

GROUPE DE PIEUX THERMOACTIF DANS UN ECOULEMENT AQUIFERE : MODELISATION PHYSIQUE ET NUMERIQUE

GEOTHERMAL ENERGIE-PILE GROUP IN AQUIFER FLOW: PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING

Thibault Badinier¹, Jean deSauvage¹, Fabien Szymkiewicz¹, Bruno Regnicoli Benitez^{1,2}

¹ GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France

² Università degli Studi di Perugia, DCEE

RÉSUMÉ – Le développement de la géothermie utilisant des structures thermoactives pose des questions au sujet des interactions qui peuvent exister entre différentes installations, dues aux phénomènes d'advection induits par les déplacements de nappe. Une étude des perturbations thermiques induites entre structures est menée sur le cas test d'un groupe de neuf pieux thermoactifs via une approche physique et numérique.

ABSTRACT – Development of geothermal installation using thermal geostructure, questions the interaction that may exist between different installations due to advection phenomenon induced by the groundwater flow. A study is conducted on thermal perturbation appearing between structures in the case of a group of nine energy-piles via a physical and a numerical approach.

1. Introduction

Les besoins en énergie croissante des zones urbaines ainsi que les impératifs écologiques conduisent à développer de nouvelles technologies de production d'énergie. En particulier, depuis les années 1980, un nouveau mode de géothermie a été développé. Il s'agit des géostructures thermiques telles que les pieux géothermiques ou les parois moulées thermoactives. Leur principe consiste à fixer aux cages d'armatures de structures géotechniques des tubes échangeurs de chaleur (Amatya et al, 2012 ; Bourne-Webb et coll., 2016 ; Mimouni et Laloui, 2015, Franzius et Pralle, 2011). Ces solutions de géothermie à basse énergie permettent de produire chauffage ou climatisation pour des bâtiments, et ce pour un faible coût carbone puisqu'elles mutualisent les rôles structurels et thermiques des installations souterraines.

Les géostructures thermiques sont souvent en interaction avec l'écoulement de la nappe environnante. L'advection le long de l'écoulement permet de réguler les éventuels excès de chauffage ou de refroidissement et donc d'éviter une dérive thermique pluriannuelle (Delerablee, 2018). Toutefois, cette advection génère un panache thermique et des ondes de chaleur dans le sol pouvant interagir avec les ouvrages en aval en perturbant le champ de vitesse d'écoulement de manière locale et en modifiant le comportement thermique des ouvrages environnants. Si le comportement thermomécanique d'une géostructure thermique unique a été caractérisé par de nombreux travaux de recherches, les interactions entre géostructures voisines représentent un sujet encore peu étudié. Leur caractérisation est pourtant essentielle pour permettre une gestion intelligente du développement de solutions géothermiques à l'échelle du quartier ou de la ville (Barla et coll., 2018).

L'objet des travaux présentés ici est de fournir les outils de modélisation physique et numérique nécessaires à ce type d'études. Ce travail se concentre sur l'exemple d'un groupe de 9 pieux thermoactifs dans un écoulement d'aquifère. Ce cas test a été étudié dans un premier temps via une modélisation physique dans la plateforme d'essais Sense-City. Un modèle numérique est ensuite développé à l'aide du logiciel d'éléments finis

CESAR-LCPC. Cette modélisation prend en compte les phénomènes thermiques et hydrologiques ainsi que leur couplage.

2. Modélisation physique : Sense City

Sense-City est une plateforme expérimentale de 400 m² permettant d'étudier de nombreux phénomènes physiques concernant l'aménagement des milieux urbains. Elle est composée d'une chambre climatique, permettant d'imposer des conditions de température, d'humidité et d'ensoleillement, ainsi que de deux zones de construction où peuvent être érigées des mini villes représentant les scénarii urbains étudiés.

2.1. Expérimentation géothermique

Le premier scénario de mini ville comprend un dispositif géothermique avec structure active. Trois cuves, représentant des systèmes de parois moulées ainsi qu'un groupe de neuf pieux de 2 m de longueur chacun sont reliés à une pompe à chaleur permettant de solliciter chacune des structures indépendamment. La première mini-ville est installée dans une cuve étanche permettant de contrôler les conditions géotechniques, y compris la présence et la hauteur de la nappe phréatique. Cette cuve est également équipée d'un système de pompe permettant d'imposer une circulation d'eau dans la nappe (voir figure 1).

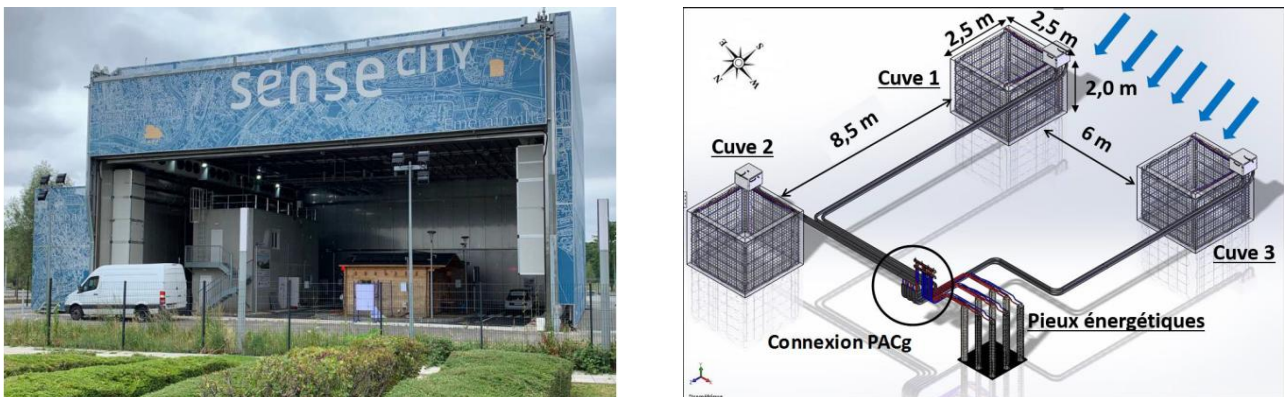


Figure :1. Dispositif d'essais Sense City. Chambre climatique (gauche) et schéma d'installation des géostructures actives (droite) (crédit : Univ Gustave Eiffel - Ifsttar).

Un réseau de fibres optiques disposées dans les différentes structures, en particulier dans le groupe de pieux, permet de mesurer l'évolution de la température au cours des expériences tout au long de l'abscisse curviligne de la fibre optique. Un interrogateur de type Brillouin est utilisé pour réaliser les mesures.

Le cas présenté ci-dessous correspond à une expérimentation menée entre décembre 2019 et janvier 2020. L'expérience menée consistait en une série de sollicitations visant à réchauffer les pièces du bâtiment principal à l'aide du système géothermique. Le programmeur de la pompe à chaleur est employé pour contrôler les cycles de fonctionnement du système. Celui-ci était activé quotidiennement durant une période de 10h. Cinq géostructures thermiques étaient activées au cours de cette expérimentation. Il a été choisi d'activer quatre des neuf pieux géothermiques selon la configuration représentée en Figure 4, restée inchangée durant toute l'expérience. Cette configuration permet d'observer diverses interactions entre les structures actives dans l'écoulement. En outre, l'une des cuves thermoactives a également été utilisée lors de l'expérimentation. En effet, celle-ci est nécessaire au système pour garantir une puissance disponible suffisante tout au long de l'expérimentation.

Un ensemble de capteurs disposés dans la chambre climatique, dans le bâtiment, et sur les circuits de fluide de la pompe à chaleur permet de suivre l'évolution des différents paramètres thermiques du système. En particulier, le suivi des températures d'entrée et de sortie des fluides caloporteurs permet d'évaluer la puissance de la pompe à chaleur lors de ses phases de fonctionnement à environ 1120 W. Dans la configuration d'activation, on estime également que seuls 560W sont extraits des quatre pieux géothermiques.

Durant l'expérience, la nappe est fixée à une profondeur de 60 cm, les pieux sont alors immergés sur une hauteur de 1.70 m, et la pompe permettant la mise en mouvement de la nappe est réglée de façon à imposer une vitesse moyenne de la nappe de 1.5 m.j⁻¹. La température extérieure n'est pas contrôlée durant la totalité de l'expérience.

2.2 Résultats

Les mesures de température par fibre optique permettent d'obtenir une mesure de la fréquence d'excitation de la fibre optique f (en GHz) correspondante à une température, avec une résolution d'un point de mesure tous les 50 mm. Cette mesure est alors transformée connaissant une température et une fréquence de référence (T_{ref} et f_{ref}) et le coefficient α d'évolution des propriétés de la fibre optique en fonction de la température ($\alpha = 1,1 \text{ MHz } ^\circ\text{C}^{-1}$).

$$T = T_{ref} + \frac{(f - f_{ref}) 1000}{\alpha} \quad (1)$$

Les mesures peuvent être exploitées de façon spatiale en mesurant la température en fonction de la position du point de mesure le long de la fibre optique. Ces mesures permettent de déterminer la position de neuf pieux le long de la fibre optique ainsi que de distinguer les pieux actifs des pieux non actifs (voir figure 2, gauche). Dans l'exemple, au jour 0, on repère un schéma de pic se répétant à neuf reprises. Cela correspond aux neuf pieux. On repère alors les neuf points correspondants aux fonds de pieux ainsi que les variations correspondant au gradient de température selon la profondeur. Au jour 17, on repère les mêmes schémas de pic à l'exception de quatre portions réagissant de façon particulière. Elles correspondent aux pieux actifs.

Il est également possible d'exploiter ces mesures selon leur évolution temporelle lorsque l'on a identifié un point singulier de la fibre optique que l'on souhaite étudier. Ces mesures permettent d'étudier les variations temporelles de la température dans les pieux actifs ou non actifs (voir figure 2, droite).

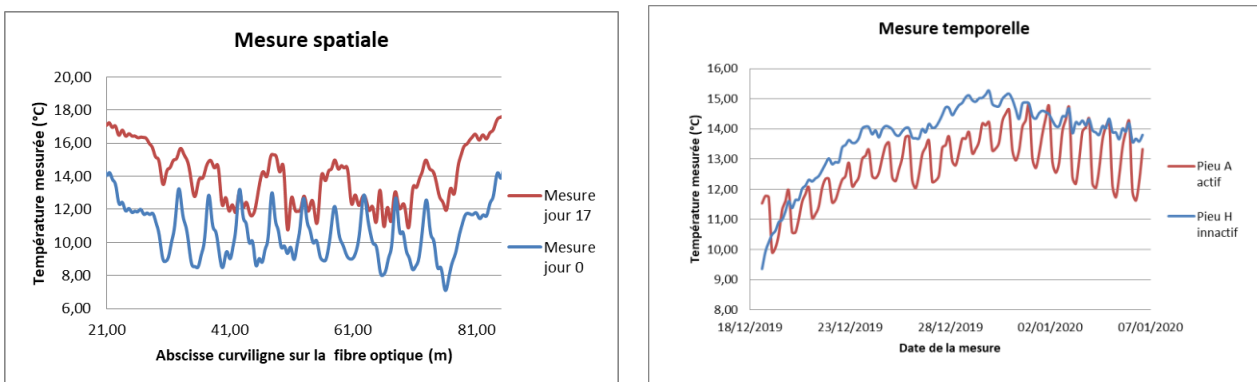


Figure 2 : Mesure spatiale (gauche) et temporelle (droite) de la température par fibre optique.

Sur une zone restreinte, telle que la hauteur d'un pieu, il est possible d'employer une représentation spatiale temporelle exposant l'évolution de la température au cours du temps sur toute la hauteur du pieu. Avec ce type de représentation, on observe différents

phénomènes. Il est par exemple possible d'observer la propagation de la température depuis la surface selon les phases d'activations ou d'inactivations de la chambre climatique, en particulier sur les mesures correspondantes aux pieux inactifs. Sur une mesure correspondant à un pieu actif, l'activation quotidienne du cycle de chauffage apparait très clairement par un effet graphique de stries. Un effet similaire de moindre amplitude est également observable sur la mesure correspondante aux pieux inactifs adjacents et/ou aval à des pieux actifs (voir Figure 3)

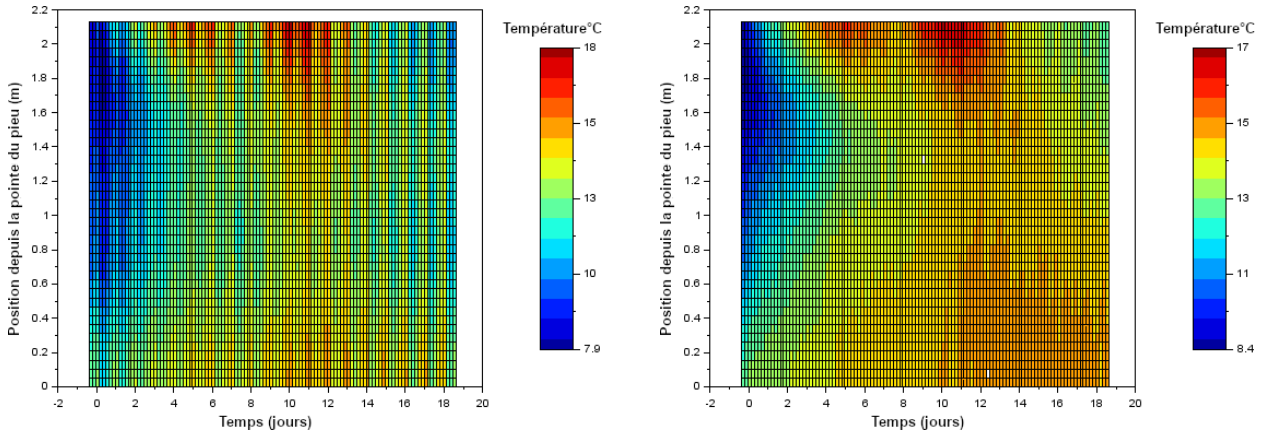


Figure 3 : Mesure spatio-temporelle de la température dans le pieu E, actif (gauche) et dans le pieu H, inactif (droite) en aval d'un duo de pieux actifs.

Du fait de l'évolution de la température à l'échelle de l'expérimentation, il est difficile de comparer les amplitudes des variations quotidiennes de la température. Il est possible d'observer ce phénomène périodique en menant une analyse fréquentielle sur les signaux de températures. Le contenu fréquentiel des signaux de température diffère pour des pieux actifs ou inactifs et selon leur position. Le traitement du signal pour trois pieux représentatif est présenté en Figure 5. Sur ce graphique, pour le pieu E, on observe le cas classique obtenu avec le signal de température d'un pieu actif. Il apparait clairement une fréquence dominante à 1 jour^{-1} correspondant à la sollicitation quotidienne du système de chauffage. Pour le pieu H en aval d'un couple de pieux actif, le graphique montre également que sa température évolue quotidiennement et avec une amplitude relativement importante (40% de l'amplitude thermique du pieu E). Au contraire, la température du pieu D adjacent, mais pas en aval d'un pieu actif n'évolue quasiment pas selon la fréquence quotidienne. En effet, l'amplitude associée à la fréquence 1 jour^{-1} est 5 fois moins importante que pour le pieu H. On peut comparer ce ratio au nombre de Peclet (Guyon et coll., 1991) décrit par l'équation (4) et caractérisant le ratio des effets de conduction et des effets d'advection (dans le cas thermo-hydro-dynamique). Dans notre cas, le nombre Peclet est de 32. On peut s'étonner de cet écart. La prédominance de l'advection semble moins marquée qu'en théorie et d'autres effets semblent influencer le pieu D. La réaction quotidienne d'un pieu aval montre que ce dernier est clairement sous l'influence des pieux actifs qui se trouvent à son amont. Cette influence ne se retrouve pas, pour un pieu simplement adjacent à des pieux actifs. Dans les trois cas, on note une fréquence importante à $0,06 \text{ jour}^{-1}$ qui correspond à un artefact induit par le traitement du signal. Nous n'en tenons pas compte.

De façon quantitative, on observe des écarts de températures moyennes significatifs entre différents pieux. Ils traduisent l'influence d'une structure active sur les structures situées en aval. Par exemple, sur la hauteur du pieu en contact avec la nappe phréatique et donc soumise au phénomène d'advection, il est mesuré qu'en moyenne, le pieu E actif et en aval du pieu I, également actif, est 0.47°C plus froid que le pieu I et 0.46°C plus froid que le pieu C. Ceux-ci sont actifs, mais sans structures actives en amont. On retrouve le même écart de 0.47°C entre les pieux B et H, ce dernier étant plus froid. Dans ce cas, le

pieu H est en aval de deux structures actives alors que le pieu B n'est en aval que d'une unique structure active. Cela tend à montrer que les effets d'advection de plusieurs structures amont s'additionnent. Enfin, si l'on compare les températures des pieux H et G, on observe un écart de 0.68°C. Le pieu H, inactif, et en aval de deux structures actives est notablement plus froid que celui qui est simplement adjacent à un pieu actif. Ceci tend à montrer que dans le cas de notre expérimentation, le phénomène d'advection conduit à une influence bien plus importante entre les structures qu'un simple phénomène de conduction de proximité. La combinaison de ces deux facteurs donne un effet léger dans une direction diagonale, par exemple on note un écart de 0.19°C entre les pieux F et D tous deux inactifs.

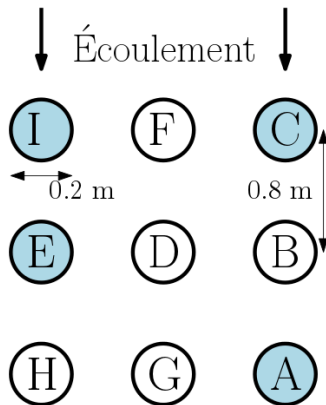


Figure 4 : Configuration d'activation des pieux thermoactifs.

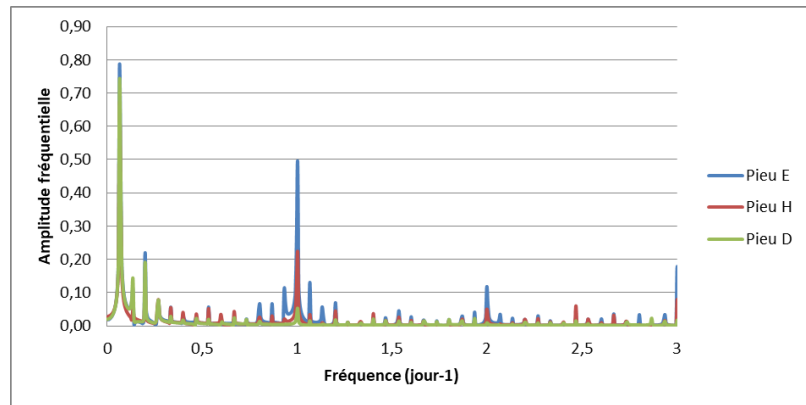


Figure 5 : Résultat du traitement fréquentiel du signal de température pour 3 pieux typiques (E, D et H).

3. Modélisation numérique : CESAR-LCPC

CESAR-LCPC est un logiciel de calcul par éléments finis orienté pour les métiers du génie civil. Il permet de modéliser des phénomènes de différente nature entre autres des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrologiques à l'aide de différents modules dédiés.

3.1. Modélisation des phénomènes

Dans un milieu inerte ne produisant pas d'énergie en lui-même, la température T en tout point peut être calculée en résolvant l'équation transitoire de la chaleur (2), avec C_p la capacité calorifique volumique du matériau et \vec{j} le flux de chaleur circulant dans le matériau. Dans le cas d'un phénomène couplé conduction / advection, le flux de chaleur est la somme des flux de chaleur induits par chaque phénomène. On comptabilise alors le flux \vec{j}_c de conduction défini par la loi de Fourier, connaissant λ le coefficient de conductivité thermique du matériau. On comptabilise également le flux de chaleur d'advection \vec{j}_a correspondant au déplacement du fluide induit par le mouvement de la nappe. Ce flux de chaleur correspond alors au déplacement de l'énergie d'excitation thermique avec le déplacement de l'eau. Il se calcule connaissant la vitesse de Darcy \vec{v} de la nappe ainsi que C_w la capacité calorifique de l'eau (équation (3)).

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{j}_c = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad \text{et} \quad \vec{j}_a = \vec{v} C_w T \tag{3}$$

$$P = \frac{L |\vec{v}| C_p \rho}{\lambda} \tag{4}$$

Pour mener un calcul thermique tenant compte des flux de convection et d'advection, il est possible d'utiliser module de calcul DTNL de CESAR-LCPC permettant les calculs thermiques transitoires. Pour cela il convient d'employer l'option VIT du module de calcul DTNL permettant de prendre en compte un déplacement de matière au cours du calcul et donc du flux de chaleur par advection.

La procédure à mettre en place pour ce type de calculs est la suivante. Il convient de faire préalablement un calcul d'écoulement de nappe, celle-ci pouvant être influencée par la présence des structures. Le champ de vitesse obtenue sera alors utilisé pour définir le flux de chaleur par advection. Il est important de noter que nous considérons dans ce cas un couplage faible. Autrement dit, l'influence du problème hydraulique sur le phénomène thermique est considérée alors que l'influence inverse est négligée. Lors du calcul thermique, le fichier de données du modèle est modifié afin de tenir compte du mouvement de la nappe. Ces modifications manuelles ne seront pas détaillées ici.

3.2. Description du modèle

Le modèle proposé est un modèle bidimensionnel représentant un plan de coupe du modèle physique, perpendiculaire aux pieux. Les dimensions totales du modèle sont de 10m x 20m permettant ainsi de limiter les effets de bord en particulier dans la direction du panache thermique. Les 9 pieux, de 20 cm de diamètre et comportant un tube échangeur de chaleur central 5 cm, sont répartis selon un quadrillage de 80cm (voir Figure 6). Les paramètres des matériaux sont issus de la thèse de Y Delerablée (2019).

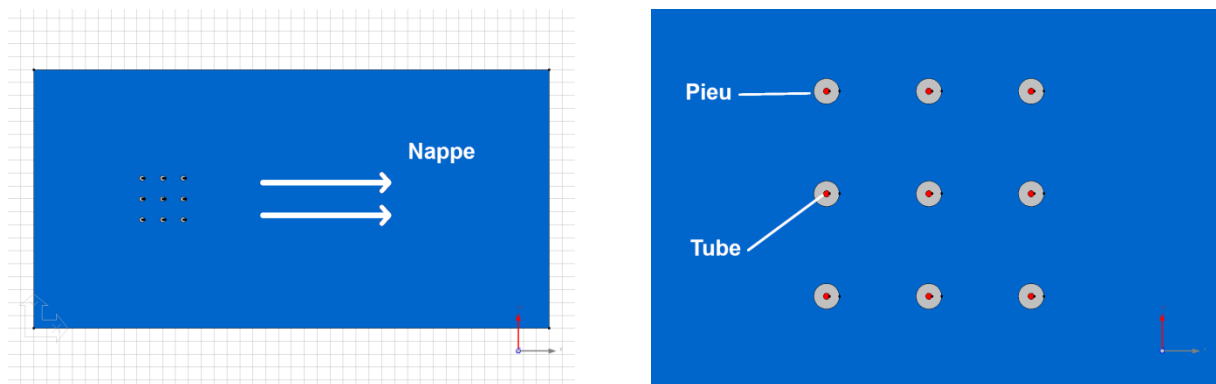


Figure 6 : Géométrie du modèle, vue globale à gauche et vue centrée à droite

La répartition des vitesses dans la nappe préalablement calculée pour tenir compte des perturbations induites par la présence des pieux correspond à une vitesse moyenne de 1.5 m.jour^{-1} . Elle est calculée en imposant un gradient de pression macroscopique entre l'amont et l'aval du modèle. Le champ de vitesse obtenue est présenté en figure 7.

Le modèle thermique est ensuite complété en imposant une température initiale et des conditions aux limites de 13°C correspondant à une température souterraine stable. Le chargement correspond à une puissance ponctuelle de -70W dans chacun des pieux actifs. Cette puissance correspond à la puissance de sollicitation du système par mètre linéaire de pieux utilisé. Soit une puissance totale de 560W , comme précédemment calculée. Comme pour l'expérimentation sur le modèle physique, la sollicitation est quotidienne et limitée à une durée de 10 h. Six journées de fonctionnement sont simulées par intervalle de 30 minutes, soit 288 étapes de calculs. Les résultats montrent une stabilisation du comportement global dans l'environnement des pieux après trois cycles de fonctionnement. Le panache thermique quant à lui atteint la limite du modèle à partir du 5^e jour. Le champ de température à l'issue de la dernière période de sollicitation est présenté sur la figure 8. Ce graphique permet de visualiser très clairement l'effet de panache thermique en aval des pieux actifs. On distingue dans ce panache la périodicité de la

sollicitation thermique. Il est également possible d'identifier les effets thermiques des pieux actifs sur les pieux avals.

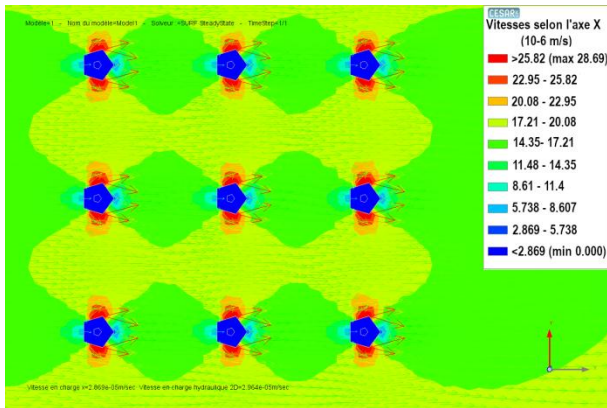


Figure 7 : Champ de vitesse de la nappe, perturbation due aux pieux.

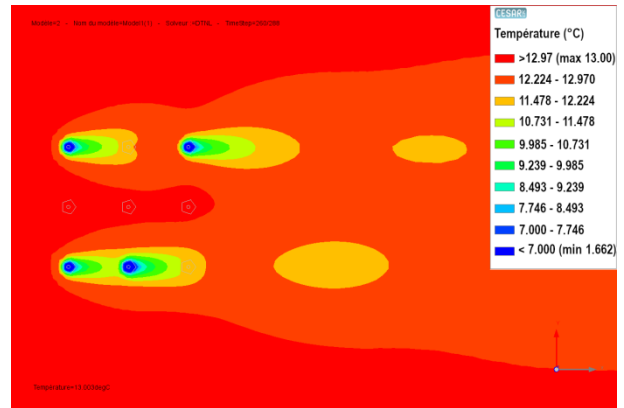


Figure 8 : Champ de température dans le modèle, panache thermique en aval des pieux

La température est mesurée en périphérie des pieux de façon similaire au montage de la fibre optique sur le modèle physique. Les graphiques montrant l'évolution temporelle de la température pour 5 des pieux sont présentés en figure 9. On constate des phénomènes similaires à ceux observés sur le modèle physique. En effet, les pieux actifs I et E ont une amplitude plus importante et une réactivité plus marquée que les pieux non actifs. Leurs amplitudes thermiques sont de l'ordre de 3°C à 4°C alors qu'elle est d'environ $1,4^{\circ}\text{C}$ pour les pieux inactifs influencés par le panache thermique (ratio de 40% conforme aux modèles physiques). Ces valeurs sont plus importantes que celles mesurées dans le modèle physique. Cependant, l'ordre de grandeur est similaire. Au contraire, les pieux adjacents sont moins réactifs que lors de l'expérimentation physique. Par exemple, l'amplitude thermique mesurée dans le pieu G est limitée à $0,05^{\circ}\text{C}$. Le ratio de ces amplitudes est de 27, ce qui est proche du nombre de Peclet précédemment décrit. La modélisation semble donc cette fois-ci cohérente avec le phénomène théorique. La figure 10 compare les résultats numériques et expérimentaux selon l'amplitude journalière de la température. Les valeurs sont normalisées par rapport au pieu I.

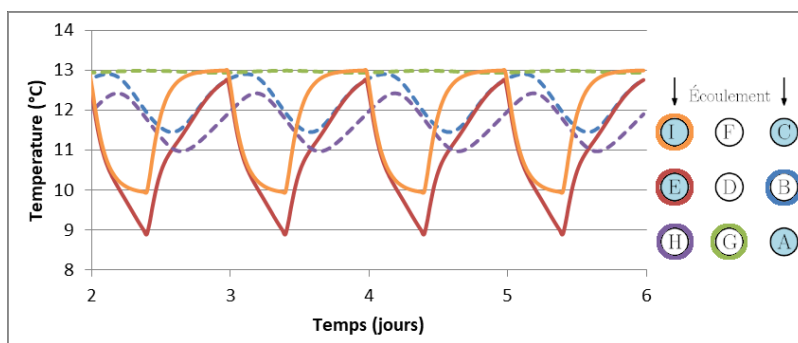


Figure 9 : Signaux thermiques pour 5 pieux différents

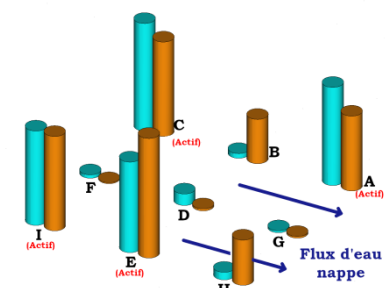


Figure 10 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Comme dans le cas du modèle physique, on constate des écarts de température entre différents pieux. Par exemple, le pieu E, en aval du pieu I, a une température inférieure à celle de ce dernier. Cela marque l'effet du panache thermique généré par le pieu amont sur celui-ci. De même, on observe que le pieu H, inactif, est également plus froid que le pieu B, également inactif. Cette différence montre que le panache d'un couple de pieux actif est effectivement d'une puissance plus importante que celui généré par un pieu isolée, conformément aux constatations expérimentales. Quantitativement, on mesure en

moyenne un écart de 0.75°C entre le pieu H et un autre pieu actif non soumis à un panache thermique. L'écart de température entre le pieu H et le pieu B est quant à lui de 0.51°C. Enfin l'écart moyen de température entre le pieu H en aval de pieux actif et le pieu G adjacent à un pieu actif est de 1.23°C. Ces écarts sont plus importants que ceux mesurés pour les mêmes comparaisons dans le cas de la modélisation physique, mais reste similaire et du même ordre de grandeur.

On peut attribuer une partie de ces différences de comportement entre le modèle physique et le modèle numériques aux nombreux paramètres qu'il est difficile de maîtriser dans la modélisation physique et aux incertitudes inhérentes à l'expérimental (possible hétérogénéité du sol autour des pieux, présence d'autres installations perturbant l'écoulement de nappe, dysfonctionnements des matériels au cours de l'expérimentation, etc.). Nous estimons néanmoins que ces résultats sont corrects vis-à-vis des résultats expérimentaux.

4. Conclusion

Dans cette étude nous avons étudié le fonctionnement d'un groupe de pieux thermoactifs dans un écoulement d'aquifère, ainsi que les interactions entre ces différentes structures induites, en partie, par les phénomènes d'advection. Deux modélisations ont été menées. Une première modélisation physique, utilisant la plateforme d'essais Sense-city et une seconde, numérique, à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis CESAR-LCPC. Les deux modélisations nous ont permis de mettre en évidence les phénomènes d'interaction entre structures, notamment la sollicitation thermique supplémentaire des structures aval. La modélisation physique dont l'auscultation est permise par des mesures par fibre optique est prometteuse. À l'avenir davantage de cas seront étudiés représentant diverses configurations et sollicitation. La modélisation numérique semble validée par les mesures expérimentales. Celle-ci est prometteuse, elle permet d'obtenir davantage d'information, par exemple sur le panache thermique dans le sol et à distance des installations. Ces modèles pourront être utilisés pour modéliser des phénomènes dans de plus grande dimension, dans des cas complexes et sur de plus grands intervalles de temps.

5. Références :

- Amatya BL, Soga K, Bourne-Webb PJ, Amis T, Laloui L. Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*. 2012 Jun;62(6):503-19.
- Barla, M., Di Donna, A., & Baralis, M. (2018). City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation. *Environmental Geotechnics*, 17(87), 11 p.
- Bourne Webb P., Burlon S., Javid S., Kuerten S. et Loveridge F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and sustainable energy*, 65 : 402-419.
- Delerablée Y. (2019) Intégration thermique et mécanique des géostructures thermiques : de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la cité. Thèse de Génie Civil – Géotechnique. Marne-la-Vallée, Université Paris Est.
- Franzius JN, Pralle N. Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* 2011 Feb (Vol. 164, No. 1, pp. 35-40). Thomas Telford Ltd.
- Guyon, E., Petit, L., & Hulin, J. P. (1991). *Hydrodynamique physique*. Interéditions.
- Mimouni T, Laloui L. Behaviour of a group of energy piles. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015;52(12):1913-29.