

# Fu-Jiao TANG

## Etude numérique sur les échangeurs de chaleur souterrains installés dans les sols

### Résumé

La géothermie peu profonde est une énergie renouvelable qui peut aider l'humanité à atteindre les objectifs du développement durable. La thermopompe couplée au sol est traditionnellement utilisée pour bénéficier de cette énergie. En tant qu'élément principal d'un système de pompe à chaleur géothermique, le rendement d'un échangeur de chaleur souterrain peut influencer directement l'efficacité énergétique d'un système de pompe à chaleur géothermique. Les échangeurs de chaleur souterrains peu profonds sont normalement installés dans les sols, qui présentent une grande hétérogénéité des propriétés hydrothermales le long des profils de sol. L'objectif principal de ce projet est d'identifier le comportement des échangeurs de chaleur souterrains dans les sols. Les échangeurs de chaleur souterrains inclus dans ce projet sont l'échangeur de chaleur de puits de forage et l'échangeur de chaleur géothermique horizontal. En résumé, les enquêtes suivantes ont été menées dans le cadre de ce projet :

La première consiste à introduire le transfert hydrothermique dans la modélisation numérique des échangeurs géothermiques installés sur un site en Alsace (France). Dans cette partie, les fluctuations hydrothermales saisonnières et la performance de l'échangeur de chaleur de forage peu profond du site avec un système de sol multicouche ont été prédites. Les résultats ont montré que les profils hydrothermiques du sol dépendaient fortement des propriétés du sol dans différentes couches. Par la suite, le modèle a été utilisé pour estimer la performance d'un échangeur de chaleur de forage peu profond installé au même endroit sur une année en considérant deux scénarios différents : une température d'entrée constante et une charge thermique saisonnière. On a constaté que le coefficient de performance dans le scénario de température d'entrée constante reste presque stable pendant la période de service. Cependant, le coefficient de performance de la thermopompe dépend fortement de la charge thermique et montre plus de variance dans le scénario de charge thermique saisonnière. Le rendement de l'échangeur de chaleur peu profond du puits de forage a été estimé pour une période de cinq ans en supposant la température d'entrée constante. On a constaté que l'énergie annuelle totale extraite diminue chaque année, mais cette diminution est devenue négligeable après la quatrième année.

La seconde enquête consiste à identifier les facteurs qui influencent la performance d'un échangeur de chaleur de forage peu profond installé dans les sols. Il a été constaté que l'échangeur de chaleur de forage peu profond installé dans le sable est plus performant que celui de l'argile de 8%. La même différence de performance entre le sable et l'argile a été observée dans la plupart des scénarios étudiés. Le rendement annuel moyen des thermopompes a présenté une variation de plus de 27,2% selon les conditions météorologiques, la conductivité thermique du coulis et le niveau de charge thermique. La solution multitubulaire et la vitesse du fluide caloporteur ont également influencé le rendement de la thermopompe, variant entre 12,2 et 16,2%. D'autres facteurs tels que l'état hydraulique, le débit d'eau souterraine, la capacité calorifique volumétrique du coulis, le diamètre du coulis, l'espacement des tiges, le diamètre intérieur du tuyau, l'épaisseur du tuyau, la conductivité thermique du tuyau, le matériau du fluide porteur et le mode de charge thermique ont eu un impact moindre sur le coefficient de performance de la thermopompe, variant entre 0 et 11,6%.

La troisième étude concerne l'analyse de sensibilité des essais de réponse thermique pour les échangeurs de chaleur de forage installés dans les sols. Cette étude a été menée pour trouver une approche alternative à l'estimation de la conductivité thermique effective sur le terrain en tenant compte de différents moments d'essai, conditions de terrain et longueurs de conduite en U. Pour atteindre cet objectif, les essais de réponse thermique ont été effectués numériquement dans de l'argile, du limon sableux et du sable pendant les jours les plus chauds de l'année en été et les jours les plus froids de l'année en hiver avec différentes

longueurs de tuyaux en U et différents niveaux d'eau souterraine. Les résultats ont montré que la conductivité thermique effective du sol était plus élevée en hiver qu'en été, tandis que cette différence devenait moins significative pour les conduites en U de plus de 30 m. La conductivité thermique effective du sol variait linéairement avec un nouveau rapport défini  $\lambda$  (la profondeur du niveau d'eau divisée par la longueur des conduites en U). Elle variait également en fonction de la longueur de la conduite en U sous forme polynomiale (second degré). Enfin, une approche analytique est proposée pour estimer la conductivité thermique effective du sol.

La dernière étude traite l'identification de la différence de performance d'un modèle de simulation numérique avec les limites de Neumann et de Dirichlet à la surface du sol pour un échangeur horizontal de chaleur souterraine. Dans le cadre de cette étude, un cadre numérique tenant compte de l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur géothermique horizontal a été proposé et validé. Les températures de sortie d'un échangeur horizontal de chaleur de type slinky-type installé dans un sol multicouche ont ensuite été étudiées dans le cadre du scénario de chauffage. Les résultats ont montré que le fonctionnement de l'échangeur de chaleur géothermique horizontal affectait évidemment la température à la surface du sol et le flux de chaleur souterraine. L'augmentation de la profondeur de montage de 0,5 à 2 m a augmenté la température de sortie. Cependant, cette augmentation était négligeable lorsque la profondeur d'installation passait de 0,5 à 1 m. On a également constaté que la non prise en compte de l'interaction atmosphère-sol surestimait la température annuelle de sortie du fluide dans le scénario de chauffage, et cette surestimation a diminué de 47,99% à 17,16% lorsque la profondeur d'installation passait de 0,5 à 2 m.

### Mots-clés

Géothermie peu profonde; Échangeur de chaleur souterrain; Sol; Modélisation numérique; Fluctuation hydrothermale; Performance; Essai de réponse thermique.

**Fu-Jiao TANG**

## **Numerical investigation on the ground heat exchanger installed in soils**

### **Abstract**

Shallow geothermal energy is a renewable energy that can help humanity to achieve the goal of sustainable development. Ground-Coupled Heat Pump is traditionally used to benefit this energy. As a main element of Ground-Coupled Heat Pump system, ground heat exchanger performance can directly influence the energy efficiency of a Ground-Coupled Heat Pump system. The shallow ground heat exchangers are normally installed in soils, which show high heterogeneity of hydrothermal properties along the soil profiles. The main objective of this project is identifying how ground heat exchanger behaves in the soil. The ground heat exchangers included in this project are Borehole Heat Exchanger and Horizontal Ground Heat Exchanger. In summary, the following investigations have been conducted in this project:

The first is introducing hydrothermal transfer in the numerical modeling of ground heat exchangers installed at a site in Alsace region (France). In this part, seasonal hydrothermal fluctuations and shallow Borehole Heat Exchanger performance of the site with a multi-layered soil system were predicted. The results showed that the soil hydrothermal profiles depended highly on the soil properties in different layers. Subsequently, the model was used to explore the performance of a shallow Borehole Heat Exchanger installed at the same place over a year considering two different scenarios: constant inlet temperature and seasonal heat load. It was found that the Coefficient of Performance in constant inlet temperature scenario remained almost stable during the service period. While heat pump Coefficient of Performance depended strongly on the heat load and shows more variance in the seasonal heat load scenario. The performance of the shallow Borehole Heat Exchanger was estimated for a 5-year period considering the constant inlet temperature scenario. It was found that the yearly Total Extracted Energy decreases annually, while this reduction became negligible after the fourth year.

The second is identifying the factors influencing the performance of a shallow Borehole Heat Exchanger installed in soils. It was found that the shallow Borehole Heat Exchanger installed in sand has a better performance of 8% than in clay. The same performance difference between sand and clay was observed in most of the investigated scenarios. The annual average heat pump performance presented a variation more than 27.2% with the meteorological condition, the grout thermal conductivity and the heat load level. The multi-pipe solution and the carrying fluid velocity also influenced the heat pump performance, ranging between 12.2 and 16.2%. Other factors such as the hydraulic condition, the groundwater flow, the grout volumetric heat capacity, the grout diameter, the shank spacing, the pipe inner diameter, the pipe thickness, the pipe thermal conductivity, the carrying fluid material and the heat load mode had less impact on the heat pump Coefficient of Performance, varying between 0 and 11.6%.

The third is conducting sensitive analysis of Thermal Response Tests for Borehole Heat Exchanger installed in soils. This investigation was conducted to find an alternative approach to estimating the field effective thermal conductivity by considering various testing times, field conditions and U-pipe lengths. To reach this objective, the Thermal Response Tests were conducted numerically in clay, sandy loam and sand during the hottest day(s) of a year in summer and the coldest day(s) of a year in winter with various U-pipe lengths and groundwater levels. The results showed that there was a higher effective soil thermal conductivity in winter than in summer while this difference became less significant for the U-pipes longer than 30 m. The effective soil thermal conductivity varied linearly with a newly defined  $\lambda$  ratio (the water level depth divided by the U-pipe length). It also varied with the U-pipe length in a polynomial form (2nd degree). Finally, an analytical approach is proposed to estimate the effective soil thermal conductivity.

The fourth is identifying the performance difference of a numerical simulation model with Neumann and Dirichlet boundaries on the land surface for a Horizontal Ground Heat Exchanger. In this investigation, a numerical framework considering the atmosphere-soil-Horizontal Ground Heat Exchanger interaction was proposed and validated. The outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger installed in a multi-layered soil field were then investigated under the heating scenario. The results showed that the operation of the Horizontal Ground Heat Exchanger affected obviously the land surface temperature and the ground heat flux. The increase of the installation depth from 0.5 to 2 m increased the outlet temperatures. However, this increase was insignificant when the installation depth increased from 0.5 to 1 m. It was further identified that the non-consideration of the atmosphere-soil interaction overestimated the annual fluid outlet temperature in the heating scenario, and this overestimation decreased from 47.99% to 17.16% as the installation depth increased from 0.5 to 2 m.

### **Keywords**

Shallow geothermal energy; Ground heat exchanger; Soil; Numerical modeling; Hydrothermal fluctuation; Performance; Thermal Response Test.