

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE A L'INTERFACE SOL/BETON DANS LES PIEUX GEOTHERMIQUES : ESSAIS DE FAISABILITE IN SITU ET EN LABORATOIRE

INFLUENCE OF SOIL/CONCRETE INTERFACE TEMPERATURE IN GEOTHERMAL PILES: PRELIMINARY RESULTS AT THE FIELD SCALE AND THE LABORATORY SCALE

Roxana Vasilescu^{1,3}, Anne-Laure Fauchille¹, Christophe Dano², Panagiotis Kotronis¹, Richard Manirakiza³ 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, France.

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

⁴ Fédération Nationale des Travaux Publics, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France 2

RÉSUMÉ – Cette étude montre les résultats préliminaires d'essais de faisabilité réalisés sur des pieux géothermiques à l'échelle 1 et en laboratoire, sur l'influence de la température sur les déformations de sols naturels à l'interface sol/béton.

ABSTRACT – This study focuses on the influence of temperature changes at the soil/concrete interface on soil deformation, applied to geothermal piles. Preliminary results of feasibility tests are presented at the field scale and the laboratory scale.

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). Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5m (Williams & Gold Veuillez 1977) et se situent autour de 13°C en France. 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 refroidir le bâtiment selon la saison. Malgré le fait que cette technologie existe depuis les années 80, à ce jour le retour d'expérience sur le comportement thermomécanique et l'effet de cycles thermiques sur l'interface sol-structure à long terme est relativement limité. Au cours du réchauffement et du refroidissement, la fondation se dilate ou se contracte en interaction avec le sol et le bâtiment, ce qui peut engendrer des déplacements verticaux et ou la modification de la contrainte verticale dans les pieux (Brandl 2006; Laloui et al. 2003; Bourne-Webb et al. 2015; McCartney & Murphy 2012), de la résistance du sol (Amatya et al. 2012) ou de manière plus générale du comportement du sol (Di Donna et al. 2015; Yavari et al. 2016; Di Donna & Laloui 2015).

Afin de mieux comprendre l'influence de chargements thermiques cycliques sur le comportement des pieux et du sol alentour, une première 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 (Seine-et-Marne, France). Une seconde campagne a été réalisée en laboratoire pour étudier le comportement en cisaillement du sol à l'interface sol/béton lors de cycles de température contrôlée. Les résultats expérimentaux préliminaires sont présentés.

2. Suivi de températures et déformations à l'échelle réelle

2.1 Site de Sept Sorts

Le bâtiment de prétraitement de la station d'épuration (STEP) de Septs-Sorts a une empreinte au sol d'environ 15m x 40m et il est fondé sur 100 pieux de diamètre 420mm et 9m de profondeur réalisés à la tarière creuse, dont 45 sont des pieux énergétiques. 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 : Localisation de pieux géothermiques P18 et P29 et du pieu P15 sur le plan de réseaux géothermiques).

L'installation géothermique Figure 1 : Localisation de pieux géothermiques P18 et P29 et du pieu P15 sur le plan de réseaux géothermiques est utilisée pour chauffer le bâtiment d'exploitation de la STEP, situé environ 15m plus loin.

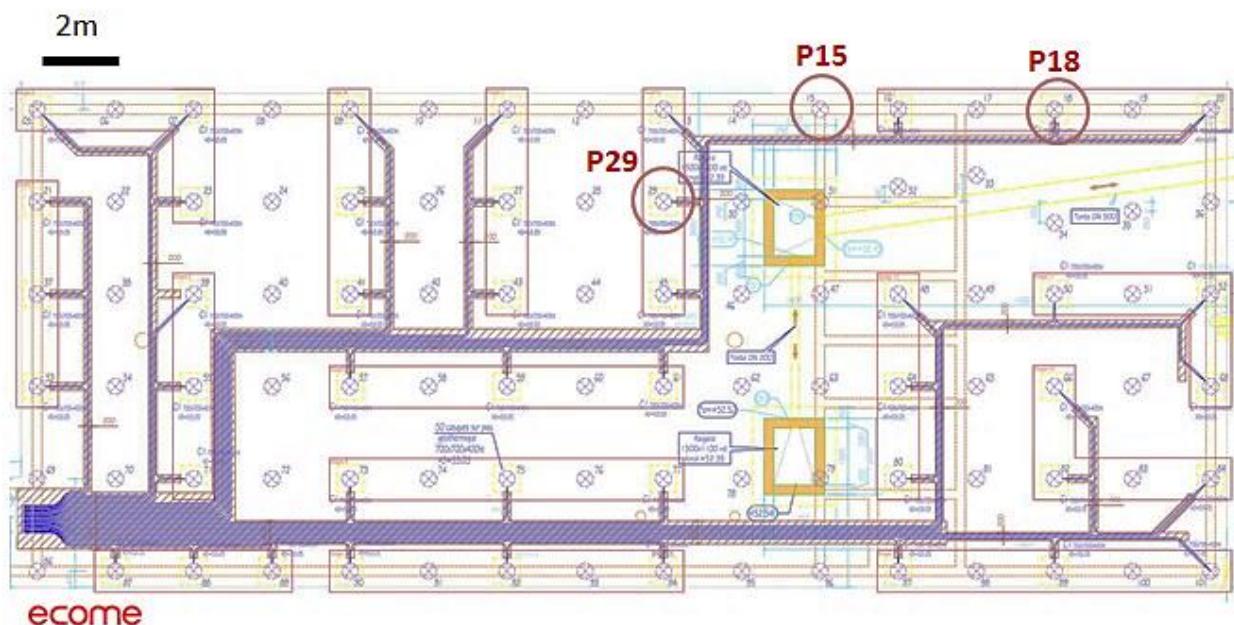


Figure 1 : Localisation de pieux géothermiques P18 et P29 et du pieu P15 sur le plan de réseaux géothermiques.

Les pieux sont réalisés par rotation à l'aide d'une foreuse hydraulique et d'une tarière à axe creux. Le bétonnage s'effectue après le forage à l'aide d'une pompe à béton. La tarière est extraite du sol pendant que le béton (C30/37 – CEM III/A 42.5N CE CP1 NF – Dmax=10mm) est injecté par l'axe creux de la tarière. La cage d'armature est alors descendue dans le béton frais. Pour les pieux énergétiques, les tubes sont assemblés et ligaturés aux cages d'armature.

Le site est localisé sur un terrain incliné en bordure de la plaine alluviale de la Marne (Sémofi 2013). Les caractéristiques mécaniques des sols sous le bâtiment de prétraitement sont les suivantes (Tableau 1 : Paramètres géotechnique) :

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

Géologie	Pression limite nette p_l^* (MPa)	Module Pressiométrique E_M (MPa)	Cohésion effective c' (kPa)	Angle de frottement ϕ (°)
Alluvions modernes	0.5	5	0	30
Marne et caillasses altères	1	11	5	25
Marne et caillasses	2	30	10	25
Calcaire grossier	>5	100	50	30

2.2 Instrumentation

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 (Figure 2a), ont été accrochés aux cages d'armature et noyés dans le béton frais lors du coulage. 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. Enfin, la centrale d'acquisition, placée dans le même local que le collecteur, au niveau zéro de la fondation, est équipée d'un capteur de température. La précision de mesure de chaque corde vibrante est de 10µm/m et de 2°C pour la température.

Pendant la phase de construction du bâtiment de prétraitement, des mesures ponctuelles de température et de déformation ont été effectuées par le CEREMA jusqu'à la mise en place définitive de la centrale d'acquisition (LC-2 Series Dataloggers, Glotzl France Geotechnique). En septembre 2016, l'acquisition de données a été automatisée pour une fréquence de lecture de 60 min.

2.3 Résultats préliminaires

L'évolution des déformations et des températures a été suivie pendant un an, entre septembre 2016 et septembre 2017, avant la mise en service de la pompe à chaleur géothermique dans le bâtiment d'exploitation. Les résultats préliminaires de l'étude montrent que la variation saisonnière de température diminue avec la profondeur (Figure 2 : (a) Position des capteurs de température sur le pieu P18 ; (b) évolution des températures en fonction de la profondeur dans le pieu P18 entre septembre 2016 et septembre 2017 b) et se stabilise autour de 13°C à partir de 5 m. Ces observations sont en accord avec la littérature (Brandl 2006; McCartney & Murphy 2012; Loveridge et al. 2016; Minh Tang et al. 2017).

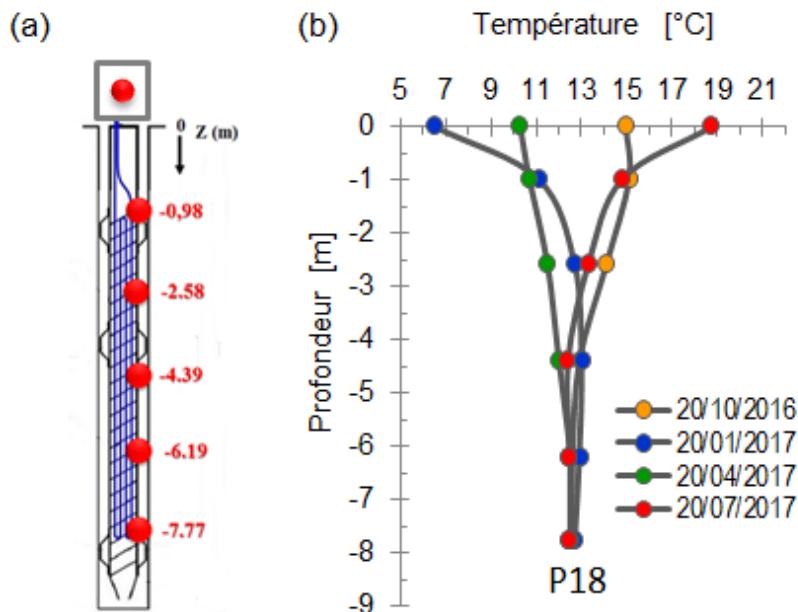


Figure 2 : (a) Position des capteurs de température sur le pieu P18 ; (b) évolution des températures en fonction de la profondeur dans le pieu P18 entre septembre 2016 et septembre 2017.

Les résultats préliminaires montrent également que les déformations des trois pieux (à 0.98m, Figure 3a) sont inférieures à 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ au cours de l'année, avant activation géothermique (Figure 3b). L'évolution de ces déformations semble suivre la même tendance que l'évolution des températures dans les trois pieux : pendant la saison hivernale, la température diminue de 18°C à 9 °C et les pieux raccourcissent alors qu'en été, la température augmente de 8°C à 18°C et les pieux se dilatent.

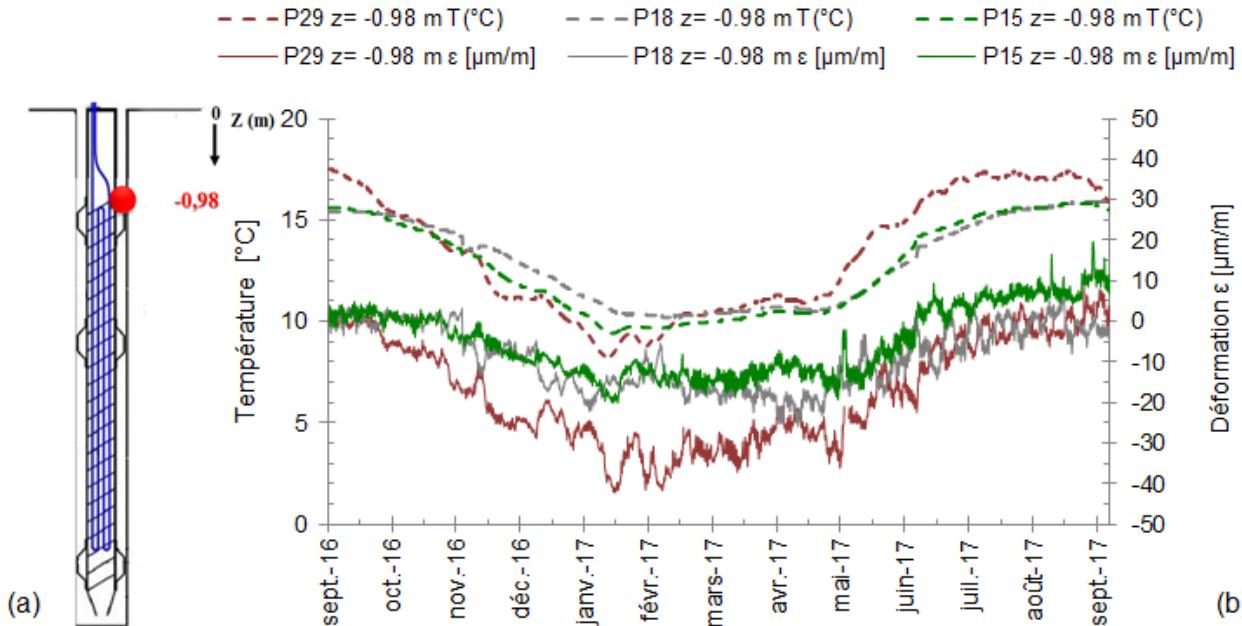


Figure 3 : (a) Position du premier capteur de température et déformation sur les pieux P15, P18 et P29 ; (b) évolution des températures et déformations en fonction de temps à -0.98m dans les pieux P29, P18 et P15

Les déformations présentent des oscillations plus ou moins marquées pendant la période suivie. Elles ont été interprétées par des modifications de chargement en tête de pieu dû à la pluviométrie, entraînant un remplissage ou une vidange des bassins (cela devra être confirmé/infirmé dans le futur).

3. Suivi de la température et de la déformation à l'échelle du laboratoire

La campagne expérimentale qui a été réalisée à l'échelle réelle permet d'apporter des informations concernant l'évolution de la température et les déformations longitudinales des pieux énergétiques sous charge thermique. En revanche, les pieux instrumentés ne nous fournissent pas d'information sur l'évolution du comportement de l'interface sol-pieu lors de ce type de chargement. Une deuxième campagne expérimentale a donc été menée à l'échelle de laboratoire à Centrale Nantes. Des essais de cisaillement direct d'interface ont été réalisés sur des échantillons sol-béton à l'aide d'une machine adaptée aux chargements thermomécaniques.

3.1 Matériaux testés

Le sol utilisé pour l'ensemble des essais en laboratoire est le sable de Fontainebleau NE34. Il s'agit d'un sable blanc à beige fin, uniforme, composé principalement de quartz (99% SiO₂). Le diamètre moyen des grains d_{50} est de 0.23 mm et le coefficient d'uniformité C_u voisin de 1.4 (Pra-ai 2013). Le sable a été mis en place dans la boite supérieure de la machine de cisaillement, par couches compactées successivement (masse volumique moyenne $\rho_{\text{moyenne}}=1650 \text{ kg/m}^3$, indice de vides initial $e_0=0.57$, indice de densité relative ID=0.9).

Une plaque en béton ($\rho=2500 \text{ kg/m}^3$, résistance en compression $\sigma_c=33.9 \text{ MPa}$, module de Young $E=44.4 \text{ GPa}$, coefficient du poisson $v=0.24$) d'une épaisseur de 11mm a été fixée dans la boîte inférieure de la machine de cisaillement direct d'interface. La rugosité normalisée R_n , définie comme étant le rapport entre R_{max} (la profondeur maximale des stries détectées sur la longueur de mesure) de la plaque et le diamètre moyen des grains d_{50} (Uesugi & Kishida 1986), mesuré avec un rugosimètre à aiguille, est de 0.15.

3.2 Machine de cisaillement direct d'interface pour étudier le comportement thermomécanique de l'interface sol-structure

Afin d'étudier le comportement de l'interface sol-béton lors de variations de température, une nouvelle machine de cisaillement d'interface à température contrôlée a été installée à Centrale Nantes (Figure 4). Cette machine peut être considérée comme un modèle réduit 2D d'une interface sol-pieu.

Le principe du cisaillement direct d'interface est illustré sur la Figure 4b. La cellule est équipée de capteurs de déplacement interne et externe (Figure 4c). La précision du capteur interne utilisé pour le suivi des déformations verticales est de $\pm 10 \mu\text{m}$ (0.1% de l'étendue de mesure). Trois capteurs de température PT100 de résolution $\pm 0.15^\circ\text{C}$ sont placés respectivement au-dessus de l'échantillon, sous la plaque de béton et dans la cuve du cryothermostat. Le faciès de la plaque de béton est indiqué sur la Figure 4d. La rugosité de la plaque est considérée constante durant les essais.

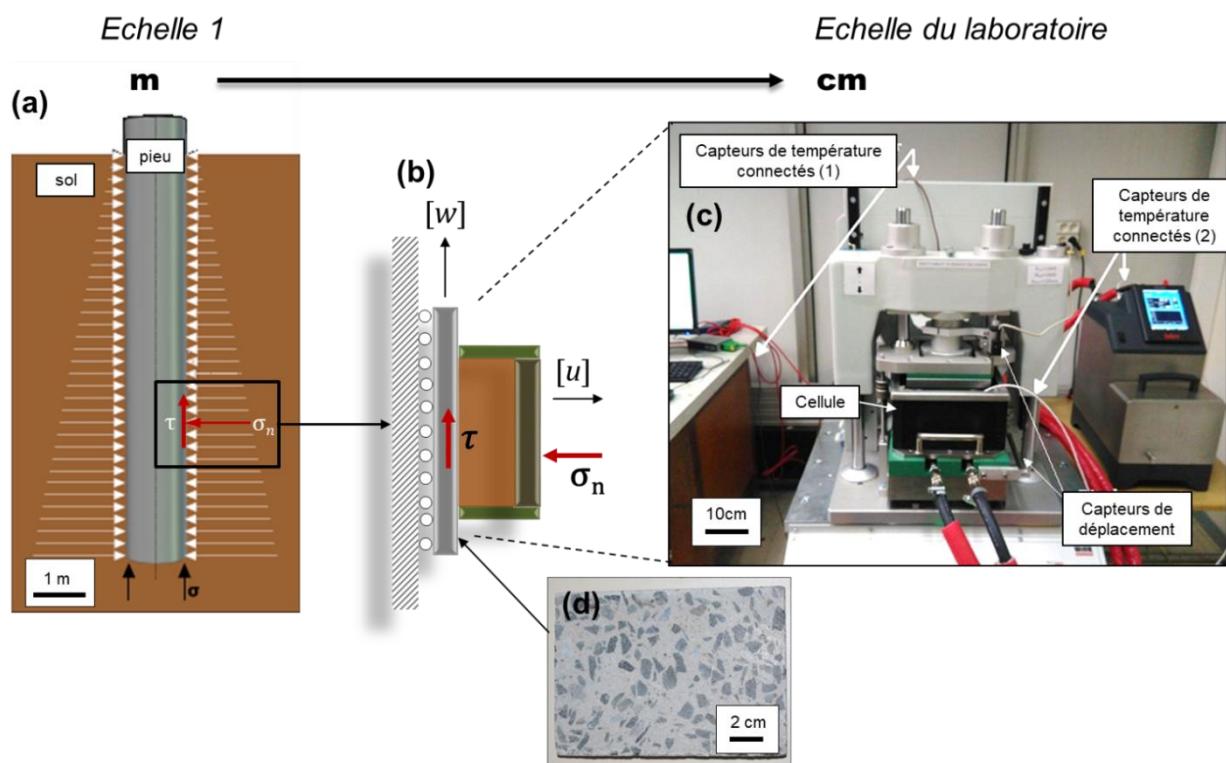


Figure 4: (a) Cisaillement direct à l'interface sol pieu à l'échelle 1, (b) schéma simplifié du cisaillement direct d'interface en laboratoire, (c) machine de cisaillement direct utilisé pour les expérimentations en laboratoire et (d) plaque de béton utilisée sous la cellule.

Une série d'essais de cisaillement d'interface monotones en condition saturée ont été réalisés avec le sable de Fontainebleau. Les essais sont d'abord composés d'une première phase de consolidation à 50, 100 et 150 kPa. Après stabilisation du déplacement vertical de l'échantillon et de la contrainte normale, la température du système est imposée à 13°C (température de référence du sol observée in-situ). Lorsque l'équilibre à 13°C est atteint, le système est amené à 8 ou 18°C , représentant la gamme des températures attendue in situ. Après équilibre à 8, 13 et 18°C , un déplacement horizontal

de 5mm est imposé à une vitesse constante de 0.5 mm/min. L'angle de frottement à l'interface sable de Fontainebleau-béton est donc calculé pour des contraintes normales de 50, 100 et 150 kPa et pour des températures de 8, 13 et 18°C, soit pour 9 essais.

3.3 Validation du fonctionnement de la machine de cisaillement d'interface

Pour valider le fonctionnement de la machine de cisaillement d'interface, plusieurs vérifications ont été effectuées sur le sable de Fontainebleau. Ce matériau est généralement peu dépendant de la température et très utilisé en géotechnique. Il a donc servi de référence dans notre étude. Des essais de consolidation à 50, 100 et 150 kPa ont révélé qu'après des effets de mise en place sur les premiers 40 kPa, le tassement vertical du sable était très faible et de l'ordre de 0.4 mm.

Pour quantifier l'influence de la température sur le comportement en cisaillement du sable, l'angle de frottement mesuré a été comparé avec les conditions de chargement et de température appliquées (Figure 5).

L'angle de frottement interne est de 24.3 ± 0.7 pour les trois essais réalisés à trois températures et contraintes normales différentes. Ces essais confirment que dans notre cas, la température ne semble pas influencer la valeur de l'angle de frottement à l'interface entre le sable de Fontainebleau et la plaque de béton (Di Donna 2014; Yavari et al. 2016).

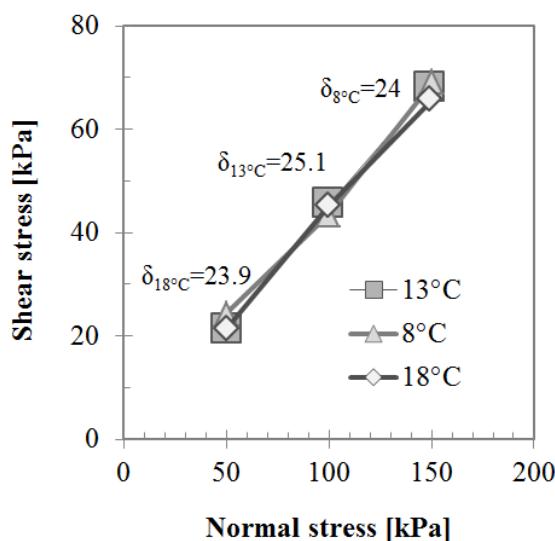


Figure 5: Contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée, pour déterminer les valeurs du coefficient de frottement δ de l'interface sable - béton.

4. Conclusions et Perspectives

L'étude proposée dans cet article porte sur l'influence de la température sur les déformations des sols à l'interface sol-béton. Grâce à l'instrumentation in-situ de trois pieux dont deux géothermiques et un pieu conventionnel sous la station d'épuration de Sept-Sorts en Seine-et-Marne, la déformation verticale et la température en tête des pieux ont été suivies dans le temps pendant un an, entre septembre 2016 et septembre 2017. Les premiers résultats révèlent que la déformation en tête de pieu suit qualitativement la même tendance que la température.

En laboratoire, une machine de cisaillement direct d'interface représentant un modèle réduit 2D et simplifié du cisaillement in situ a été installé. Les expérimentations en laboratoire ont pour but d'étudier l'influence de la température en conditions contrôlées, contrairement à l'échelle 1, pour laquelle les conditions de chargement dépendent des besoins en chauffage ou refroidissement dans le bâtiment d'exploitation.

La pompe à chaleur permettant l'activation géothermique du site a été mise en service en mars 2018. L'analyse des données de déformation et de température des pieux à différentes profondeurs permettra ainsi de mieux comprendre l'influence in situ de chargements thermiques cycliques sur le comportement des pieux, et de les comparer aux pieux non géothermiques.

5. Références bibliographiques

- Amatya, B.L. et al., 2012. Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), pp.503–519.
- Bourne-Webb, P.J., Freitas, T.M.B. & Assunção, R.M.F., 2015. Soil – pile thermal interactions in energy foundations. *Géotechnique*, 66(2), pp.167–171.
- Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), pp.81–122.
- Di Donna, A., 2014. Thermo-mechanical aspects of energy piles. *Phd Thesis*, 6145.
- Di Donna, A., Ferrari, A. & Laloui, L., 2015. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms , cyclic mobilisation and behaviour at different temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(October 2015), pp.1–44.
- Di Donna, A. & Laloui, L., 2015. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: Experimental and constitutive study. *Engineering Geology*, 190, pp.65–76.
- Laloui, L., Moreni, M. & Vulliet, L., 2003. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), pp.388–402.
- Loveridge, F.A. et al., 2016. Long term monitoring of CFA energy pile schemes in the UK. In *Energy Geotechnics*. pp. 585–592.
- 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), pp.26–38.
- Minh Tang, A. et al., 2017. Etude expérimentale du comportement thermomécanique des pieux énergétiques dans l'argile Experimental studies on the thermo-mechanical behavior of energy piles in clay. In *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul, pp. 3467–3470.
- Pra-ai, S., 2013. *Behaviour of interfaces subjected to a large number of cycles . Application to piles*.
- Sémofi, 2013. *Rapport d'étude géotechnique d'avant-projet (G11 + G12) Communauté de communes du pays Fertois, Reconstruction de la station d'épuration, Sept-Sorts (77)*.
- Uesugi, M. & Kishida, H., 1986. Influential factors of friction between steel and dry sands. *Soils and Foundations*, 26(2), pp.33–46.
- Williams, G.P. & Gold Veuillez, L.W., 1977. Les températures du sol. *Digeste de la construction au Canada*, 2.
- Yavari, N. et al., 2016. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil – structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(7), pp.1186–1194.