

EFFET DE L'ÉCOULEMENT DE LA NAPPE SUR LA PERFORMANCE THERMIQUE DES PAROIS MOULÉES GÉOTHERMIQUES

ACCOUNTING FOR THE UNDEGROUND WATER FLOW ON THE THERMAL PERFORMANCE OF GEOTHERMAL DIAPHRAGM WALLS

Dina RAMMAL¹, Hussein MROUEH¹, Sébastien BURLON², Maria SURYATRIYASTUTI³

¹ Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE)-Université Lille 1-Sciences et technologies-Villeneuve d'Ascq, 59655, France

² Institute Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement, et des Réseaux (IFSTTAR)-Paris, 75015, France

³ ITECH-Saint-Maurice, 94410, France

RÉSUMÉ – Cet article présente l'influence de la conductivité hydraulique du sol ainsi que de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine sur l'efficacité thermique des parois moulées géothermiques à partir de différentes simulations numériques. La performance du système est étudiée en tenant compte des phénomènes de conduction et d'advection. L'effet de la longueur active des parois moulées sur le processus d'échange de chaleur est aussi étudié.

ABSTRACT – This paper presents the influence of the soil hydraulic conductivity as well as the velocity of underground water flow on the thermal efficiency of geothermal diaphragm walls, through different numerical simulations. The performance of the system is studied taking into account the conductive and advective phenomena. The effect of the active length of the diaphragm wall on the heat exchange process is also studied.

1. Introduction

Ces dernières années, les ouvrages géothermiques ont vu leur utilisation croître en Europe du fait de la volonté politique et de la nécessité environnementale de favoriser les énergies renouvelables. Les parois moulées énergétiques appartiennent à ce type d'ouvrages et peuvent échanger de l'énergie thermique avec le terrain encaissant au moyen des tubes échangeurs de chaleur accrochés à la caisse de ferrailage qui garantit usuellement leur résistance mécanique. Par comparaison avec les pieux géothermiques, les parois moulées présentent des surfaces d'échanges très grandes notamment dans le cas des projets des stations de métro pour les travaux du Grand Paris (plus de 150 m de longueur et plus de 30 m de profondeur).

Le transfert thermique entre un ouvrage géothermique et le terrain encaissant est équivalent à la puissance thermique échangée entre les deux systèmes. La plupart des travaux conduisent à estimer l'énergie totale transférée selon l'équation 1, en prenant en compte le transfert de chaleur convectif à l'intérieur des tubes parcourus par le fluide échangeur de chaleur (Bouazza et al., 2013; Gao et al., 2008):

$$Q_{total} = Q_{in} - Q_{out} = m_f \cdot c_f \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

où Q_{in} et Q_{out} (W) sont respectivement les chaleurs entrante et sortante, m_f (kg/s) et c_f (J/K/kg) sont le débit massique et la capacité thermique massique (chaleur spécifique) du fluide caloporteur et T_{in} and T_{out} (K) sont les températures d'entrée et de sortie du fluide.

Cette relation ne permet pas d'analyser facilement l'influence du terrain notamment la présence de la nappe et son écoulement qui peuvent affecter les échanges thermiques entre l'ouvrage énergétique et le sol encaissant. Par ailleurs, il faut souligner que la présence d'une paroi moulée peut elle-même modifier l'écoulement de la nappe en créant des effets de barrage plus ou moins importants. Il est donc nécessaire de pouvoir identifier les conditions géologiques et hydrogéologiques les plus appropriées pour garantir la meilleure efficacité thermique des parois moulées géothermiques. Il faut néanmoins garder à l'esprit que les besoins thermiques de la structure à chauffer ou à climatiser aussi jouent un rôle dans l'estimation globale de l'efficacité thermique d'un ouvrage géothermique.

De nombreux travaux ont déjà traité le problème des échanges de chaleur entre le sol et des échangeurs de chaleur (Choi et al., 2013; Tolooyan et al., 2012) ou des structures géothermiques et notamment des pieux (Bouazza et al., 2013; Cecinato et Loveridge, 2015; Cervera, 2013) et les tunnels (Di Donna et Barla, 2016). Néanmoins, le cas des parois moulées est très peu traité (Xia et al. 2012) et l'influence de la vitesse de la nappe, qui influe sur la nature conductive ou advective des échanges thermiques n'a jamais été directement abordée. L'advection vient se superposer au phénomène de conduction, c'est-à-dire au transfert de chaleur au sein d'un milieu matériel, par exemple un sol, quand ce milieu est le siège de l'écoulement d'un fluide, par exemple l'eau dans le cas d'une nappe.

L'objectif de ce travail est d'analyser comment la ressource thermique autour d'une paroi moulée évolue lorsque des phénomènes conductifs et advectifs sont possibles. Il s'agit notamment d'estimer numériquement le volume de sol affecté par des variations de température. Les contributions des échanges par conduction et par advection sont aussi estimées à partir du nombre adimensionnel de Péclet. Enfin, l'influence de la longueur active de la paroi moulée est aussi considérée.

2. Estimation de la puissance échangée

2.1 Conduction

Le transfert de chaleur par conduction est dû à une différence de température entre le sol et la structure géothermique. Dans tous les terrains, des échanges par conduction sont possibles. L'équation rendant compte de la puissance échangée par conduction est la suivante (Fromentin et Pahud, 1997) :

$$P_c(x,t) = \frac{\Delta T(x,t)}{R_{eq}} = \frac{T_s(x,t) - T_{es}}{R_s + R_{es}} \quad (2)$$

où T_{es} (K) est la température de la structure géothermique considérée comme la moyenne entre les températures entrante et sortante du fluide caloporteur et $T_s(x,t)$ (K) est la température du sol situé à une distance x de la structure et affecté par les variations de température et à un temps t . Cette équation est obtenue par analogie avec un modèle résistif où le terrain et la structure géothermique sont considérés comme deux résistances connectées en série. La résistance thermique équivalente est la somme des résistances thermiques de la structure géothermique R_{es} et du terrain R_s (m.K/W). La puissance échangée $P_c(x,t)$ (W/m) peut être définie comme la chaleur moyenne transférée par conduction par unité de longueur entre la structure géothermique et le volume de sol situé à une distance x de cette structure et à un temps t .

2.2 Advection

En présence d'un écoulement de la nappe, un phénomène d'advection se superpose au phénomène de conduction pour lequel la vitesse d'écoulement de la nappe au sens de Darcy est négligeable. L'advection traduit le transfert d'une certaine quantité de chaleur par le mouvement d'un fluide qui est ici celui de la nappe à travers les vides entre les particules de sol. Dans une direction donnée, la puissance transférée par advection entre la structure et le sol située à une distance x est définie par la relation suivante :

$$P_v(x,t) = v \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_s(x,t) - T_{es}) \quad (3)$$

où ρ_w (kg/m^3) est la masse volumique de l'eau souterraine; c_w (J/K/kg) sa chaleur spécifique et v (m/s) est la vitesse d'écoulement de la nappe au sens de Darcy dans la direction donnée, T_s et T_{es} sont des quantités identiques à celle définie pour le calcul de $P_c(x,t)$ dans l'équation 2. La puissance échangée $P_v(x,t)$ (W/m^2) peut être définie comme la chaleur moyenne transférée par advection entre la structure géothermique et le volume de sol situé à une distance x de cette structure et à un temps t .

Afin d'analyser plus précisément les effets de l'écoulement de la nappe, le nombre adimensionnel de Péclet défini comme le rapport entre la chaleur transférée par advection et celle transférée par conduction est introduit :

$$P_e = \frac{\rho_w c_w}{\lambda_s} \cdot v \cdot L_c \quad (4)$$

où λ_s (W/K/m) est la conduction thermique du sol et L_c est une longueur caractéristique du problème (m). Elle est définie ici comme le rapport entre le volume de sol traversé par les flux thermiques de conduction et d'advection et la surface normale à ces flux.

3. Modélisation numérique

3.1. Etude d'une station de métro

Les parois moulées sont très souvent utilisées pour la construction de stations de métro ou de parkings souterrains et présentent un intérêt certain pour la géothermie. L'objectif est ici d'étudier l'effet de l'écoulement de la nappe et de la longueur active de la paroi moulée sur la chaleur échangée avec le terrain. La longueur active de la paroi moulée désigne la partie équipée de tubes échangeurs de chaleur et n'est donc pas toujours égale à la longueur totale de la paroi.

Le choix de la longueur des tubes échangeurs et de leur position dans la paroi moulée joue un rôle important pour l'échange de la chaleur. Les tubes échangeurs peuvent être mis en œuvre sur toute la longueur de la paroi ou seulement mis en place dans la fiche. Par ailleurs, ils peuvent être disposés du côté de la paroi en contact avec le sol (Amis et al., 2009) ou des deux côtés, la face en contact avec le sol et la face en contact avec le volume d'air de la station. Dans le modèle analysé par la suite, deux cas sont considérés : le premier où la paroi moulée est équipée sur toute sa longueur et le second au niveau de sa fiche.

3.2. Présentation du modèle

La modélisation numérique est réalisée à l'aide du logiciel FLAC3D sur la base de la méthode des différences finies (ITASCA, 2005). Le volume de sol est modélisé en trois dimensions sur une largeur d'un mètre et présente une hauteur de 50 m et une longueur de 60 m. Ces valeurs ont été choisies sur la base d'une étude paramétrique préliminaire permettant d'appréhender de manière fiable les variations de température et de charge hydraulique à proximité de la paroi. Les dimensions des parois moulées et du radier constituant la station de métro modélisée (Figure 1) sont inspirées des projets du « Grand Paris ». Chaque paroi moulée a une hauteur de 32,5 m et une épaisseur de 1,2 m. Les fiches mesurent 10,5 m de long. Le radier présente une largeur de 21 m et une épaisseur de 1,5 m.

En ce qui concerne les conditions hydrauliques, le sommet et la base du domaine sont considérés imperméables. Des conditions de flux sont imposées sur les bords gauches et droits du modèle pour générer un écoulement dans le plan (XZ). Le sol est considéré homogène et présente un coefficient de perméabilité isotrope k_h (m/s) tandis que les parois moulées sont imperméables. Six cas sont considérés pour rendre compte de trois types de conditions limites et deux valeurs de coefficient de perméabilité. Pour chaque cas, les vitesses moyennes au sens de Darcy sont présentées dans le Tableau 1.

En ce qui concerne les conditions thermiques, des conditions adiabatiques sont imposées sur les parois latérales du modèle et au niveau des parois moulées en contact avec l'air extérieur. Le sommet du modèle est soumis aux variations de température de l'air extérieur tandis qu'à la base, un flux de chaleur interne égal à $0,0544 \text{ W/m}^2$ est imposé. La température initiale du sol est fixée à 14°C . La température des parois moulées est fixée à 5°C en hiver et 25°C en été, correspondant aux valeurs moyennes usuellement constatées dans ce type d'ouvrages (Suryatriyastuti, 2013).

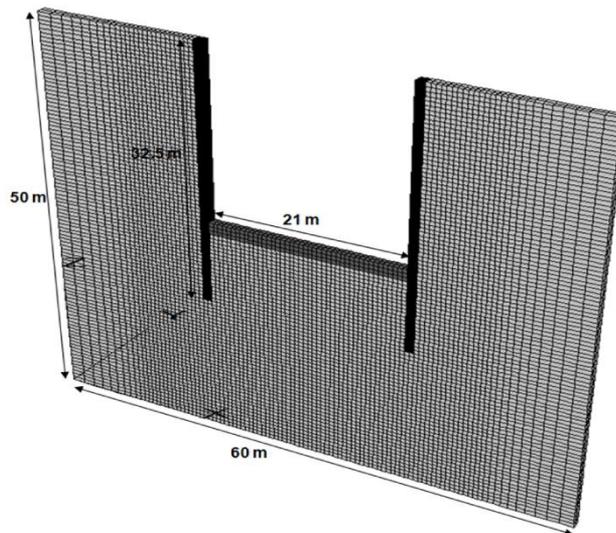


Figure 1. Géométrie de la station de métro considérée

Tableau 1. Conditions hydrauliques aux limites et vitesse d'écoulement de la nappe

	Profondeur de la nappe (m)		Vitesse d'écoulement moyenne (m/s)	
	Bord gauche (x=0 m)	Bord droit (x=60 m)	$k_h=10^{-5}$ m/s	$k_h=10^{-6}$ m/s
Cas 1	50	30	$3,34 \times 10^{-6}$	$3,34 \times 10^{-7}$
Cas 2	50	35	$2,50 \times 10^{-6}$	$2,50 \times 10^{-7}$
Cas 3	50	45	$8,34 \times 10^{-7}$	$8,34 \times 10^{-8}$

3.3. Propriétés des terrains et des matériels

Le modèle est constitué de deux matériaux : le béton pour la paroi moulée et un sol sableux saturé. Les propriétés thermiques et hydrauliques de ces deux matériaux sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Propriétés hydrauliques et thermiques du sol et du béton

	Sol	Béton
Coefficient de perméabilité (m/s)	10^{-6} - 10^{-5}	-
Porosité	0,4	0,15
Capacité thermique massique (J/kg/K)	1000	880
Résistance thermique (m.K/W)	0,5	0,06

Les résistances thermiques qui interviennent dans le calcul de la puissance transmise par conduction sont déterminées selon deux approches. Pour le béton, ce sont les valeurs indiquées par la Société Suisse des Architectes et des Ingénieurs qui sont considérées (Tableau 3). Compte tenu de la géométrie des parois moulées, il est supposé qu'elle s'apparente à un pieu foré en béton équipé d'un tube en U quadruple attaché à la cage d'armatures et présentant un diamètre compris entre 0,3 et 1,5 m. Pour le sol, la résistance thermique peut être considérée comme l'inverse de sa conductivité thermique : $R_s=1/\lambda_s$. Plusieurs études théoriques et expérimentales ont montré la dépendance de la conductivité thermique du sol avec sa nature, sa granulométrie, sa compacité, sa masse volumique sèche ρ_d (kg/m³) et sa teneur en eau w . Dans cette étude, la corrélation suivante a été choisie pour décrire la conductivité des sables étudiés (Kersten, 1949) :

$$\frac{1}{R_s} = \lambda_s = 0,1442 \cdot (0,7 \log w + 0,4) \cdot 10^{0,6243\rho_d} \quad (5)$$

Tableau 3. Résistance thermique d'un pieu (SIA, 2005)

Type de pieu		Diamètre du pieu (m)	Résistance thermique totale (m.K/W)
Pieu battu équipé d'un tube en U double		0,3-1,5	0,15
Pieu en béton foré ou préfabriqué	Tube en U double attaché à la cage d'armatures	0,3-1,5	0,10-0,11
	Tube en U triple attaché à la cage d'armatures	0,3-1,5	0,07-0,08
	Tube en U quadruple attaché à la cage d'armatures	0,3-1,5	0,06

3.4. Performance thermique en hiver

3.4.1 Influence de la vitesse d'écoulement

L'influence de l'écoulement apparaît nettement sur la Figure 2 et montre les effets de l'advection qui augmentent avec la vitesse d'écoulement de la nappe. Le nombre de Péclet pour chaque cas est présenté dans le Tableau 4 pour deux valeurs de coefficient de perméabilité k_h : 10^{-5} m/s et 10^{-6} m/s.

Afin d'analyser plus en détail les échanges de chaleur, la moyenne de la puissance thermique totale P_{total} entre la paroi et le sol est définie :

$$P_{total} = \bar{P}(x,t) \quad \text{et} \quad P(x,t) = \frac{P_c(x,t)}{L_c} + P_v(x,t) \quad (6a)$$

$$P(x,t) = \frac{T_s(x,t) - T_{es}}{L_c(R_s + R_{es})} + v\rho_w c_w (T_s(x,t) - T_{es}) = (T_s(x,t) - T_{es}) \left(\frac{1}{L_c(R_s + R_{es})} + v\rho_w c_w \right) \quad (6b)$$

où \bar{P} est calculée en considérant la moyenne de la puissance thermique échangée $P(x,t)$ correspondant à la somme de la chaleur échangée par conduction et par advection entre la paroi et le sol situé à une distance x et à temps t . La longueur caractéristique L_c définie précédemment comme le rapport entre le volume de sol traversé par les flux thermiques de conduction et d'advection et la surface normale à ces flux est égale dans ce cas à 1,0 mètre, c'est-à-dire la largeur du modèle étudié.

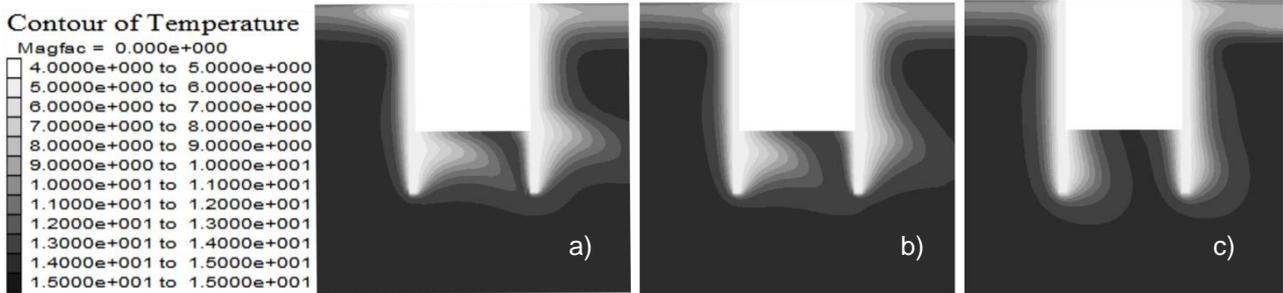


Figure 2. Profil de température autour des parois moulées – $k_f=10^{-5}$ m/s
a) cas 1 b) cas 2 c) cas 3

Tableau 4. Nombre de Péclet pour chaque cas de calcul

	$P_e (k_f=10^{-5} \text{ m/s})$	$P_e (k_f=10^{-6} \text{ m/s})$
Cas 1	7,0	0,70
Cas 2	5,2	0,52
Cas 3	1,7	0,17

La Figure 3 montre la variation de puissance thermique totale P_{total} échangée en fonction du nombre de Péclet. Elle augmente avec le nombre de Péclet : pour $P_e > 1,7$, des puissances de l'ordre de 35 W/m² peuvent être échangées. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles recommandées par Brandl (2006) et égales à 30 W/m².

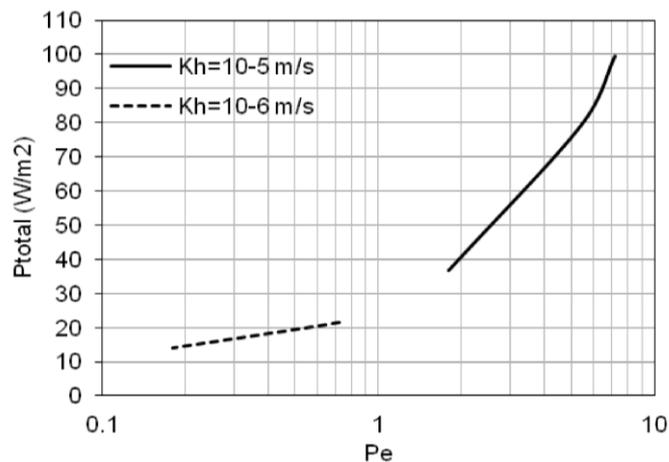


Figure 3. Variation de la puissance totale P_{total} échangée en fonction du nombre de Péclet.

La Figure 4 présente les valeurs moyennes de puissance échangées par conduction P_c et par advection P_v . Il peut être noté que la puissance thermique échangée par conduction

P_c a une valeur presque constante qui décroît lentement lorsque P_e augmente. Inversement, la puissance échangée par advection P_v augmente très fortement sans présenter de limite.

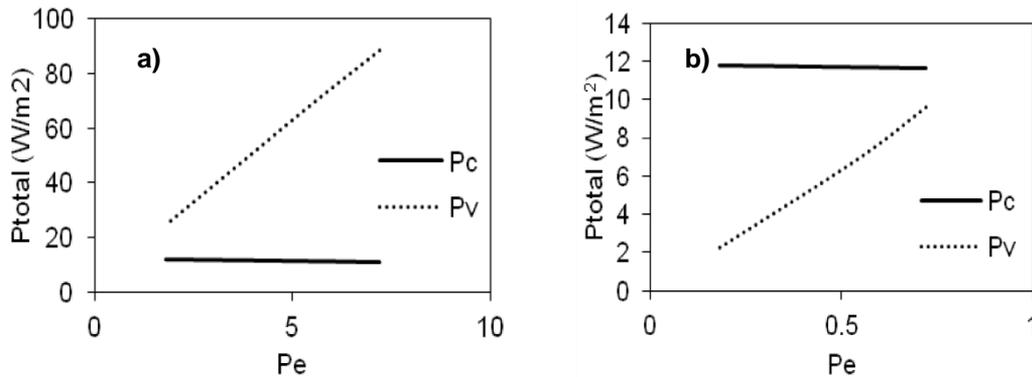


Figure 4. Influence de la conduction et de l'advection sur les puissances échangées P_c et P_v . a) $k_f=10^{-5}$ m/s b) $k_f=10^{-6}$ m/s.

3.4.2. Influence de la longueur active de la paroi

L'influence de la longueur active de la paroi est analysée en comparant deux configurations : l'une où la paroi est totalement équipée (W1) et l'autre où seulement la fiche est équipée (W2). La figure 5 montre la différence entre les deux configurations. L'équipement de la totalité de la paroi induit une augmentation qui est d'autant plus importante que la vitesse d'écoulement est élevée.

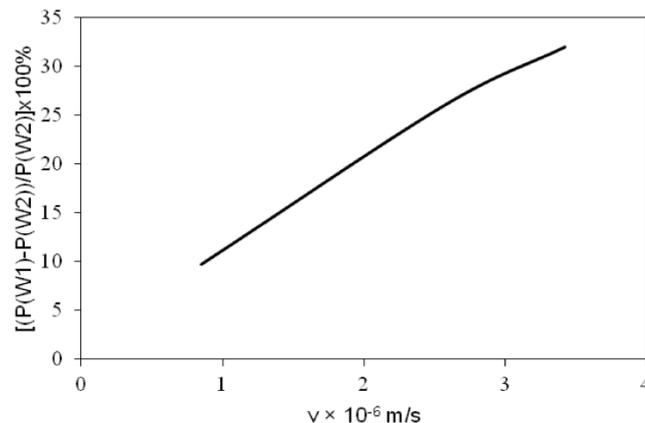


Figure 5. Rapport de la puissance thermique échangée entre les configurations W1 et W2 ($k_f=10^{-5}$ m/s).

4. Conclusion

Les parois moulées énergétiques constituent une technique prometteuse pour leur intérêt environnemental et leur efficacité thermique. Leur importante surface d'échange avec le sol est un atout à exploiter. En présence d'un écoulement de nappe, cette étude montre que la puissance thermique totale échangée augmente largement. Les puissances calculées donnent un ordre de grandeur au moins qualitatif des gains qui peuvent être attendus en présence d'une nappe. La répartition des puissances échangées par conduction et par advection est aussi intéressante à analyser. Elle montre que la

puissance échangée par conduction reste constante tandis que la puissance échangée par advection varie sensiblement en fonction de la vitesse de l'écoulement. Il s'ensuit une relative prudence à adopter lors du dimensionnement thermique d'une paroi moulée énergétique et la nécessité de réaliser des tests de réponse thermique pour confirmer les valeurs estimées. La possibilité d'équiper seulement la fiche de la paroi a aussi été étudiée et il a été constaté que la performance du système avec la paroi totalement équipée est d'autant plus élevée que la vitesse d'écoulement est grande.

Cette étude délivre un premier enseignement sur la performance de l'échange thermique entre une paroi moulée énergétique et un sol donné. Des travaux supplémentaires sont envisagés pour prendre en compte le couplage thermo-mécanique des parois moulées énergétiques.

5. Bibliographie

- Amis T., Robinson C.A., Wong S. (2009). Integrating geothermal loops into the diaphragm walls of the Knightbridge Palace Hotel project.
- Bouazza A., Loang B., Sigh R. (2013). Soil effective thermal conductivity from energy pile thermal tests. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, pp. 211-219.
- Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, vol. 56, n°2, pp. 81-122.
- Cecinato F., Loveridge F.A. (2015). Influences on thermal efficiency of energy piles. *Energy*, vol. 82, pp. 1021-1033.
- Cervera C.P. (2013). Ground thermal modeling and analysis of energy pile foundations. Epsos, 135 pages.
- Choi J.C., Park J., Lee S.R. (2013). Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays. *Renewable energy*, vol. 52, pp. 230-240.
- Di Donna A., Barla M. (2016). The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange. *Environmental geotechnics*.
- Fromentin A., Pahud D. (1997). Recommandations pour la réalisation d'installation avec pieux échangeurs, Lausanne, 247 pages.
- Gao J., Zhang X., Liu J., Shan Li K., Yang J. (2008). Thermal performance and ground temperature of vertical pile foundation heat exchangers : A case study. *Applied thermal engineering*, vol. 28, pp. 2295-2304.
- ITASCA. (2005). FLAC^{3D} Version 3.0 Theory and Background. Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
- Kersten M. (1949). Thermal properties of soils, Minnesota, vol. LII, n° 21, 233 pages.
- SIA (2005). Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton, guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. Documentation D 0190 - Swiss Society of Engineers and Architects, Geneva, 100 pages.
- Suryatriyastuti M.E. (2013) Numerical study of the thermo-active piles behavior in cohesionless soils, Lille, 143 pages.
- Tolooiyan A., Hemmingway P. (2012). A preliminary study of the effect of groundwater flow on the thermal front created by borehole heat exchangers. *International journal of low-carbon technologies*, vol. 9, pp. 284-295.
- Xia C., Sun M., Zhang G., Xiao S., Zou Y. (2012). Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls. *Energy and buildings*, vol. 52, pp. 50-55.