

Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondation géothermiques

Badr OUZZINE^{1*}, Thibault BADINIER¹, Jean de SAUVAGE¹, Fabien SZYMKIEWICZ¹, Philippe REIFFSTECK¹

¹GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, F-77454, France

* (auteur correspondant : badr.ouzzine@univ-eiffel.fr)

Résumé - Depuis quelques décennies, on assiste au développement des géostructures thermiques dont le principe consiste à fixer des tubes échangeurs aux cages des fondations géotechniques. Une pompe à chaleur fait alors circuler de l'eau dans ces tubes afin d'extraire de la chaleur du sol en hiver ou alors de la fraîcheur en été. Cependant, ces géostructures sont très fréquemment implantées dans des sols parcourus par des écoulements souterrains qui impactent le champ thermique du sol et donc la performance de la pompe à chaleur. Une étude numérique est alors réalisée pour apprécier l'impact de l'écoulement sur la performance d'une pompe à chaleur reliée à un groupe de pieux géothermiques.

Nomenclature

Q	Charge thermique, W	H	Charge hydraulique, m
V	Débit de pompage moyen, $m^3 \cdot s^{-1}$	T	Température, K
v	Vitesse de Darcy, $m \cdot s^{-1}$		
k	Perméabilité, $m \cdot s^{-1}$		
Cv	Capacité thermique, $J \cdot K^{-1}$		

1. Introduction

Depuis les années 80, les géostructures thermiques dont le principe consiste à attacher des tubes échangeurs aux cages d'armature des structures géotechniques se développent. On confère ainsi à ces structures, dont le rôle premier est d'assurer une stabilité mécanique, un second rôle énergétique afin d'en faire des solutions de géothermie basse enthalpie avec un faible impact carbone. Ces géostructures thermiques sont ainsi de plus en plus utilisées et fréquemment placées dans un sol où un écoulement d'eau souterrain est présent ([1], [2]), sans pour autant considérer la potentielle interaction entre plusieurs géostructures bien que certains guides de recommandations aient été publiés ([3], [4], [5]). D'une part, l'écoulement est un bon moyen d'éviter la dérive thermique pluriannuelle du sol puisque l'advection permet de diffuser et donc d'atténuer l'anomalie thermique créée par la géostructure. D'autre part, ce phénomène d'advection crée un panache thermique et des ondes thermiques susceptibles d'atteindre d'autres structures en aval et d'impacter leur comportement [6]. La compréhension de ces interactions est essentielle au développement intelligent de la géothermie à faible profondeur. Afin d'étudier ces interactions, un groupe de neuf pieux énergétiques a été étudié dans Sense-City, une mini-ville dans laquelle un climat spécifique peut être imposé et la vitesse de l'écoulement souterrain contrôlée. Le sol et les neuf pieux ont été équipés de fibre optique et de capteurs de température ponctuels. Un modèle numérique hydro-thermique a ensuite été développé sur le logiciel de calcul en éléments finis CESAR-LCPC [7] afin d'extrapoler les résultats expérimentaux. Ce modèle numérique est couplé à un programme Python qui simule une pompe à chaleur afin d'étudier l'évolution du coefficient de performance (COP) d'une installation de géostructures thermiques en fonction de la vitesse de l'écoulement souterrain.

2. Modélisation numérique d'une expérience réalisée dans Sense-City

2.1 Expérience dans Sense-City

Sense-city est un équipement de l'Université Gustave Eiffel composé d'une chambre climatique de 400 m² où il est notamment possible de contrôler la température et l'humidité. A l'intérieur de cette chambre, une mini-ville est construite au-dessus d'une fosse géotechnique (voir figure 1 et 2) et des travaux de recherche sur différents domaines scientifiques en lien avec l'aménagement urbain sont effectués. Dans cette fosse en béton de 3 m de profondeur remplie de matériau granulaire, trois ouvrages souterrains de parois moulées et un groupe de neuf pieux géothermiques (2 m de hauteur pour 0,2 m de diamètre avec un espacement de 0,8 m entre les centres de pieux, voir figure 3) ont été mis en place. La saturation de la fosse est réalisée par des tubes fendus positionnés sur les parois nord et sud. Une injection d'eau à débit constant est réalisée d'un côté de la fosse et est pompée de l'autre côté afin de créer un écoulement souterrain. Le débit maximum de la pompe est de 6 m³/h et la hauteur maximale de 2,10 m.

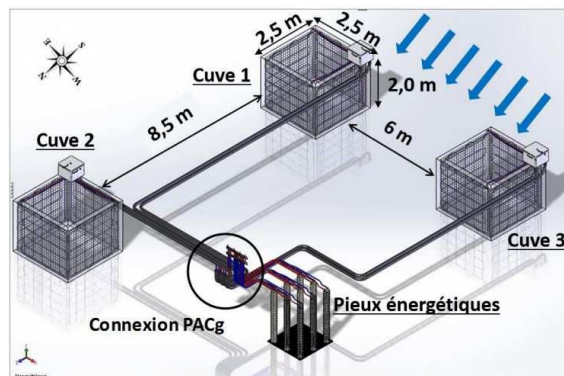


Figure 1 : Configuration des géostructures thermiques dans Sense-City

Les parois moulées ainsi que les pieux géothermiques sont équipés de tubes échangeurs de chaleur reliés à une pompe à chaleur, elle-même reliée au plancher chauffant d'un des bâtiments de la mini-ville. La PACg¹ fait circuler un fluide dans ces pieux avec une température d'entrée contrôlée afin de chauffer le bâtiment à une température choisie. L'intégralité de l'installation géothermique est équipée de nombreux capteurs, notamment des capteurs de température Pt100 sur les tubes échangeurs et de la fibre optique le long des structures. La construction de la fosse géothermique et son instrumentation est détaillée dans la thèse d'Y. Delerablée [6] (figure 1 et 2).



Figure 2 : Représentation de Sense-City et construction de la fosse géothermique

¹ Pompe à chaleur géothermique

Pour le besoin de l'expérimentation, un système annexe de climatiseur permet de contrôler la température dans les pièces du bâtiment et ainsi d'imposer un besoin constant en chauffage. Lors d'une période de chauffage du bâtiment, le système extrait de l'énergie du sol et la température du fluide caloporteur diminue. La pompe compense donc en utilisant plus de travail électrique, le COP diminue par conséquent. Cependant, si l'écoulement d'eau souterrain est assez fort pour maintenir une température constante dans le sol, le COP se maintient à un niveau supérieur. Une partie de ce travail consiste à simuler numériquement ce phénomène pour confirmer ou non cette hypothèse. Pour cela, dans le modèle numérique, le programme permet d'imposer aux pieux activés une puissance thermique qui dépend de la température du sol.

2.2 Modélisation numérique du groupe de pieux

Un modèle numérique a été réalisé sur le logiciel de calcul en éléments finis CESAR-LCPC [7]. Dans ce modèle numérique 2D, chaque pieu est représenté par un disque en béton et un unique tube échangeur de chaleur. Comme l'intérêt est porté sur le transfert de chaleur dans le sol et non à l'intérieur du pieu, ces simplifications n'impactent pas les résultats. Le modèle numérique représente un rectangle de sol de 10 m par 20 m (voir figure 3). Les pieux sont positionnés de façon à laisser un espace suffisant pour observer le panache thermique. Les conditions aux limites étant définies par une température imposée, ces dimensions sont choisies dans l'optique de limiter les effets de bord inhérent au modèle numérique.

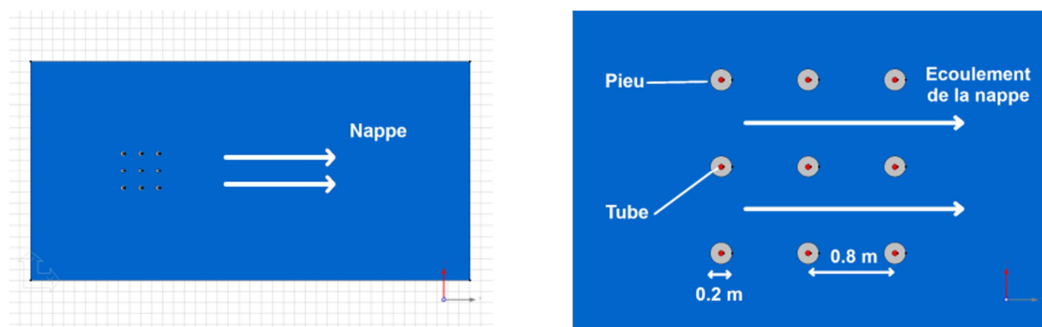


Figure 3 : Modèle numérique 2D du groupe de pieux [8]

Le modèle d'écoulement d'eau souterraine est réalisé dans l'objectif d'imposer une vitesse d'écoulement moyenne de 1.5 m/jour identique à celle initialement imposée dans Sense City dans un souci de comparaison. Le résultat de ce premier calcul donne la vitesse de l'écoulement en chacun des points du modèle. Ce résultat est ensuite une donnée d'entrée du modèle thermique. Le calcul représente 20 jours d'expérience, décomposée en 960 pas de 30 minutes. Ce découpage temporel s'est avéré suffisant pour ne pas dégrader les résultats. La température des bords du modèle est imposée en tenant compte des variations journalières de température mesurées dans Sense-City. Les équations classiques de la thermique régissent ce problème :

$$C_v \frac{dT}{dt} + \text{div } \mathbf{J}_{\text{tot}} = 0 \quad (1)$$

Avec $\mathbf{J}_{\text{tot}} = \mathbf{J}_{\text{cond}} + \mathbf{J}_{\text{adv}} = -\lambda \cdot \text{grad } \mathbf{T} + \mathbf{V} \cdot C_v \cdot \mathbf{T}$

Comme le suggère l'équation, le flux thermique total est décomposé en la somme d'un flux conductif et d'un flux advectif. Ce dernier flux dépend donc de l'écoulement d'eau qui a été calculé dans le premier modèle. Il s'agit donc d'un couplage hydro-thermique faible. Cette modélisation numérique a permis de reproduire fidèlement les variations de température

observées expérimentalement (voir figure 4). Ce qui nous permet de valider l'efficacité du processus de modélisation.

Les résultats expérimentaux, tout comme les résultats de la modélisation, ont permis d'observer les effets de panache thermique induit par les pieux actifs sur les pieux aval (actifs ou non). Un pieu thermiquement actif aura une influence sur le comportement thermique de toute structure en aval qu'elle soit active ou non. Cependant, cet impact sera d'autant plus faible que la distance entre les structures sera grande. De même, les influences seront cumulatives si une structure se trouve en aval de plusieurs structures thermiquement actives. Le détail de cette analyse est présenté dans une précédente publication [8].

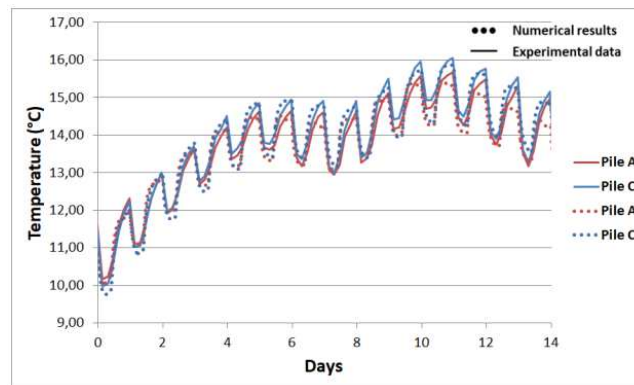


Figure 4 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques [9]

3. Imposer des conditions aux limites réalistes sur les pieux

3.1 Prise en compte du fonctionnement de la pompe à chaleur dans le modèle numérique

La modélisation numérique est fortement dépendante des conditions aux limites et, en raison de l'activité de la pompe à chaleur, les conditions aux limites sur les pieux ne sont ni une température constante ni un flux de chaleur constant.

Lorsque la pompe à chaleur est active, la puissance fournie au plancher chauffant est maintenue constante, mais la température du sol d'où est puisée la chaleur diminue au fil du temps. Afin de continuer à extraire la chaleur du sol, la pompe à chaleur doit abaisser la température du fluide caloporteur, ce qui consomme davantage d'énergie électrique et la part de la puissance de chauffage provenant du sol diminue, compensée par de l'énergie électrique. Cela correspond à un coefficient de performance de la pompe à chaleur qui diminue.

Le flux de chaleur imposé aux pieux dépend donc de la température du sol environnant. Un programme Python a donc été réalisé pour interagir avec le modèle CESAR-LCPC et fournir des conditions limites plus réalistes, c'est-à-dire la charge thermique à chaque pas de temps.

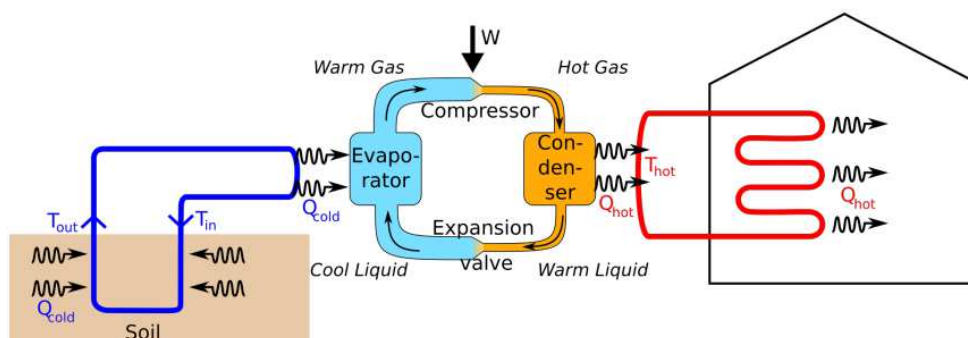


Figure 5 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur en mode chauffage

La figure 5 présente l'action d'une pompe à chaleur en mode chauffage. En utilisant un travail mécanique W , elle peut extraire Q_{cold} d'une source froide (le sol) pour transférer Q_{hot} vers une source chaude (le plancher chauffant). En supposant qu'il n'y a pas de perte dans les tuyaux de l'échangeur de chaleur, Q_{hot} est égale à la puissance fournie au bâtiment et Q_{cold} est la puissance extraite du sol, c'est-à-dire le chargement thermique qu'il faut imposer dans la modélisation en éléments finis. Pour imposer le chargement thermique, il doit au préalable être calculé. À la fin de la n ème étape dans le modèle numérique, T_{soil} est extrait des résultats comme la valeur moyenne des températures obtenues autour des pieux thermiquement actifs et T_{in} est calculée avec le programme Python comme expliqué ci-après. Ce même programme permet également de calculer Q_{cold} qui sera imposée comme chargement thermique sur les pieux pour la $n + 1$ ème étape de calcul du modèle numérique.

3.2 Relation entre la température du sol et la charge thermique imposée aux pieux

Le principe d'une pompe à chaleur, utilisée en mode chauffage, est de transférer une quantité de chaleur d'une source froide à une source chaude moyennant un travail. Dans le cas présent, le sol représente la source froide, tandis que le bâtiment à chauffer est la source chaude. En appliquant le premier principe de la thermodynamique à la pompe à chaleur et par définition du COP , il vient :

$$Q_{cold} = Q_{hot} \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (4)$$

Où Q_{cold} et Q_{hot} sont respectivement la puissance thermique échangée dans le sol et la puissance thermique que le bâtiment nécessite pour se chauffer. En effet, on considère que la chaleur échangée entre le condenseur et le système de chauffage est la même que celle échangée entre le système de chauffage (plancher chauffant) et le bâtiment. Cela revient à négliger les pertes qui ont lieu entre la PAC et le plancher. Cette puissance est constante par principe de fonctionnement dans Sense-City et il est donc logique de la considérer également constante dans le modèle numérique. De même, on suppose que la puissance échangée dans le sol est la même que la puissance échangée dans l'évaporateur et définie de la façon suivante :

$$Q_{cold} = C_p \cdot q \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (5)$$

Avec T_{in} la température du fluide qui entre dans le sol et T_{out} la température du fluide qui sort du sol, C_p la capacité thermique massique du fluide exprimée en $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$, et q le débit massique du fluide caloporteur en $(kg \cdot s^{-1})$. Ainsi, cette équation s'écrit également :

$$T_{in} = T_{out} - \frac{Q_{cold}}{C_p q} \quad (6)$$

Lors du fonctionnement de la pompe à chaleur, le fluide calorifique circule dans le tube et un transfert de flux thermique a lieu entre le sol et le fluide. Le pieu en béton, la paroi du tube, et le phénomène de convection entre le fluide et la paroi du tube s'opposent à ce flux thermique. Cela est représenté par une résistance thermique R_{th} dans l'expression du flux thermique qui a lieu entre le fluide dans le pieu et le sol.

$$Q_{cold} = \frac{T_{sol} - T_{tube}}{R_{th}} \quad (7)$$

Avec $T_{tube} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$. On suppose que la température du tube est la moyenne entre la température d'entrée et de sortie. Cela revient à considérer que la température du tube est la température moyenne du fluide. Cela surestime faiblement la résistance thermique [10]. Il vient donc :

$$R_{th} = \frac{1}{Q_{cold}} \left(T_{sol} - \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad (8)$$

En combinant les équations (6) et (8), on obtient :

$$T_{in} = T_{sol} - Q_{cold} \left(\frac{1}{2c_p q} + R_{th} \right) \quad (9)$$

Dans leur article [11], Staffel et al donnent une approximation du COP en fonction de la différence de température entre le fluide dans le condenseur et dans l'évaporateur. Cette loi a été obtenue empiriquement grâce à une base de données [12] et s'écrit :

$$COP = 8,77 - 0,150 * (T_{hot} - T_{in}) + 0,000734 * (T_{hot} - T_{in})^2 \quad (10)$$

On considèrera, en première approximation que la température du fluide dans le condenseur est celle d'un plancher chauffant donc $T_{hot} = 40^\circ C$ et que la température du fluide dans l'évaporateur correspond à la température du fluide qui entre dans le sol.

En remplaçant Q_{cold} et COP par leur expression littérale dans (4), on obtient finalement :

$$T_{in} = T_{sol} - Q_{hot} \left(1 - \frac{1}{8,77 - 0,150(T_{hot} - T_{in}) + 0,000734(T_{hot} - T_{in})^2} \right) \left(\frac{1}{2c_p q} + R_{th} \right) \quad (11)$$

3.3 Estimation de la résistance thermique du pieu

L'équation (11) obtenue précédemment est une équation polynomiale de degré 3 en T_{in} que l'on peut résoudre par la méthode de Cardan à condition de connaître R_{th} .

Cette résistance représente une opposition au flux de chaleur provenant du sol, de la part du tube, du pieu et de la convection dans le tube et autour du pieu, et s'écrit :

$$R_{th} = R_{bet} + R_{tube} + R_{adv_{tube}} + R_{adv_{pieu}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda_{bet}L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)}{2\pi\lambda_{tube}L} + \frac{1}{h_{tube}S_{tube}} + \frac{1}{h_{pieu}S_{pieu}} \quad (12)$$

Avec r_1 et r_2 les rayons externe et interne du pieu en béton (en m), r_3 et r_4 les rayons interne et externe du tube (en m). h_{tube} et h_{pieu} sont respectivement les coefficients de convection entre le fluide et le tube et entre l'eau souterraine et la surface du pieu. S_{tube} et S_{pieu} sont les surfaces d'échange du tube et du pieu pour le flux convectif (en m²). Enfin, λ_{tube} et λ_{bet} sont les conductivités thermiques du tube et du béton (en W/mK). Notons ici que cette formule suppose un tube unique et au centre du pieu, ce qui n'est pas vrai dans l'expérience puisque le tube est en U est légèrement excentré. Par conséquent, la résistance calculée ici est légèrement surestimée. Il s'agit ici d'un des raffinements possible du modèle.

3.3.1 Calcul des coefficients de convection

Il est connu que le nombre de Nusselt représente le rapport de prédominance entre les phénomènes de convection et de conduction et est défini comme :

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda_{fluide}} \quad (13)$$

Avec L_c , la longueur caractéristique du système qui n'est autre que le diamètre du tube (ou du pieu), et λ_{fluide} la conductivité thermique du fluide (en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

En pratique, cette expression est le plus souvent utilisée pour déterminer h . Pour calculer Nu , des corrélations ont été empiriquement établies entre Nu , Re et Pr qui sont respectivement les nombres adimensionnels de Nusselt, Reynolds et Prandtl. Ainsi, pour un écoulement turbulent ($Re > 5000$) dans un tube dont la paroi est plus chaude que le fluide, on a [13]:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (14)$$

Le nombre de Prandtl est propre au fluide et le nombre de Reynolds est accessible grâce à la connaissance de la vitesse d'écoulement du fluide dans le tube. Ces corrélations donnent finalement accès à la valeur du coefficient de convection dans le tube.

Intéressons-nous maintenant à la convection qui existe autour d'un pieu lorsqu'un écoulement souterrain existe. La formule donnant le nombre de Nusselt est :

$$Nu = CRe^n Pr^{\frac{1}{3}}$$

Avec n et C obtenus après calcul de Re selon des abaques [13] :

Ainsi, le nombre de Reynolds calculé en prenant le diamètre du pieu comme longueur caractéristique donne accès au nombre de Nusselt et par la suite au coefficient de convection à la surface du pieu.

Il semble ici important de préciser que dans un milieu poreux homogène, un coefficient de dispersion thermique pourrait être considéré pour rendre compte de la combinaison entre la diffusion qui se fait aussi bien dans le milieu liquide que solide et la convection entre le fluide et la paroi du pieu. Ce coefficient de dispersion thermique dépend directement du nombre de Reynolds [14] qui serait ici calculé avec une longueur caractéristique relative à la taille des grains. Ce nombre de Reynolds serait très proche de 0. Il en découle que le coefficient de dispersion thermique serait approximativement égale à la conductivité thermique considérée dans ce problème (mesuré expérimentalement in situ).

Les deux différents coefficients de convection permettent le calcul de la résistance thermique et par conséquent de T_{in} . Cette donnée, obtenue pour une puissance échangée Q_{cold} va permettre de calculer un nouveau COP grâce à la formule de Staffel (11) et donc une nouvelle puissance échangée dans le sol qui pourra être imposée comme chargement thermique dans le modèle numérique à l'étape de calcul suivante.

4. Impact de l'écoulement souterrain sur la performance de la pompe à chaleur

Ces résultats sont utilisés pour étudier l'influence de la configuration des pieux activés et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine sur les performances de la pompe à chaleur. La température initiale du sol et sa valeur fixe sur la frontière du modèle est donnée à 13 °C. Le processus de modélisation utilise une charge thermique continue (et non une activation quotidienne comme dans la partie 2 ou dans [8]) sur quatre pieux activés. La charge thermique globale est fixée pour donner une puissance de 736 W dans le système de chauffage au sol. Nous avons essayé trois schémas d'activation différents, représentés en figure 6. Enfin, pour un même calcul, la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau est maintenue constante pendant tout le processus de modélisation. Mais afin d'évaluer son influence, le calcul a été effectué pour différentes vitesses moyennes d'écoulement de la nappe (entre 0 et 5,0 m/jour).

Lors de la première étape, la température du sol environnant est de 13 °C, ce qui donne un COP de 4,32 et une charge de puissance de -70W par mètre de pieux. Pour la deuxième étape, la charge thermique variable est calculée en mesurant la température moyenne du sol autour des pieux activés. La température est mesurée sur quatre points autour de chaque pieu actif, les 16 valeurs sont ensuite moyennées pour calculer la nouvelle valeur du COP et la charge de puissance imposée à la deuxième étape du calcul numérique.

Les résultats sont conformes à nos attentes. La figure 6 montre l'évolution du COP pendant les 72 heures de la simulation pour le cas 1 pour trois vitesses d'eau différentes. Nous observons que le comportement dépend effectivement des vitesses de l'eau. Dans chaque cas,

le COP part de la même valeur imposée par la température initiale du sol. Ensuite, cette valeur diminue rapidement en raison de la diminution de la température du sol. Finalement, la valeur du COP devient stable si le flux d'eau est assez rapide. En revanche, sans effet de lessivage thermique, le COP semble continuer à diminuer sans valeur finale. Ceci peut être expliqué par la stabilisation ou non du champ de température. En cas de débit d'eau suffisant, la dissipation de l'anomalie thermique sera équilibrée avec la charge thermique du système. Sans débit d'eau, cette anomalie continuera à gonfler diminuant ainsi la température du sol et le COP.

La figure 6 montre également la variation de la valeur finale calculée du COP en fonction des vitesses d'écoulement de l'eau (notez que pour des valeurs plus petites des vitesses d'écoulement de l'eau, cela ne correspond pas à une valeur stable, voir la figure ci-dessous). Nous observons sur cette figure que le COP dépend fortement des vitesses d'écoulement de l'eau.

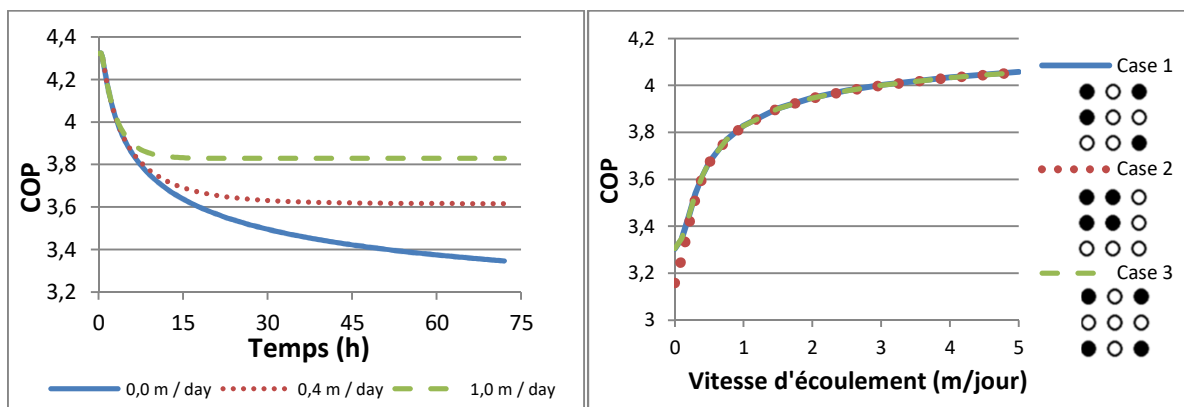


Figure 6 : Variation du COP en fonction du temps pour différentes vitesses d'écoulement et en fonction de la vitesse d'écoulement selon le cas

À partir d'un cas sans aucun écoulement d'eau, où le COP est inférieur à 3,2 dans le cas 2, le COP augmente rapidement avec l'accélération du débit d'eau. À partir de la valeur de 1 m/jour, le COP est supérieur à 3,8, et augmente lentement avec la vitesse de l'eau. La comparaison entre les 3 cas n'exhibe pas de différence, sauf pour les vitesses d'eau les plus lentes. Dans le cas 2, la proximité entre les quatre pieux actifs entraîne l'augmentation de l'anomalie thermique par un effet d'îlot, diminuant plus fortement la température du sol et le COP. Cet effet n'est pas observable dans les cas 1 et 3, en raison de la distance relativement importante entre les quatre pieux. Mais avec l'accélération de l'écoulement de l'eau, l'effet de lessivage thermique devient rapidement prédominant et supprime cet effet d'îlot thermique. Pour des vitesses d'écoulement de la nappe suffisamment importantes, l'efficacité du système dans les 3 cas sera équivalente.

5. Conclusion

En résumé, nous nous proposons dans ce document d'étudier le comportement thermique et l'interaction des géostructures thermiques à l'aide d'une modélisation expérimentale et numérique. Les résultats, numériques et expérimentaux, permettent d'observer le comportement thermique d'un groupe de pieux et leurs interactions au sein du groupe, en particulier à l'intérieur d'un groupe de pieux. De plus, grâce au travail numérique, nous avons pu évaluer l'influence de l'écoulement des eaux souterraines sur l'efficacité énergétique du système. Il apparaît d'une part que l'écoulement souterrain dissipe rapidement les anomalies thermiques et limite donc les interactions entre les pieux et par conséquent entre de potentiels différents groupes de pieux. D'autre part, l'écoulement souterrain favorise le fonctionnement

de la pompe à chaleur dans la mesure où le COP augmente avec la vitesse d'écoulement de la nappe. Cette augmentation atteint un seuil, mais le point important est qu'en dessous d'une vitesse d'un mètre par jour, une légère augmentation de vitesse implique une forte augmentation du COP. Ce travail pourrait être extrapolé à l'échelle d'une ville afin d'évaluer les interactions thermiques sur une plus grande distance et dans le cadre d'installations multiples.

Références

- [1] Ding, G., Jiao, J.J., Zhang, D., 2008. Modelling study on the impact of deep building foundations on the groundwater system. *Hydrological Processes: An International Journal* 22, 1857–1865. Mickey 2Gen, *Universality in question*, Presses Universitaires du Plateau (1999).
- [2] Pujades, E., López, A., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., Jurado, A., 2012. Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering geology* 145, 41–49.
- [3] Bourne-Webb, P., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., Loveridge, F., 2016. Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and sustainable energy reviews* 65, 402–419
- [4] Fromentin, A., Pahud, D., Jacquier, C., Morath, M., 1997. Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. *empfehlungen für energiepfahlsystem*
- [5] CFMS, SYNTEC, 2017. Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. *Revue Française de Géotechnique* 149, 120.
- [6] Delerablee, Y., 2019. Intégration thermique et mécanique des géostructures thermiques: de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la cité. Ph.D. thesis. Paris E
- [7] Humbert, P., Dubouchet, A., Fezans, G., & Remaud, D. (2005). CESAR-LCPC, un progiciel de calcul dédié au génie civil. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 256, 7-37.
- [8] de Sauvage, J., Benitez, B. R., Szymkiewicz, F., & Badinier, T. (2020). Group effects in urban shallow geothermal energy. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 05017). EDP Sciences.
- [9] Badinier T et al. Groupe de pieux thermoactifs dans un écoulement aquifère: modélisation physique et numérique. In *JNGG 2020*, (pp. 8-p).
- [10] D. Marcotte, P. Pasquier. 2008. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy*.
- [11] Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., Hawkes, A., 2012. A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science* 5, 9291–9306.
- [12] Hua Qian, Yungang Wang; Modeling the interactions between the performance of ground source heat pumps and soil temperature variations, *Energy for Sustainable Development*, 2014
- [13] Yves Jannot; Transferts thermiques – Ecole des Mines Nancy; 2012
- [14] A. Testu, D. Didierjean, D. Maillet, C. Moyne, T. Metzger, T. Niass. 2006. Thermal dispersion for water or air flow through a bed of glass beads. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.002>