DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE D'UN GRAND VOLUME DE SOL À PARTIR DE MESURES REPARTIES DE LA TEMPÉRATURE PAR FIBRE OPTIQUE

NOUVEAU M.[1], PHILIPPE M.[1] GRANDJEAN G.[1], TABBAGH A.[2]

[1] BRGM, 3 avenue Claude Guillemin 45060 Orléans, marienouveau@outlook.com, m.philippe@brgm.fr, g.grandjean@brgm.fr
[2] Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, UMR 7619, Métis, 4 place Jussieu F-75252, Paris, France, mail : alain.tabbagh@upmc.fr

RÉSUMÉ

La plateforme géothermie installée sur le site du BRGM à Orléans comprend un échangeur horizontal équipé d'une fibre optique permettant le suivi de la température au niveau du tuyau, dont la profondeur est de 1m, au-dessus, à 50 cm, et en dessous à 1,5 m. Une chauffe par circulation d'eau chaude du 27 mai au 3 juin 2013 a permis une cartographie de la conductivité thermique du terrain au niveau du tuyau par la méthode du choc thermique et une détermination globale sur l'ensemble de la surface concernée, en assimilant l'ensemble du tuyau à un plan chauffant. La cartographie des variations de cette propriété donne une valeur modale, proche de 1,6 $Wm^{-1}K^{-1}$, cohérente avec le résultat fourni par méthode « globale » et les contrôles sur échantillons de petit volume.

***Mots clés** : mesure de température du sol, fibre optique, conductivité thermique du sol, échangeur géothermique*

ABSTRACT

THERMAL CONDUCTIVITY DETERMINATION OVER A BIG SOIL VOLUME USING AN OPTICAL FIBER DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSOR

The ground heat exchanger test facility settled in the BRGM site of Orléans incorporates a horizontal exchanger and a distributed optical fiber thermal sensor that spreads at three levels, the one of the heating pipe, at 1 m depth, another at 50 cm depth and the third at 1.5 m. A heat generation campaign extending from May 27to June 3, 2013 allowed gathering temperature data that were used to map the soil thermal conductivity at the pipe level using the 'heat pulse method', and, considering the whole pipe as a heating plane, to determine the global conductivity of the whole parcel. The modal value, 1.6 $Wm^{-1}K^{-1}$, is in accordance with the one delivered by the global method and with control measurements achieved on small soil samples.

***Key words**: Soil temperature measurements, optical fiber, thermal conductivity, ground heat exchanger*

.1 INTRODUCTION

La diffusion de la chaleur dans le sol est dépendante de deux propriétés thermiques, la conductivité et la chaleur volumique. Leur connaissance est utile pour une large gamme d'applications où intervient la capacité d'un sol à stocker ou à évacuer la chaleur. C'est par exemple le cas pour les installations d'échangeurs géothermiques superficiels. L'existence sur le terrain du BRGM à Orléans d'un échangeur horizontal, où une fibre optique est accolée au tuyau caloporteur, nous a permis de disposer d'un jeu de données pour tester plusieurs méthodes de détermination de la conductivité thermique.

.2 MATERIELS ET METHODES

2.1 L'échangeur et le sol environnant

L'échangeur (**cf. Fig.1 1 et 2**), est constitué d'un tuyau où circule de l'eau glycolée, disposé en serpentin à 1 m profondeur les brins successifs se trouvant distants de 50 cm. La fibre optique est déroulée en 3 nappes : l'une à 50 cm de profondeur, l'autre à 1 m accolée au tuyau et la troisième à 1,50 m de profondeur. La mise en place de cette installation a nécessité l'excavation complète du terrain puis sa remise en place, le sol a donc été totalement remanié.

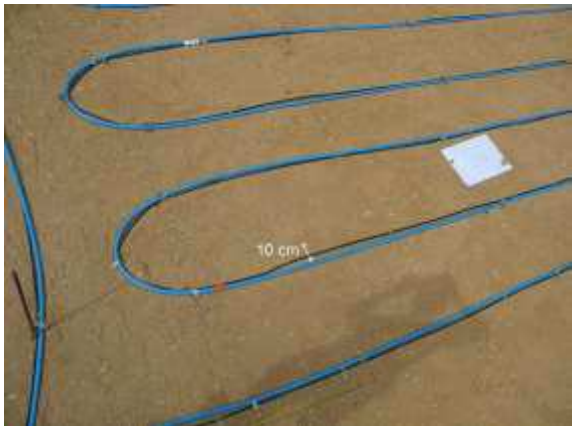

Fig. 1 – Disposition horizontale du tuyau et de la fibre optique

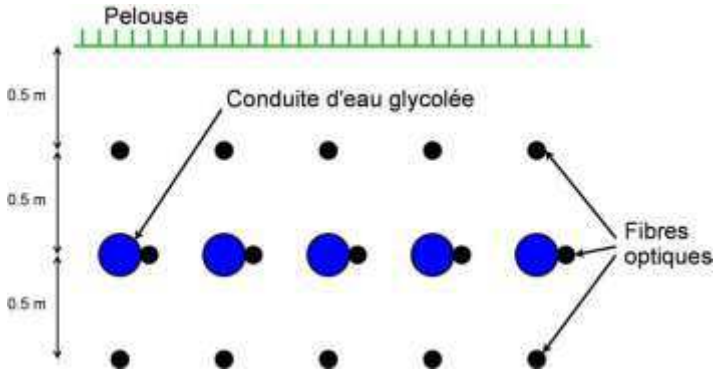

Fig. 2 – Disposition verticale du tuyau et de la fibre optique

La zone étudiée couvre une surface de 11 m ×15 m, divisée en 4 parties dont seule la partie 3 a été chauffée du 27 mai au 3 juin 2013 comme l'indique la figure 3 où est cartographiée la température à 1 m à la fin de la chauffe.

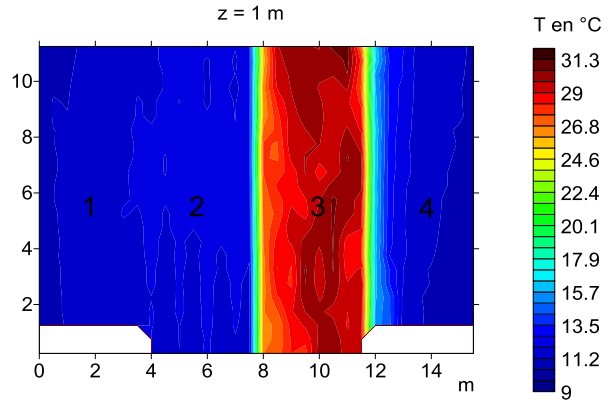

Fig. 3 – Température du sol à 1m le 3 juin 2013 à 16 h

Le sol est constitué de sable de l'Orléanais. Très drainant, sa teneur en eau pondérale est restée faible et proche de w=11%. La masse volumique sèche de 1,94 kg.dm^{-3} (Philippe, 2010) correspondant à une porosité de n=0,268, est caractéristique d'un sol bien compacté. La connaissance de la teneur en eau et de la porosité permet de calculer une chaleur volumique (C_v) de 1,93.10^6 Jm^{-3}K^{-1}, $C_v = (1-n)C_s + \theta C_w$, où C_w est la chaleur volumique de l'eau, C_s celle de la fraction solide et θ la teneur en eau volumique. La conductivité thermique fixe donc directement celle de la diffusivité, $\alpha = k / C_v$.

2.2. Méthodes de détermination de la conductivité thermique, k

Deux approches différentes ont été développées. Dans la première on calcule à proximité du tuyau avec une maille fine la conductivité thermique par la méthode du « choc thermique » où le tuyau est considéré comme un fil chauffant rectiligne où la chauffe est brusquement arrêtée (Tabbagh et Jolivet 1974). Cette impulsion permet de déterminer en chaque point la conductivité à partir des valeurs de température en régime asymptotique entre 3 et 8 h. On dispose ainsi d'une carte de la conductivité à 1 m de profondeur sur la zone chauffée.

La deuxième approche est une approche « globale » où l'ensemble des zigzags du tuyau est considéré comme un plan chauffant placé dans un milieu de propriétés latéralement homogènes, à la profondeur h=1m. On calcule l'effet de ce chauffage à 50 cm et à 1,5 m. Ce calcul est fait en tenant compte de l'évolution temporelle de la quantité de chaleur $Q(\tau)$ libérée dans le milieu que l'on détermine à partir de l'évolution des températures d'entrée et de sortie du fluide. Cette variation est décomposée en une série de fonctions d'Heaviside, Y(t-τ), puis la température en est déduite à partir de la réponse à une impulsion selon les formules (où *ierfc* est la fonction erreur complémentaire) :

$$Q(t) = \int_0^t \frac{\partial Q}{\partial \tau} \mathrm{Y}(t-\tau) d\tau$$

$$T(z,t) = \int_0^t \frac{\partial Q}{\partial \tau} \frac{\sqrt{4\alpha(t-\tau)}}{k} \left[\, ierfc\left(\frac{z-h}{\sqrt{4\alpha(t-\tau)}}\right) - ierfc\left(\frac{z+h}{\sqrt{4\alpha(t-\tau)}}\right) \, \right] d\tau$$

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans la première méthode, pour affiner les résultats, la chaleur libérée le long du tuyau est considérée comme décroissante selon une loi exponentielle, $Q = Q_0 e^{-\frac{l}{l_0}}$, où l est la distance le long du tuyau et l_0 la distance caractérisant l'amortissement. Les valeurs optimales minimisant les variations de la conductivité sont : Q_0 =-20.458 Wm^{-1} et l_0 = 2300 m. La carte de la conductivité thermique (**cf. Fig. 4**), montre de nettes variations avec une valeur modale proche de 1,6 $Wm^{-1}K^{-1}$.

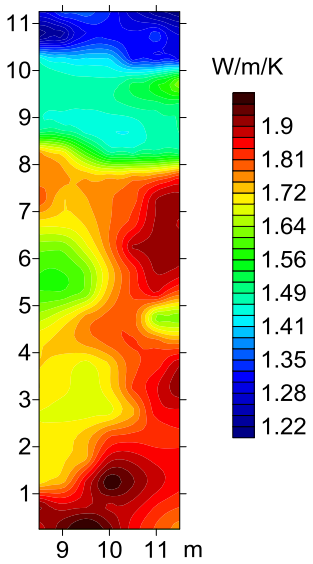

Fig. 4 – Carte de la conductivité thermique, zone 3 à 1 m de profondeur

La mise en œuvre de la deuxième méthode se heurte à l'existence de variations d'origine climatique qui se superposent aux variations induites par le chauffage. On minimise leurs effets d'une part en considérant les différences entre zones chauffées et non chauffées de même niveau, d'autre part en limitant la durée des mesures prises en compte. À partir des données entre 5 heures et 25 heures après le début du chauffage on a : k=1,90 $Wm^{-1}K^{-1}$ pour 50 cm et k=1,48 $Wm^{-1}K^{-1}$ pour 150 cm. La différence entre les valeurs au-dessus du plan chauffant et celles en-dessous, peut être expliquée par une différence de tassement lors de la remise en place du sol. Ces résultats sont cohérents avec les mesures réalisées sur échantillons après prélèvement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PHILIPPE M., 2010 – Développement et validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels. *Thèse MinesParisTech, 130 pages.*

TABBAGH A., JOLIVET A., 1974. Procédé de mesure in-situ des propriétés thermiques des sols. *Science du sol*, 4, 269-279.