

Analyse de la portance des pieux géothermiques

Discussions about the bearing capacity of geothermal piles

Suryatriyastuti M., Mroueh H.
LGCgE, Villeneuve d'Ascq, France

Burlon S.
IFSTTAR, Paris, France

Habert J.
CETE Nord Picardie, Haubourdin, France

RÉSUMÉ : Les pieux géothermiques en plus d'être utilisés classiquement comme des éléments supportant des bâtiments permettent grâce à la circulation d'un fluide caloporteur de les chauffer ou les climatiser suivant la saison. Les pieux, sous l'effet des variations de température, subissent des chargements cycliques. Afin d'analyser ce problème et d'évaluer son impact sur le comportement des pieux géothermiques, deux types d'approches sont proposées : la première repose sur une modélisation conventionnelle de l'interaction sol-pieu, la seconde prend en compte les effets cycliques induits par les variations de température.

ABSTRACT: Geothermal piles are deep foundations providing not only structural support for the buildings but also heat exchanger elements from the ground to the buildings. Heat exchanges occur by the circulation of seasonal heat carrier medium, depending on the needs of heating or cooling the buildings. The pile foundations are then subjected to cyclic contraction and dilatation loading under the variation of temperature. To analyse this phenomenon and its impact to the structure stability, two types of studies are conducted, one by implementing a conventional method and an other by taking into account cyclic effects induced by temperature variations.

MOTS-CLES : pieu géothermique, capacité portante, effets cycliques, chargement axial, interface sol-pieu.

KEYWORDS: geothermal pile, bearing capacity, cyclic effects, axial loading, interface soil-pile.

1 INTRODUCTION

Les pieux géothermiques (pieux échangeurs de chaleur) présentent un intérêt particulier pour le chauffage et la climatisation des bâtiments afin de remplir les exigences fixées par les nouvelles réglementations thermiques. Dès lors que le sol présente en surface, entre 10 m et 50 m de profondeur, une température constante comprise entre 10°C et 15°C, ce qui est le cas dans la majorité des pays européens dont la France (Adam et Markiewicz 2009), l'efficacité des échanges thermiques est garantie. Ces pieux géothermiques sont constitués en général de béton armé et de tubes échangeurs de chaleur en U accrochés à la caisse de ferrailage. Le fluide caloporteur circulant dans le tube en U autorise des échanges thermiques entre le sol et la pompe à chaleur à laquelle le tube est lié, ce qui permet de chauffer ou climatiser le bâtiment. Sous l'effet des variations de température, les pieux géothermiques sont soumis à des variations répétitives de longueur qui peuvent s'assimiler à des chargements cycliques. En hiver, le fluide caloporteur injecté est plutôt froid (0 à 5°C) tandis qu'il est plutôt chaud en été (30 à 40°C).

Les connaissances acquises, à l'heure actuelle, dans le domaine des pieux échangeurs de chaleur concernent essentiellement le comportement thermomécanique des sols. Il apparaît que les propriétés mécaniques des sols en termes de déformation et de résistance ne sont pas affectées par les variations de température dans les gammes d'exploitation habituelle des pompes à chaleur 0°C – 40 °C (Böennec 2009, Cekerevac et Laloui 2004). Seule la pression de préconsolidation semble présenter des variations sensibles vis-à-vis de l'augmentation de la température.

En Europe, cette technologie s'est surtout développée en Autriche, en Suisse et en Allemagne (tunnel de Vienne, aéroport de Zürich, tour de Francfort, etc.). Toutefois, peu d'éléments méthodologiques existent ce qui conduit bien souvent à considérer des coefficients de sécurité plus importants que ceux utilisés pour les pieux classiques (Knellwolf *et al.* 2011,

Bourne-Webb *et al.* 2009). Afin d'apporter des éléments complémentaires à l'analyse de la portance des pieux géothermiques, cet article propose des éléments méthodologiques fondés d'une part sur la mise en œuvre d'outils conventionnels de calcul et d'autre part sur l'utilisation d'outils numériques plus complexes dans le cas où les effets cycliques seraient significatifs pour la structure portée.

2 MODÉLISATION CONVENTIONNELLE

2.1 Principes de modélisation

Cette approche, utilisée couramment pour le dimensionnement des pieux sous charge axiale, est fondée sur la modélisation de l'interaction sol-pieu par des lois locales de mobilisation de la résistance du sol (loi $t-z$) (Frank et Zhao 1982). Le principe du calcul repose sur la décomposition de la déformation totale ε en une partie élastique ε^e et l'autre thermique ε^h selon l'équation (1). L'équation (2) présente l'équilibre mécanique du pieu :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^h \quad (1)$$

$$E_s S \frac{d^2 w}{dz^2} + f_{sol-pieu}(z, w) = 0 \quad (2)$$

où E_s est le module de Young du matériau constituant le pieu, S la section du pieu, w le déplacement vertical du pieu, $f_{sol-pieu}$ la loi de mobilisation du frottement axial ou de l'effort de pointe et z la profondeur.

2.2 Phasage de chargement et conditions en tête de pieu

Le chargement est réalisé systématiquement en deux phases : (i) une première phase de chargement « mécanique » et (ii) une deuxième phase de chargement thermique. Lors de la deuxième phase de chargement, une évolution homogène de la température est imposée à l'ensemble du pieu. L'observation

des températures mesurées dans des pieux géothermiques instrumentés justifie cette approche (Bourne-Webb *et al.* 2009). Cette variation est intégrée dans le calcul en retenant une valeur du coefficient de dilatation thermique du béton α_T égale à $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et en imposant une déformation axiale. Seul le premier chargement thermique est considéré si bien que les éventuels effets cycliques ne peuvent pas être pris en compte. Le sol situé autour du pieu est supposé ne pas être soumis à des variations volumiques d'origine thermique, ce qui est valable quand l'écoulement de la nappe est suffisant (supérieur à 10 cm/jour) pour maintenir la température du sol constante (Fromentin *et al.* 1999).

Trois types de conditions en tête de pieu sont possibles : (i) pieu libre en tête (l'effort en tête de pieu n'est pas modifié lors de l'application du chargement thermique), (ii) pieu bloqué en tête (le déplacement en tête de pieu n'est pas modifié lors de l'application du chargement thermique) et (iii) prise en compte d'une rigidité en tête de pieu modélisant les conditions de liaison de ce dernier avec la structure portée.

2.3 Résultats obtenus

La méthode de calcul permet d'obtenir l'évolution des contraintes normales σ_n , des déplacements verticaux w et de la mobilisation du frottement axial q_s avec la profondeur. Les figures 1 et 2 présentent les « résultats-types » obtenus pour un pieu respectivement libre et bloqué en tête : par rapport à la situation où le pieu est simplement chargé mécaniquement, la déformation appliquée en hiver correspond à une diminution de la température de 12°C et celle appliquée en été à une augmentation de 20°C .

Ces comportements extrêmes permettent d'appréhender le comportement réel d'un pieu géothermique pour lequel la rigidité en tête est intermédiaire. Pour un pieu libre en tête, le refroidissement de ce dernier induit un tassement supplémentaire ainsi qu'une diminution de la contrainte normale dans les sections du pieu, voire dans certains cas, l'apparition de traction. Le réchauffement de la fondation conduit à un soulèvement de la tête de pieu accompagné d'une augmentation de la contrainte normale dans les sections du pieu. Dans tous les cas, les variations de température sont associées à des modifications de la répartition du frottement axial. Pour un pieu bloqué en tête, les résultats peuvent être interprétés de manière similaire.

2.4 Abaque de représentation du comportement global d'un pieu géothermique

Cet abaque (Figure 3) permet d'appréhender simplement les variations de déplacement vertical Δw_t et d'effort normal ΔN_t en tête de pieu lors de l'application du chargement thermique, pour différentes gammes de température et de rigidité de la structure portée (Habert et Burlon 2012).

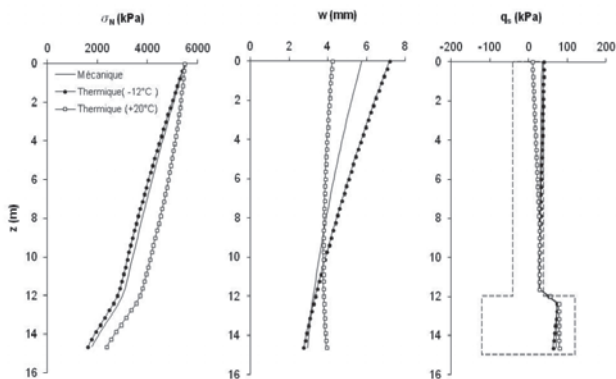


Figure 1. Comportement d'un pieu « libre en tête »

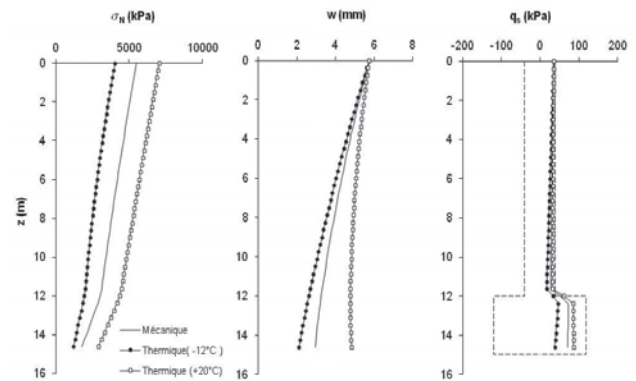


Figure 2. Comportement d'un « pieu bloqué en tête »

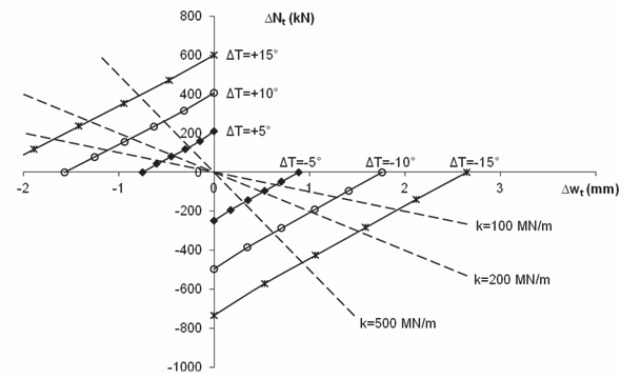


Figure 3. Abaque global de fonctionnement d'un pieu géothermique

3 PRISE EN COMPTE DES EFFETS CYCLIQUES

3.1 Introduction

La répétition des dilatations et des contractions du pieu sous l'effet des variations de température conduit à modifier plus ou moins significativement la répartition du frottement axial et de la contrainte à la base du pieu. Ces cycles sont alors susceptibles de provoquer des dégradations du sol et de l'interface sol-pieu et diverses stratégies de calcul peuvent être alors envisagées.

3.1.1 Modèle unidimensionnel : loi t - z cyclique

La loi t - z cyclique proposée est une loi d'interaction locale fondée sur les mêmes principes que la loi de Frank et Zhao (Frank et Zhao 1982, Suryatriyastuti *et al.* 2012). Elle permet de décrire de manière exhaustive chaque cycle de charge et de décharge. Elle est définie par l'équation (3) où n désigne le nombre de cycle de chargement, q_{si} [kPa] désigne le frottement mobilisé à l'inversion de charge ($q_{si}=0$ pour $n=1$), u_{fi} [m] et u_{fs} [m] désignent respectivement le déplacement de l'interface sol-pieu au cycle précédent ($u_{fi}=0$ pour $n=1$) et la somme des valeurs absolues des déplacements ($u_{fs} = \sum |u_{fi}|$). q_{sULT} [kPa] est le frottement maximal axial mobilisable lors du premier cycle, Δq_s [kPa] et ε [m] sont respectivement la variation positive ou négative du frottement maximal mobilisable et la vitesse de cette variation, et α [m] quantifie la rigidité de l'interface.

Les paramètres A et R (équations 4 et 5) permettent, à chaque inversion de chargement, respectivement, de limiter la valeur de frottement q_s et de quantifier l'éventuelle augmentation de rigidité de l'interface au cours des cycles (le paramètre ρ définit cette augmentation et le paramètre ξ indique la vitesse de cette augmentation). La formulation de la loi t - z cyclique permet de rendre compte des principaux phénomènes caractéristiques des effets cycliques (Lemaître et Chaboche 2009) : relaxation et rochet.

$$q_s = q_{si} + A(-1)^{n+1} \left(q_{s0} + \Delta q_s \left(1 - e^{-\frac{u_s}{\varepsilon}} \right) \right) \left(1 - e^{-R \left| \frac{u_i - u_{ii}}{\alpha} \right|} \right) \quad (3)$$

$$A = \frac{\left| q_{si} - (-1)^{n+1} \left(q_{s0} + \Delta q_s \left(1 - e^{-\frac{u_s}{\varepsilon}} \right) \right) \right|}{\left| q_{s0} + \Delta q_s \left(1 - e^{-\frac{u_s}{\varepsilon}} \right) \right|} \quad (4)$$

$$R = e^{-(n-1)\xi} + \rho(1 - e^{-(n-1)\xi}) \quad (5)$$

3.1.2 Modèle Tridimensionnel : Modèle d'interface Modjoin

La loi de comportement Modjoin (Shahrouh et Rezaie 1997) est formulée dans le cadre de l'élastoplasticité avec deux systèmes d'écrouissage : l'un isotrope et l'autre cinématique non linéaire. La partie élastique est définie par deux paramètres k_n et k_t reliant d'une part la contrainte normale σ_n au déplacement relatif normal u_n et d'autre part la contrainte tangentielle τ au déplacement relatif tangentiel u_t . La surface limite f_i ainsi que la variable d'écrouissage isotrope associée sont définis par les équations (6) et (7) à partir de φ , DR et ADR . La surface de charge cinématique f_c ainsi que la variable d'écrouissage associée sont caractérisées par les équations (8) et (9) à partir des paramètres γ_c et β_c ainsi que du multiplicateur plastique λ . Enfin, la règle d'écoulement est présentée par les équations (10) et (11) à partir des paramètres ψ_c et a_c . La formulation de la loi Modjoin permet de rendre compte des principaux phénomènes cycliques (relaxation et rochet).

$$f_i = |\tau| + \sigma_n R_{\max} \quad (6)$$

$$R_{\max} = \tan \varphi + DR \left(1 - e^{-ADR u_{ir}^p} \right) \quad (7)$$

$$f_c = |\tau - \sigma_n R_c| \quad (8)$$

$$dR_c = \lambda \left[\gamma_c |R_{\max} - R_c|^{\beta_c} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_n} = \left(\tan \psi_c - \left| \frac{\tau - \sigma_n R_c}{\sigma_n} \right| \right) e^{-a_c u_c^p} \quad (10)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\tau}{|\tau|} \quad (11)$$

3.2 Application à l'étude d'un pieu géothermique

3.2.1 Présentation de l'exemple

L'exemple choisi concerne un pieu présentant une longueur D égal à 15 m et un diamètre B égal à 0.6 m. Les propriétés des terrains, des matériaux et de l'interface sol-pieu sont présentées dans le tableau 1. Le pieu est soumis à 20 cycles de chargement thermique d'une amplitude correspondant à une variation de température de 20°C (les cycles thermiques débutent par un refroidissement). La charge mécanique appliquée au pieu correspond au tiers de sa résistance limite définie conventionnellement par un enfoncement de la tête du pieu égal à $B/10$. Les calculs sont réalisés pour deux configurations : pieu libre en tête et pieu bloqué en tête.

Tableau 1. Propriétés des matériaux, des terrains et des interfaces (Hillel 2012)

Propriétés		Sol	Béton	Interface
Densité [kN/m ³]	ρ	1950	2500	
Module d'incompressibilité [MPa]	K	10	20000	
Rigidité normale [MN/m]	k_n			22
Module de	G	3.75	7500	

cisaillement [MPa]			
Rigidité tangentielle [MN/m]	k_t		8.33
Conductivité thermique [W/m ²]	λ_T	1.5	1.8
Chaleur massique [J/kg °C]	C	800	880
Coefficient de dilatation thermique [10 ⁻⁵ J/°C]	α_T	0.5	1.25
Cohésion [kPa]	c		1
Angle de frottement [°]	φ		30

3.2.2 Résultats

Dans le cas du pieu libre en tête, les résultats obtenus montrent, pour les deux modèles, des variations similaires de déplacements en tête de pieu (Figure 4). Celle-ci a tendance à s'enfoncer au cours des cycles thermiques, avec toutefois, durant les cycles de réchauffement, un soulèvement qui correspond à une dilatation du pieu. Le rapport entre le déplacement induit seulement par les variations de température et par la dégradation de l'interface et le tassement initial du pieu atteint sur cet exemple 20%. Cet enfoncement résulte du choix des paramètres effectués pour les deux modèles et s'accompagne pour chaque section du pieu d'une diminution des frottements latéraux ainsi que d'une augmentation des déplacements tangentiels (Figure 5a et 5b). Les paramètres choisis rendent compte d'un phénomène de rochet pour le comportement de l'interface sol-pieu. La dégradation des propriétés du sol se traduit par une augmentation de l'effort normal dans le pieu pour les deux modèles (Figures 6a et 6b). Cette augmentation est toutefois faible puisqu'elle reste inférieure à 20%.

Dans le cas du pieu bloqué en tête, pour les deux modèles, les résultats obtenus montrent une diminution de l'effort normal en tête du pieu au cours des cycles thermiques (Figure 7). Cette diminution traduit un phénomène de relaxation qui est rendu possible par le choix des paramètres des modèles. Ce phénomène peut aussi être mis en évidence au niveau du comportement local de l'interface sol-pieu, particulièrement avec le modèle t - z . Le frottement latéral se dégrade sans enfoncement ni soulèvement notable du pieu (Figure 8a et 8b). Avec le modèle Modjoin, pour les deux sections de pieu considérées, une diminution du frottement latéral ainsi qu'un léger enfoncement sont constatés. La diminution de l'effort normal dans le pieu au cours des cycles de refroidissement est beaucoup plus importante qu'au cours des cycles de réchauffement (Figure 9a et 9b). Pour le modèle t - z , sur toute la hauteur du pieu, les efforts normaux diminuent uniformément dans le pieu. Pour le modèle Modjoin, les efforts normaux diminuent avec la profondeur hormis au niveau de la pointe du pieu. Pour ce modèle, la présence du sol autour du pieu autorise sans doute une répartition des forces qui limite la diminution de l'effort normal.

4 CONCLUSION

Les fondations profondes énergétiques supportent les charges transmises par les structures qu'elles portent et sont utilisées en même temps comme échangeurs thermiques. Elles présentent un fonctionnement particulier régi par les contractions et les dilatations qu'elles subissent. Les méthodes de calcul proposées permettent de prévoir l'évolution des déplacements en tête de pieu, de la contrainte normale et de la mobilisation de la résistance du sol en incluant le cas échéant des effets cycliques. L'instrumentation prochaine de pieux géothermiques permettra de valider ces modèles de calcul. Dans l'immédiat, les outils proposés permettent dès maintenant de justifier des pieux géothermiques selon les règles et les normes actuelles.

5 RÉMERCIEMENTS

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet ANR « GECKO ». Les auteurs remercient vivement les différents partenaires du projet (ECOME, BRGM, IFSTAR, CETE Nord Picardie, LGCgE, LAGEO, et EPFL) pour leur soutien.

6 REFERENCES

Adam D. et Markiewicz R. 2009. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique* 59 (3), 229-236.

Boënnec O. 2009. Piling on the energy. *Geodrilling International* 150, 25-28.

Bourne-Webb P., Amatya B., Soga K., Amis T., Davidson C., et 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.

Cekerevac C. et 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, 209-228.

Frank R. et Zhao S. 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin Liaison Laboratoire Ponts Chaussées* 119, 17-24.

Fromentin A., Pahud D., Laloui L., et Moreni M. 1999. Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement. *Revue française de génie civil* 3(6), 387-421.

Knellwolf C., Peron H., et Laloui L. 2011. Geotechnical analysis of heat exchanger piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 37 (10), 890-902.

Lemaître J. et Chaboche J.L. 2009. *Mécanique des Matériaux Solides*. Dunod, Paris.

Habert J. et Burlon S. 2012. Éléments sur le comportement mécanique des fondations géothermiques. *ACTES de Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur* (2), 617-624.

Hillel D. 2004. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Science, USA.

Shahrour I. et Rezaie F. 1997. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading. *Computers and Geotechnics* 21 (1), 21-39.

Suryatnyastuti M., Mroueh H., et Burlon S. 2012. Modélisation numérique du comportement thermomécanique d'un pieu échangeur de chaleur. *ACTES de Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur* (2), 593-600.

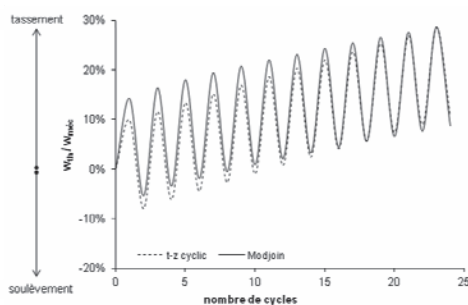


Figure 4. Pieu libre en tête – Variation relative du déplacement en tête du pieu

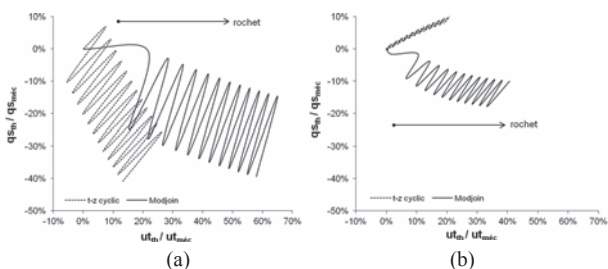


Figure 5. Pieu libre en tête – Variation relative de la réponse de l'interface sol-pieu – (a) en profondeur 1/4 L – (b) en profondeur 3/4 L

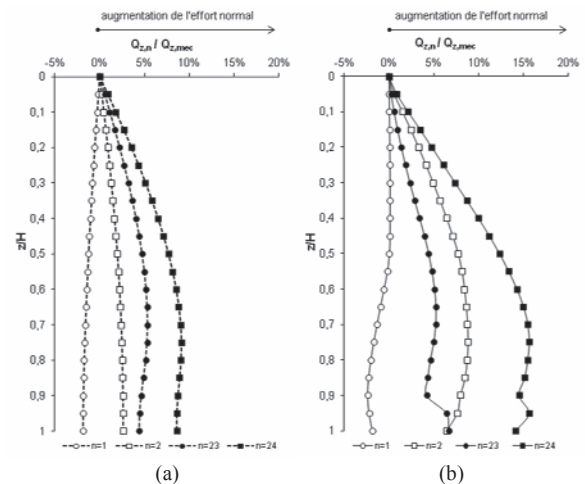


Figure 6. Pieu libre en tête – Variations relatives des efforts induits par les variations de température dans le pieu – (a) Loi t-z – (b) Loi Modjojn

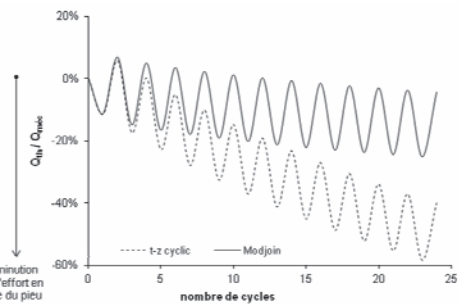


Figure 7. Pieu bloqué en tête – Variation relative de l'effort en tête du pieu

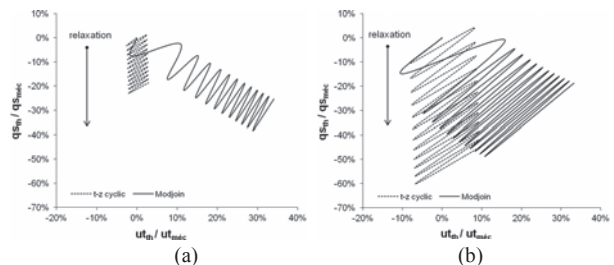


Figure 8. Pieu bloqué en tête – Variation relative de la réponse de l'interface sol-pieu – (a) en profondeur 1/4 L – (b) en profondeur 3/4 L

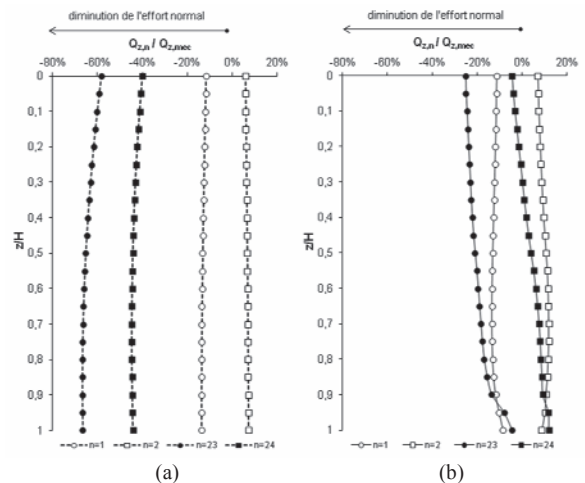


Figure 9. Pieu bloqué en tête – Variations relatives des efforts induits par les variations de température dans le pieu – (a) Loi t-z – (b) Loi Modjojn