

A practical design approach for energy piles based on pressuremeter test results

Une méthode pratique de dimensionnement des pieux énergétiques basée sur les résultats des essais pressiométriques

Ichrak Gaaloul^{1,3#}, Othman Ben Mekki¹, Sami Montassar¹ and Wissem Frikha^{2,4}

¹ Laboratoire de Génie civil, Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale D'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisia;

² Laboratoire de L'ingénierie Géotechnique, Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale D'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisia;

³ Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Nabeul, Tunisia;

⁴ Setec International, 42-52 Quai de la Rapée, Central Seine Building, 75583, Paris cedex 12, France.

#Ichrak Gaaloul: email: ichrak.chihi@enit.utm.tn

ABSTRACT

This paper proposes a method for designing energy piles based on the results of in situ pressuremeter tests. The method involves integrating thermal effects into a numerical model of cylindrical cavity expansion. In a first part, a finite difference analysis was performed, considering large strains and thermal effects. The model assumed that the soil is a homogeneous elastic perfectly plastic material with a Mohr-Coulomb yield criterion. The numerical model produced pressuremeter profiles that represent the limit pressure at different temperature variations. The bearing capacity of the pile was subsequently determined using the conventional procedure outlined in Eurocode 7 for designing a pile, based on pressuremeter tests. Thus, from pressuremeter curves resulting from a conventional pressuremeter test, the proposed method is enabled to provide the mobilized base resistance, shaft friction and the bearing capacity of an energy pile. In a second part, a case study of an energy pile located in a silty clay was conducted to explain the different steps of the proposed method and to examine the impact of thermal effects on the mobilized bearing capacity of the pile. The study revealed that the bearing capacity exhibits an increase when heating which reaches 3% at $\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$ and a decrease of 4% at $\Delta\theta = -40^\circ\text{C}$ when cooling.

In the absence of a standard for the design of energy piles, the proposed approach could offer engineers a practical method for designing energy piles.

RESUME

Ce papier propose une approche de dimensionnement des pieux énergétiques basée sur les résultats d'essais pressiométriques réalisés in situ. La méthode repose sur l'intégration des effets thermiques à travers un modèle numérique d'expansion de cavité cylindrique. Une analyse numérique par la méthode des différences finies a été réalisée en intégrant les effets thermiques. Le sol est considéré comme homogène et élasto-plastique, selon le critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Les pressions limites correspondant à chaque variation de température sont présentées sous forme de profils pressiométriques générés par le modèle numérique. Ainsi, à partir des courbes pressiométriques, la méthode proposée permet de déterminer la résistance de pointe, le frottement latéral mobilisé et la capacité portante d'un pieu énergétique. Une étude de cas d'un pieu énergétique situé dans un sol argileux a été menée, permettant d'expliquer les différentes étapes de la méthode proposée et d'examiner l'impact des effets thermiques sur la capacité portante du pieu. L'étude a révélé que la capacité portante augmente de 3 % lors d'un réchauffement à 40°C et diminue de 4 % lors d'un refroidissement à -40°C .

En l'absence de norme spécifique pour le dimensionnement des pieux énergétiques, l'approche proposée pourrait constituer une méthode pratique pour les ingénieurs.

Keywords: pieux énergétiques, essais pressiométriques, modèle numérique, effets thermiques, capacité portante.

1. Introduction

Les pieux énergétiques sont de plus en plus utilisés pour optimiser la consommation d'énergie tout en assurant le chauffage et la climatisation des bâtiments. Ces fondations profondes bifonctionnelles remplissent un double rôle : elles supportent les charges structurelles

tout en agissant comme échangeurs thermiques avec le sol. Les variations de température induites par ces échanges affectent à la fois le pieu et le sol environnant, ce qui impose une prise en compte rigoureuse des interactions thermo-mécaniques lors de la conception.

Dans la pratique courante de l'ingénierie géotechnique, le dimensionnement des fondations profondes repose généralement sur les résultats d'essais

pressiométriques ou d'essais au pénétromètre statique. Cependant, l'évaluation de la capacité portante d'un pieu énergétique nécessite une analyse supplémentaire intégrant les effets des fluctuations thermiques. À ce jour, le cadre réglementaire en vigueur, notamment l'Eurocode 7 (AFNOR 2005), ne prend pas en compte ces effets spécifiques. Bien que le nombre de pieux énergétiques en service ne cesse d'augmenter (Brandl 2006), il n'existe toujours pas de norme dédiée au dimensionnement géotechnique de ces structures. Actuellement, les recommandations suivies par les praticiens se limitent à un guide en Suisse (SIA-D0190 2005), des directives au Royaume-Uni (GSHP Association 2012) et des préconisations en France (CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP 2017). En parallèle, plusieurs recherches ont exploré la conception et l'évaluation probabiliste des pieux énergétiques (Hu et al. 2022 ; Rotta Loria et al. 2020 ; Xiao et al. 2016). Toutefois, ces approches, bien que précieuses, restent complexes à mettre en œuvre pour les ingénieurs en charge de la conception pratique des pieux énergétiques.

L'essai pressiométrique, quant à lui, est une méthode largement utilisée en ingénierie géotechnique pour caractériser les propriétés mécaniques des sols, notamment la résistance (pression limite) et la rigidité (module pressiométrique). Ces paramètres sont essentiels pour modéliser le comportement du sol et concevoir différents types de fondations (AFNOR 2012). L'essai repose sur le principe d'expansion d'une cavité cylindrique, où la sonde pressiométrique est assimilée à une cavité subissant une expansion radiale. De nombreuses études ont approfondi l'analyse de ce phénomène en résolvant le problème de l'expansion d'une cavité cylindrique (Carter et al. 1986 ; Jang et al. 2003 ; Wang et al. 2010).

Toutefois, les essais pressiométriques sous contraintes thermiques restent peu explorés. Quelques contributions récentes ont abordé l'effet des variations de température sur l'expansion d'une cavité cylindrique (Gaaloul 2022 ; Gaaloul et al. 2021 ; Zhou et al. 2018 ; Gaaloul et al. 2024), mais ces travaux restent limités.

Dans ce contexte, cet article propose une méthode innovante de dimensionnement des pieux géothermiques, combinant les résultats des essais pressiométriques avec un modèle numérique simulant l'expansion de la cavité cylindrique sous l'influence de variations thermiques

2. Approches de dimensionnement des pieux énergétiques

2.1. Cadre réglementaire actuel

Un pieu géothermique se distingue des pieux traditionnels par sa soumission à un chargement thermique spécifique. Par conséquent, les normes existantes, telles que l'Eurocode (NF EN 1997-1 et NF P94-262) (AFNOR 2005), qui s'appliquent aux pieux classiques, ne sont pas directement transposables dans ce contexte.

Afin de répondre à cette particularité, plusieurs recommandations ont été élaborées, notamment le guide suisse (SIA-D0190 2005), la norme britannique (GSHP

Association 2012), ainsi que la recommandation française (CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP 2017). Toutefois, bien que ces recommandations apportent des éléments importants, elles comportent certaines limites. Par exemple, le guide suisse (SIA-D0190 2005) omet certains aspects qui ont été identifiés plus récemment. Le guide britannique (GSHP Association 2012), quant à lui, repose sur des prescriptions applicables à un nombre restreint de situations et privilégie un scénario défavorable, ce qui peut conduire à un surdimensionnement du pieu géothermique (Rotta Loria et al., 2020).

De son côté, la recommandation française (CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP 2017) s'aligne globalement avec les normes en vigueur (Eurocode : NF EN 1997-1 et NF P94-262) et repose principalement sur les courbes de transfert t-z modifiées (Frank et Zhao 1982). Toutefois, elle ne propose pas un processus complet de dimensionnement, mais un ensemble de vérifications. De plus, elle introduit un facteur partiel pour les effets thermiques, proche de celui appliqué aux pieux classiques, ce qui pourrait conduire à une sous-estimation du dimensionnement des pieux énergétiques.

La conception d'un pieu énergétique prend en compte trois paramètres principaux : $\Delta N_{th}(z)$, qui correspond à la variation de la charge axiale en fonction de la profondeur ; Δw_{th} , qui représente la variation du déplacement au sommet du pieu ; et ΔR_{mob} , qui désigne la variation de la résistance mobilisée. Les différentes étapes de la conception des pieux énergétiques, telles que recommandées par le guide français (CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP 2017), sont illustrées dans le diagramme présenté à la Figure 1.

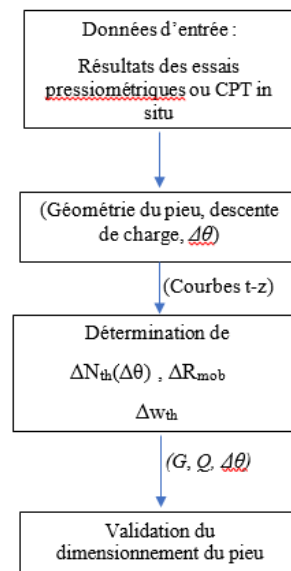


Figure 1. Schéma résumé de la méthode de dimensionnement des pieux énergétiques proposée par CFMS et al. (2017).

2.2. Nouvelle méthode de dimensionnement des pieux énergétiques

Dans la conception pratique des pieux, les ingénieurs se basent généralement sur la méthode classique de l'Eurocode 7, qui utilise les résultats des essais

pressiométriques. L'approche proposée pour la conception des pieux géothermiques repose sur l'exploitation des résultats de l'essai pressiométrique standard Ménard, adaptés aux spécificités des pieux énergétiques.

Les données d'entrée de cette méthode sont les résultats des essais pressiométriques réalisés in situ, exprimés en termes de pression limite (profils pressiométriques). L'introduction des effets thermiques s'effectue par une simulation numérique de l'expansion d'une cavité cylindrique soumise à des charges thermiques, cette cavité étant modélisée par une sonde pressiométrique. Le modèle numérique génère ainsi de nouveaux profils pressiométriques en fonction des variations de température. En conséquence, le frottement latéral (q_s), la résistance de pointe (q_p) et la capacité portante du pieu peuvent être déterminés à partir de ces profils, en appliquant l'approche de l'Eurocode 7, pour chaque variation de température.

La procédure de dimensionnement proposée est résumée dans le diagramme présenté à la Figure 2.

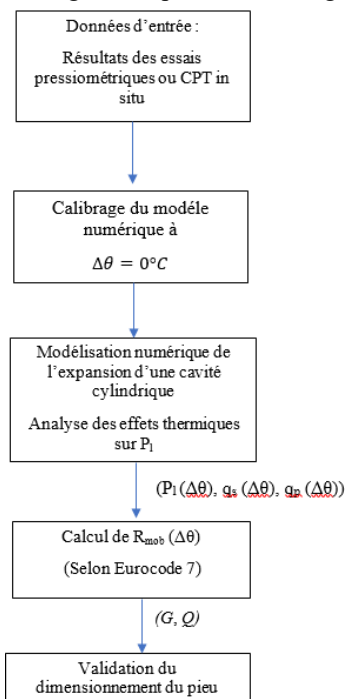


Figure 2. Approche proposée pour le dimensionnement des pieux géothermiques

3. Application de l'approche proposée de dimensionnement d'un pieu géothermique dans une argile vaseuse

Dans l'objectif de mieux expliciter la méthode proposée de dimensionnement des pieux énergétiques, une application est détaillée par étapes dans cette partie.

Le code de différences finies FLAC V7.00 (Itasca Consulting Group) a été utilisé pour réaliser les simulations numériques de l'expansion de cavité cylindrique soumise à des variations thermiques.

3.1. Modèle numérique d'expansion d'une cavité cylindrique

3.1.1. Géométrie et conditions aux limites

L'analyse de l'expansion de la cavité cylindrique a été traitée comme un problème bidimensionnel axisymétrique avec des conditions aux limites de déformation plane. Un rayon initial de cavité de 3 cm a été utilisé dans la simulation. Ce rayon correspond au rayon de la sonde du pressiomètre Menard; le diamètre de la sonde est de 60 mm (AFNOR 2000). Le sol autour de la cavité est théoriquement infiniment étendu. De ce fait, le rayon extérieur R de la tranche du sol considérée pour simuler le sol infini vaut 150 fois le rayon intérieur de la cavité ($R = 150 a_0 = 4,5\text{m}$). Le choix de ces dimensions est justifié par des recommandations des recherches antérieures (Nahra et Frank 1986, Bahar 1992). La géométrie et les conditions aux limites sont présentées dans la figure 3.

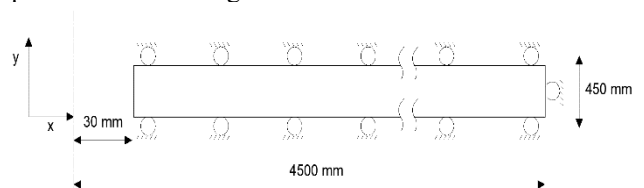


Figure 3. Géométrie et conditions aux limites

Le maillage du modèle se compose de 124 éléments quadrilatères linéaires axisymétriques dans l'ensemble du domaine. Le maillage a été gradué dans les directions radiale et verticale. Afin de mieux refléter le comportement du sol entourant la cavité, le maillage a été raffiné en augmentant la densité de maillage près de la cavité, graduée par un facteur de 1,1, là où la pression est supposée être la plus élevée (Figure 4).

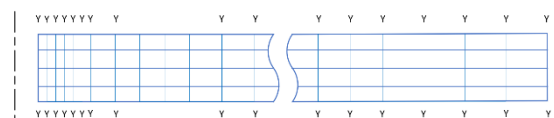


Figure 4. Maillage du modèle simulé par le logiciel Flac

Initialement, la frontière de la cavité est fixée, les contraintes in situ sont installées, et une condition aux limites de pression uniforme est appliquée. Le changement de température est appliqué uniformément sur la paroi de la cavité et sur l'ensemble de la longueur du pieu projeté (Bourne-Webb et al. 2009; Cekerevac and Laloui 2004 ; Saggu and Chakraborty 2015).

3.1.2. Propriétés du sol

Le sol est supposé être isotrope et homogène. Un modèle élasto-plastique isotrope utilisant le critère de plasticité de Mohr-Coulomb a été adopté.

Les propriétés géotechniques du sol considéré sont dérivées d'une campagne géotechnique réalisée lors de l'étude de la réalisation d'un projet de construction en Tunisie.

Le sol étudié inclut la lithologie suivante :

- De 2,5m à 11m de profondeur : Argile sableuse vaseuse de caractéristiques mécaniques médiocres.

- De 11 m à 17 m de profondeur : Argile sableuse dont les caractéristiques mécaniques sont faibles.
- De 17 m à 41 m de profondeur : Argile sableuse vaseuse de caractéristiques mécaniques assez faibles.
- De 41 à 51 m de profondeur : Argile sableuse dont les caractéristiques mécaniques sont modérées.
- De 51 m à 80 m de profondeur : Argile silto-sableuse de caractéristiques mécaniques élevées.

Dans le modèle numérique, le module pressiométrique Ménard, le coefficient de Poisson, la cohésion et l'angle de frottement doivent être fournis par l'utilisateur. En utilisant les résultats de l'essai de cisaillement et les résultats des essais pressiométriques (module pressiométrique) réalisés lors de la campagne géotechnique, les propriétés des différentes couches sont résumées dans le Tableau 1. Le coefficient d'expansion thermique pris en compte est $\alpha = 10^{-5} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ (Laloui et al. 2006).

Tableau 1. Propriétés du sol

	Module Ménard E (MPa)	Coefficient de Poisson ν	Cohésion C (kPa)	Angle de frottem ent $\varphi (^{\circ})$	Coefficient d'expansion thermique $\alpha (^{\circ}\text{C}^{-1})$
Couche 1	10	0.33	40	12	10^{-5}
Couche 2	20	0.33	52	15	10^{-5}
Couche 3	20	0.33	20	35	10^{-5}
Couche 4	62	0.33	60	18	10^{-5}
Couche 5	200	0.33	50	15	10^{-5}

3.2. Résultats et discussions

3.2.1. Courbes pression-volume

La première étape de la méthode proposée consiste à utiliser les profils pressiométriques obtenus lors de la campagne géotechnique in situ pour calibrer le modèle numérique à $\Delta\theta = 0^{\circ}\text{C}$. Par la suite, les effets thermiques sont introduits à l'aide du code développé dans FLAC 7.00.

Une série de simulations numériques a été réalisée pour prendre en compte les variations de température du sol allant de -40°C à 40°C (Amatya et al. 2012, Di Donna et Laloui 2013b, Eslami et al. 2013). L'effet du gel n'est pas pris en compte dans la modélisation. Les courbes pressiométriques à 4 m de profondeur, issues de ces simulations, sont présentées dans la Figure 5. ΔV représente le volume injecté, tandis que V_0 désigne le volume initial de la sonde. Le chauffage du sol entraîne une augmentation de la pression, tandis que le refroidissement provoque une diminution de celle-ci.

À partir des courbes pressiométriques obtenues, la pression limite est déterminée pour chaque variation thermique considérée. Plus précisément, pour chaque courbe, la pression limite correspond à la pression associée à un rapport $V/V_0 = 2$.

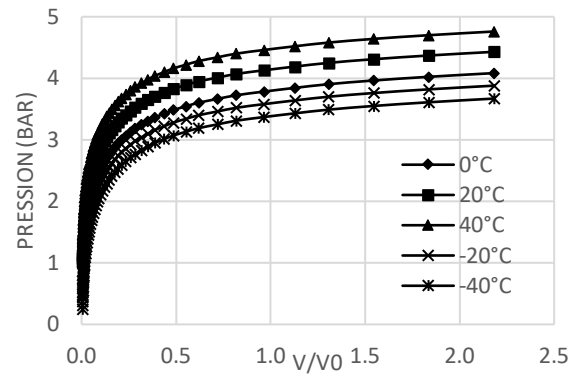


Figure 5. Effets thermiques sur les courbes pressiométriques à la profondeur de 4m

3.2.2. Pression limite

La figure 6 présente la variation de la pression limite normalisée en fonction de la variation de la température du sol à 4 m de profondeur. P_{l0} est la pression limite à $\Delta\theta = 0^{\circ}\text{C}$. La figure montre une augmentation de la pression lors de l'élévation de la température. Cette augmentation est de 7% et 13% lors du chauffage à 20°C et 40°C respectivement. Le refroidissement induit une diminution de la pression limite de 9% à -20°C et de 14% à -40°C . Ce qui montre que l'effet du chauffage et du refroidissement sont asymétriques.

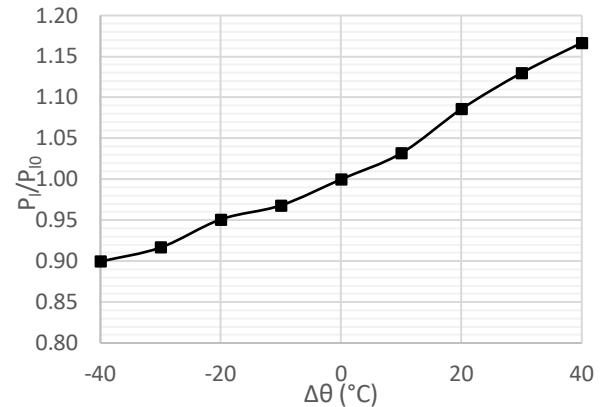


Figure 6. Variation de la pression limite en fonction de la variation de la température

Le résultat de cette étape de la démarche de dimensionnement consiste à obtenir des profils pressiométriques en termes de P_l à chaque variation thermique. Ces nouveaux profils serviront, par la suite, à déterminer la capacité portante du pieu énergétique.

3.2.3. Evaluation de la capacité portante du pieu énergétique

À ce stade, les données d'entrée sont constituées des profils pressiométriques, établis au préalable pour chaque variation de température. La capacité portante d'un pieu géothermique est ensuite calculée en utilisant l'approche classique de l'Eurocode 7 (AFNOR 2012). Cette approche repose sur le calcul du frottement axial unitaire limite ($q_{s,i}$) et de la résistance de pointe (q_b).

La Figure 7 montre la variation de la résistance de pointe à la base du pieu en fonction de $\Delta\theta$. Il apparaît que R_b/R_{b0} augmente avec le chauffage et diminue avec le refroidissement. Ici, R_{b0} représente la résistance à la base

du pieu à $\Delta\theta = 0$. On observe une augmentation de 4 % de R_b/R_{b0} à 40 °C, et une diminution de 6 % à -40 °C. Lors du refroidissement, la partie inférieure du pieu tend à bouger vers le haut, ce qui explique la réduction du contact entre la base du pieu et le sol, et donc la diminution de R_b . Alors que sa partie supérieure tend à s'enfoncer vers le bas. Il existe donc un point sur la longueur du pieu qui ne bouge pas : c'est le point de déformation nul (Amatya et al. 2012).

En revanche, lors du chauffage, l'augmentation de R_b est liée au fait que les déplacements axiaux générés par les variations thermiques tendent à enfoncer davantage la partie inférieure du pieu. Lorsque le pieu se réchauffe, la dilatation empêchée se traduit par une contrainte additionnelle de compression. Dans ce cas, la déformation du pieu est telle que sa partie supérieure bouge vers le haut alors que sa partie inférieure tend à s'enfoncer vers le bas (Amatya et al. 2012).

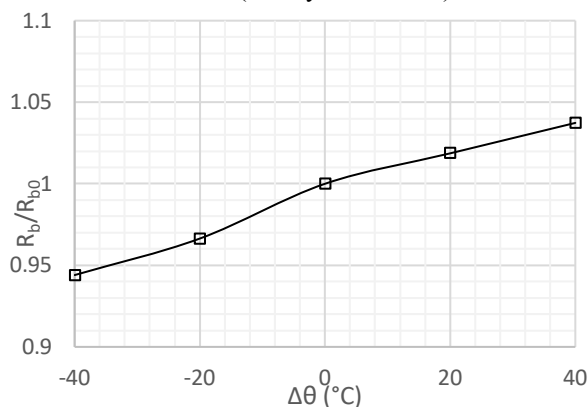


Figure 7. Variation de la résistance de pointe en fonction de la variation de la température

En considérant un pieu ayant un diamètre de 1000 mm et une profondeur de 53 m, la charge limite totale mobilisée par le frottement latéral R_s est obtenue pour différentes variations de température. La Figure 8 représente l'effet des variations thermiques sur R_s . Il peut être noté que le chauffage entraîne une augmentation de R_s . En effet, l'élévation de la température à 40 °C conduit à une augmentation de R_s de 7 % à une profondeur de 53 m, tandis que le refroidissement à -40 °C entraîne une diminution de 8 % de R_s à une profondeur de 53 m.

Lors du chauffage, le pieu se dilate, ce qui augmente la contrainte radiale de traction et entraîne l'élévation de l'effort total limite mobilisable par frottement latéral. Alors que le refroidissement provoque la contraction du pieu, ce qui induit une augmentation de la contrainte radiale de compression et la diminution de R_s

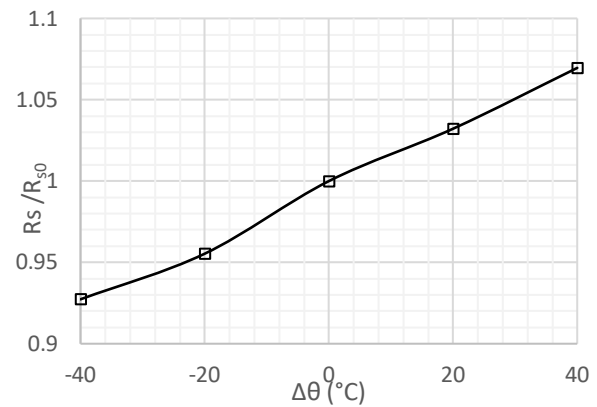


Figure 8. Effets thermiques sur R_s à une profondeur de 53m

Ces résultats sont en accord avec les travaux de plusieurs auteurs sur les pieux énergétiques, qui ont observé des modifications des caractéristiques mécaniques à l'interface pieu-sol. Par exemple, McCartney et al. (2010), lors d'essais réalisés sur des pieux dans une centrifugeuse, ont intégré les effets thermiques sur le frottement latéral. Ils ont constaté qu'un chauffage du pieu provoque une augmentation du frottement latéral, due à la dilatation du pieu qui comprime le sol à l'interface.

Ces résultats sont également cohérents avec le modèle proposé par Amatya et al. (2012), selon lequel le refroidissement entraîne une contraction du pieu. Ce qui induit une diminution de la contrainte radiale et réduit le frottement mobilisable. Cependant, contrairement à Amatya et al. (2012), qui considèrent des effets symétriques, la présente étude montre une asymétrie dans la réponse thermique du pieu.

La capacité portante d'un pieu isolé a été calculée pour chaque valeur de $\Delta\theta$, et la courbe montrant les effets thermiques sur cette portance est présentée à la Figure 9. La capacité portante augmente avec le chauffage, atteignant une hausse de 3 % (0,13 MN) à $\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$, tandis qu'elle diminue de 4 % (0,14 MN) à $\Delta\theta = -40^\circ\text{C}$. Cette variation est non linéaire et dissymétrique, le refroidissement ayant un impact plus marqué sur la réduction de la capacité portante, sans compensation complète lors du chauffage.

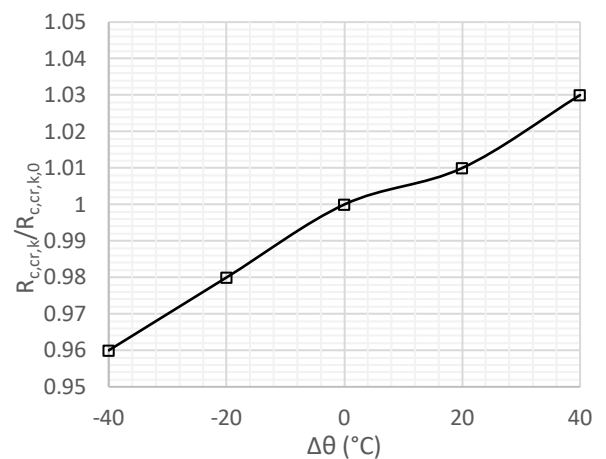


Figure 9. Effets thermiques sur la capacité portante du pieu énergétique

4. Conclusions

La présente étude analyse les mécanismes de portance générés par les variations de température dans un pieu énergétique. Elle propose une méthode pratique de conception de pieu énergétique, en utilisant d'une part les résultats des essais pressiométriques réalisés in situ, et d'autre part un modèle numérique d'expansion d'une cavité cylindrique soumise à des charges thermiques. Ce modèle numérique a été calibré à partir des résultats des essais pressiométriques réalisés à $\Delta\theta = 0^\circ\text{C}$. En se basant sur les courbes pressiométriques, la méthode proposée permet de générer de nouveaux profils pressiométriques pour différentes variations de température. Cela facilite l'évaluation de la résistance mobilisée à la base, du frottement latéral et de la capacité portante d'un pieu géothermique. Fondée sur des essais pressiométriques, qui sont couramment utilisés par les ingénieurs pour la conception des pieux classiques, la méthode innovante décrite dans cet article constitue une procédure pragmatique pour la conception des pieux énergétiques.

Une étude de cas, portant sur un pieu énergétique dans un sol argileux, est présentée pour illustrer les différentes étapes de la méthode et mettre en évidence l'impact des variations de température sur la capacité portante d'un pieu énergétique. Les résultats montrent que la résistance de pointe et le frottement latéral augmentent avec le chauffage et diminuent avec le refroidissement. Les effets du refroidissement sur la capacité portante d'un pieu énergétique sont légèrement plus prononcés que ceux du chauffage. Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte les variations de capacité portante dues aux effets thermiques.

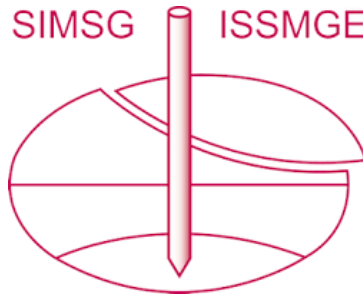
5. Références

- AFNOR. 2000. "NF P 94-110-1 : Sols : Reconnaissance et Essais : Essai Pressiométrique Menard : Norme Française."
- . 2005. "Norme NF EN 1997-1, Eurocode 7 Partie1."
- . 2012. "NF P 94-262 : Justification Des Ouvrages Géotechniques : Norme d'application Nationale de l'Eurocode 7."
- Amatya, B.L., K. Soga, P.J. Bourne-Webb, T. Amis, and L. Laloui. 2012. "Thermo-Mechanical Behaviour of Energy Piles." *Géotechnique* 62 (6): 503–19. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- Bourne-Webb, P. J., B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson, and P. Payne. 2009. "Energy Pile Test at Lambeth College, London: Geotechnical and Thermodynamic Aspects of Pile Response to Heat Cycles." *Géotechnique* 59 (3): 237–48. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>
- 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>
- Carter, J. P., J. R. Booker, and S. K. Yeung. 1986. "Cavity Expansion in Cohesive Frictional Soils." *Géotechnique* 36 (3): 349–58. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.349>
- Cekerevac, C., and Laloui, L. 2004. "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 28 (3): 209–28. <https://doi.org/10.1002/nag.332>
- CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP. 2017. "Recommandations Pour La Conception, Le Dimensionnement et La Mise En Œuvre Des Géosstructures Thermiques."
- Di Donna, A., and Laloui, L. 2013b. "Advancements in the geotechnical design of energy piles. International Workshop on Geomechanics and Energy – The Ground as Energy Source and Storage, Lausanne, Switzerland."
- Eslami, H., Rosin-Paumier, S., Abdallah, A. and Masrouri, F. 2013. "Influence of Temperature Variation on Parameters of Pressuremeter Test of a Compacted Soil. Annales du Bâtiment et des travaux publics", 6, 12 p.10.1201/b21938-110.hal-01431334.
- Gaaloul, I. 2022. "Contribution à la modélisation numérique du comportement thermomécanique des sols et des pieux énergétiques." Tunisie : Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.
- Gaaloul, I., Ben Mekki, O., Montassar, S., and Frikha, W. 2024. "Effect of Temperature Variations on the Cylindrical Cavity Expansion : Numerical Analysis." *Indian Geotechnical Journal* 54 (4): 1549–61. <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00831-3>
- Gaaloul, I., Montassar, S., and Frikha, W. 2021. "Thermal Effects on Limit Pressure in a Cylindrical Cavity Expansion." *Innovative Infrastructure Solutions* 6 (4) : 194. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00562-5>
- GSHP Association. 2012. "Thermal Pile Design, Installation & Materials Standards." 1.
- Hu, B., Gong, Q., Zhang, Y., Yin, Y., and Chen, W. 2022. "Characterizing Uncertainty in Geotechnical Design of Energy Piles Based on Bayesian Theorem." *Acta Geotechnica* 17 (9): 4191–4206. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01535-3>
- Jang, I.S, Chung, C., Myoung, K., and Cho, S. 2003. "Numerical Assessment on the Consolidation Characteristics of Clays from Strain Holding, Self-Boring Pressuremeter Test." *Computers and Geotechnics* 30 (2): 121–40. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(02\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(02)00031-9)
- Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L. "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile," *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, vol. 30, no. 8, pp. 763–781, Jul. 2006. <https://doi.org/10.1002/nag.499>
- Cartney, Mc., John S., Joshua E. Rosenberg, and Sultanova A.. 2010. "Engineering Performance of Thermo-Active Foundations." In *GeoTrends*, 27–42. Denver, Colorado, United States: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41144\(391\)4](https://doi.org/10.1061/41144(391)4)
- Frank, R. and Zhao, S. 1982. "Estimation Par Les Paramètres Pressiométriques de l'enfoncement Sous Charge Axiale de Pieux Forés Dans Des Sols Fins." *Bulletin de liaison Laboratoire Ponts et Chaussée* 119.
- Rotta, L., Alessandro F., Bocco M., Garbellini C., Muttoni A., and Laloui L. 2020. "The Role of Thermal Loads in the Performance-Based Design of Energy Piles." *Geomechanics for Energy and the Environment* 21 (March):100153. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100153>
- Saggu, Rajni, and Chakraborty T. 2015. "Thermal Analysis of Energy Piles in Sand." *Geomechanics and Geoengineering* 10 (1): 10–29. <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.923586>
- SIA-D0190. 2005. "Utilisation de La Chaleur Du Sol Par Des Ouvrages de Fondation et de Soutènement En Béton. Guide Pour La Conception, La Realisation et La Maintenance. Zurich, Switzerland."
- Wang, S.Y., D.H. Chan, K.C. Lam, and S.K.A. Au. 2010. "Numerical and Experimental Studies of Pressure-Controlled Cavity Expansion in Completely Decomposed Granite Soils of Hong Kong." *Computers and Geotechnics* 37 (7–8): 977–90. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.08.006>

Xiao, J., Luo, Z., R. Martin, J., Gong, W., and Wang, L.. 2016. "Probabilistic Geotechnical Analysis of Energy Piles in Granular Soils." *Engineering Geology* 209 (July):119–27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.006>.

Zhou, H, Kong G., Hanlong L., and Laloui L. 2018. "Similarity Solution for Cavity Expansion in Thermoplastic Soil." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 42 (2): 274–94. <https://doi.org/10.1002/nag.2724>

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters (ISP2025) and was edited by Wissem Frikha and Alexandre Lopes dos Santos. The conference was held from September 2nd to September 5th 2025 in Esch-sur-Alzette, Luxembourg.