

# Estimation des échanges thermiques à long terme d'une géostructure thermique

## *Long term assessment of thermal exchange of a thermoactive geostructure*

Yvon DELERABLEE<sup>1</sup>, Sébastien BURLON<sup>2</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>2</sup>, Eric ANTOINET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Antea Group, équipe fondations et terrassements, Antony, France

<sup>2</sup> IFSTTAR, département GERS, Champs-sur-Marne, France

**RÉSUMÉ** – Les géostructures thermiques sont en plein développement en Europe. De nombreux projets sont en conception ou en cours de réalisation. Cet article a pour objectif de présenter une méthode d'analyse originale des échanges thermiques à long terme entre le terrain et l'ouvrage prenant en compte la circulation d'une nappe hydraulique. L'analyse des flux de chaleur par conduction et par advection est également développée.

**ABSTRACT** – Thermoactive geostructures are in great development in Europe. Many projects are at design state or in progress. The goal of this paper is to present an original approach of long term heat exchange between the ground and the structure considering the groundwater flow. The analysis of heat flux by conduction and advection is also presented.

### 1. Introduction

Les géostructures thermiques sont des ouvrages géotechniques dans lesquels sont insérés des tubes échangeurs de chaleur afin de produire du chaud en hiver ou du froid en été. Les principaux ouvrages équipés sont les fondations profondes, les ouvrages de soutènement, les radiers et les tunnels (CFMS et SYNTÉC, 2017). Le défi actuel réside dans la mise en place de ces géostructures thermiques dans des ouvrages complexes tels que les parois moulées de gares ou les tunnels de métro (Barla *et al*, 2016).

Les échanges thermiques ayant lieu à travers des éléments structuraux, les déformations d'origine thermique induisent des variations mécaniques à prendre en compte dans le dimensionnement. De nombreuses études ont été menées sur le comportement thermo-mécanique des terrains (Campanella et Mitchell, 1968 ; Laloui et Cekerevac, 2008) et des pieux énergétiques (Bourne-Webb *et al*, 2009 ; Adam and Markiewicz, 2009 ; Di Donna *et al*, 2016). Du point de vue thermique, deux échelles d'étude sont possibles : l'échelle du tube échangeur de chaleur et l'échelle de l'ouvrage dans son environnement. Historiquement, l'échelle du tube échangeur de chaleur est bien connue car semblable à ce que l'on peut trouver notamment dans les études sur les sondes géothermiques (Pahud *et al*, 1999). L'échelle de l'ouvrage permet d'analyser le comportement à long terme de la géostructure et du terrain environnant en termes de variations de température et de puissance échangée. La prise en compte de l'écoulement d'une nappe permet ainsi d'appréhender les notions de panache thermique et de recharge thermique naturelle. A cette échelle, les échanges thermiques sont gouvernés par (i) la conduction thermique à travers le terrain, (ii) la vitesse d'écoulement de la nappe qui affecte la recharge thermique et les échanges thermiques par advection (Fromentin *et al*, 1997 ; Barla *et al*, 2016), (iii) l'influence de la température de l'air extérieur et (iv) la forme en trois dimensions de la géostructure thermique qui peut affecter l'écoulement de la nappe.

Quelques approches considérant cette échelle de l'ouvrage ont été développées dans le cadre de la modélisation de tests de réponse thermique (Signorelli *et al*, 2007 ; Zarrella *et al*, 2017) et peuvent être appliquées aux géostructures thermiques (Xia *et al*, 2012). En termes de conception, trois problématiques majeures peuvent être soulevées : quel est l'effet à long terme sur la température du terrain et de la nappe ? Quelle est la

puissance échangée entre le terrain et l'ouvrage ? Quelle sont les contributions de la conduction et de l'advection dans les échanges thermiques en lien avec la vitesse d'écoulement de la nappe ?

Dans cet article, une approche originale est développée afin d'analyser la pérennité thermique des géostructures et, notamment, des parois moulées thermoactives. Cette approche est basée sur l'étude des flux thermiques par conduction et par advection et de leur contribution en termes de puissance volumique. Elle est illustrée par l'exemple d'une station de métro à Paris. L'objectif est de fournir un outil d'analyse simple permettant, à terme, de fournir des abaques et des clés pour améliorer la conception des ouvrages thermoactifs.

## 2. Estimation des échanges thermiques par conduction et par advection

### 2.1 Analyse de l'équation d'équilibre énergétique

L'équation d'équilibre qui régit les échanges thermiques entre le terrain et la structure inclut les contributions de la conduction et de l'advection :

$$C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{J}_{cond}) + \operatorname{div}(\vec{J}_{adv}) - j_{int} = 0 \quad (1)$$

où  $C_{eff}$  est la chaleur spécifique effective ( $\text{J/m}^3.\text{K}$ ),  $T$  la température ( $\text{K}$ ),  $\vec{J}_{cond}$  le flux de chaleur par conduction ( $\text{W/m}^2$ ),  $\vec{J}_{adv}$  le flux de chaleur par advection ( $\text{W/m}^2$ ) et  $j_{int}$  la production de chaleur volumique interne ( $\text{W/m}^3$ ) qui peut être négligée en fonction du type de terrain rencontré et de la profondeur de l'ouvrage.

Le théorème de Green-Ostrogradski relie la divergence du flux au flux lui-même :

$$\iiint_V \vec{V} \cdot \vec{j} dV = \oint_{\partial V} \vec{j} \cdot dS \quad (2)$$

Le calcul direct des différentes composantes des flux étant complexe en 3D, le calcul de la divergence permet d'évaluer les flux entrants et sortants d'un volume et, ainsi, de caractériser le transfert de chaleur à travers ce volume. C'est également un moyen d'étudier les variations de température. En effet, quand le signe de la divergence est négatif, la température augmente et inversement. Plus la divergence est élevée, plus les variations sont importantes. De plus, en régime stationnaire, la somme des divergences est nulle.

### 2.2 Application aux géostructures thermiques

L'approche par divergence permet d'analyser les flux de chaleur à travers un volume. Dans le cadre des géostructures thermiques, un volume de terrain enveloppant l'ouvrage peut être défini afin de considérer les transferts thermiques dans toutes les directions. La Figure 1 présente un exemple de ce volume. L'intégration de la divergence sur tous les sous-volumes associés correspond au bilan des échanges thermiques entre le terrain et l'ouvrage  $P_{tot}$  :

$$\operatorname{div}(\vec{J}_{tot,i}(t)) = \operatorname{div}(\vec{J}_{cond,i}(t)) + \operatorname{div}(\vec{J}_{adv,i}(t)) \quad (3)$$

$$P_{tot}(t) = \sum_{i=1}^n V_i \operatorname{div}(\vec{J}_{tot,i}(t)) \quad (4)$$

où  $P_{tot}$  est le bilan des échanges thermiques à travers le volume de contrôle ( $\text{W}$ ),  $n$  est le nombre de subdivisions du volume et  $V_i$  le volume de la subdivision  $i$  ( $\text{m}^3$ ).

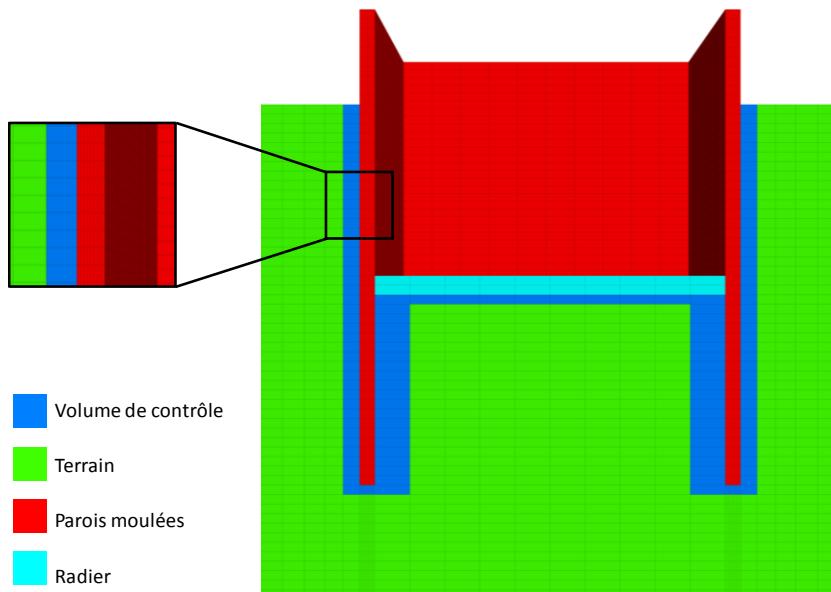


Figure 1 : exemple d'un volume de contrôle autour d'une géostructure thermique pour le calcul des divergences

### 3. Analyse numérique

#### 3.1 Méthodologie

##### 3.1.1 Introduction à la méthode d'analyse

Dans le cas des parois moulées thermoactives, il est essentiel de considérer les effets 3D qui peuvent modifier les caractéristiques initiales de l'écoulement (direction et intensité), aux abords de l'enceinte. C'est ce que l'on appelle l'effet barrage. Les échanges par advection étant proportionnels à la vitesse d'écoulement, les flux de chaleur à l'interface sont ainsi fonction de l'effet barrage de l'ouvrage. Par conséquent, les échanges d'énergie de chacune des parois sont différents. Cette complexité ne pouvant être représenté par une solution analytique, il est nécessaire de réaliser des modèles numériques avancés.

Ainsi, dans le modèle numérique, des variables locales peuvent être calculées : les flux de chaleur  $\vec{j}(x, t)$  ( $\text{W/m}^2$ ), la divergence des flux  $\text{div}(\vec{j}(x, t))$  ( $\text{W/m}^3$ ), la température  $T(x, t)$  (K), la vitesse de l'écoulement  $\vec{v}_D(x, t)$  ( $\text{m/s}$ ), etc. De plus, des variables globales à l'échelle de la structure peuvent être calculées : l'échange de chaleur global  $P_{tot}(t)$  (W) et le flux de chaleur global moyen  $\bar{\Phi}(t)$  ( $\text{W/m}^2$ ) (voir Figure 2), la dérive thermique, etc. Il est également possible de définir des valeurs moyennes temporelles, comme la moyenne annuelle journalière des échanges thermiques  $\bar{P}_{tot, \text{année}}$  ( $\text{W/jour/an}$ ) et la moyenne annuelle saisonnière des flux de chaleur  $\bar{\Phi}_{\text{année}}$  ( $\text{W/m}^2 \text{mois/an}$ ). Ces variables, calculées numériquement, permettent de quantifier les échanges thermiques liés à l'ouvrage.

Il est essentiel de noter que la donnée d'entrée principale concernant la sollicitation thermique que va subir la géostructure est la demande énergétique en chaud et en froid du bâtiment. L'objectif est de déterminer la réaction du terrain en fonction de la satisfaction plus ou moins complète de cette demande. C'est pourquoi le pic de puissance et la quantité d'énergie globale à produire doivent être considérés. En effet, un appel de puissance important peut être réalisé sur une faible période de temps si le réservoir énergétique le permet. Dans le cas des géostructures thermiques, le réservoir est le terrain environnant. Les échanges entre la géostructure, la pompe à chaleur, et le terrain sont efficaces uniquement si ce dernier peut fournir la bonne quantité d'énergie. Si ce n'est pas le cas, la pompe à chaleur compense à l'aide d'énergie électrique, diminuant d'autant son Coefficient de Performance.

### 3.1.2 Conditions initiales

Les calculs réalisés à l'aide du logiciel FLAC3D (ITASCA, 2013) prennent notamment en compte la variation de température de l'air extérieur, un niveau de terrain désaturé en subsurface et un échange par convection entre l'air à l'intérieur de l'enceinte et la paroi en béton. De plus, le calcul présente un couplage thermo-hydraulique. Dans un premier temps, l'écoulement de la nappe est initialisé afin de modéliser l'effet barrage lié à l'ouvrage. Dans un deuxième temps, la température est initialisée par rapport à l'écoulement, aux variations de l'air extérieur et aux échanges entre l'air et la paroi intérieure avant activation des parois moulées. Dans ce cas, la variation de l'air extérieur est régie par une loi sinusoïdale.

Ainsi, la température est égale à 14 °C à partir d'une dizaine de mètre de profondeur. Cependant, dans les premiers mètres de terrain, la température est fonction de la profondeur. À la vue des dimensions classiques d'ouvrages en parois moulées (< 60 m de profondeur), une proportion non négligeable de l'ouvrage subit l'influence des variations de température de l'air extérieur.

Les tubes échangeurs de chaleur sont représentés par des sources linéaires finies. A chacun des nœuds de celles-ci, une puissance est appliquée.

## 3.2 Application à un ouvrage type gare de métro

### 3.2.1 Géométrie, conditions limites et paramètres de terrain

Le Tableau 1 et la Figure 2 présentent les dimensions et les conditions aux limites du modèle utilisé. Le Tableau 2 donne la géologie et les paramètres thermo-hydrauliques utilisés pour la création de ce modèle.

Tableau 1 : Géométrie et conditions limites

Dimensions	Parois moulées	Radier	Limites
Longueur [m]	100	100	+ 115 de la paroi amont/+ 385 de la paroi aval
Largeur [m]	30	30	+ 110 de la paroi
Profondeur [m]	58	30	+ 22 de la paroi
Epaisseur [m]	0,8	1	-

	Conditions limites	Symbole	Unité	Valeur
Thermique	Température initiale	$T_{moy}$	[°C]	14
	Variation de température saisonnière	$T_{surface}$	[°C]	2 (hiver) – 26 (été)
	Température du substratum	$T_{substratum}$	[°C]	14
	Température des bords	$T_{bord}$	[°C]	-
	Coefficient d'échange par convection	$h_{conv}$	[W/m².K]	1
	Température de l'air intérieur	$T_{air}$	[°C]	20
Hydraulique	Charge hydraulique minimale	$h_{min}$	[m]	75
	Charge hydraulique maximale	$h_{max}$	[m]	77

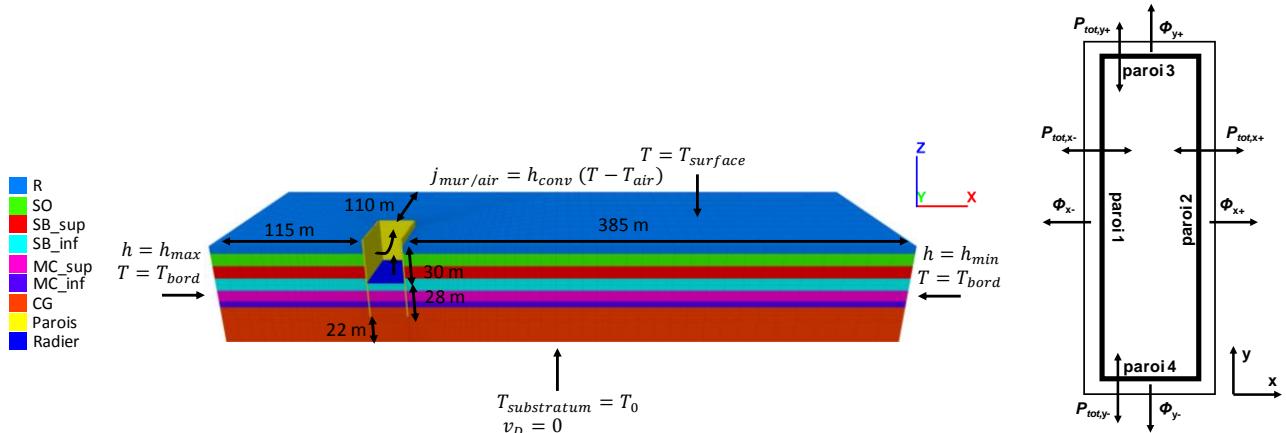


Figure 2 : Coupe du modèle numérique type gare de métro

Tableau 2: géologie et paramètres thermo-hydrauliques

Géologie	Remblais R	Calcaire de Saint-Ouen SO	Sables de Beauchamps Supérieurs SB_sup	Sables de Beauchamps Inférieurs SB_inf	Marnes et Caillasses Supérieures MC_sup	Marnes et Caillasses Inférieures MC_inf	Calcaire Grossier CG
Epaisseur [m]	6	10	10	11	5	15	> 10
Perméabilité [m/s]	$1.10^{-5}$	$2.10^{-5}$	$1.10^{-5}$	$3.10^{-6}$	$1.10^{-3}$	$1.10^{-3}$	$2.10^{-4}$
Conductivité thermique [W/m/K]	1,7	2,1	2,3	2,3	2,1	2,1	2,4
Chaleur spécifique [MJ/m <sup>3</sup> /K]	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2

### 3.2.2 Résultats

Une fois le modèle initialisé en écoulement et en température, une sollicitation thermique est appliquée aux parois moulées à 20 cm de l'interface sol/structure pendant 10 ans (Figure 3). Deux variations sont ainsi testées : une chronique sinusoïdale parfaitement équilibrée débutant par une injection d'énergie (climatisation) et une chronique « réelle » déséquilibrée (plus de chauffage que de climatisation sur une année).

Dans le cas de la sollicitation sinusoïdale, le terrain se charge progressivement en énergie pendant la période estivale et voit sa température augmenter en conséquence. Ce stockage d'énergie est ensuite utilisé en hiver. Il en résulte une mise à l'équilibre de la température du terrain sur une année après seulement quelques cycles. Ce comportement est bien visible dans l'analyse des puissances calculées via les divergences (Figure 4). En effet, le bilan de puissance tend vers zéro, signifiant l'arrivée à un état stationnaire.

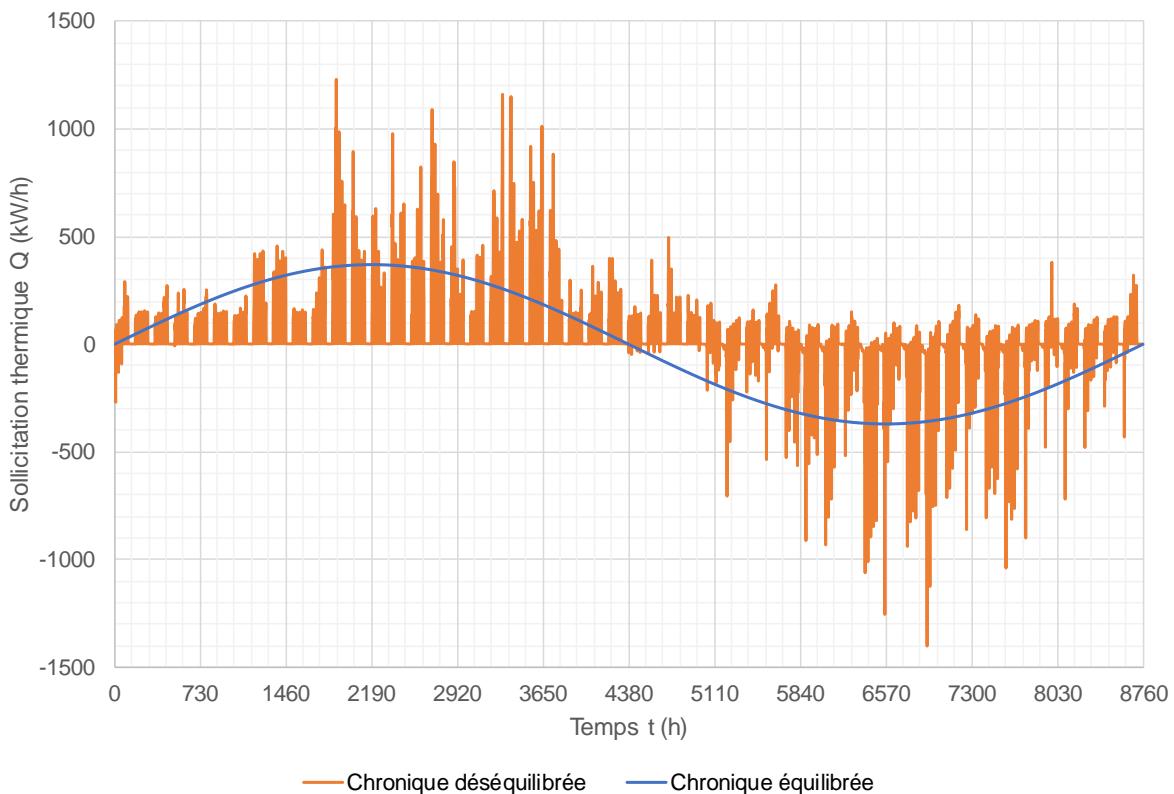


Figure 3 : sollicitations thermiques appliquées aux parois moulées

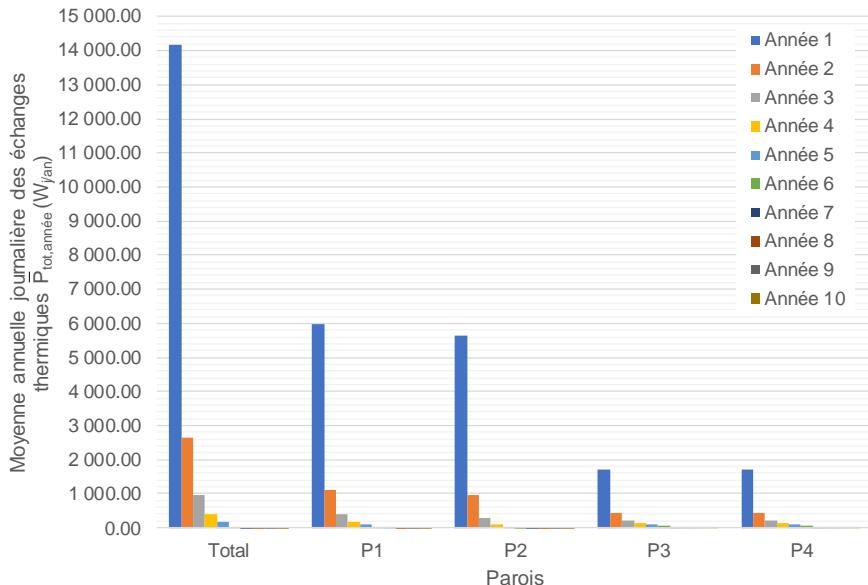


Figure 4 : Bilan énergétique – sollicitation sinusoïdale

Les échanges sont globalement conductifs. Cependant, localement, dans les zones où le flux hydraulique est le plus élevé, l'advection a un rôle non négligeable en comptant pour au moins 30% des échanges thermiques. La Figure 5 montre cette différence en comparant la divergence totale et la divergence par advection à la fin de l'été de l'année 3 à deux profondeurs : à 20 m/TN (cas (a)) où la perméabilité est faible et à 40 m/TN (cas (b)) où la perméabilité est élevée.

Dans la zone peu perméable (a), la modélisation montre que l'advection est négligeable même dans les angles où la vitesse du flux hydraulique est la plus élevée. Cependant, dans la zone perméable (b), l'advection devient non négligeable. Cela implique que le stockage d'énergie est diminué et conduit à des températures extrêmes lors des pics de besoin par manque de ressource disponible.

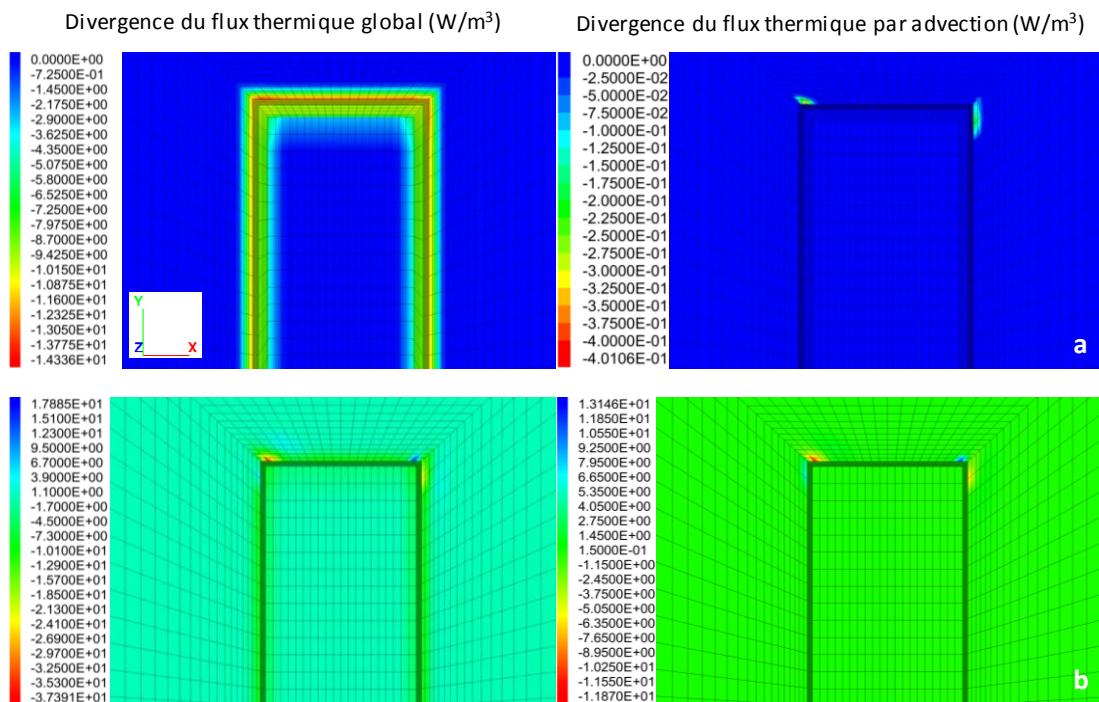


Figure 5 : Comparaison entre la divergence à la fin de l'été de l'année 3 du flux thermique global et par advection à deux profondeurs : (a) 20 m/TN ; (b) 40 m/TN

Pour la sollicitation réelle, le constat est différent. En effet, ce déséquilibre en besoin de chauffage conduit à un refroidissement progressif du terrain et à une diminution des performances énergétiques du système car la pompe à chaleur fonctionne avec des températures plus extrêmes. L'équilibre n'est pas atteint au bout de 10 ans de sollicitation (Figure 6). Selon la paroi et la saison, la diminution des performances est variable mais peut atteindre 10% après 10 ans de fonctionnement (Figure 7).

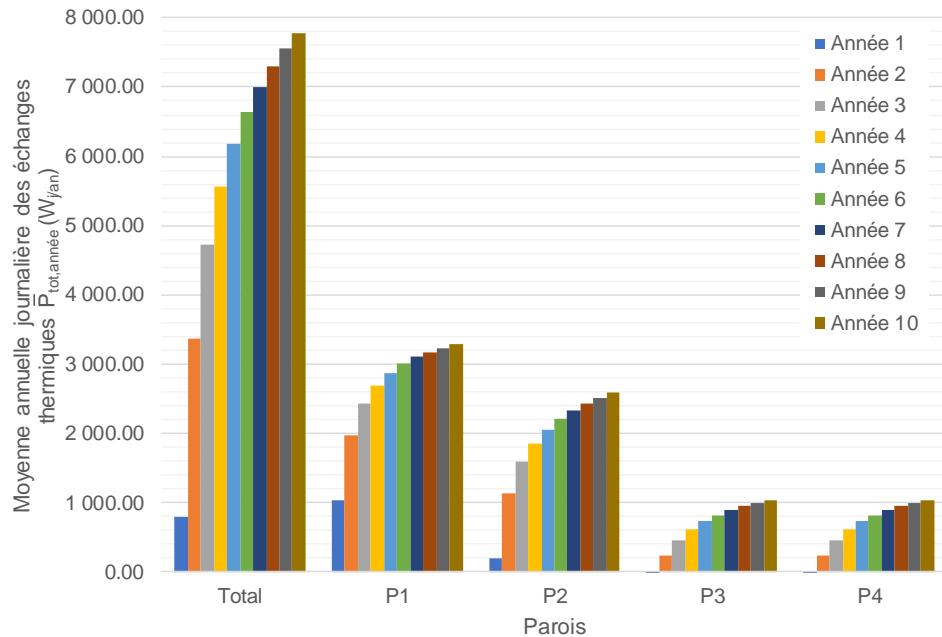


Figure 6 : Bilan énergétique - sollicitation réelle

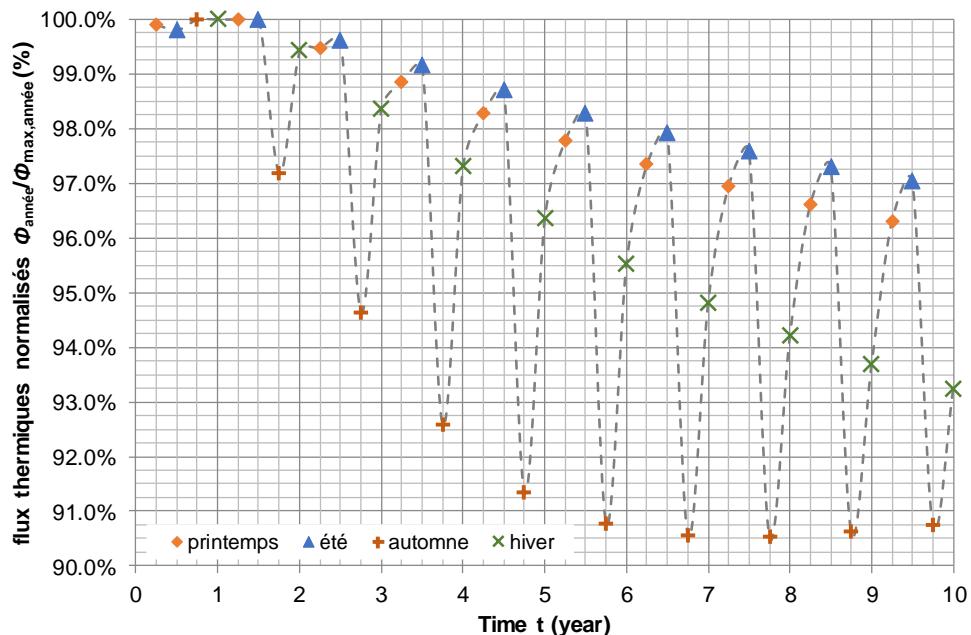


Figure 7 : Diminution des performances du système lié à une dérive thermique pluriannuelle pour la paroi 1 (amont)

#### 4. Conclusion

La méthode développée dans cet article permet d'étudier les échanges thermiques entre une géostructure thermique et un ouvrage à partir de l'analyse des flux de chaleur par conduction et par advection et de la vitesse d'écoulement de la nappe. Les résultats

permettent de mettre en évidence les zones et les conditions dans lesquelles la dérive thermique du système est la plus probable. Ainsi, dans le cas d'une demande énergétique parfaitement équilibrée, le système ne dérive pas et tend, au bout d'un ou deux ans d'activité, à un équilibre thermique. Cependant, dans le cas de besoins déséquilibrés, la température du terrain autour de l'ouvrage augmente ou diminue année après année, conduisant à une diminution des performances thermiques du système. Dans tous les cas, il convient de noter que les échanges énergétiques dépendent de la profondeur et de la paroi analysée.

## 5. Bibliographie

- Adam D., & Markiewicz R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique*, 59(3): 229-236.
- Barla M., Di Donna A. & Perino A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, 61: 104-113.
- Campanella R.G. & Mitchell J.K. (1968) Influence of temperature variations on soil behavior. *Journal of soil mechanics and foundation division ASCE*, 94(3) : 709-734.
- CFMS et SYNTÉC. (2017). Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. *Revue Française de Géotechnique*, 149, 120 p.
- Di Donna A., Rotta A.F., & Laloui L. (2016). Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads. *Computers and Geotechnics*, 72 : 126-142.
- FLAC3D Version 5.01 User's guide (2013), Minnesota, USA : ITASCA Consulting Group, Inc.
- Fromentin A., & Pahud D. (1997). Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Rapport final. Rapport d'étude n°120.104. Office fédéral de l'énergie, Lausanne, Suisse. 79 p.
- Laloui L., & Cekerevac C. (2008). Numerical simulation of the non-isothermal mechanical behavior of soils. *Computers and Geotechnics*, 35: 729-745.
- Pahud D., Fromentin A., & Hubbuch M. (1999). Heat exchanger pile system of the dock midfield at the Zürich Airport. Detailed simulation and optimization of the installation. Rapport final. Rapport d'étude n°120.110. Office fédéral de l'énergie, Lausanne, Suisse. 49 p.
- Signorelli S., Bassetti S., Pahud D. & Kohl T. (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36: 141-166.
- Xia C., Sun M., Zhang G., et al. (2012). Experimental study on geothermal heat exchangers buried in diaphragm walls. *Energy and Buildings*, 52: 50-55.
- Zarella A., Emmi G., Zecchin R. & De Carli M. (2017). An appropriate use of thermal response test for the design of energy foundation piles with U-tube circuits. *Energy and buildings*, 134 : 259-270.