de déformation des pieux due à la géothermie ont le même ordre de grandeur que les valeurs de déformation due aux variations saisonnières de température dans le sol mais leur distribution est plus uniforme le long de la partie chauffée / refroidie du pieu. Ces déformations sont faibles mais non-négligeables et varient entre $-50\mu\text{m}/\text{m}$ (compression) et $30\mu\text{m}/\text{m}$ (extension) dans la période étudiée.

6. Références

- Bourne-Webb PJ, Amatya B, Soga K, Amis T, Davidson C, Payne P (2009) Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique* 59:237–248 . doi: 10.1680/geot.2009.59.3.237
- Bourne-webb PJPJ, Soga K, Amatya BBL (2012) A framework for understanding energy pile behaviour. *Geotech Eng* 166:170–177 . doi: 10.1680/geng.10.00098

- Brandl H (2006) Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56:81–122 . doi: 10.1680/geot.2006.56.2.81
- Di Donna A, Ferrari A, Laloui L (2015) Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms , cyclic mobilisation and behaviour at different temperatures. *Can Geotech J* 14:1–44 . doi: 10.1139/cgj-2015-0294
- Di Donna A, Laloui L (2015) Response of soil subjected to thermal cyclic loading: Experimental and constitutive study. *Eng Geol* 190:65–76 . doi: 10.1016/j.enggeo.2015.03.003
- Laloui L, Moreni M, Vulliet L (2003) Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Can Geotech J* 40:388–402 . doi: 10.1139/t02-117
- McCartney JS, Murphy KD (2012) Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations (DFI Young Professor Paper Competition 2012). *DFI J - J Deep Found Inst* 6:26–38 . doi: 10.1179/dfi.2012.008
- Tang AM, Yavari N, Nguyen VT, Hassen G, Pereira J-M, Vasilescu R, Kotronis P, Housse P-J, Szymkiewicz F (2017) Etude expérimentale du comportement thermomécanique des pieux énergétiques dans l'argile. In: *ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*
- Vasilescu R, Fauchille A, Dano C, Kotronis P, Manirakiza R, Gotteland P (2018) Influence de la température a l'interface sol/béton dans les pieux géothermiques : essais de faisabilité in situ et en laboratoire. *Journées Natl Géotechnique Géologie l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018* 1–7
- Williams GP, Gold Veuillez LW (1977) Les températures du sol. *Dig la Constr au Canada*
- Yavari N, Tang AM, Pereira JM, Hassen G (2016) Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil – structure interface. *Can Geotech J* 53:1186–1194 . doi: 10.1139/cgj-2015-0355