

ETUDE DE L'EFFET D'UN ECOULEMENT SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR INDUIT PAR UN GROUPE DE PIEUX GEOTHERMIQUES

STUDY OF THE INFLUENCE OF GROUNDWATER FLOW ON THE HEAT TRANSFER INDUCED BY A GROUP OF ENERGY PILES

Sahar HEMMATI¹, Badr OUZZINE¹, Jean DE SAUVAGE¹, Philippe REIFFSTECK¹,
¹ GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-vallée, France

RÉSUMÉ – Un modèle numérique tridimensionnel couplé thermo-hydraulique d'un groupe de pieux géothermiques dans le sol a été créé en utilisant le code de calcul COMSOL. Les résultats des calculs sont comparés avec des mesures réalisées dans un essai en centrifugeuse géotechnique à 50g. L'influence de l'écoulement sur le champ de température du sol a été mise en évidence.

ABSTRACT – A three-dimensional coupled thermo-hydraulic model of a group of energy piles in the soil is created using the COMSOL software. The calculation results are then compared with the temperature measurements in a centrifuge test carried out at 50g. The influence of groundwater flow on the temperature field in the soil has been highlighted.

1. Introduction

L'évolution actuelle des villes nécessite des quantités d'énergie grandissantes et les enjeux écologiques actuels, soutenus par les réglementations thermiques régissant les nouvelles constructions poussent au développement d'énergies propres et renouvelables. C'est dans ce contexte que se développent les fondations géothermiques et notamment les pieux géothermiques. Il s'agit d'une solution de géothermie de basse énergie où des tubes en polyéthylène haute densité sont fixés aux cages d'armature des fondations et dans lesquels circule un fluide calorifique. Il est donc possible de puiser la chaleur du sol afin de chauffer le bâtiment en hiver et inversement en été. On confère donc un rôle énergétique d'échange de chaleur aux fondations qui n'avaient jusqu'alors qu'un rôle mécanique de stabilité (Brandl, 2006). L'injection ou le prélèvement de chaleur dans le sol génère une modification locale du champ de température que l'on nomme par la suite anomalie thermique. Celle-ci se déplace d'autant plus rapidement que l'écoulement souterrain est fort (Di Donna et al., 2017). Le couplage thermo-hydraulique peut générer des interactions positives ou négatives entre les fondations d'un bâtiment. Il intervient également lorsque la géométrie de la géostructure impacte l'écoulement d'eau souterraine et donc l'évolution du champ de température (Delerablée, 2019). Par ailleurs, des études numériques 2D ont permis d'appréhender le rôle du gradient hydraulique et de la perméabilité du sol sur le déplacement de l'anomalie thermique (Pophillat et al., 2018 et BRGM N°59387, 2012). Dans ce document, l'étude présentée est celle d'un modèle numérique créé sur COMSOL dans le but de simuler l'impact de l'écoulement souterrain sur le panache thermique. Le modèle représente un groupe de 4 pieux liés entre eux par un chevron et dont le chargement thermique n'est pas symétrique dans la mesure où un seul des pieux est chauffé. Cette modélisation s'appuie sur une expérience menée en centrifugeuse (Ouzzine et al., 2022) et l'objectif est de comparer les résultats obtenus expérimentalement avec les résultats numériques. Ce document apporte des premiers éléments de comparaison qui permettront par la suite de caler un modèle numérique plus précis et réaliste.

2. Modélisation du couplage thermo-hydraulique et de l'évolution de la température dans le sol

Un groupe de 4 pieux de 2 cm de diamètre et de 25 cm de longueur implanté dans un massif de sable de 20 cm de largeur, 64 cm de longueur et 40 cm de profondeur est modélisé. Ce modèle représente un essai en centrifugeuse à 50g (Ouzzine et al., 2022) dans lequel les pieux sont encastrés dans un chevêtre en aluminium sans contact avec le sol. L'espacement entre les centres des pieux est de 6 cm. Le sol considéré est un sable homogène et les pieux sont réalisés en ciment considéré comme homogène.

2.1. Modélisation des transferts de chaleur et choix des paramètres

Le transfert de chaleur dans le sol se produit par conduction, ainsi que par convection dans le cas d'un écoulement souterrain. L'écoulement d'eau dans le sol est décrit par la loi de Darcy.

$$Q_m = \text{div}(\rho_w \mathbf{u}) \quad (1)$$

Où $\mathbf{u}$ est la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le milieu (m/s), Q_m le débit de Darcy (m^3/s), et ρ_w la masse volumique de l'eau (kg/m^3).

$$\mathbf{u} = -\frac{K}{\rho_w g} (\nabla p + \rho_w \mathbf{g}) \quad (2)$$

Où p est la pression interstitielle de l'eau (Pa), K la perméabilité de Darcy du milieu (m/s).

Le transfert de chaleur par conduction et advection (les autres phénomènes thermiques étant négligés) est décrit par la relation suivante :

$$Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla T + \text{div}(-\lambda \nabla T) \quad (3)$$

Où $\rho_w C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla T$ représente la chaleur transmise par la convection, terme nul si aucun écoulement n'existe dans le massif ($\mathbf{u} = \mathbf{0}$).

Les propriétés thermiques et hydrauliques des matériaux sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Les paramètres thermiques et hydrauliques des matériaux

Matériau	Masse volumique, ρ (Kg/m ³)	Capacité calorifique, C_p (J/(kg.K))	Conductivité thermique λ (W/(m.K))	Perméabilité K (m/s)
Sable saturé	2035.8	1228	3	1.5 e -3
Ciment	2500	880	1.8	1.5 e -13
Eau (25°)	1000	4160	0.6	-

2.2. Géométrie et maillage du modèle

La géométrie et le maillage du système sol-pieu sont illustrés sur la Figure 1. Le chevêtre n'est pas modélisé, son impact thermique étant négligeable comme démontré en fin d'article. Le maillage est plus fin autour des pieux. Le sol est représenté par un sable homogène. Le niveau de l'eau est considéré à 35 cm par rapport à la base du modèle. Deux études sont réalisées, l'une en condition de sable saturé uniquement et la seconde avec présence d'écoulement dans le sol.

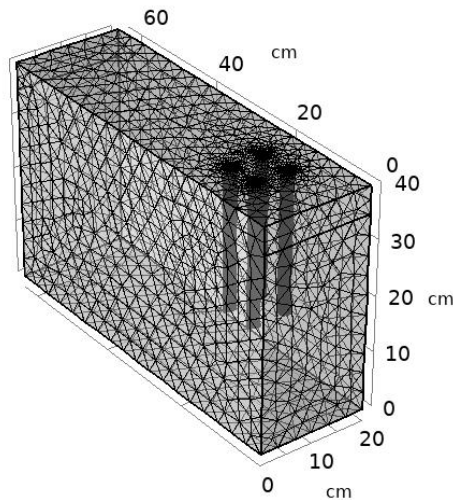


Figure 1. Géométrie et maillage du modèle

2.3. Conditions aux limites hydrauliques et thermiques

2.3.1. Modèle du sable saturé sans écoulement de l'eau

Dans un premier temps, la modélisation numérique a été effectuée en considérant le sable saturé, sans aucune différence de charge hydraulique dans le modèle. Le chargement thermique est de type température imposée, variable dans le temps. La température est imposée en tant que condition aux limites sur la surface du pieu 3 sur toute la longueur de ce pieu (Figure 2). La température imposée est issue des mesures effectuées sur un capteur collé sur le pieu dans l'essai en centrifugeuse. Une isolation hydraulique est imposée sur les surfaces du bloc du sable.

Concernant la condition limite en température, le modèle physique de sol n'est pas thermiquement isolé puisqu'il est situé dans une boîte en acier. Isoler thermiquement les parois du modèle numérique revient à considérer que la conductivité thermique de la boîte serait nulle et le risque est d'accumuler de la chaleur sur les bords du modèle. L'autre possibilité consiste à imposer une température constante au bord du modèle. Cette configuration maintient les parois du modèle numérique à la température initiale du modèle et empêche donc la diffusion de la chaleur au proche de la paroi.

Aucune des deux solutions n'est parfaitement réaliste et les résultats des modélisations avec les deux configurations (conditions aux limites en température constantes ou flux thermique nul) sont comparés par la suite.

Dans tous les cas, la question des conditions aux limites n'est problématique que si la chaleur se déplace jusqu'au bord du modèle. Dans le cas où la chaleur n'atteint pas les bords du modèle (parce que le temps de modélisation n'est pas suffisamment long ou que l'écoulement d'eau dissipe la chaleur dans le sens longitudinal de la boîte), le type de condition limite imposée n'est pas déterminant.

2.3.2. Modèle du sable saturé avec un écoulement de l'eau

Dans la deuxième étude numérique, une charge hydraulique de 38,7 cm est imposée en amont (côté pieux) et une charge de 35 cm est imposée en aval. Cette différence de charge hydraulique, mesurée lors de l'essai expérimental, permet ici d'établir l'écoulement dans le modèle. L'idée est d'étudier numériquement la présence combinée de la convection et de la conduction dans le transfert de chaleur. La température de l'eau d'entrée est supposée équivalente à la température du sol sur la face amont. La condition

aux limites « flux nul » est imposée sur le reste des surfaces du bloc. La chaleur transmise dans le massif du sol est donc totalement due au chauffage du pieu 3 (Figure 2).

La numérotation des sondes installées dans le modèle à la hauteur du milieu des pieux ($z=27,5$ cm) est également présentée sur la Figure 2. Les numéros 3, 5, 7, 8 représentent les pieux et leur sonde et P1, P2, P3, P4 sont les sondes installées dans le sol. L'emplacement de ces sondes est choisi selon l'emplacement des capteurs de température installés dans le modèle dans l'essai réalisé en centrifugeuse.

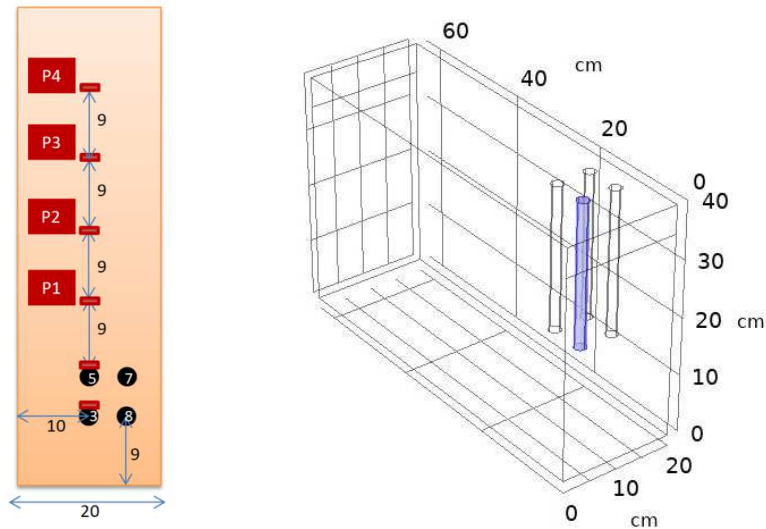


Figure 2. Plan de la numérotation des pieux et des sondes (gauche), Température imposée uniformément sur toute la surface du pieu 3 (droit)

La température de l'eau qui entre dans le pieu géothermique pour le chauffer est identique lors des deux études. Cependant, comme le pieu est soumis à des conditions différentes d'une étude à l'autre, sa température de surface n'est pas la même. C'est cette température de surface mesurée expérimentalement qui est imposée ici en tant que condition limite lors de la modélisation numérique. Les températures imposées en surface du pieu chauffé dans les deux études sont présentées sur la Figure 3. La durée de l'étude est choisie selon la disponibilité des températures mesurées. Pour le modèle sans écoulement le temps final est de 9000 secondes et pour celui avec l'écoulement le chargement thermique dure 5300 secondes.

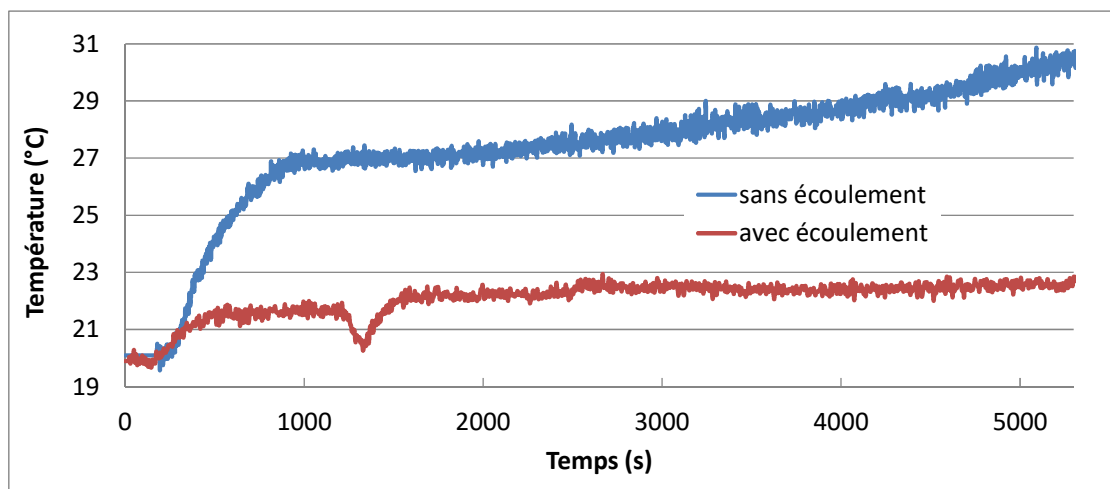


Figure 3. Température du pieu, imposée dans les deux cas de calcul : sans écoulement et avec écoulement

3. Résultats et discussions

Les variations de températures sont étudiées à l'aide des calculs couplés thermo-hydrauliques pour un cas sans écoulement et un cas avec écoulement d'eau. La forme du panache thermique montre clairement l'effet de l'écoulement sur la distribution de chaleur dans le sol (Figure 4). Comme supposé, lorsqu'un écoulement d'eau est présent, le panache thermique est suffisamment étroit pour ne pas entrer en interaction avec les parois et le type de condition limite imposée n'impacte pas le résultat. Ce résultat apparaît plus rigoureusement sur la figure 5 où les températures à différents endroits du modèle sont comparées pour les deux types de conditions aux limites (température imposée ou flux thermique nul).

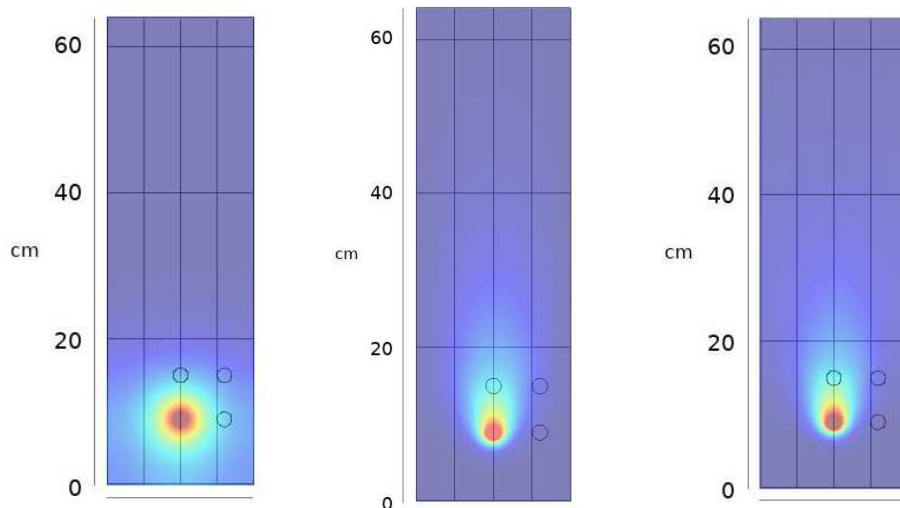


Figure 4. Panache thermique à mi-hauteur, de gauche à droite : sans écoulement, avec un écoulement et conditions aux limites en température imposée, avec un écoulement et condition limite en flux thermique nul

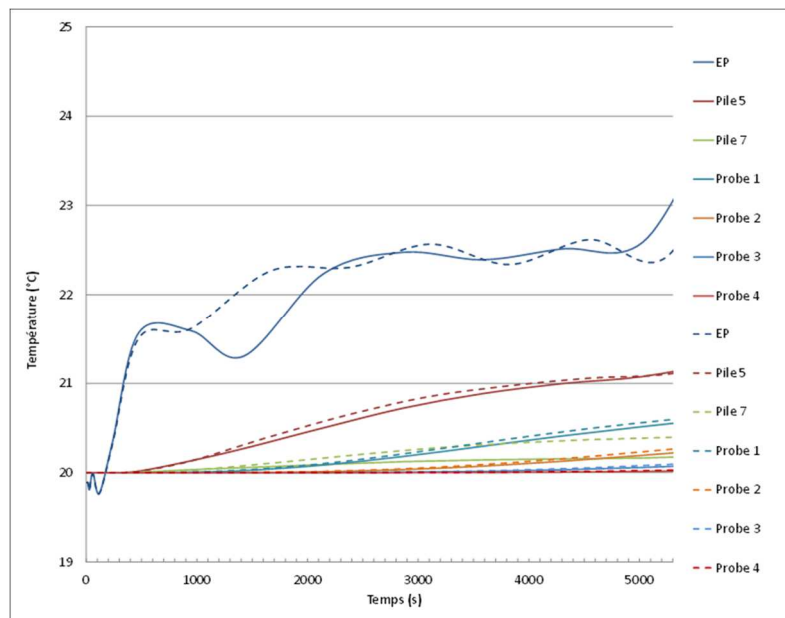


Figure 5. Variations de température dans l'étude avec un écoulement pour deux conditions aux limites différentes (trait continue: température imposée, trait en pointillé: flux nul)

Sur une durée de 9000 secondes les températures mesurées et calculées aux coordonnées des sondes (4 sondes sur la surface des pieux et 4 sondes distribuées dans le sol à différentes distances des pieux) sont présentées. Les températures mesurées

expérimentalement sont illustrées par des lignes continues et les températures calculées numériquement par des pointillés. Dans toutes les figures, le pieu 3 est nommé EP pour Energy Pile. Il s'agit du pieu qui subit la charge thermique.

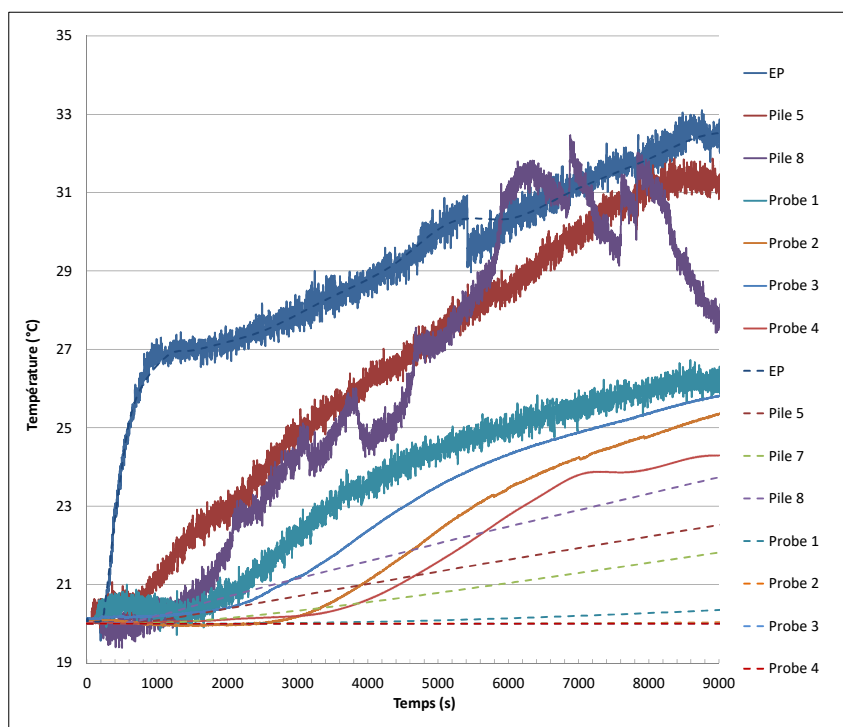


Figure 6. Variations de température dans l'étude sans écoulement

Concernant les résultats numériques (traits en pointillés), la figure 6 montre que le pieu le plus chauffé est le pieu 8. Cela provient du fait qu'il est le plus proche des parois qui sont isolées thermiquement dans le modèle numérique. Ensuite le pieu 5 qui a la même distance avec le pieu 3 (chauffant) que le pieux 8. Et le pieux 7 est le pieu le moins influencé dans ce calcul. Les sondes installées dans le sol montrent des variations très faibles. Les résultats de température des calculs (en pointillés) sont inférieurs aux mesures expérimentales (traits pleins).

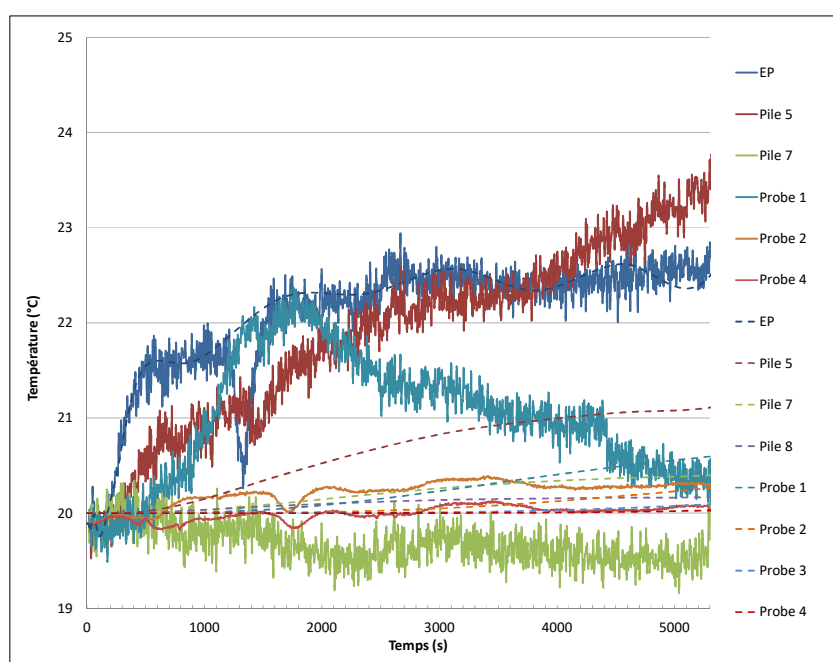


Figure 7. Variations de température dans l'étude avec un écoulement

Les températures mesurées et calculées numériquement dans le cas avec un écoulement sont illustrées sur la Figure 7. La forme des courbes calculées montre la participation du transfert de la chaleur par la convection. La différence de températures imposée dans le cas sans écoulement était de 13 degré tandis que cette différence est de 3.5 degré dans le cas avec écoulement. Les températures calculées ici dans le second cas sont plus proches des mesures obtenues lors du premier calcul.

Les capteurs thermiques mesuraient des températures différentes à l'instant initial. Or, on suppose que suffisamment de temps a été donné au modèle expérimental avant le début du test pour supposer que sa température initiale était homogène. Ainsi, cette différence entre les mesures des températures initiales peut être imputée à l'étalonnage des capteurs et notamment à l'offset. Par conséquent, une remise à zéro a été effectuée (choix d'une température initiale commune), ce qui remet en question l'interprétation des mesures. Toutefois, certaines tendances apparaissent. Tout d'abord, l'écoulement diminue les anomalies thermiques comme le démontre la relative faible montée en température du pieu chauffant dans le cas « avec écoulement ». De plus, les capteurs situés suffisamment loin du pieu chauffant ne ressentent l'anomalie thermique qu'en présence de l'écoulement. Enfin, le transfert de chaleur apparaît sur le graphe dans la mesure où les capteurs ressentent la « montée » en température à des instants différents selon leur distance au pieu chauffant.

Il est possible de définir un indice I , qui rend compte du transfert thermique dans le modèle :

$$I = 1 - \frac{\Delta T_{EP} - \Delta T_{P5}}{\Delta T_{EP}} \quad (4)$$

Où ΔT_{EP} est la différence entre la température au début de l'essai et la température à 5000 s pour le pieu chauffant. De même, ΔT_{P5} correspond au même calcul mais pour le pieu 5 qui est situé en aval du pieu chauffant. Pour une différence de température enregistrée par le pieu chauffant en 5000s, cet indice correspond à la part de cette différence ressenti par le pieu en aval. Par exemple, si le pieu chauffant subit une différence de température de 10°C en 5000s et que le pieu 5 enregistre lui une différence de température de 5°C sur la même période de temps, l'indice I vaudra 50%.

Le calcul de cet indice montre qu'il vaut environ 15% pour le cas sans écoulement contre 30% pour le cas avec écoulement. L'amélioration du transfert thermique par l'écoulement est ainsi mise en lumière.

L'effet de la présence du chevêtre en aluminium est également étudié. Dans l'essai en centrifugeuse les pieux en ciment ne sont pas en contact direct avec le chevêtre mais isolés par une pièce en plexiglas. Une première simulation grossière a été effectuée en les considérant en contact directement avec l'aluminium. Néanmoins les résultats présentés sur la Figure 8 montrent l'effet négligeable de la présence du chevêtre sur le champ de température du sol. Cela prouve qu'il n'est pas nécessaire de modéliser le chevêtre lorsque l'on étudie le comportement thermique du groupe de pieux. Ce résultat permet également aux expérimentateurs de ne pas se préoccuper de l'isolation thermique entre pieu et chevêtre lors des expérimentations.

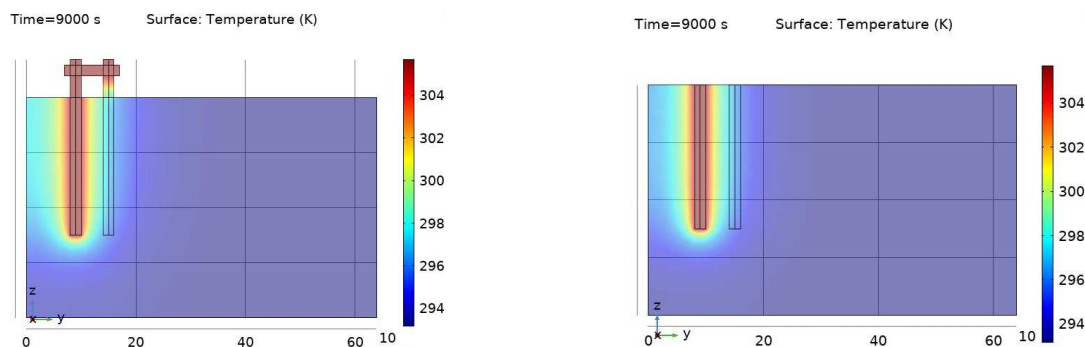


Figure 8. Champ de température du sol, avec un chevêtre en aluminium en contact direct avec les pieux (gauche) sans chevêtre (droit)

4. Conclusions

Le transfert de chaleur d'un pieu géothermique dans deux essais en centrifugeuse à 50g a été étudié par la modélisation numérique tridimensionnelle couplée thermo-hydraulique. Dans le premier cas, l'étude est faite en supposant qu'aucun écoulement n'existe dans le massif afin de pouvoir étudier seulement le transfert de chaleur par conduction. Dans le deuxième cas de calcul, un écoulement est imposé pour étudier l'effet de la convection. Ces calculs 3D aident à définir la taille de la zone influencée par un pieu géothermique dans un groupe de pieux. Les propriétés thermiques des matériaux modélisés numériquement étant bien connues, la différence entre résultats expérimentaux et numériques peut provenir de l'étalonnage des capteurs et du filtrage des signaux obtenus ou encore de l'hypothèse d'homogénéité du sable qui n'est pas réelle. L'effet de l'écoulement est mis en évidence : le panache thermique se déplace plus loin dans le sens de l'écoulement et est moins étalé dans le sens perpendiculaire à l'écoulement. Les résultats des calculs ont montré plus de cohérence avec les mesures dans le cas avec un écoulement de l'eau. Dans le cas sans écoulement les valeurs calculées sont plus éloignées des mesures expérimentales. Cette étude fait partie d'un travail plus global qui visera in fine la création d'un modèle numérique calé sur des résultats expérimentaux. Enfin, le modèle numérique a permis de confirmer que le radier reliant les pieux n'impactait pas les transferts thermiques malgré sa forte conductivité thermique. Ce résultat sera utile pour d'autres études expérimentales et numériques.

5. Références bibliographiques

- Brandl, H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56, No. 2, 81-122
- COMSOL Multiphysics® v. 5.6. www.comsol.com
- Di Donna, A., Barla, M. et Amis, T., 2017, October. Energy Geostructures: Analysis from research and systems installed around the World. In *DFI 42nd Annual Conference on Deep Foundations*.
- Delerablée, Y., 2019. Intégration thermique et mécanique des géostructures thermiques: de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la cité (Thèse de doctorat, Université Paris Est).
- Pophillat W, Attard G, Bayer P, Hecht-Méndez J, Blum P, Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems, *Renewable Energy* (2018), doi: 10.1016/j.renene.2018.07.148.
- BRGM (2012). Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines - Synthèse bibliographique. Rapport final n° 59387.
- Ouzzine, B., de Sauvage, J., Madhabushi, G., Viggiani G., Reiffsteck P. 2022, June. Centrifuge modelling of a thermally loaded pile group within a flow. In *JNGG2022*