

# MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE D'UN GROUPE DE PIEUX THERMIQUEMENT CHARGE AU SEIN D'UN ECOULEMENT

## CENTRIFUGAL MODELING OF A THERMALLY LOADED PILE GROUP WITHIN A FLOW

Badr OUZZINE<sup>1</sup>, Théophile GRAPPE<sup>2</sup>, Jean DE SAUVAGE<sup>1</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>1</sup>, Giulia VIGGIANI<sup>3</sup>, Gopal MADABHUSHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-vallée, France

<sup>2</sup> ESIEE Paris, Univ Gustave Eiffel, F-77447 Marne-la-Vallée, France

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, Univ. of Cambridge, CB3 0EF, United Kingdom

**RÉSUMÉ** – Depuis quelques décennies, les pieux géothermiques, consistant à utiliser comme échangeurs de chaleur des pieux de fondations, se développent. Cependant, le chargement thermique de ses structures affecte directement leur comportement mécanique. La modélisation en centrifugeuse d'un groupe de pieux chargé thermiquement au sein d'un écoulement permet d'appréhender le comportement de ce type de fondation.

**ABSTRACT** – In recent decades, energy piles – allowing the use of piles as heat exchangers – have been developing. However, the thermal loading of these structures directly affects their mechanical behaviour. Centrifuge modelling of a group of thermally loaded piles within seepage makes it possible to understand the behaviour of this type of foundation.

### 1. Introduction

Dans un contexte où le gouvernement mise de plus en plus sur les énergies renouvelables, les géostructures thermiques apparaissent comme une solution prometteuse. Cette technique s'est développée dans les années 80 et consiste à attacher des tubes échangeurs de chaleur aux cages d'armatures des fondations géotechniques afin de leur conférer un rôle énergétique en plus de leur rôle mécanique de base. En raison de leur ressemblance avec des solutions de géothermies plus classiques comme les sondes géothermiques, les pieux géothermiques ont été majoritairement étudiés et utilisés. Par conséquent, leur comportement thermomécanique est assez bien connu : lorsque le pieu est chauffé (respectivement refroidi), une dilatation (respectivement une contraction) thermique est créée, ce qui induit des contraintes car le pieu ne se déforme pas librement. Cependant, le comportement d'un groupe de pieu reste quand à lui peu étudié, notamment lorsque le chargement thermique n'est pas symétrique et lorsque le sol est traversé par un écoulement. C'est dans le but de mieux comprendre le comportement d'un groupe de pieu dans ce cas particulier qu'une modélisation en centrifugeuse a été menée. En effet, les études en centrifugeuse apparaissent comme une technique rapide et relativement peu chère pour étudier un modèle réduit d'une structure géotechnique tout en conservant les mêmes contraintes mécaniques qu'à l'échelle réelle. Ainsi, au sein de la centrifugeuse du Schofield Centre du département ingénierie de l'université de Cambridge, un groupe de 4 pieux est mis en place dans du sable d'Hostun et un des quatre pieux est chauffé. Les deux principaux objectifs sont d'observer le transfert de chaleur dans le sol et d'étudier le comportement thermomécanique du groupe.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. La centrifugeuse

Située au Schofield Centre au sein du Département d'ingénierie de l'université de Cambridge, la centrifugeuse est constituée d'un bras rotor de 10 m dans une chambre de 2 m de hauteur située en sous-sol. Le modèle à tester est préparé préalablement dans une salle au-dessus. C'est également depuis cette salle de contrôle que l'on impose la vitesse de rotation du bras de la centrifugeuse et donc l'accélération appliquée au modèle. Cette vitesse de rotation peut atteindre 180 rpm, ce qui correspond à une accélération centrifuge de 125g.



Figure 1. Photographie de la centrifugeuse du Schofield centre

Une fois que le modèle est prêt, il est placé dans une des deux nacelles situées aux extrémités du bras de la centrifugeuse et un chargement précis est mis en place à l'autre extrémité dans le but d'équilibrer le moment lors de la rotation. L'expérience est réalisée à une accélération centrifuge égale à 50g. Conformément aux règles de similitudes, le groupe de quatre pieux correspond donc à un groupe de pieux qui serait 50 fois plus grand en réalité et que l'on nomme prototype.

### 2.2. Le groupe de pieux et les capteurs

Les pieux sont réalisés à base d'une pâte de ciment et ont un diamètre de 20 mm pour une longueur de 300 mm. Il s'agit donc de pieux ayant un élancement de 15 et dont les dimensions seraient en réalité de 1 m de diamètre pour 15 m de profondeur. Chacun des pieux est équipé d'un tube en cuivre en forme de U de diamètre intérieur et extérieur de 2 mm et 3 mm. Ce tube en cuivre permet de chauffer (respectivement refroidir) le pieu en faisant circuler de l'eau chaude (respectivement froide) à l'intérieur. Bien qu'un seul des quatre pieux qui constituent le groupe soit chauffé, tous les pieux sont équipés d'un tube en cuivre afin qu'ils aient tous les mêmes caractéristiques mécaniques. Enfin, afin de mieux rendre compte de l'interaction sol-pieu, tous les pieux sont rendus rugueux en collant du sable sur leur surface grâce à une colle silicone.



Figure 2. Schéma d'un pieu géothermique modèle, photographie de pieux avant et après sablage

Les quatre pieux sont reliés entre eux par un radier en aluminium d'une masse égale à 0.440 kg. Une fois que le modèle sera soumis à une accélération centrifuge de 50g, ce radier imposera un poids de 215 N sur les quatre pieux.

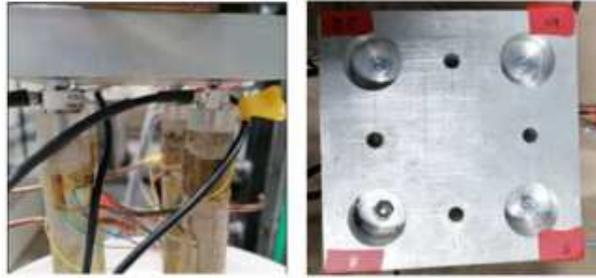


Figure 3. Photographie du radier modèle vu de profil et en plan

Comme le montre la figure 3, et dans le but de mesurer le poids repris par chacun des pieux, un capteur de force est vissé en tête de chaque pieu et fixé au radier avec un écrou. De plus, afin de mesurer le déplacement du radier lors de l'expérimentation, des capteurs de déplacements (LVDTs) sont fixés au couvercle de la boîte modèle, et positionnés aux quatre coins du radier (Voir figure 5). Ces capteurs permettent de caractériser la réponse mécanique du système d'étude. Par ailleurs, dans le but de contrôler l'écoulement d'eau dans le modèle, sept capteurs de pression interstitielle (CPI) sont placés au fond du modèle le long de celui-ci. Enfin, pour mesurer le transfert de chaleur dans le modèle, des capteurs de température sont placés sur un plan horizontal à une profondeur de 130 mm de la surface du modèle, ainsi que sur chacun des pieux.

### 2.3. Le système de chauffage

Afin de chauffer le pieu, un système Peltier est utilisé. Ce système permet de chauffer l'eau qui circulera ensuite dans le tube à l'intérieur du pieu grâce à une pompe péristaltique. L'eau transite donc dans le pieu en échangeant de la chaleur avec ce dernier avant d'être évacuée hors du modèle (voir figure 4). Il s'agit par conséquent d'un système de chauffe en boucle ouverte, non équivalent à une pompe à chaleur. C'est un système plus simple mais moins efficace (pour une même puissance thermique produite, le Peltier nécessite plus de puissance électrique). Cependant, le fait de travailler en boucle ouverte assure une température d'eau entrant dans le pieu toujours constante. En calibrant la pompe et le Peltier, il est ainsi possible de fixer ce paramètre. Par ailleurs, en mesurant les températures de l'eau en entrée et en sortie du pieu géothermique, on accède à la puissance thermique échangée entre le pieu et le sol, moyennant la connaissance du débit de la pompe  $q$  et de la capacité thermique de l'eau  $C$  grâce à l'équation suivante :

$$P_{\text{échangée}} = C * q * \Delta T \quad (1)$$

Le test réalisé lors de cette étude vise une température d'entrée dans le pieu à 45°C avec un débit de 40 ml/min pour la pompe. Le système Peltier ainsi que la pompe ont donc été alimentés en électricité de façon à obtenir ces valeurs. Cependant, sous l'effet de la force centrifuge, les calibrages qui ont été effectués à 1g n'étaient plus valables. Pour connaître le débit dans la pompe, un système de mesure avec flotteur a été mis en place et un débit de 20 ml/min a été calculé. Il en découle des charges thermiques plus faibles que celles attendues.

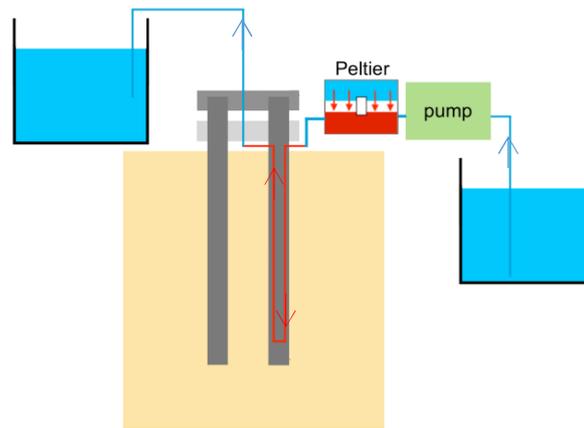


Figure 4. Schéma du système de chauffage du pieu géothermique modèle

#### 2.4. Mise en place du modèle et de l'écoulement

Le modèle est réalisée dans une boîte dont les dimensions sont les suivantes :  $L \times l \times h = 790 \times 0.20 \times 0.55$  (mm), dont une face est en plexiglas. Afin de pouvoir établir un écoulement d'eau dans ce modèle, la boîte est partagée en trois parties sur sa longueur : les deux extrémités (70mm chacune) sont constituées de graviers et la partie centrale est remplie avec un sable d'Hostun et sa densité relative est d'environ 90% (sable dense). Un grillage recouvert de géotextile matérialise la séparation entre les trois parties (voir figure 5) afin de permettre à l'eau de s'écouler tout en évitant que le sable ne se mélange aux graviers. Afin d'avoir un sol homogène, un système mécanique de pluviation automatisée présent au Schofield Centre (Madabhushi et al., 2006) a été utilisé. Il permet, grâce à des résultats empiriques, d'obtenir une densité relative du sol avec une certaine précision, en jouant sur la hauteur de chute, la taille de la fente à travers laquelle le sable s'écoule et la vitesse de déplacement. En géotechnique, on dénombre deux principales façons de mettre en place des pieux : par fonçage ou par forage. Dans ce modèle d'étude, le fonçage s'avérant techniquement difficile à mettre en place, les pieux sont mis en place comme s'ils avaient été forés. Dans les faits, ils sont foncés jusqu'à quelques centimètres après qu'une première couche de sable ait été mise en place, puis la pluviation du sable est ensuite terminée. Une fois la mise en place du sable et des graviers faite, la saturation du modèle se fait en injectant de l'eau par le bas à un faible débit. La saturation n'est pas parfaite mais on fait l'hypothèse qu'elle l'est.

La différence de perméabilité entre les graviers et le sable permet de mettre en place un écoulement à travers le sable lorsque l'on maintient deux niveaux d'eau différents dans les graviers, selon la formule de Darcy :

$$Q = k * i * S \quad (2)$$

Avec  $Q$  le débit ( $m^3/s$ ),  $i$  le gradient hydraulique (-),  $k$  la perméabilité du sol ( $m/s$ ), et  $S$  la surface hydraulique ( $m^2$ ). Un système mécanique permet d'alimenter le modèle en eau pendant la rotation du modèle en centrifugeuse. Cette alimentation en eau est maitrisée en débit et une fois que l'écoulement dans le modèle atteint un régime permanent, la hauteur d'eau en amont reste constante. Pour imposer une hauteur d'eau constante en aval cette fois, un système de siphon est mis en place : un trou dans le fond de la boîte est créé et est relié à un tube vertical à l'extérieur de la boîte. Ainsi, la hauteur d'eau dans les graviers en aval ne peut être supérieure à la hauteur de siphon.

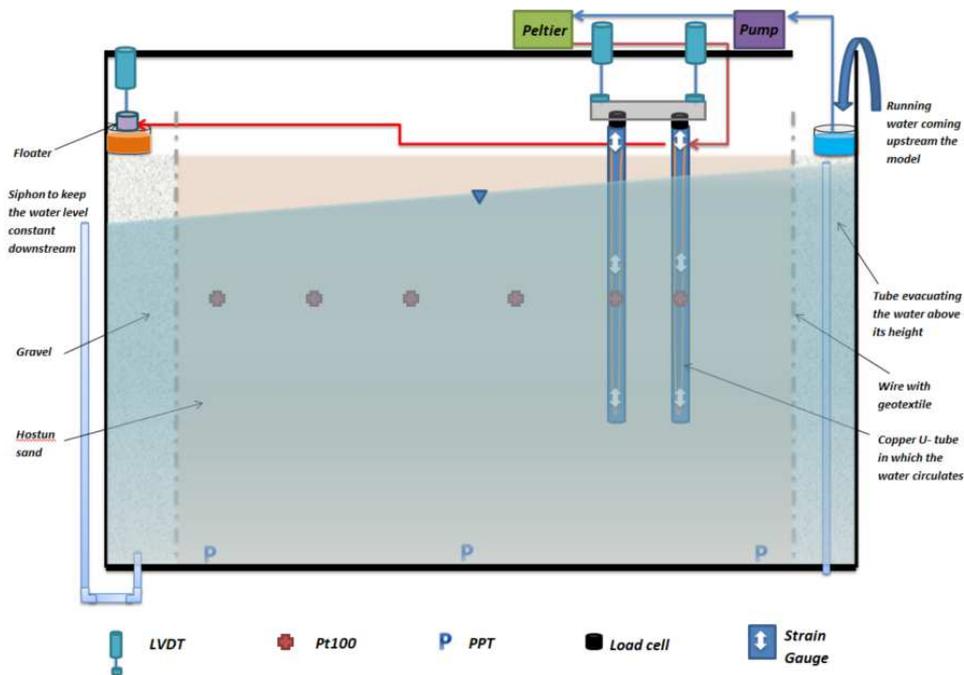
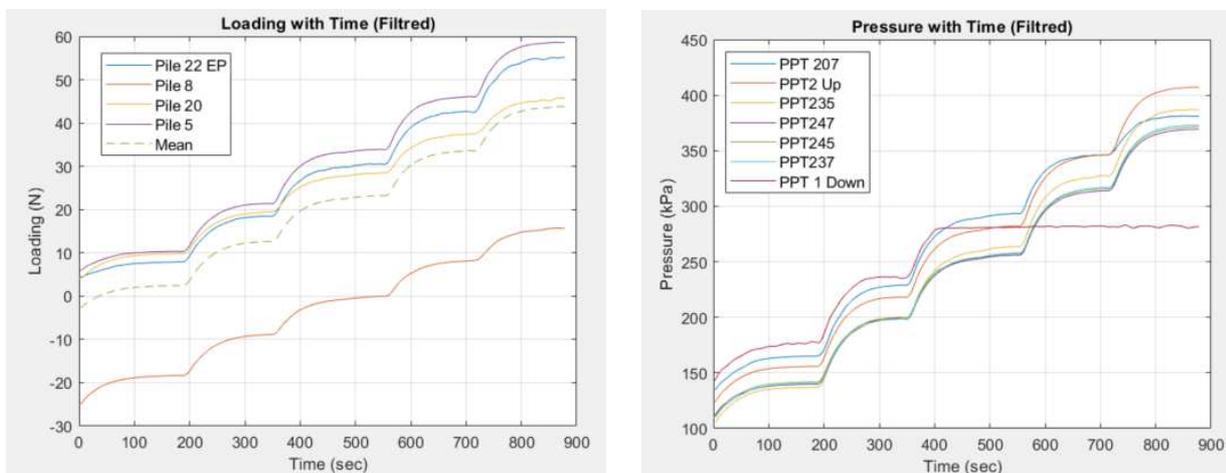


Figure 5. Schéma récapitulatif du modèle testé en centrifugeuse

### 3. Résultats

La première phase de l'essai est appelé *swing up*. C'est la phase durant laquelle le modèle est progressivement monté en accélération par palier de 10g jusqu'à atteindre 50g. Lors de cette phase, le suivi des mesures des capteurs de force et de pressions interstitielles rendent bien compte de la montée en accélération. En effet, il apparaît bien une augmentation des forces et des pressions interstitielles à chaque palier. De plus, il est important de noter ici qu'à la fin du dernier palier, la force totale est constante ainsi que les différentes pressions interstitielles. Cela permet de considérer les prochaines évolutions – une fois que le système de chauffage sera activé – comme étant induites par la charge thermique. C'est également le cas pour les mesures de déplacements : lors du *swing up*, un tassement du radier est observé induit par la montée en accélération. Ce tassement n'est pas parfaitement vertical et une certaine rotation existe. Cependant, à la fin du dernier palier, plus aucun déplacement n'est observé et on peut considérer que les prochains déplacements seront dus à la charge thermique.

Figure 6. Evolution des chargements en tête de pieu et des pressions interstitielles en fonction du temps lors du *Swing up*

### 3.1. Application de la charge thermique sans écoulement

Une fois que l'accélération centrifuge a atteint la valeur cible de 50g, le système de chauffage est activé : la pompe et le Peltier sont mis en route. On peut voir sur la figure 7 que la température de la surface du pieu augmente très rapidement. Cette même figure présente également la température enregistrée par un capteur collé à la surface du pieu. Les températures mesurées ne sont pas aussi importantes qu'attendues. Cet écart provient très probablement du débit dans la pompe qui n'était pas assez fort à cause de l'accélération centrifuge. Toutefois, des effets induits par cette augmentation en température sont observables : le capteur de déplacement au-dessus du pieu géothermique enregistre un soulèvement et le pieu opposé mesure simultanément un tassement. Il s'agit donc d'une rotation du radier dans le sens pieu géothermique vers pieu opposé. De plus, la force reprise par le pieu géothermique et celle reprise par le pieu opposé sur la diagonale augmentent lorsque le pieu chauffe. En effet, le soulèvement du pieu géothermique induit par la dilatation thermique est contraint par le poids du radier, ce qui crée une contraction en tête de pieu et sur le pieu situé sur la diagonale opposée. Cette augmentation de chargement en tête sur ces deux pieux correspond à un allègement du poids repris par les deux autres pieux. En effet, la somme totale des chargements repris par les quatre pieux reste constante lors de l'expérience. Il apparaît également un phénomène moins attendu, celui du rééquilibrage des chargements et des déplacements après une première évolution. Il semblerait que la variation de température induise de « brusques » changements qui se rééquilibrent ensuite bien que l'on continue de chauffer.

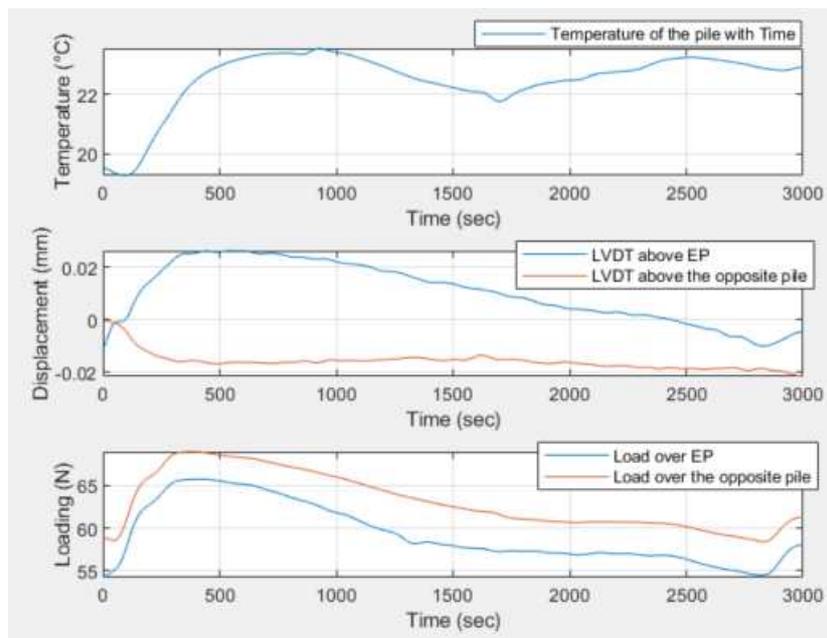


Figure 7. Evolution de la température en surface de pieu (a), de la charge en tête (b) et du déplacement (c) du pieu chauffé et du pieu opposé en fonction du temps – cas sans écoulement

### 3.2. Application de la charge thermique avec écoulement

Après avoir chauffé le pieu géothermique modèle pendant environ une heure, le système chauffant est éteint et le modèle est alimenté en eau courante avec un débit d'environ 2l/min en amont. L'objectif est d'établir un écoulement d'eau courante dans le modèle afin d'homogénéiser sa température. Il s'agit d'une phase de refroidissement que l'on contrôle en température. Une fois que le modèle semble être homogène en température, l'alimentation en eau courante et donc l'écoulement sont maintenus et le système de chauffage est rallumé. On entre dans une nouvelle phase de chauffage pour le pieu

géothermique mais cette fois dans des conditions d'écoulement d'eau dans le sol. La puissance électrique alimentant le Peltier et le débit de la pompe sont identiques à ceux de la première phase de chauffage. En d'autres termes, dans un souci de comparaison des résultats, la température de l'eau entrant dans le pieu est identique.

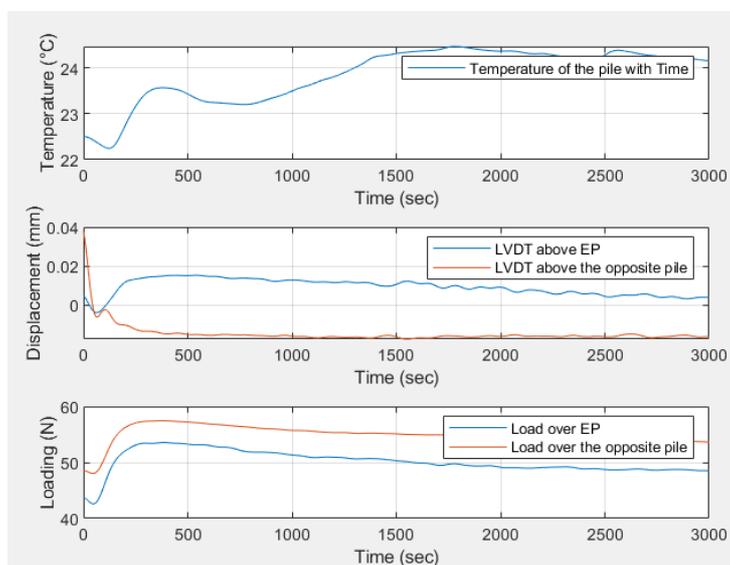


Figure 8. Evolution de la température en surface de pieu (a), de la charge en tête (b) et du déplacement (c) du pieu chauffé et du pieu opposé en fonction du temps – cas avec écoulement

La figure 8 montre l'évolution de la température en surface du pieu géothermique. Le temps 0 correspond, comme à chaque fois, à la mise en route du chauffage. On retrouve le même phénomène que précédemment. Le pieu géothermique modèle se soulève lorsqu'il est chauffé et le pieu situé à l'opposé sur le radier subit l'effet inverse. De plus, ces deux pieux enregistrent une augmentation de la charge reprise en tête. A nouveau, le poids total est constant durant toute l'expérience et l'augmentation de la charge reprise par le pieu géothermique et le pieu à l'opposé sur la diagonale est compensée par une perte de charge en tête pour les deux autres pieux.

### 3.3. Impact de l'écoulement sur l'interaction thermomécanique

Lorsqu'un écoulement d'eau est présent dans le modèle, le phénomène de convection thermique limite la dilatation thermique et donc le soulèvement du pieu et l'augmentation de sa charge en tête qui en sont des effets induits. Ce résultat apparaît sur la figure 9 où l'on compare le tassement moyen du radier (moyenne des déplacements mesurés par les 4 LVDTs au-dessus du radier) dans le cas sans écoulement et avec écoulement. Il apparaît bien que le soulèvement du radier est moindre dans le cas où un écoulement vient dissiper l'anomalie thermique. De même, et logiquement, les variations de charge en tête sont plus faibles lors du cas avec écoulement comme le montre la figure 10.

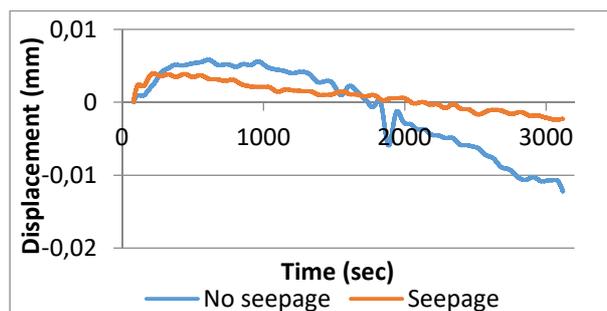


Figure 9. Evolution du tassement moyen en fonction du temps pour les deux cas de configuration

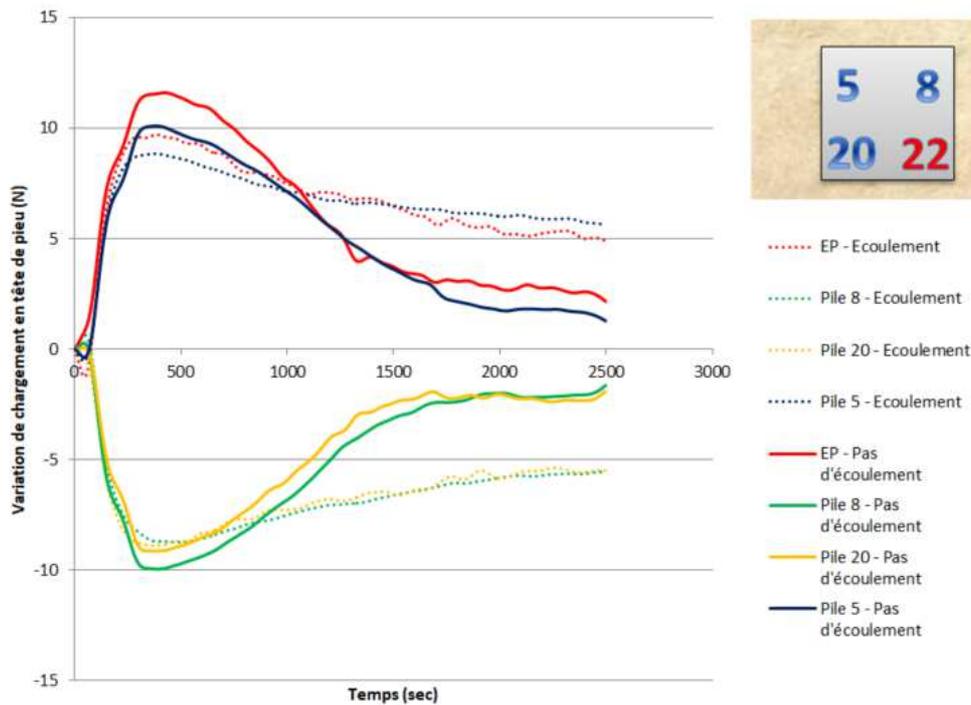


Figure 10. Variation de la charge en tête de chaque pieu en fonction du temps pour les deux cas de configuration

#### 4. Conclusions

Dans un fonctionnement du pieu énergétique en été, la chaleur est puisée du bâtiment pour être injectée dans le sol. Lors de ce travail expérimental un groupe de quatre pieux géothermique a été modélisé en centrifugeuse dans un sable saturé. Lors de cet essai, un seul des quatre pieux était soumis à une charge thermique imposée en faisant circuler dans le pieu de l'eau chaude. L'étude du comportement thermomécanique du groupe de pieux montre un soulèvement du radier au niveau du pieu chauffé ainsi qu'une augmentation de la charge en tête. Il apparaît également que ces variations tendent à se rééquilibrer dans le temps bien que la charge thermique soit maintenue. Le point principalement innovant consistait à établir un écoulement d'eau à travers le modèle. L'expérience a donc été également menée dans des conditions d'écoulement d'eau souterraine. Il en ressort que l'impact thermomécanique est sensiblement atténué.

Ces résultats doivent cependant être considérés avec précaution dans la mesure où l'aspect cyclique du chargement thermique est également responsable de l'atténuation de l'impact thermomécanique (Ng, 2019). De nouvelles études doivent donc être menées pour déterminer la part de chacun des phénomènes dans cette diminution des effets induits par le chargement thermique.

#### 5. Références bibliographiques

S.P.G Madabhushi, N.E Houghton & S.K. Haigh. (2006) A new automatic sand pourer for model preparation at University of Cambridge. Physical modelling in Geotechnics, two Volume Set: Proceedings of the sixth international conference on physical modelling in Geotechnics.

Ng, C. W. W. and Ma, Q. J. (2019). Energy pile group subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading in centrifuge. Géotechnique letters 9, 173-177