

# **ETUDE EN CENTRIFUGEUSE D'UN PIEU GEOTHERMIQUE EN CIMENT ARME SOUS CHARGEMENT HORIZONTAL EN TETE**

## ***CENTRIFUGE STUDY OF A GEOTHERMAL PILE LOADED HORIZONTALLY***

Eva Khamis<sup>1</sup>, Thierry Dubreucq<sup>1</sup>, Matthieu Blanc<sup>1</sup>, Jean de Sauvage<sup>2</sup>, Thibault Badinier<sup>3</sup>, Fabien Szymkiewicz<sup>3</sup>, Jean-Michel Pereira<sup>4</sup>, Anh Minh Tang<sup>4</sup>, Roxana Vasilescu<sup>5</sup>, Hussein Mroueh<sup>6</sup>

<sup>1</sup> *Univ Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais, France*

<sup>2</sup> *Univ Gustave Eiffel, Univ Lyon, GERS-RRO, F-69675 Lyon, France*

<sup>3</sup> *Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne - la- Vallée, France*

<sup>4</sup> *Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France*

<sup>5</sup> *PINTO, F-35300 Fougères, France.*

<sup>6</sup> *University of Lille, IMT Lille Douai, Univ. Artois, Yncrea Hauts-de-France, ULR 4515 - LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-59000 Lille,*

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre du projet ANR « COOP » (Combined LOading Of energy Piles), le laboratoire Centrifugeuses géotechniques de l'Université Gustave Eiffel a étudié le comportement à la flexion d'un pieu géothermique à échelle réduite, soumis à des cycles de température et à un chargement horizontal en tête. Le pieu modèle en ciment armé est fiché dans un sable saturé. Il simule un pieu prototype de 16 m de longueur et 0,8 m de diamètre.

**ABSTRACT** – As part of the ANR "COOP" (Combined LOading Of energy Piles) project, the Geotechnical Centrifuge Laboratory at Gustave Eiffel University has studied the bending behavior of a small geothermal pile, subjected to temperature cycles and horizontal head loading. The reinforced cement model pile is embedded in saturated sand. It simulates a prototype pile 16 m long and 0.8 m in diameter.

## **1 Introduction**

Les besoins énergétiques croissants liés à l'expansion des zones urbaines, couplés aux enjeux environnementaux favorisent l'utilisation de sources d'énergies renouvelables. De nouvelles technologies énergétiques sont donc en cours de développement, comme les géostructures thermiques qui extraient de la chaleur du sol ou injectent de la chaleur dans le sol afin de répondre aux besoins de chauffage ou de refroidissement des bâtiments.

Parmi elles, les pieux géothermiques ( $P_{\text{therm}}$ ) ont reçu le plus d'attention en raison de leur comportement thermique qui est comparable à celui des pompes à chaleur géothermiques conventionnelles. Ces  $P_{\text{therm}}$  ont la particularité de servir à la fois de support structurel et d'échangeur d'énergie thermique (Loveridge et al., 2020).

Les recherches antérieures se sont principalement concentrées sur les charges axiales. Le travail effectué par Vitali et al. (2022) est probablement la seule étude utilisant des essais sur modèle de centrifugeuse pour examiner l'impact du chauffage monotone sur la performance en flexion des  $P_{\text{therm}}$  chargés horizontalement.

Dans une publication récente, Zhao et al. (2023) ont mené une étude numérique spécifique explorant le comportement des  $P_{\text{therm}}$  soumis à des charges latérales en tête et enfouis dans du sable sec. Cette étude, qui repose sur des simulations par éléments finis, a révélé des effets d'accumulation en termes de déplacement horizontal des pieux. Le déplacement accumulé s'est avéré plus prononcé lorsque la charge horizontale appliquée était plus élevée. Cependant, les résultats examinés sur les systèmes de  $P_{\text{therm}}$  indiquent

que le flux de chaleur est fortement influencé par les conditions de saturation du sol, et que l'efficacité thermodynamique diminue dans les sols non saturés (Cunha, et al., 2022).

L'objectif de cette étude vise à fournir une compréhension plus précise des comportements à la flexion des  $P_{\text{therm}}$  soumis à la fois à une charge latérale en tête constante et à des cycles de charge thermique autour d'une température moyenne dans le sable saturé de Fontainebleau NE 34 (Indice de densité de 0,75). Cette étude s'inscrit dans la cadre du projet ANR « COOP » (Combined Loading Of energy Piles, 2023-2027).

## 2 Modèle de pieu géothermique

### 2.1 Fabrication du pieu géothermique

Un  $P_{\text{therm}}$  modèle cylindrique a été fabriqué en ciment armé d'une longueur  $L$  de 60 cm enterré et d'un diamètre  $D$  de 3 cm. Lors des essais, une accélération centrifuge de  $26,7 \times g$  est appliquée pour simuler un pieu prototype de 16 m de longueur et 0,8 m de diamètre selon les règles de similitude. Cette accélération est nécessaire pour reproduire les interactions sable-pieu prototype dans le modèle réduit soumis au même niveau de contraintes. Le  $P_{\text{therm}}$  est équipé d'un tuyau en cuivre en forme de U pour la circulation de l'eau sur toute sa hauteur, et d'un grillage en acier galvanisé de 0,2 mm de diamètre sur la périphérie faisant office de cage d'armatures (Figure 1). Le ciment a été utilisé sans agrégat en raison de la petite taille du pieu et de l'impossibilité d'incorporer du sable dans le coulis de ciment qui devenait alors trop rigide. Des fibres optiques (FO) à réseau de Bragg ont été fixées sur les côtés du  $P_{\text{therm}}$  pour mesurer le transfert de charge du modèle de pieu, la distribution des contraintes, le déplacement transversal et les variations de température.

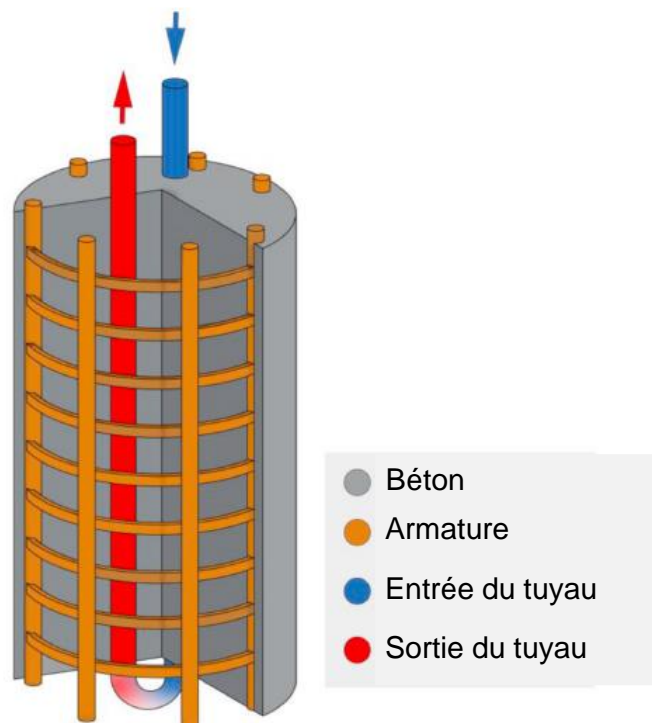


Figure 1. Illustration 3D d'un pieu géothermique (d'après (Asadinik, 2022))

### 2.2 Essai de flexion à quatre points

L'essai de flexion à quatre points a été utilisé pour évaluer la rigidité en flexion et la résistance du matériau. Le pieu géothermique est placé sur deux supports distants de  $L$ . Deux forces dirigées verticalement vers le bas,  $F/2$ , situées à des distances égales du centre, sont appliquées au pieu.

Deux fibres optiques étant fixées sur les côtés opposés de la surface du pieu, les valeurs des lectures fibres optiques FBGs (Fibre Bragg Gratings) sont transformées en déformation (comme illustré dans la Figure 2) et les valeurs de contrainte à chaque application de charge sont calculées à l'aide de la formule de contrainte de flexion. Ainsi, le module de Young homogénéisé peut-être calculer en utilisant la loi de Hooke, ce qui donne une valeur de 2,2 GPa.

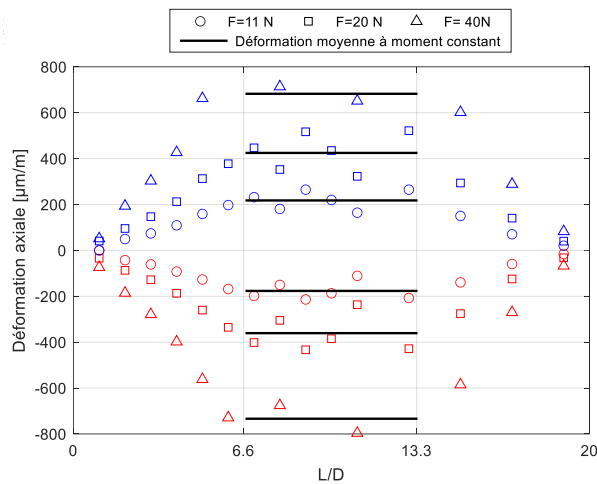


Figure 2. Déformation le long de la longueur du pieu à l'application d'une charge croissante

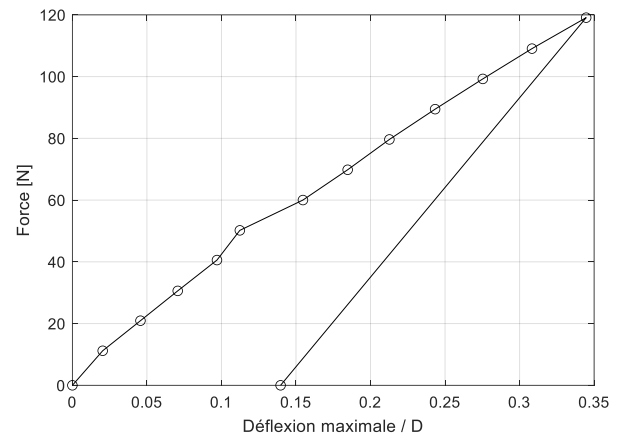


Figure 3. Force par rapport à la déflexion

Un capteur de déplacement est placé au centre du pieu. Siswanto et al. (2019) présentent l'utilisation de la formule de flexion élastique dans l'essai de flexion à 4 points ; ainsi, le module de Young peut être calculé en utilisant l'équation (1).

$$E = \frac{F \cdot \left(\frac{L}{3}\right) \cdot (3L^2 - 4(L/3)^2)}{48 \cdot I \cdot f} \quad (1)$$

Où :  $E$  (Pa) est le module de Young,  $F$  (N) est la force de flexion,  $L$  (m) est la distance entre les supports,  $I$  ( $m^4$ ) est le moment d'inertie et  $f$  (m) est la déflexion.

Après l'enlèvement complet de la charge (Figure 3), le pieu n'est pas revenu à sa position initiale. Ceci révèle un comportement plastique. Cette décharge correspond à la partie élastique du pieu, qui a donné 2,1 GPa pour le module de Young ( $E$ ). Par ailleurs, lors du chargement initial jusqu'à 40 N, le module sécant est d'environ 1,8 GPa. Ces deux modules sont relativement faibles pour du ciment.

### 3 Modélisation en centrifugeuse

#### 3.1 Montage expérimentale

Un lit de sable uniforme et sec de Fontainebleau NE 34 d'indice de densité  $I_d=75\%$  a d'abord été mis en œuvre par pluviation au fond du conteneur (Figure 4). Puis le pieu a été installé pour une profondeur d'enfouissement ( $L$ ) de 60 cm (c'est-à-dire, 20 fois le diamètre du pieu -  $20D$ ). Des thermocouples ont été placés à la surface du pieu pour aider à comprendre comment la température affecte à la fois le pieu et le sol environnant. Une longueur de pieu libre de 10 cm (c'est-à-dire,  $3D$ ) a été laissée au-dessus de la surface du sol, qui est la partie du pieu soumise à la charge horizontale. Pour s'assurer que l'analyse se concentre

sur le comportement du pieu et ne soit pas influencée par la proximité des parois du conteneur, le pieu modèle a été positionné à une distance de 28 cm (soit environ  $9,5D$ ) des parois. Comme l'indiquent Zhao et al. (2023), l'effet de paroi vis-à-vis du pieu sous charge latérale était négligeable lorsque le pieu se trouvait à une distance d'au moins  $8D$  des limites verticales du conteneur. Une fois la pluviation achevée, le massif de sable a été saturé.

Le chargement latéral a été appliqué à  $2D$  au-dessus du niveau du sol, perpendiculairement à la surface du pieu, à l'aide d'un actionneur électromécanique. Des capteurs de déplacement positionnés à  $1D$  et  $3D$  au-dessus du niveau du sol ont été attachés au pieu pour mesurer la déflexion obtenue.

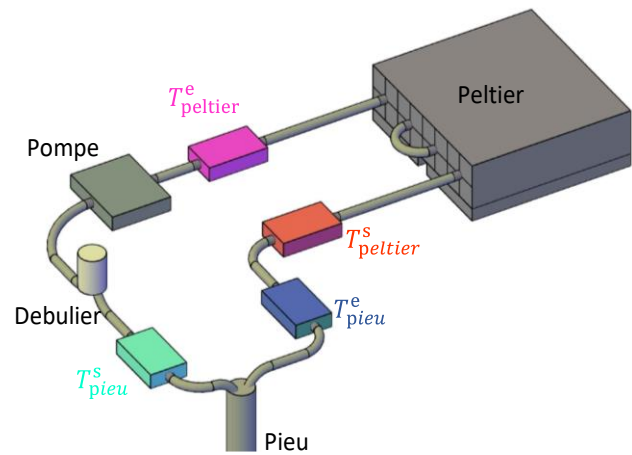
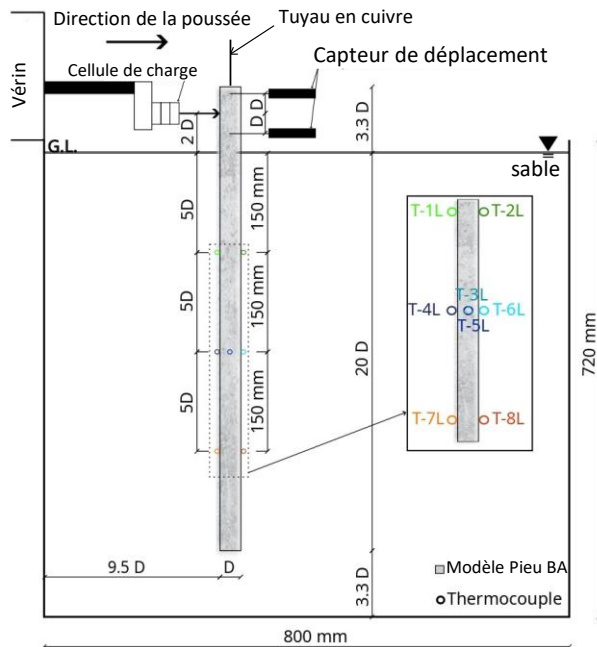


Figure 4. Schéma du montage mécanique (échelle modèle) Figure 5. Schéma de l'installation thermique

Les cycles thermiques à l'intérieur du  $P_{therm}$  sont assurés par un circuit thermique (Figure 5), qui comprend un dispositif Peltier pour refroidir ou chauffer l'eau, une pompe pour maintenir un débit constant de 350 ml/min ici, un débulleur pour éliminer les bulles du circuit, des capteurs de température pour mesurer la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du pieu et du dispositif Peltier, et des tuyaux soigneusement isolés thermiquement pour interconnecter le circuit.

### 3.2 Programme d'essais

Le programme d'essais comprend deux phases. Un premier chargement jusqu'à la rupture du pieu en ciment armé est d'abord réalisé sur le pieu dit de rupture ( $P_{rupt}$ ), en augmentant la charge horizontale appliquée jusqu'à la charge ultime ( $F_u$ ) qui correspond ici à la rupture interne du pieu. Dans la deuxième phase, une charge admissible égale à 50 % de  $F_u$  est appliquée en même temps au pieu de référence ( $P_{réf}$ ) pour évaluer l'effet du fluage seul, et au pieu géothermique ( $P_{therm}$ ). Au bout de 24 minutes de fluage, le  $P_{therm}$  a été soumis, en supplément, à une charge thermique avec des cycles alternés de refroidissement et de chauffage de l'eau entre  $5^\circ\text{C}$  et  $40^\circ\text{C}$  autour d'une température moyenne dans le sable de  $13^\circ\text{C}$ .

#### 4 Résultats et discussion

Tous les résultats sont exprimés en dimensions prototype, sauf indication contraire.

Comme le montre la Figure 6, la rupture du pieu en ciment armé était de 214 kN. Par la suite, 50% de  $F_u$  (107 kN) a été appliquée à  $P_{réf}$  et à  $P_{therm}$ , ce qui a donné une valeur de déflexion équivalente à 15% de la déflexion observée pour  $P_{rupt}$ . Les comportements mécaniques des trois pieux jusqu'à une charge de 107 kN sont visiblement similaires, avec des valeurs de déflexion atteignant environ  $0,06D$  dans tous les cas.

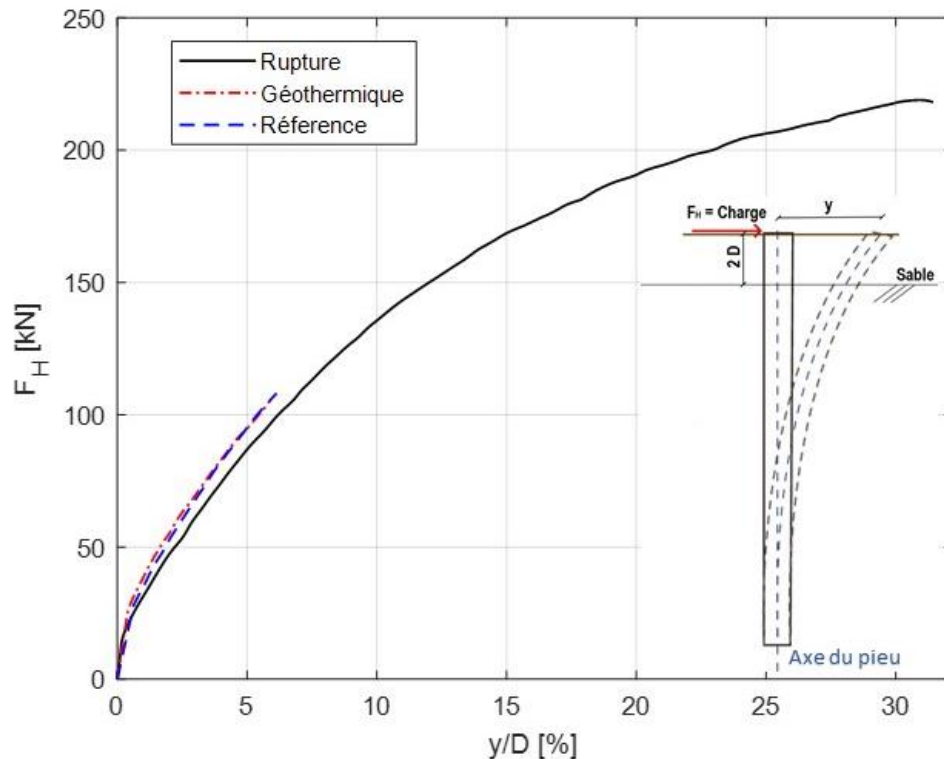


Figure 6. Courbes de chargement horizontal appliqué en fonction de la déflexion réduite  $y/D$  de  $P_{rupt}$ ,  $P_{therm}$  et  $P_{réf}$ .

La Figure 7 (a) illustre la déflexion de  $P_{therm}$  et de  $P_{réf}$  en fonction du temps après l'application d'une charge horizontale de 107 kN à  $t=0$  s, à laquelle s'ajoute des cycles thermiques sur  $P_{therm}$  à partir de  $t = 1428$  s. La courbe tiretée bleue montre la déflexion de fluage de  $P_{réf}$  après l'application de la charge. La courbe pointillée rouge correspond à la déflexion de fluage du  $P_{therm}$  qui est déduite du fluage du pieu de référence. Enfin, la courbe continue rouge correspond à la déflexion totale de  $P_{therm}$  qui résulte du fluage du sable sous la charge et de l'application des cycles thermiques. Au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à  $40^{\circ}\text{C}$ , la déflexion augmente, puis elle diminue légèrement quand la température redescend jusqu'à  $5^{\circ}\text{C}$ . Cela peut être attribué au comportement du pieu qui se dilate et se contracte en fonction de l'augmentation et de la diminution de la température, respectivement.

La Figure 7 (b) illustre l'augmentation relative de la déflexion résultant de l'application d'une charge thermique sur le  $P_{therm}$ , en excluant toute contribution du fluage. Ce résultat a été obtenu en soustrayant la déflexion de fluage à la déflexion totale du  $P_{therm}$ , comme le montre la Figure 7 (a), puis en la divisant par la déflexion initiale ( $y_0$ ) avant le début des cycles thermiques. On peut observer que les 12 cycles thermiques entraînent une déflexion relative totale de +24%. Après le premier cycle, la déflexion relative est déjà de +15%. Après 6 cycles, la déflexion semble atteindre un palier. Cependant, la rupture d'une FO n'a pas permis d'analyser plus finement le comportement du pieu dans le sol.

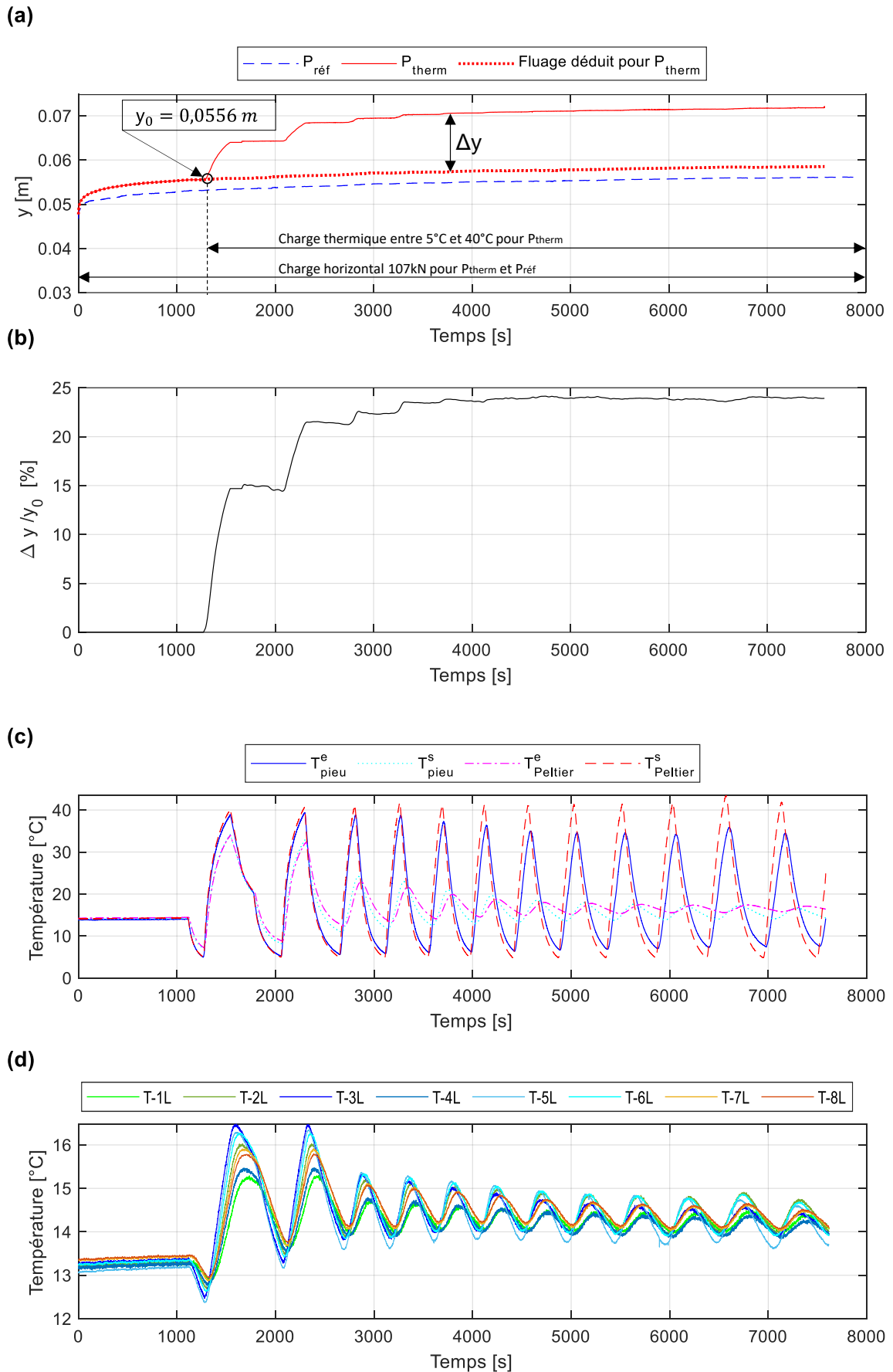


Figure 7. Evolutions (a) de la déflexion «  $y$  » absolue de  $P_{therm}$  et  $P_{réf}$  ; (b) de la déflexion relative de  $P_{therm}$  (c) des températures dans le circuit thermique (d) des températures à l'interface sable-pieu à trois niveaux

La Figure 7 (c) montre les évolutions de la température mesurée à l'entrée et à la sortie du module Peltier et du pieu en fonction du temps. Une différence de température significative entre l'entrée et la sortie du pieu est observée après le deuxième cycle thermique. En outre, la température maximale atteinte par les capteurs PT100 placés à l'entrée et à la sortie du circuit thermique de la pile présente un déphasage notable, ce qui indique un niveau de débit trop faible pour maintenir une température sensiblement constante dans le circuit thermique à l'intérieur du pieu.

La Figure 7 (d) montre les variations de la température mesurée par les thermocouples situés à 3 niveaux de profondeur sur la surface du pieu géothermique dans le sol, comme indiqué dans la Figure 4, en fonction du temps. La température est détectée à l'interface entre le pieu et le sol. La courbe montre une diminution de la température au cours du temps. Il est suggéré que la température du sable diminue au fil des cycles thermiques. Ce phénomène est également observé pour la température de sortie du pieu. Une diminution anormale du débit pourrait en être la cause. Par ailleurs, les thermocouples mesurent des valeurs différentes au même moment, ce qui pourrait être attribué à un positionnement imprécis ou un mauvais contact des thermocouples avec la surface latérale de  $P_{\text{therm}}$ .

On constate que les thermocouples et le capteur de température situés à la sortie du pieu et à l'entrée du Peltier ( $T_{\text{pieu}}^s$  et  $T_{\text{peltier}}^e$  respectivement) présentent le même phénomène, avec une forte oscillation au cours des deux premiers cycles, puis une diminution de la température.

## 5 Conclusion et perspectives

Cette communication présente une évaluation du comportement mécanique et thermique d'un pieu géothermique en ciment armé dans du sable dense saturé, chargé latéralement en tête et thermiquement afin de prédire avec précision son comportement.

La procédure expérimentale comprenait l'exécution séquentielle de ces étapes, ce qui a permis une étude complète du comportement et des performances des pieux géothermiques dans diverses conditions.

Les conclusions et les perspectives sont les suivantes :

- les essais de flexion 4 points indique une faible valeur du module d'élasticité du pieu qu est trop souple pour simuler un pieu réel en béton armé. La possibilité d'utiliser un autre matériau sera étudiée.
- Les essais en centrifugeuse montrent une forte accumulation de déplacement due à la charge thermique cyclique. L'attention est attirée sur le fait que les variations thermiques peuvent affecter les propriétés du pieu lui-même mais aussi le comportement du sol environnant. De plus, l'amplitude des températures diminue après quelques cycles, ce qui entraîne une diminution du taux d'accumulation de déplacement provoqué par la charge thermique cyclique. Cela suggère qu'il pourrait y avoir une diminution du débit du fluide caloporteur lors de l'essai. L'incidence du débit devrait être examinée plus en détail pour comprendre son effet sur les transferts thermiques.

## **Références bibliographiques**

Asadinik A. (2022). Energy Pile: A Source of Green Energy Under Our Buildings. <https://www.linkedin.com/pulse/energy-pile-source-green-under-our-buildings-asadinik-m-sc-p-eng/>.

Cunha R.P. et Bourne-Webb P.J. (2022). A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, 14 pp. /10.1016/j.rser.2022.112072

Loveridge F., McCartney J.S., Narsilio G.A. (2020). Sanchez M., Energy geostructures: a review of analysis approaches, in situ testing and model scale experiments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol. 22, 30pp. /10.1016/j.gete.2019.100173

Siswanto W.A. et Martama B.P. (2019). Stress and Deflection of a Concrete Block in a Four-Point Bending (FPB) Test. *Universal Journal of Mechanical Engineering* vol. 7, n°6, pp. 307-317. /10.13189/ujme.2019.070601

Vitali D., Leung A.K., Feng S., Knappett J.A. et Ma L. (2022). Centrifuge modelling of the use of discretely-spaced energy pile row to reinforce unsaturated silt. *Géotechnique*, vol. 72, n°7, pp. 618-631. /10.1680/jgeot.20.P.157

Zhao R., Leung A. K. et Knappett J. A. (2023) Thermally-induced ratcheting of a thermo-active reinforced concrete pile in sand under sustained lateral load. *Géotechnique*, vol. 73, n°9, pp 826-839. /10.1680/jgeot.21.00299