

Comportement thermomécanique d'un pieu énergétique instrumenté en conditions réelles d'exploitation : résultats de la première année de suivi à l'hôpital d'Oradea

Thermo-Mechanical Behaviour of an Instrumented Energy Pile under Real Operating Conditions: First-Year Monitoring at Oradea Hospital

Leyla COGALAN¹, Octavian BUJOR^{2*}, Hussein MROUEH¹, Roxana VASILESCU³, Zsolt NAGY², Iulia Consuela PRODAN²

1 Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE), Université de Lille, Béthune, France

2 Université technique de Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Roumanie

3 PINTO, Fougères, France

**octavian.bujor@dst.utcluj.ro*

RESUME : Les bâtiments représentent près de 40 % de la consommation énergétique totale en Europe, majoritairement imputable aux besoins en chauffage et en refroidissement, ce qui constitue un levier majeur de la transition énergétique. Dans ce contexte, les pieux énergétiques constituent une solution à la fois économique et bas carbone, en étendant la fonction des pieux de fondation par l'intégration d'un rôle d'échangeur de chaleur destiné au chauffage et au rafraîchissement des bâtiments. Cette étude présente le suivi en conditions réelles d'exploitation d'un pieu énergétique instrumenté sous l'extension du service d'urgence de l'hôpital d'Oradea (Roumanie), en service depuis 2020. La fondation comprend 230 pieux énergétiques (600 mm de diamètre, 10 m de profondeur), dont quatre sont instrumentés par des capteurs thermomécaniques. L'analyse porte sur une année complète, incluant des phases de chauffage, de refroidissement et de repos. Les mesures mettent en évidence une réponse thermique saisonnière marquée, avec des amplitudes comprises entre -12 °C en hiver et +15 °C en été, et des déformations axiales corrélées variant de -110 µε à +140 µε. Ces résultats fournissent une base expérimentale solide pour la validation des modèles thermomécaniques des pieux énergétiques.

ABSTRACT: Buildings account for nearly 40% of total energy consumption in Europe, largely driven by heating and cooling demands, highlighting the need for efficient and low-carbon solutions. In this context, energy piles offer an economically viable alternative by combining structural load-bearing and geothermal functions within building foundation systems to provide low-carbon heating and cooling. This study presents the monitoring of an instrumented energy pile under real operating conditions beneath the emergency department extension of Oradea Hospital (Romania), in service since 2020. The foundation includes 230 energy piles (600 mm diameter, 10 m length), four of which are equipped with thermo-mechanical sensors. The analysis focuses on one pile monitored over a full year, covering heating, cooling and resting phases. Results show a pronounced seasonal thermal response, with temperature variations ranging from -12 °C in winter to +15 °C in summer and thermally induced axial strains between -110 µε and +140 µε. These observations provide a robust experimental basis for validating coupled thermo-mechanical models of energy piles.

Mots-clés: Pieux énergétiques ; Géostrucures énergétiques ; Échange géothermique ; Suivi expérimental.

1 INTRODUCTION

La transition du secteur du bâtiment vers des pratiques bas carbone constitue un pilier majeur de la stratégie européenne en faveur de la neutralité climatique à l'horizon 2050. Les bâtiments représentent aujourd'hui près de 40 % de la consommation énergétique totale en Europe, dont environ 80 % est associée au chauffage, au rafraîchissement et à la production d'eau chaude sanitaire (Eurostat 2023).

Cette situation souligne la nécessité de développer des solutions constructives à la fois durables et efficaces sur le plan énergétique. Dans ce contexte, les géostrucures énergétiques, et en particulier les pieux énergétiques, apparaissent comme une solution pertinente, en associant la fonction porteuse des fondations à l'échange d'énergie avec le sol.

Les pieux énergétiques sont des éléments de fondation intégrant des échangeurs de chaleur, permettant de mobiliser la relative stabilité thermique

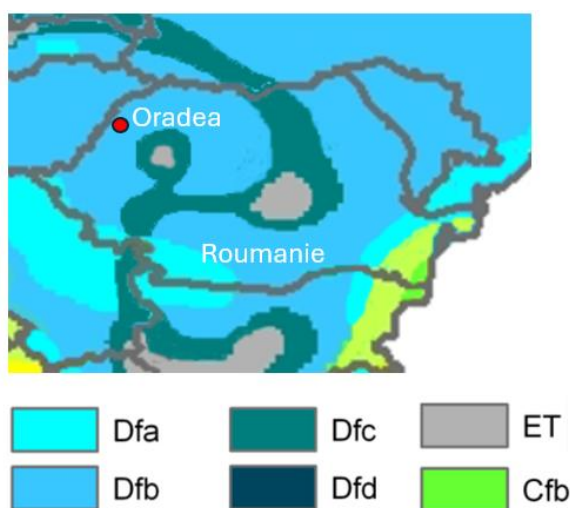
du sol pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Cette multifonctionnalité présente plusieurs avantages, notamment une réduction des coûts d'exploitation des bâtiments grâce au recours à une énergie renouvelable à faible coût, une amélioration de l'efficacité énergétique, ainsi qu'une diminution des émissions de carbone et de l'emprise foncière en milieu urbain. Depuis les travaux de (Brandl, 1998, 2006, 2013, 2016) qui mettent en évidence les bénéfices environnementaux et économiques de ces systèmes, les pieux énergétiques connaissent un développement croissant. Leur capacité à fournir une énergie durable tout en répondant aux exigences géotechniques a été confirmée par de nombreuses études menées à l'échelle internationale (Laloui & Rotta Loria, 2019; Salciarini et al., 2026).

Malgré la mise en œuvre de plus en plus fréquente des pieux énergétiques, certaines incertitudes persistent quant à leur comportement thermomécanique en conditions réelles d'exploitation. Si les essais en laboratoire et les expérimentations de courte durée in situ (Amatya et al., 2012; Bourne-Webb et al., 2009; Knellwolf et al., 2011; Mimouni & Laloui, 2013, 2015; Olgun, Abdelaziz, et al., 2012; Olgun, Martin, et al., 2012; Qiu et al., 2025; Sutman, 2016) ont permis d'éclaircir certains mécanismes de couplage thermique et mécanique, les données de suivi à long terme en

conditions opérationnelles demeurent limitées. Or, les sollicitations thermiques journalières et saisonnières, combinées aux charges structurales, induisent des réponses mécaniques complexes — telles que des déformations axiales et des redistributions de contraintes — dont les effets à long terme sur l'intégrité structurale et la performance énergétique restent encore insuffisamment étudiés (Brandl, 1998, 2006, 2013, 2016; McCartney & Murphy, 2017; Murphy & McCartney, 2015; Prodan et al., 2021; Stewart & McCartney, 2012; A.-R. Vasilescu, 2019).

Ce manque de recul est particulièrement impactant pour les bâtiments à forte demande énergétique continue, dont les fondations doivent présenter un comportement fiable sous sollicitations mécaniques et thermiques combinées sur le long terme. Une meilleure compréhension du comportement thermomécanique in situ des pieux énergétiques est donc essentielle pour intégrer de manière maîtrisée les charges thermiques dans la conception des ouvrages, optimiser les projets et garantir une exploitation sûre et durable des fondations.

Les résultats de cette étude présentent un intérêt pour un large spectre d'ingénieurs (ingénieurs géotechniciens, ingénieurs CVC, etc.) ainsi que pour les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les architectes impliqués dans la conception de bâtiments et d'infrastructures bas carbone. En apportant un éclairage sur le comportement thermomécanique réel des pieux énergétiques dans un bâtiment à forte



Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. (University of Melbourne) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_Köppen_Map.png), „Europe Köppen Map“, Zoom Romania by RV, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

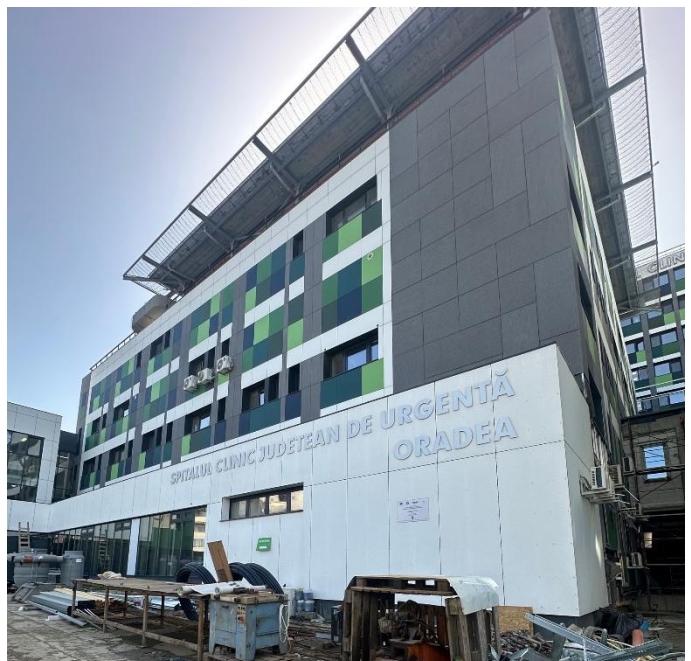


Figure 1 : (a) Localisation d'Oradea sur la carte climatique de la Roumanie selon la classification de Köppen; (b) vue extérieure de l'extension du service des urgences de l'hôpital clinique départemental d'Oradea.

demande, ce travail contribue à renforcer la confiance dans la viabilité structurelle et thermique de ces systèmes à long terme. Les enseignements tirés de cette étude peuvent également alimenter l'évolution des pratiques de dimensionnement et des approches de modélisation, en vue d'améliorer la fiabilité des hypothèses de comportement sur des horizons de service étendus.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROGRAMME DE SUIVI

L'étude concerne des pieux énergétiques assurant la reprise des charges d'un nouvel ouvrage réalisé dans le cadre de l'extension du service des urgences de l'hôpital départemental d'Oradea, en Roumanie (Figure 1 (a) et (b)). Afin d'assurer la totalité des besoins en chauffage et en rafraîchissement du bâtiment, l'ensemble des 230 pieux de fondation a été équipé d'échangeurs thermiques. Ces pieux forés à la tarière creuse continue ont un diamètre de 600 mm pour une longueur de 9.6m.

Tableau 1

Profile	Z (m)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ν (-)	E (MPa)
Argile Molle	-4.85	15	28	0.42	14
Argile raide	<	20	33	0.42	30

Les investigations géotechniques réalisées ont mis en évidence la présence de 4.85m d'argiles compressibles aux caractéristiques géotechniques défavorables (Figure 2). Cette couche superficielle repose sur une argile raide, d'âge pannonien, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres. Cette formation constitue le substratum de référence dans une grande partie de la région de Transylvanie (Prodan et al., 2021). La nappe phréatique a été interceptée à environ 1 m sous la tête des pieux.

En complément des reconnaissances géotechniques, un essai de réponse thermique (TRT) a été conduit sur le site afin de caractériser son comportement thermique. L'exploitation des données issues de cet essai constitue une étape importante pour évaluer la mise en œuvre de géostructures énergétiques (Loveridge & Powrie, 2014). Le *Tableau 2* présente les résultats obtenus à l'issue de l'interprétation des données du TRT, ainsi que les valeurs retenues par la suite pour le dimensionnement énergétique et thermomécanique (Prodan et al., 2021).

228 pieux énergétiques, armés tout hauteur, sont équipés des échangeurs de chaleur en boucle fermée

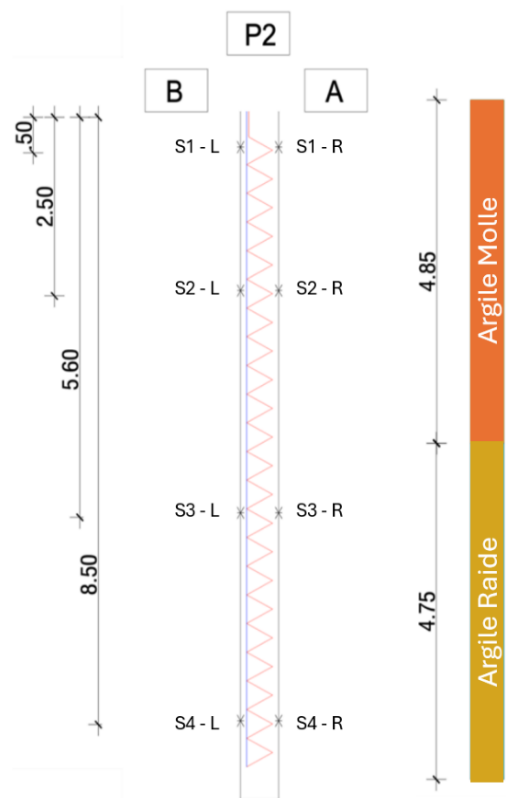


Figure 2 : Schéma du pieu instrumenté P2.

constitués de tubes en polyéthylène réticulé (PEXa) de 16 mm de diamètre, disposés selon une configuration hélicoïdale avec un pas de spire de 20 cm. Deux pieux ont été équipés de configurations d'échangeurs distinctes : l'un avec un échangeur hélicoïdal à pas de spire de 40 cm, l'autre avec un échangeur de type double U. Ces dispositifs ont été mis en œuvre afin d'examiner l'influence de la géométrie et de l'espacement des tubes sur la performance énergétique ; toutefois, ces pieux ne sont pas considérés dans l'analyse présentée dans cette étude. Le système fonctionne avec un fluide caloporteur eau-glycol (30 % de glycol) et est couplé à une pompe à chaleur eau glycolée/eau de type DIMPLEX SI130 (130kW).

Tableau 2

Paramètre	Valeur
Profondeur réelle	17 m
Configuration	2U
Diamètre de forage	160 mm
Diamètre des tubes	40 mm
Conductivité thermique du coulis	2.1 W/mK
Puissance d'essai	52 W/m
Débit	1234 l/h
Capacité thermique volumique du sol	2 MJ/m ³ K
Conductivité thermique du sol	1.45 W/mK

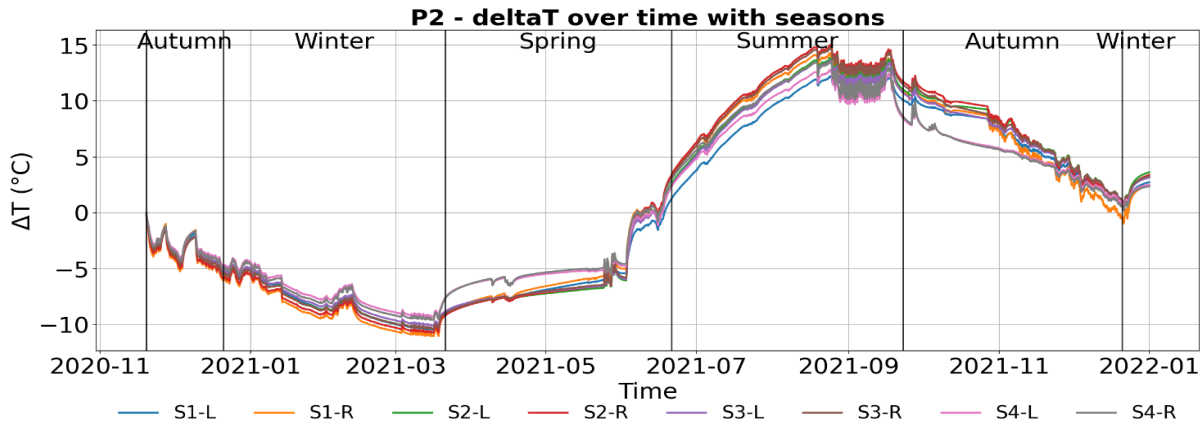


Figure 3: Évolution temporelle de la variation de température (ΔT) au fil des saisons pour le pieu P2

Quatre pieux, désignés P1 à P4, ont été instrumentés afin de caractériser leur réponse thermique et mécanique. L'instrumentation, fixée directement sur les cages d'armature, comprend des capteurs à corde vibrante et des thermistances. La température a été mesurée à l'aide de thermistances NTC3000, avec une précision de $\pm 0,1$ °C, tandis que les déformations axiales ont été suivies au moyen de capteurs à corde vibrante de type VWS-2100, présentant une précision de ± 3 $\mu\epsilon$. Les mesures ont été réalisées à quatre profondeurs : 0,5 m, 2,5 m, 5,6 m et 8,5 m (Figure 2).

Bien que la conception initiale prévoie une instrumentation symétrique de part et d'autre des cages d'armature à chaque niveau, des contraintes liées aux conditions de chantier ainsi qu'à la capacité des centrales d'acquisition ont limité la mise en œuvre complète à un seul pieu. Ainsi, seul le pieu P2 dispose de l'instrumentation intégrale, tandis que les 3 autres pieux présentent une configuration simplifiée de type alterné.

La campagne de suivi a débuté en novembre 2020, date à laquelle les pieux géothermiques ont été mis en exploitation. Lors de la phase de mise en service de la pompe à chaleur, les données ont été acquises à un pas de temps de 15 minutes, puis espacées à une fréquence horaire afin de maîtriser le volume de données tout en conservant une résolution temporelle suffisante pour l'analyse. L'ensemble des capteurs a été étalonné avant leur installation, et les mesures ont été enregistrées au moyen d'un système centralisé d'acquisition de données.

La présente étude se concentre sur l'analyse des résultats obtenus sur le pieu P2 au cours de la première année d'exploitation.

3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Comportement thermique

La variation de température, notée $\Delta T(z, t)$, est définie comme l'écart entre la température mesurée $T(z, t)$ à une profondeur z et à un instant t donnés, et la température de référence initiale $T(z, ref)$, enregistrée au début de la période de suivi :

$$\Delta T(z, t) = T(z, t) - T(z, ref) \quad (1)$$

La Figure 3 présente l'évolution temporelle de la variation de température (ΔT) enregistrée par les huit thermistances disposées le long du pieu P2. Les capteurs sont positionnés à quatre profondeurs (0,5 m, 2,5 m, 5,6 m et 8,5 m), de part et d'autre de la cage d'armature. Les mesures couvrent une période continue d'une année, et correspondent à des conditions réelles d'exploitation incluant des phases de chauffage, de rafraîchissement et de mise à l'arrêt du système.

La réponse thermique du pieu met en évidence une cyclicité saisonnière marquée. Durant la période hivernale, comprise entre décembre et mars, les variations de température ΔT restent négatives à l'ensemble des profondeurs, traduisant un fonctionnement dominé par l'extraction de chaleur depuis le sol. À l'inverse, au cours de la période estivale de rafraîchissement (juillet–août), les valeurs de ΔT deviennent nettement positives, témoignant d'une injection de chaleur dans le milieu environnant. Des comportements intermédiaires sont observés au printemps et à l'automne, caractérisés par des valeurs de ΔT proches de zéro ou présentant un changement

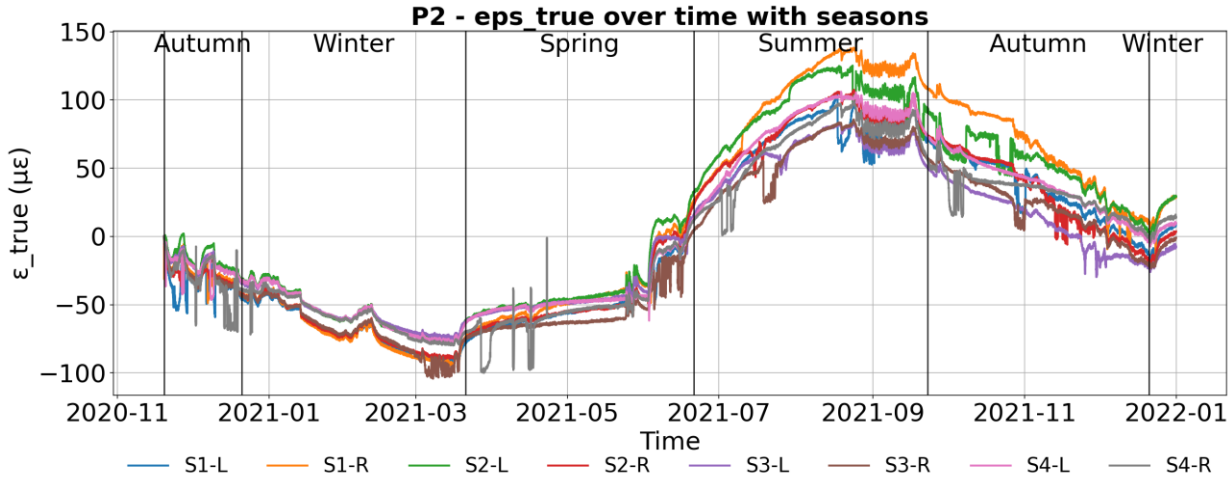


Figure 4: Évolution temporelle de la déformation axiale du pieu P2.

de signe, correspondant aux phases de transition entre les régimes de chauffage et de rafraîchissement.

Les amplitudes maximales sont atteintes en été, avec des ΔT de l'ordre de $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis qu'en hiver, l'extraction thermique intensive conduit à des valeurs minimales avoisinant $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces gradients thermiques intermédiaires observés lors des saisons de transition sont représentatifs du basculement progressif entre les modes de fonctionnement du système.

3.2 Comportement mécanique

Les variations de déformation axiale aux différentes profondeurs z , notées $\Delta\varepsilon_{mesurée}(z, t)$ et exprimés en $\mu\text{m}/\text{m}$, ont été déterminées à partir des variations de fréquence enregistrées par les capteurs à corde vibrante. Ces variations ont été converties en microdéformations à l'aide du facteur de jauge et des coefficients de calibration fournis par le fabricant. Par convention, les valeurs positives traduisent un allongement du pieu (traction), tandis que les valeurs négatives correspondent à un raccourcissement (compression).

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{mesurée}(z, t) & \\ &= (F^2(z, t) \\ &\quad - F_0^2(z, ref)) \cdot G \cdot B \end{aligned} \quad (2)$$

Où :

$F(z, t)$ - fréquence enregistrée par les capteurs à corde vibrante à la profondeur z et à l'instant t .

$F(z, ref)$ - fréquence enregistrée par les capteurs à corde vibrante à la profondeur z et à l'instant de référence.

$G = 3.718$ - facteur de jauge (gauge factor)

$B = 0.938$ - coefficients de calibration (batch factor)

Les valeurs de déformation ont été ensuite corrigées afin de tenir compte de l'influence des variations de température sur la déformation de la corde vibrante:

$$\Delta\varepsilon_{true} = \Delta\varepsilon_{mesurée} + \alpha_s \Delta T \quad (3)$$

Où :

$\Delta\varepsilon_{true}$ - déformation corrigée.

α_s - coefficient de déformation théorique de la corde vibrante.

On fait l'hypothèse que les déformations présentées par la suite sont principalement induites par l'activation géothermique des fondations, dans la mesure où l'acquisition des données a débuté après la mise en service de la pompe à chaleur, et donc après la mise en exploitation du bâtiment. Par ailleurs, les variations de charges mécaniques au cours de la période étudiée sont supposées négligeables.

La Figure 4 présente l'évolution temporelle de la déformation $\Delta\varepsilon_{true}$ du pieu P2, mesurée à quatre profondeurs différentes et sur les deux faces de ce pieu. Les données mettent clairement en évidence une réponse thermomécanique saisonnière, caractérisée par une contraction en période hivernale et une dilatation durant la période estivale, observée de manière cohérente sur l'ensemble des capteurs. Sur la période de suivi, comprise entre novembre 2020 et décembre 2021, deux phases principales peuvent être distinguées : une diminution progressive des déformations de l'automne au printemps ($\Delta\varepsilon_{true} < 0$), traduisant une contraction thermique, suivie d'une augmentation marquée au cours des mois d'été ($\Delta\varepsilon_{true} > 0$), associée à une dilatation thermique.

Les déformations maximales en compression, de l'ordre de $-110\text{ }\mu\text{ε}$, ont été enregistrées en mars 2021 dans la partie inférieure du pieu (S3-R à 5,6 m et S4-R

à 8,5 m). À l'inverse, les déformations maximales en traction, atteignant environ $+140 \mu\epsilon$, ont été observées en août 2021, au niveau le plus proche de la tête du pieu (S1-R, 0,5 m). À chaque profondeur, les capteurs positionnés de part et d'autre du pieu présentent des évolutions globalement similaires, bien que de légères différences d'amplitude soient observables, en particulier à proximité de la tête du pieu.

Ces résultats indiquent que l'évolution des déformations est étroitement corrélée aux variations thermiques saisonniers, le béton se contractant durant les périodes froides et se dilatant au cours des périodes plus chaudes. La quasi-symétrie et la réversibilité des courbes sur le cycle annuel suggèrent un comportement élastique du matériau, sans dérive plastique significative. Les différences d'amplitude observées selon la profondeur peuvent être attribuées à des variations des gradients thermiques ou à des conditions locales d'interaction entre le pieu et le sol.

4 ANALYSE ET DISCUSSION

Le suivi thermique réalisé sur le pieu énergétique instrumenté de l'hôpital d'Oradea met en évidence une évolution temporelle présentant une périodicité proche du cycle annuel. Les variations de température mesurées le long du pieu atteignent des valeurs maximales d'environ $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ durant la période estivale, tandis que des minima de l'ordre de $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ sont observés en hiver. Cette alternance traduit le fonctionnement cyclique du système géothermique, soumis aux besoins saisonniers de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment.

Sur l'année de suivi, l'amplitude absolue associée à l'injection de chaleur dans le sol apparaît légèrement supérieure à celle observée lors de l'extraction de chaleur. Cette dissymétrie suggère une exploitation marginalement orientée vers le rafraîchissement sur la période considérée, sans pour autant indiquer un déséquilibre thermique marqué du système. Cette observation doit être interprétée à la lumière du contexte climatique et des conditions d'exploitation spécifiques à l'année 2021, marquée par des épisodes estivaux exceptionnellement chauds en Europe centrale et orientale. Par ailleurs, la fonction hospitalière du bâtiment, caractérisée par une occupation continue, des apports internes élevés et des exigences strictes en matière de confort thermique, est susceptible d'avoir accru la demande en rafraîchissement et, par conséquent, l'injection thermique dans le sol.

La mise en perspective de ces résultats avec des études de référence souligne l'influence conjointe du climat et des modalités d'exploitation sur la réponse

thermique des pieux énergétiques. Dans le cas étudié par Brandl (2006) à Bad Schallerbach, les amplitudes thermiques observées sont plus symétriques, reflétant des besoins saisonniers relativement équilibrés. À l'inverse, McCartney et Murphy (2014) ont rapporté à Denver des valeurs de ΔT nettement plus élevées en période estivale, associées à un climat semi-aride et à une demande de rafraîchissement dominante. Bien que le contexte climatique de Denver diffère de celui d'Oradea, la comparaison suggère que des étés particulièrement chauds peuvent infléchir temporairement le fonctionnement thermique des pieux énergétiques, même dans des climats continentaux humides. À l'opposé, Vasilescu (2019) a observé des amplitudes thermiques plus faibles et plus symétriques (environ $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) pour le projet de Sept-Sorts, cohérentes avec un climat océanique tempéré et une intensité d'usage plus modérée du bâtiment instrumenté.

Les mesures de déformation axiale réalisées sur le pieu d'Oradea montrent une évolution saisonnière cohérente avec les variations thermiques. En période hivernale, les déformations axiales négatives, correspondant à un raccourcissement du pieu, sont dominantes, tandis qu'en période estivale, l'augmentation de la température s'accompagne de déformations positives, traduisant un allongement axial. L'amplitude des déformations mesurées s'inscrit dans les ordres de grandeur classiquement rapportés dans la littérature pour des pieux énergétiques en conditions réelles d'exploitation. À titre comparatif, McCartney et Murphy (2014) ont mesuré à Denver des déformations atteignant environ $-200 \mu\epsilon$ en hiver et $+100 \mu\epsilon$ en été, selon la profondeur, tandis que Vasilescu (2019) rapporte des valeurs généralement inférieures à $\pm 50 \mu\epsilon$ à Sept-Sorts. Ces différences reflètent les écarts de sollicitations thermiques, de dimensions des ouvrages et d'intensité d'usage des bâtiments. Dans l'ensemble, les résultats d'Oradea s'inscrivent dans la continuité des observations issues de systèmes de plus grande échelle ou soumis à des charges énergétiques plus élevées, confirmant que l'amplitude des déformations est étroitement liée aux gradients thermiques, aux caractéristiques géométriques des pieux et aux conditions d'exploitation du système géothermique.

5 CONCLUSIONS

Cette étude présente les résultats issus de la première année de suivi continu d'un pieu énergétique instrumenté, mis en œuvre sous l'extension du service des urgences de l'hôpital d'Oradea. La campagne de mesure a permis de caractériser le comportement

thermomécanique du pieu en conditions réelles d'exploitation, dans un contexte climatique continental.

La réponse thermique mesurée montre une variabilité saisonnière nette, avec des variations de température comprises entre $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ en période hivernale, correspondant aux phases d'extraction de chaleur, et $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en période estivale, associées aux phases d'injection thermique. Sur l'année de suivi, l'amplitude absolue de l'injection de chaleur apparaît légèrement supérieure à celle de l'extraction, traduisant une asymétrie modérée de l'exploitation, orientée vers le rafraîchissement. Cette observation, bien que limitée à une seule année, est notable dans une région traditionnellement dominée par les besoins en chauffage et met en évidence l'influence conjointe des conditions climatiques saisonnières, de l'usage du bâtiment et des modalités d'exploitation du système.

Les mesures de déformation axiale suivent également une évolution saisonnière cohérente avec la réponse thermique du pieu. Les déformations négatives, associées à un raccourcissement du pieu, sont prédominantes en période hivernale, tandis que les déformations positives, correspondant à un allongement, apparaissent en période estivale. Les amplitudes mesurées restent dans les ordres de grandeur classiquement rapportés pour des pieux énergétiques en fonctionnement et la réversibilité des courbes sur le cycle annuel indique un comportement globalement élastique du béton, sans accumulation de déformations résiduelles.

Bien que ces résultats concernent un seul pieu instrumenté et une période de suivi limitée, ils apportent des premiers éléments sur l'évolution des profils de demande énergétique des bâtiments. Un retour d'expérience fondé sur des campagnes de suivi pluriannuelles sera nécessaire pour déterminer si la tendance observée relève d'un comportement ponctuel ou d'une évolution durable. Dans ce contexte, les pieux énergétiques apparaissent comme une solution pertinente pour le secteur de la construction, en particulier pour des ouvrages soumis à des charges thermiques croissantes, en offrant une réponse intégrée aux enjeux structurels et énergétiques actuels.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet LEG-DHC, financé par le programme Clean Energy Transition Partnership (CETP-2022-00147), cofinancé par l'Union européenne dans le cadre d'Horizon Europe et par l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour la partie française (ID ANR-23-CETP-0003).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eurostat. (2023). *Energy consumption in households*. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households, (Accessed: 7 January 2026).
- Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503–519. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- Bourne-Webb, P. J., 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(3), 237–248. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>
- Brandl, H. (1998). Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground. *Deep Foundations on Bored and Auger Piles - Bap Iii*, 37–60 526.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- Brandl, H. (2013). Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 57, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.005>
- Brandl, H. (2016). Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds. *Procedia Engineering*, 165, 747–764. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.773>
- Cekerevac, C., & Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 28(April 2003), 209–228. <https://doi.org/10.1002/nag.332>
- Di Donna, A. Di, Ferrari, A., & Laloui, L. (2016). Experimental investigations of the soil – concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(October 2015), 1–14. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0294>
- Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890–902. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000513)
- Laloui, L., & Rotta Loria, A. F. (2019). *Analysis and Design of Energy Geostructures* (1st Editio). Academic Press.
- Loveridge, F., & Powrie, W. (2014). G-Functions for multiple interacting pile heat exchangers.

- Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.014>
- Maghsoodi, S., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2019). Thermal effects on mechanical behaviour of soil–structure interface. *Https://Doi.Org/10.1139/Cgj-2018-0583*, 57(1), 32–47. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0583>
- McCartney, J. S. (2013). Centrifuge Modeling of Energy Foundations. In *Energy Geostructures*. <https://doi.org/10.1002/9781118761809.ch5>
- McCartney, J. S., & Murphy, K. D. (2017). Investigation of potential dragdown/uplift effects on energy piles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 10, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2017.03.001>
- Mimouni, T., & Laloui, L. (2013). Full-scale in situ testing of energy piles. In *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9781118761809.ch2>
- Mimouni, T., & Laloui, L. (2015). Behaviour of a group of energy piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(May), 1–17. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0403>
- Murphy, K. D., & McCartney, J. S. (2015). Seasonal Response of Energy Foundations During Building Operation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(2). <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9802-3>
- Ng, C. W. W., Gunawan, A., Shi, C., Ma, Q. J., & Liu, H. L. (2016). Centrifuge modelling of displacement and replacement energy piles constructed in saturated sand: A comparative study. *Geotechnique Letters*, 6(1). <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00119>
- Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., Laloui, L., & Liu, H. L. (2014). Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1045–1057. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0301>
- Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., & Laloui, L. (2014). *Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay*. 4. <https://doi.org/10.1680/geolett.14.00063>
- Olgun, C. G., Abdelaziz, S. L., & Martin, J. R. (2012). Long-Term Performance and Sustainable Operation of Energy Piles. *ICSDEC 2012*. <https://doi.org/10.1061/9780784412688.064>
- Olgun, C. G., Martin, J., Abdelaziz, S., Iovino, P. L., Catalbas, F., Elks, C., Fox, C., & Gouvin, P. (2012). Field testing of energy piles at Virginia Tech. *Proceedings from the 37th Annual Conference on Deep Foundations*, 1–15.
- Prodan, I., Bujor, O., Popa, A., & Ban, H. (2021). A Case Study of Isolated Foundations on Energy Piles – from Design to Implementation. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 126, 1085–1092. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64518-2_129
- Qiu, C., Vasilescu, R., Doghman, M., Mroueh, H., Badinier, T., Szymkiewicz, F., Khadour, A., Nguyen, V. T., Pereira, J. M., Kotronis, P., & Tang, A. M. (2025). Long-term thermo-mechanical behaviour of an energy pile installed in clay: Field experiments and numerical simulations. *Energy and Buildings*, 349(11), 116498. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116498>
- Ravera, E., Sutman, M., & Laloui, L. (2020). Cyclic thermomechanical response of fine-grained soil–concrete interface for energy piles applications. *Https://Doi.Org/10.1139/Cgj-2020-0437*, 58(8), 1216–1230. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0437>
- Salciarini, D., Gerola, M., De Feudis, S., Lupattelli, A., Dalla Santa, G., Capati, G., Rafai, M., Tihana, J., Scerbo, M., Di Donna, A., Ravera, E., Nicolino, M., Insana, A., Mroueh, H., & Barla, M. (2026). Database-driven analysis of energy geostructures using a global dataset: Diffusion, efficiency, and environmental performance. *Renewable Energy*, 256, 124373. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2025.124373>
- Stewart, M., & McCartney, J. (2012). Strain Distributions in Centrifuge Model Energy Foundations. *GeoCongress 2012, 2020*, 4376–4385. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784412121.450>
- Sutman, M. (2016). *Thermo-Mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling*. Virginia Polytechnic Institute and State University in.
- Vasilescu, A.-R. (2019). *Design and execution of energy piles: Validation by in-situ and laboratory experiments*. Ecole centrale de Nantes.
- Vasilescu, R., Fauchille, A. L., Dano, C., Kotronis, P., Manirakiza, R., & Gotteland, P. (2019). Impact of Temperature Cycles at Soil – Concrete Interface for Energy Piles. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 1, 35–42. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99670-7_5
- Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J.-M., & Hassen, G. (2016). Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil–structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(7), 1186–1194. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0355>