

Montage expérimental d'un pieu géothermique soumis à un chargement incliné

Experimental setup of an energy pile subjected to inclined loading

Eva KHAMIS ^{1*}, Matthieu BLANC¹, Thierry DUBREUCQ¹, Jean DE SAUVAGE², Thibault BADINIER³, Fabien SZYMKIEWICZ³, Jean-Michel PEREIRA⁴, Anh Minh TANG⁴, Roxana VASILESCU⁵, Hussein MROUEH⁶

1 Univ Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais, France

2 Univ Gustave Eiffel, Univ Lyon, GERS-RRO, F-69675 Lyon, France

3 Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne - la- Vallée, France

4 Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

5 PINTO, F-35300 Fougères, France.

6 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

**eva.khamis@univ-eiffel.fr*

RESUME : Les pieux énergétiques assurent à la fois des fonctions structurelles et géothermiques, mais leur comportement sous chargements mécaniques inclinés et sollicitations thermiques cycliques reste peu documenté. Cette étude présente un essai en centrifugeuse géotechnique portant sur un pieu énergétique en aluminium soumis à un chargement mécanique incliné dans du sable sec. L'essai a été réalisé à 26,7 g sur un pieu de longueur 20D (16 m à l'échelle prototype), installé selon la méthode *wished-in-place*. Le pieu a été soumis à un chargement incliné de 2067 kN (valeur à l'échelle prototype) appliqué à 2D au-dessus de la surface du sol, puis maintenu sous charge constante avant l'application de cinq phases de cycles de chauffage–refroidissement d'amplitudes croissantes. Les déplacements, la rotation en tête de pieu et la réponse thermique ont été suivis à l'aide de capteurs de déplacement et de fibres optiques. Les résultats montrent que le pieu en aluminium lui-même reste dans le domaine élastique, tandis que l'interaction sol–pieu présente des déformations progressives sous l'effet des cycles thermiques. Les cycles thermiques induisent une augmentation progressive des déplacements et de la rotation en tête de pieu, accentuée pour des amplitudes thermiques plus élevées.

ABSTRACT: Energy piles combine structural and geothermal functions, yet their behaviour under combined inclined mechanical loading and thermal cycling remains insufficiently documented. This study presents a geotechnical centrifuge investigation of an aluminium energy pile subjected to an inclined mechanical load in dry sand. A physical model test was conducted at 26.7 g on a 20D-long pile (16 m at prototype scale) installed using a *wished-in-place* technique. The pile was subjected to an inclined load of 2067 kN (prototype-scale value) at 2D above the soil surface, which was then maintained constant prior to the application of five heating–cooling phases with increasing temperature amplitudes. Displacements, pile head rotation, and thermal response were monitored using displacement sensors and distributed fibre optic instrumentation. Results show that the aluminium pile itself remains within the elastic range, while soil–pile interaction exhibits progressive deformation under thermal cycling. However, thermal cycling under constant inclined load induces a progressive increase in horizontal and vertical displacements as well as pile head rotation, with larger responses observed at higher temperature amplitudes. These findings highlight the significance of coupled thermo-mechanical effects on the service behaviour of energy piles.

Mots-clés: Pieu géothermique; centrifugeuse ; modèle physique; charge inclinée.

1 INTRODUCTION

Face au changement climatique, les pieux énergétiques constituent une solution de plus en plus utilisée pour répondre aux besoins énergétiques tout en assurant le rôle de fondation. Un pieu énergétique est

un pieu thermo-actif intégrant des échangeurs de chaleur, permettant le transfert de chaleur entre une structure et le sol (McCartney, 2013), et contribuant à la réduction des émissions de CO₂ (Mohamad et al., 2021). Toutefois, les variations de température peuvent induire des contraintes et des déformations

supplémentaires, susceptibles d'influencer l'interaction sol-pieu, en particulier lorsqu'elles sont combinées à des chargements mécaniques.

Les pieux énergétiques sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux ouvrages, tels que les bâtiments, les culées de ponts, les ouvrages de soutènement et les constructions en terrain en pente (Vitali et al., 2022; Zhao et al., 2023). S'ils reprennent principalement des charges verticales dans les bâtiments, ils peuvent être soumis à des chargements horizontaux ou inclinés dans d'autres configurations (Cunha & Bourne-Webb, 2022). Malgré de nombreuses études sur le comportement axial des pieux énergétiques, leur réponse sous chargements mécaniques combinés et cycles thermiques reste encore peu étudiée, notamment en ce qui concerne les effets de ratcheting à long terme (Pei et al., 2022; Song et al., 2025).

Cette étude, menée dans le cadre du projet ANR COOP (Mroueh et al., 2024), présente un essai en centrifugeuse géotechnique sur un pieu énergétique modèle en aluminium soumis à un chargement incliné de 12° dans du sable sec. Le chargement mécanique est maintenu constant avant l'application de cycles thermiques. Les premiers résultats expérimentaux et les analyses associées sont présentés.

2 BIBLIOGRAPHIE

La majorité des études expérimentales sur les pieux énergétiques se concentrent sur le chargement axial (Ng & Ma, 2019; Stewart & McCartney, 2014) et négligent l'influence du chargement latéral. Néanmoins, quelques travaux ont commencé à s'intéresser au comportement thermo-mécanique des pieux énergétiques sous chargement horizontal. Vitali et al. (2022) et Zhao et al. (2023) ont étudié le comportement en flexion de pieux soumis à des cycles de chauffage-refroidissement par des essais en centrifugeuse, tandis que Chen et al. (2023) ont mené des essais à 1 g sur des pieux énergétiques soumis à un chargement horizontal dans du sable. Des essais en centrifugeuse sur un pieu géothermique en béton armé soumis à un chargement horizontal ont également été présentés par Khamis et al. (2024).

Ces études mettent en évidence l'existence d'un phénomène de ratcheting thermique, se traduisant par une accumulation progressive de déplacements irréversibles sous cycles thermiques répétés. À ce jour, l'étude de (Nouri et al., 2023) demeure la seule ayant investigué un pieu énergétique soumis à un chargement mécanique incliné combiné à un chargement thermique dans du sable, montrant des déplacements en tête d'environ $0,6 \%D$ et un déplacement horizontal en tête d'environ $1,2 \%D$.

Peu d'études ont analysé le comportement de pieux conventionnels soumis à un chargement incliné, à partir d'essais à 1 g (Jain et al., 1987), d'essais en centrifugeuse (Lu & Zhang, 2018) ou d'essais à l'échelle réelle (Karasev et al., 1977). L'influence combinée des chargements axial, latéral et thermique sur le comportement des pieux énergétiques demeure encore largement inexplorée.

3 PIEU EN ALUMINIUM

Le pieu énergétique modèle est réalisé à partir d'un tube en alliage d'aluminium 2017, présentant un module de Young de 72,5 GPa, une conductivité thermique de 134 W/(m·K) et un coefficient de dilatation thermique de 22,9 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Le tube est fermé à sa base par un sabot de pieu conique fixé à l'extrémité inférieure. Le pieu présente un diamètre intérieur de 26 mm, un diamètre extérieur de 30 mm et une longueur totale de 700 mm.

Le choix d'un pieu en aluminium est motivé par les limites observées lors d'essais précédents réalisés sur des pieux énergétiques modèles en béton armé, pour lesquels un module d'élasticité très faible et la présence de fissures ont été observés, rendant le comportement mécanique peu représentatif (Khamis et al., 2024). Ces observations ont conduit à recommander l'utilisation d'un matériau alternatif, mieux maîtrisé et présentant des propriétés mécaniques homogènes. L'aluminium permet ainsi de respecter le facteur d'échelle de rigidité (EI) tout en conservant une épaisseur de tube compatible avec l'instrumentation.

Les pieux en aluminium sont équipés de deux fibres optiques placées dans des rainures sur deux faces opposées, correspondant aux zones en traction et en compression du pieu (Figure 1). Les fibres sont installées à la surface du pieu afin de suivre son comportement mécanique. Bien que les fibres optiques soient présentes et que les données aient été enregistrées lors des essais sous chargement incliné, ces mesures ne sont pas analysées dans le présent article en raison de la complexité de leur interprétation dans cette configuration.

4 MODELISATION PHYSIQUE EN CENTRIFUGEUSE

La centrifugeuse géotechnique permet de reproduire, à l'aide de modèles à échelle réduite, des champs de contraintes représentatifs des conditions à l'échelle réelle. La centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel, de 11 m de diamètre, peut atteindre une accélération maximale de 100 g pour une charge utile de 2000 kg,

et est particulièrement adaptée à l'étude des fondations profondes.

Tableau 1 Lois de similitude en modélisation centrifuge

Paramètre	Unité	Facteur d'échelle : x^*
Distance, longueur	L	1/N
Contrainte	M/LT ²	1
Masse volumique	M/L ³	1
Déformation	-	1
Force	ML/T ²	1/N ²
Temps (diffusion)	T	1/N ²

L'utilisation de la centrifugeuse repose sur des lois de similitude reliant le comportement du modèle à celui du prototype, comme indiqué dans le Tableau 1. Par exemple: $x^* = x_{\text{modèle}} / x_{\text{prototype}}$ (Garnier, 2001). Pour les phénomènes thermiques, ces lois indiquent que les processus se produisent N^2 fois plus rapidement qu'à l'échelle réelle (Ouzzine et al., 2024). Dans cette étude, les essais ont été réalisés à 26,7 g, ce qui correspond à un pieu prototype de 0,8 m de diamètre et 18,7 m de longueur.

Les essais sont réalisés dans un conteneur de 1200 mm de longueur, 800 mm de largeur et 720 mm de hauteur, rempli de sable jusqu'à 720 mm. Deux pieux sont installés par conteneur, avec une longueur encastrée de 600 mm et une émergence de 100 mm au-dessus de la surface du sol. Les pieux sont espacés de 300 mm et positionnés à une distance d'environ $9,5D$ des parois, ce qui permet de négliger les effets de bord pour des chargements latéraux. Une distance de $3D$ est laissée sous la pointe du pieu, suffisante pour l'étude de pieux soumis à un chargement incliné.

5 MONTAGE EXPERIMENTAL

5.1 Caractéristiques du sable

Le sable utilisé est le Fontainebleau NE34, présentant les propriétés physiques suivantes : coefficient d'uniformité $C_u = 1,53$, indices des vides $e_{\text{max}} = 0,753$ et $e_{\text{min}} = 0,549$, et diamètre médian des grains $D_{50} = 0,21$ mm. Pour un diamètre de pieu $D = 30$ mm, le rapport D/D_{50} est largement supérieur à 30, ce qui permet de considérer que l'effet de la taille des grains sur l'interaction sol-pieu est négligeable (Bolton et al., 1999).

Les conteneurs sont préparés par pluviation automatisée (Garnier, 2001), assurant une densité homogène et une bonne répétabilité. La densité du sable obtenue est de $1,643 \text{ g/cm}^3$, correspondant à une densité relative moyenne de 74 %.

Le pieu énergétique modèle est installé selon la méthode *wished-in-place*, avec une profondeur encastrée de 600 mm, soit environ $20D$. Le pieu est maintenu en position pendant la mise en place du sable par pluviation, ce qui permet de représenter un pieu foré dans du sable sec. Une longueur libre de 100 mm (environ $4D$) est laissée au-dessus de la surface du sol afin de faciliter l'application du chargement.

5.2 Chargement mécanique incliné en centrifugeuse

La Figure 1 présente un schéma du dispositif expérimental en centrifugeuse utilisé pour l'essai du pieu énergétique, ainsi qu'une coupe verticale et une coupe horizontale à $3D$ du pieu. Un vérin hydraulique de chargement est utilisé pour appliquer le chargement incliné sur le pieu en aluminium à l'emplacement souhaité. Le chargement est appliqué par un vérin hydraulique actionné par un moteur électrique.

Le dispositif de chargement est composé de trois éléments principaux, comme illustré sur la figure. Le premier élément est une fourche verticale, directement reliée au vérin hydraulique. Cette fourche entre en contact avec une barre horizontale traversant le centre du pieu énergétique à une hauteur de $2D$ au-dessus de la surface du sol. Le vérin hydraulique est incliné d'un angle de 12° afin de générer la combinaison souhaitée de charges verticales et horizontales appliquées au pieu.

Le vérin hydraulique, relié au moteur électrique, contrôle le chargement appliqué et est équipé d'un capteur de force externe ainsi que de capteurs de déplacement du vérin horizontal, permettant de mesurer respectivement le chargement incliné appliqué en tête du pieu et le déplacement associé. Quatre capteurs de déplacement de type potentiomètre sont utilisés pour mesurer les déplacements en tête du pieu en deux positions distinctes, situées à $3D$ et $6D$ au-dessus de la surface du sol. À chaque position, deux potentiomètres sont installés : l'un pour mesurer le déplacement horizontal et l'autre pour mesurer le déplacement vertical. Ces deux points de mesure sont séparés par une distance verticale de $1D$, ce qui permet de détecter et de quantifier toute rotation de la tête du pieu induite par le chargement incliné appliqué.

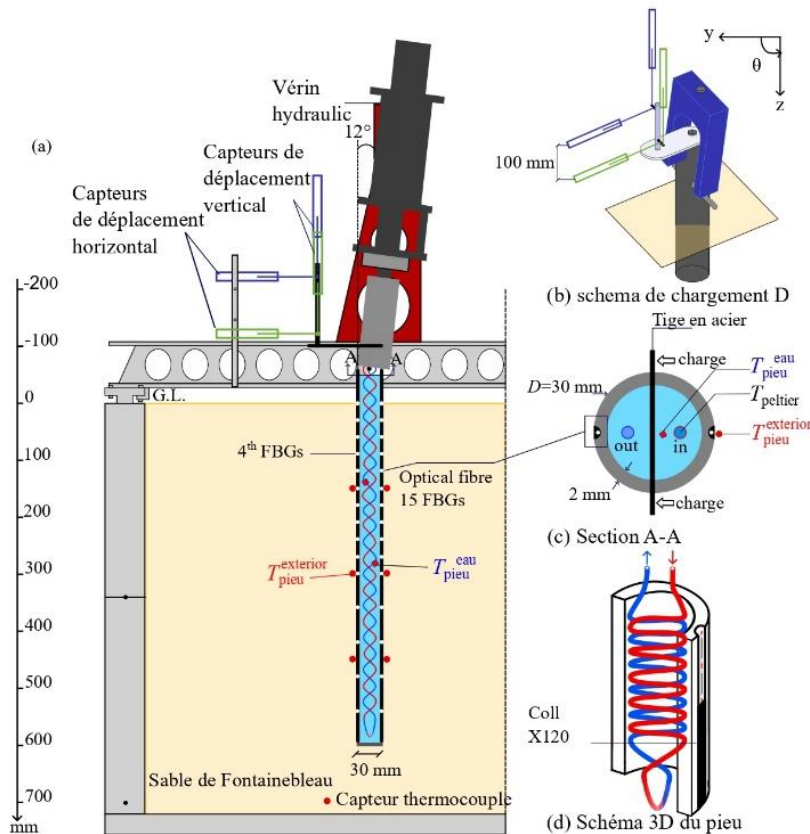


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental : (a) système de chargement incliné en centrifugeuse ; (b) vue oblique du schéma 2D mettant en évidence la position des capteurs de déplacement ; (c) coupe verticale du pieu à la section A-A ; (d) coupe horizontale 3D du pieu.

5.3 Dispositif de charge thermique

Un système de contrôle thermique en circuit fermé est mis en place afin d'imposer des cycles de chauffage et de refroidissement au pieu énergétique modèle durant le vol en centrifugeuse. Il comprend un module Peltier, une pompe péristaltique, des capteurs de température, un piège à bulles et des conduites isolées (Figure 2). Le module Peltier permet de chauffer ou de refroidir l'eau par inversion du courant électrique, tandis que la pompe péristaltique assure sa circulation à débit contrôlé (700 ml/min) dans un tube en cuivre hélicoïdal intégré au pieu. Cette configuration, préférée à un tube en U, permet d'obtenir une température du pieu aussi homogène que possible (Zarrella et al., 2013). Le pieu est rempli d'eau afin

d'assurer un transfert thermique efficace vers l'aluminium et le sol environnant.

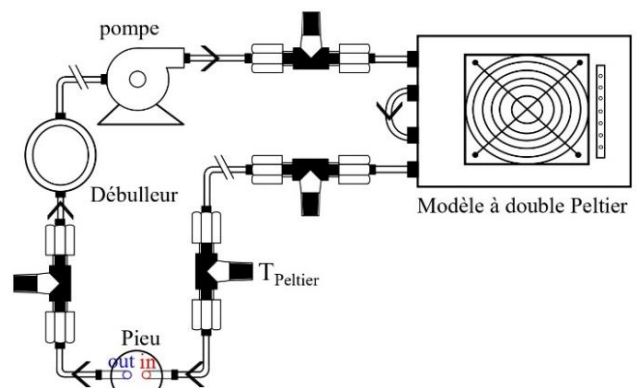


Figure 2 Schéma de l'installation thermique

La température du fluide est mesurée à l'entrée et à la sortie du pieu ainsi qu'au niveau du module Peltier. Deux thermocouples de type K sont installés à l'intérieur du pieu, tandis que six autres sont fixés à sa surface à différentes profondeurs afin de suivre la distribution thermique le long du fût. Leur faible encombrement rend leur influence sur l'interface sol-pieu négligeable. En complément, trois capteurs de

température sont disposés dans le sol à proximité du pieu afin d'évaluer les gradients thermiques et de fournir des valeurs de référence pour la validation des calculs inverses issus des mesures par fibres optiques.

6 RESULTATS ET DISCUSSION

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

Lorsque la centrifugeuse a atteint l'accélération cible, un chargement mécanique incliné a été appliqué à une hauteur de $2D$ au-dessus de la surface du sol et progressivement augmenté jusqu'à 2067 kN (échelle prototype). Ce chargement correspond à la combinaison des résultats obtenus lors des essais antérieurs sous sollicitations horizontales 430 kN et axiales 2022 kN, ayant conduit à la définition de l'amplitude de charge et de l'angle d'inclinaison adoptés. Cette phase de chargement a conduit à un déplacement horizontal d'environ $7,7 \%D$, un déplacement vertical de l'ordre de $5 \%D$, comme illustré sur la Figure 3. Le chargement mécanique a ensuite été maintenu constant afin de permettre le développement des effets de fluage et d'isoler, par la suite, l'influence du chargement thermique sur le comportement du pieu.

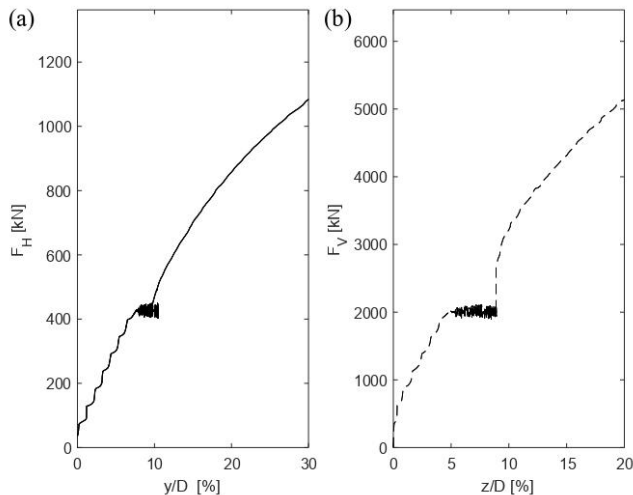


Figure 3 Comportement charge-déplacement

Après une période de fluage correspondant à 1 heure de temps modèle, le chargement thermique a été initié. Le programme thermique comprenait cinq phases successives, chacune composée de dix cycles de chauffage-refroidissement. Les amplitudes de température imposées étaient de $\Delta T = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la phase 1, $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la phase 2, $\Delta T = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pour

la phase 3, $\Delta T = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la phase 4 et $\Delta T = 20,8 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la phase 5. À chaque phase, l'influence des variations de température sur le comportement du pieu a été analysée. Le choix de ces amplitudes de température vise à fournir des données expérimentales nécessaires à la calibration et à l'amélioration du modèle numérique.

6.1 Comportement mécanique

La Figure 3 présente la réponse mécanique du pieu soumis à un chargement incliné. Bien que la charge soit appliquée selon une direction inclinée, elle est décomposée en ses composantes latérale et axiale pour l'analyse des résultats. La sous-figure (a) montre le déplacement latéral y , normalisé par le diamètre du pieu D et exprimé en pourcentage, en fonction de la composante latérale du chargement appliqué. La sous-figure (b) présente le tassement z , également normalisé par D et exprimé en pourcentage, en fonction de la composante axiale du chargement.

Dans la Figure 3a, la composante latérale du chargement incliné est progressivement augmentée jusqu'à 430 kN, valeur définie sur la base d'essais expérimentaux antérieurs. Le déplacement latéral atteint alors environ $7,7 \%D$. Le chargement incliné est ensuite maintenu constant. Durant cette phase, le fluage se développe tandis que les cycles thermiques sont appliqués sous chargement mécanique constant. Le palier observé correspond aux effets combinés du fluage et du chargement thermique. Sous ces sollicitations thermo-mécaniques couplées, une augmentation supplémentaire du déplacement latéral d'environ $2 \%D$ est enregistrée. Par la suite, le chargement incliné est de nouveau augmenté afin d'évaluer le comportement du pieu après l'application des cycles thermiques.

De manière similaire, la Figure 3b montre que la composante axiale du chargement incliné entraîne un tassement atteignant environ $5 \%D$ lorsque la charge maximale est appliquée. Le chargement est ensuite maintenu constant ; le palier observé résulte également de la combinaison du fluage et du chargement thermique. Une augmentation supplémentaire du tassement d'environ $5 \%D$ est alors mesurée sous cycles thermiques. Enfin, le chargement incliné est de nouveau augmenté afin d'analyser la réponse mécanique du pieu après sollicitation thermique. Effets du chargement thermique sur la réponse mécanique du pieu

6.2 Effets du chargement thermique sur la réponse mécanique du pieu

La Figure 4 illustre la réponse thermo-mécanique du pieu au cours de la phase thermique. La sous-figure (a) présente l'évolution de la température en fonction du temps modèle. La sous-figure (b) montre la réponse mécanique correspondante, avec le tassement représenté par la courbe noire en pointillés et le déplacement latéral par la courbe noire continue, également en fonction du temps modèle. L'ensemble de la durée représentée correspond à la phase thermique, durant laquelle des cycles de température d'amplitudes croissantes (ΔT), définies précédemment, sont appliqués sous chargement mécanique constant.

Il apparaît clairement que chaque phase de cycles thermiques entraîne une augmentation du déplacement latéral et du tassement. De plus, lorsque l'amplitude de température augmente, l'augmentation des déformations devient plus marquée. En particulier, des valeurs plus élevées de ΔT conduisent à des accroissements plus importants du déplacement latéral ainsi que du tassement, mettant en évidence l'influence de l'intensité du chargement thermique sur la réponse mécanique du pieu.

7 CONCLUSIONS

Cette étude analyse le comportement de pieux énergétiques en aluminium soumis à un chargement incliné en centrifugeuse à 26,7 g. Le pieu, de longueur dans le sol de 20D (16 m à l'échelle prototype), a été chargé jusqu'à 2067 kN, puis soumis à 50 cycles thermiques.

- Les cycles thermiques sous chargement mécanique constant induisent une augmentation progressive des déplacements et de l'angle de rotation en tête de pieu.
- Cette étude confirme l'influence des effets thermo-mécaniques couplés sur le comportement en service des pieux énergétiques en sable.

Des travaux futurs porteront sur l'influence de l'élançement, de la saturation du sol et de variations de température plus importantes.

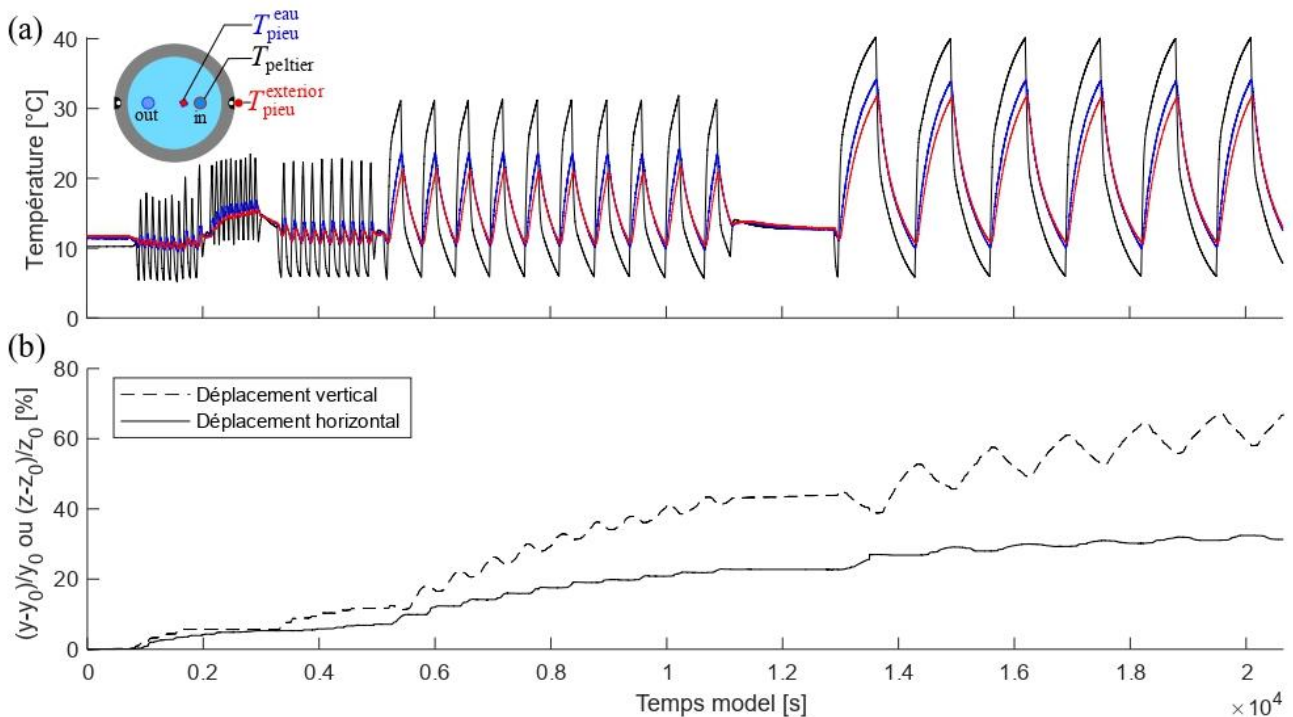


Figure 4 Évolution de la température et des déplacements normalisés au cours de la phase thermique

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'organisme de financement l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour son soutien financier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bolton, M. D., Gui, M. W., Garnier, J., Corte, J. F., Bagge, G., Laue, J., & Renzi, R. (1999). Centrifuge cone penetration tests in sand. *Géotechnique*, 49(4), 543–552. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.4.543>
- Chen, Z., Zhao, H., Wang, C., Bouazza, A., & Kong, G.-Q. (2023). Deformation characteristics of energy piles subjected to horizontal load under heating–cooling cycles in sand. *Acta Geotechnica*, 18, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01862-z>
- Cunha, R. P., & 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*, 158, 112072. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112072>
- Garnier, J. (2001). Modèles physiques en géotechnique—I – Évolution des techniques expérimentales et des domaines d'application. *Revue Française de Géotechnique*, (97), Article 97. <https://doi.org/10.1051/geotech/2001097003>
- Jain, N. K., Ranjan, G., & Ramasamy, G. (1987). Effect of vertical load on flexural behaviour of piles. *Geotechnical Engineering*, 18(2), 185–204.
- Karasev, O. V., Talanov, G. P., & Benda, S. F. (1977). Investigation of the work of single situ-cast piles under different load combinations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 14(3), 173–177. <https://doi.org/10.1007/BF02092686>
- Khamis, E., Dubreucq, T., Blanc, M., de Sauvage, J., Badinier, T., Szymkiewicz, F., Pereira, J.-M., Tang, A. M., Vasilescu, R., & Mroueh, H. (2024, June). Etude en centrifugeuse d'un pieu géothermique en ciment armé sous chargement horizontal en tête. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Poitiers 2024*. <https://univ-eiffel.hal.science/hal-04737188>
- Lu, W., & Zhang, G. (2018). Influence mechanism of vertical-horizontal combined loads on the response of a single pile in sand. *Soils and Foundations*, 58(5), 1228–1239. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.002>
- McCartney, J. S. (2013). Centrifuge Modeling of Energy Foundations. In *Energy Geostructures* (pp. 99–115). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118761809.ch5>
- Mohamad, Z., Fardoun, F., & Meftah, F. (2021). A review on energy piles design, evaluation, and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125802>
- Mroueh, H., Badinier, T., Blanc, M., Dubreucq, T., Sauvage, J. de, Szymkiewicz, F., Pereira, J.-M., Tang, A.-M., & Vasilescu, R. (2024). COOP Project: Energy piles under combined loading. In *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. CRC Press.
- Ng, C. W. W., & Ma, Q. J. (2019). Energy pile group subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading in centrifuge. *Géotechnique Letters*, 9(3), 173–177. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00161>
- Nouri, A., Noorzad, A., Pereira, J.-M., & Tang, A. M. (2023). Small-scale cyclically thermally-activated pile under inclined mechanical loads. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3683–3696. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01807-6>
- Ouzzine, B., de Sauvage, J., Hemmati, S., Badinier, T., Blanc, M., Dubreucq, T., Chevalier, C., & Reiffsteck, P. (2024). Scaling laws for the modelling of energy geostructures. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 24(4), 202–216. <https://doi.org/10.1680/jphmg.22.00073>
- Pei, H., Song, H., Meng, F., & Liu, W. (2022). Long-term thermomechanical displacement prediction of energy piles using machine learning techniques. *Renewable Energy*, 195, 620–636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.057>
- Song, H., Pereira, J.-M., Tang, A. M., & Pei, H. (2025). Thermally-induced long-term behavior of energy piles under inclined load in saturated clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1–23. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0416>
- Stewart, M. A., & McCartney, J. S. (2014). Centrifuge Modeling of Soil-Structure Interaction in Energy Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4), 04013044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001061](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001061)
- Vitali, D., Leung, A. K., Feng, S., Knappett, J. A., & Ma, L. (2022). Centrifuge modelling of the use of discretely spaced energy pile row to reinforce unsaturated silt. *Géotechnique*, 72(7), 618–631. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.157>
- Zarella, A., De Carli, M., & Galgaro, A. (2013). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube.

Applied Thermal Engineering, 61(2), 301–310.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.011>

Zhao, R., Leung, A. K., & Knappett, J. A. (2023). Thermally induced ratcheting of a thermo-active reinforced concrete pile in sand under sustained lateral load. *Géotechnique*, 73(9), 826–839.
<https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00299>