



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Energie Solaire et Bâtiment
Sonnenenergie und Bauwesen
Solar Energy in Buildings



Conférence Internationale Energie Solaire et Bâtiment

Lausanne, 22 - 23 septembre 1999

COMPARAISON DES PERFORMANCES DE SONDES GEOTHERMIQUES EN DOUBLE-U PAR DES MESURES IN SITU

D. Pahud¹; B. Matthey²

1: *LASEN - Département de génie civil EPFL - Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, CH - 1015 Lausanne EPFL*

2: *Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, CH - 2205 Montézlillon - NE*

ABSTRACT

The response test method is briefly presented. It allows the in situ determination of the thermal conductivity of the ground in the vicinity of a borehole heat exchanger, as well as the effective thermal resistance of this latter. Tests performed with different types of boreholes equipped with a double-U pipe have shown the viability of the method. They reveal that the thermal resistance can be decreased by 30% when quartz sand is used instead of bentonite and when spacers are used to keep the plastic pipes in contact to the borehole wall. Relative to a common heat extraction rate of 50 W/m of borehole length, the temperature gain in a heat pump evaporator is +2 K. Finally, a mobile device has been developed to offer the possibility to accomplish a response test.

RÉSUMÉ

La méthode dite du test de réponse est brièvement présentée. Elle permet de déterminer in situ la conductibilité thermique du terrain dans le voisinage d'une sonde géothermique ainsi que la résistance thermique effective de cette dernière. Des essais appliqués à différents types de sonde en double-U montrent la viabilité de la méthode. Ils révèlent que la résistance thermique d'une sonde remplie de sable de quartz, dont les tubes sont plaqués contre la paroi du forage par des distanceurs, offre une résistance de 30% inférieure à celle d'une sonde conventionnelle remplie de bentonite (sans distanceurs). Relativement à une extraction de chaleur usuelle de 50W/m de sonde, le gain de température à l'évaporateur de la pompe à chaleur est de +2 K. Finalement, un dispositif transportable a été réalisé pour offrir la possibilité d'accomplir un test de réponse.

INTRODUCTION

Une sonde géothermique est généralement réalisée à partir d'un forage de 20 à 300 m mètres de profondeur dont le diamètre est compris entre 10 et 15 cm. Un tube ou un réseau de tube est ensuite inséré dans le forage (par exemple 2 tubes faisant un aller retour pour une sonde en double-U), de manière à faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le terrain. Finalement un matériau de remplissage est introduit dans le forage pour garantir un bon contact thermique entre les tubes et la paroi du forage, et dans certains cas pour éviter les transferts verticaux d'eau souterraine. Une sonde géothermique est donc un échangeur de chaleur avec le terrain. Raccordée à une pompe à chaleur, elle permet d'extraire la chaleur contenue dans le terrain pour satisfaire des besoins de chauffage. Elle peut également servir à dissiper des charges thermiques issues d'une demande de refroidissement avec ou sans l'intermédiaire d'une machine frigorifique. Sans machine frigorifique, on parle alors de refroidissement direct sur sonde géothermique.

L'efficacité thermique de ces dispositifs est fonction des propriétés physiques du terrain (imposées) et des caractéristiques de la sonde elle-même (géométrie, matériel de remplissage, conductibilité thermique des tubes, etc.) qui jouent un rôle particulièrement important en cas de refroidissement direct. Il est donc primordial de réaliser des sondes aussi performantes que possible. Un test in situ offre l'occasion unique de comparer les performances thermiques de différents types de sondes dans des conditions réelles.

OBJECTIFS

Obtenus dans le cadre de plusieurs mandats octroyés par l'office fédéral de l'énergie (OFEN), les résultats présentés dans ce papier répondent aux objectifs suivants:

- la mise au point d'une méthode de mesure et de calcul pour la détermination in situ des propriétés thermiques d'une sonde géothermique et du terrain;
- l'application de la méthode à des cas concrets (différents types de sonde en double-U) et faire des recommandations pour en améliorer les performances thermiques;
- le développement d'un dispositif transportable pour effectuer des tests in situ de sondes géothermiques (communément appelés tests de réponse).

RAPPELS THÉORIQUES

Une sonde géothermique est caractérisée du point de vue thermique par sa résistance thermique effective R_b . Elle traduit une relation de proportionnalité entre l'écart de température fluide - terrain sur le bord du forage et la puissance thermique échangée par la sonde (cf. relation 1, [1]). Elle prend en compte aussi bien les paramètres géométriques de la sonde (écartement des tubes, diamètre, nombre de tubes, profondeur) que physique (conductibilité thermique des matériaux utilisés, débit dans les tubes, nature du fluide, etc.). La qualité de la sonde est d'autant plus élevée que la résistance de celle-ci est faible.

$$(T_f - T_b) = q R_b \quad (1)$$

R_b : résistance thermique effective de la sonde géothermique (K/(W/m)).

$T_f = 0.5 \times (T_{fin} + T_{fout})$, T_f : moyenne arithmétique de la température du fluide caloporteur à l'entrée (T_{fin}) et la sortie (T_{fout}) de la sonde (°C).

T_b : température moyenne du terrain sur le bord du forage (°C).

$q = Q/H$ (W/m), Q : puissance thermique moyenne transférée par la sonde (W) dont la longueur active (du point de vue thermique) est H (m).

Le test de réponse permet de déterminer in situ la conductibilité thermique moyenne du terrain ainsi que la résistance thermique effective d'une sonde. Il est réalisé à partir de l'injection dans le terrain d'une puissance thermique constante et de la mesure de la température du fluide (T_{fin} , T_{fout}). Au cours du test, les transferts thermiques près de la sonde sont essentiellement radiaux et relativement constants le long de la sonde. La solution pour une source d'énergie thermique linéaire permet de mettre en équation l'évolution de la température moyenne du fluide T_f [2]:

$$T_f(t) - T_o = \frac{q}{4 \pi \lambda} \cdot \ln(t) + q \cdot \left[R_b + \frac{1}{4 \pi \lambda} \cdot \left(\ln\left(\frac{4 a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \right] \quad (2)$$

T_o : température du terrain non perturbé, avant le début de l'injection de chaleur (°C).

λ : conductivité thermique du terrain (W/mK).

C : capacité thermique volumétrique du terrain (J/m³K).

$a = \lambda/C$: diffusivité thermique du terrain (m²/s).

r_b : rayon de la sonde géothermique (forage) (m).

γ : constante d'Euler = 0.5772.

Le temps t est compté depuis le début de l'injection de chaleur. L'équation (2) est valide lorsque un régime stationnaire est atteint dans la sonde, soit après le temps $\frac{5r_b^2}{a}$. La

température du fluide $T_f(t)$ évolue de façon linéaire en fonction de $\ln(t)$. La pente de la droite, ϕ , permet d'évaluer d'abord la conductivité thermique du terrain (cf. relation 3).

$$\lambda = \frac{q}{4 \pi \phi} \quad (3)$$

La résistance thermique de la sonde est évaluée dans une deuxième étape, sur la base de l'équation (2). Elle nécessite la connaissance de la capacité thermique volumétrique du terrain, qui peut généralement être connue avec une précision suffisante à partir de valeurs usuelles découlant de la géologie du site. La température du terrain non perturbé doit également être connue. Elle est obtenue en faisant circuler le fluide sans chauffage avant le début du test.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est composé d'un chauffage électrique à puissance constante (boiler), d'une pompe de circulation, d'une tuyauterie bien isolée, d'un vase d'expansion et de capteurs de mesure reliés à un datalogger (sondes de température T_{fin} , T_{fout} ; consommation électrique C_E). En mesurant le débit C on dispose d'un contrôle supplémentaire pour calculer la puissance injectée. La figure 1 montre le dispositif utilisé lors des tests de Peseux [3,4]. Le boiler avait une puissance de 4 kW. Un dispositif analogue mais transportable a été développé au LASSEN - EPFL [5]. La puissance électrique peut être réglée à 3, 6 ou 9 kW en fonction de la longueur de la sonde à tester.

Les mesures sont enregistrées avec une fréquence de 5 minutes. La durée du test varie entre 2 (à Peseux) et 7 jours (à Kloten). Le critère pour que l'équation (2) soit valide correspond à environ 5 - 6 heures pour les sondes géothermiques testées.

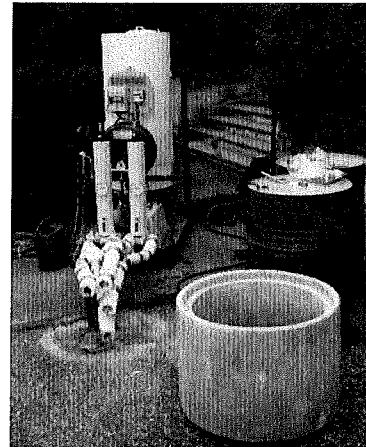
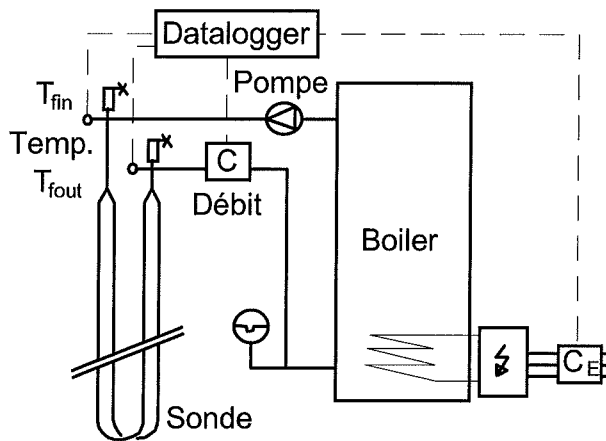


Figure 1: Dispositif expérimental utilisé à Peseux.

RESULTATS DES TESTS

Les résultats présentés (tableau 1) correspondent au test de 6 sondes en double-U (4 à Peseux [3,4] et à 2 à Kloten [6]). La figure 2 montre à titre d'exemple les mesures de température et leur interprétation pour le test de la sonde n° 1 à Peseux.

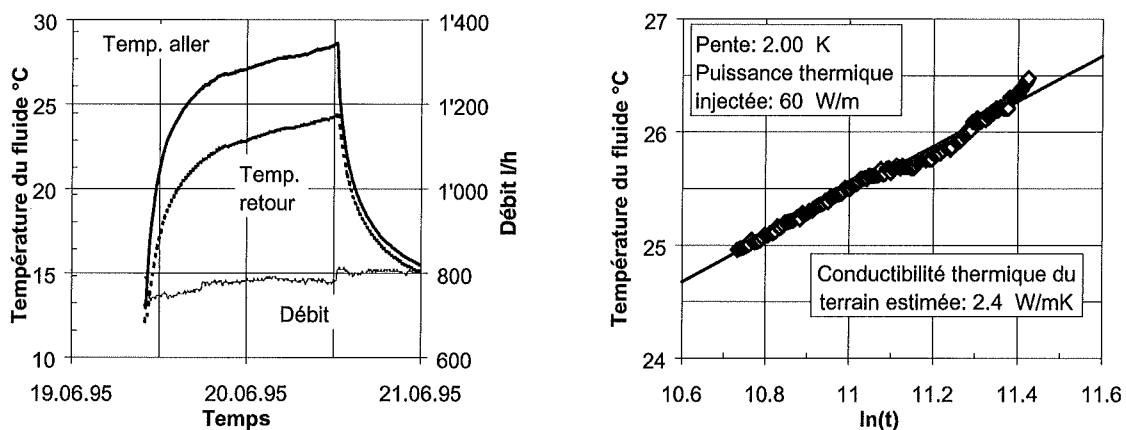


Figure 2: Mesures relatives à la sonde n° 1 de Peseux et estimation de la conductibilité thermique du terrain

Dans le cadre du projet à **Peseux**, les 4 sondes en double-U testées font partie intégrante d'un stockage de chaleur dans le terrain. Il est formé de 5 rangées de 6 sondes de 60 m de profondeur avec un espacement de 4 m entre les sondes et les rangées. Le diamètre des forages est de 13 cm. Le double-U est formé par des tubes en polyéthylène de diamètre intérieur - extérieur de 26 / 32 mm. Les sondes testées diffèrent les unes des autres par la nature du matériau de remplissage utilisé (mélange standard de bentonite et ciment, ajout de sable de quartz ou sable de quartz seul) et l'usage ou non de distanceurs pour maintenir les tubes près de la paroi du forage. Comme les 4 sondes testées traversent la même formation géologique, les résistances thermiques sont estimées à partir de la moyenne des conductibilités thermiques obtenues des 4 tests (2.5 W/mK). La température initiale du terrain, établie à 10 °C, est la même pour les 4 sondes; (les sondes sont suffisamment espacées pour ne pas craindre une influence thermique de l'une à l'autre entre les essais).

A **Kloten**, il s'agissait de déterminer la conductibilité thermique du terrain [6] dans deux endroits de la zone traversée par les pieux échangeurs servant de fondation au nouveau terminal pour les avions, le Dock Midfield [7]. La qualité des sondes utilisées n'était pas importante et aucune précaution particulière n'a été prise. Il s'agit de deux sondes en double-U de 33 m de profondeur et de diamètre 12 cm. Des tubes en polyéthylène plus fin qu'à Peseux sont utilisés (diamètre intérieur - extérieur de 23 / 26 mm). Un mélange standard de bentonite et ciment remplit l'espace entre les tubes et la paroi du forage. Le test de réponse a été effectué avec une puissance d'injection de 40 W/m.

Les valeurs des résistances thermiques obtenues sont données dans le tableau 1 pour tous les tests. Le tableau 1 permet la comparaison des résistances thermiques calculées préalablement aux essais à partir des données géométriques et thermiques des sondes avec les valeurs mesurées résultant de l'interprétation des essais in situ. Les calculs de résistance thermique ont été effectués avec le programme Earth Energy Designer (EED) [8].

Sonde géothermique en double-U	R_b calculé	R_b mesuré
Sonde 1, Peseux, diamètre: 13cm bentonite sans distanceurs	0.240 K/(W/m)	d = 5.0 cm $\lambda_r = 0.7$ W/mK 0.143 K/(W/m)
Sonde 2, Peseux, diamètre: 13cm bentonite avec distanceurs	0.142 K/(W/m)	d = 8.6 cm $\lambda_r = 0.7$ W/mK 0.141 K/(W/m)
Sonde 3, Peseux, diamètre: 13cm 50% sable + bent. avec distanceurs	0.124 K/(W/m)	d = 8.6 cm $\lambda_r = 1.0$ W/mK 0.121 K/(W/m)
Sonde 4, Peseux, diamètre: 13cm sable de quartz avec distanceurs	0.100 K/(W/m)	d = 8.6 cm $\lambda_r = 2.0$ W/mK 0.096 K/(W/m)
Sonde est, Kloten, diamètre: 12cm bentonite sans distanceurs	0.150 K/(W/m)	d = 7.6 cm $\lambda_r = 0.7$ W/mK 0.148 K/(W/m)
Sonde ouest, Kloten, diam.: 12cm bentonite sans distanceurs	0.223 K/(W/m)	d = 5.0 cm $\lambda_r = 0.7$ W/mK 0.169 K/(W/m)

Tableau 1: Résistances thermiques calculées (programme EED) et mesurées à partir des résultats des essais in situ. Les paramètres d et λ_r sont respectivement les distances axe-axe entre 2 tubes opposés et la conductibilité thermique du matériau de remplissage utilisés pour le calcul de la résistance thermique.

Dans tous les cas, le débit dans les sondes lors des tests établissait un régime laminaire (nombre de Reynold d'environ 2'000). Les calculs suggèrent qu'un régime d'écoulement non laminaire (Reynold de 3'000) permet de diminuer la résistance thermique de la sonde de 0.04 à 0.05 K/(W/m). Toutefois des tests devraient encore confirmer ces valeurs et démontrer que le bilan énergétique (amélioration du rendement de la pompe à chaleur (PAC) contre consommation supplémentaire du circulateur des sondes) est bénéfique.

CONCLUSIONS ET DISCUSSION

La méthode utilisée (communément appelée test de réponse) est viable. Elle a montré qu'il était possible d'améliorer les performances thermiques d'une sonde géothermique de type double-U, sans créer de problèmes supplémentaires dans leur réalisation. Lorsque le terrain et les contraintes environnementales le permettent, l'usage de distanceurs et de sable de quartz comme matériau de remplissage est à recommander. L'amélioration de la résistance thermique relativement à une sonde standard (bentonite, pas de distanceurs) est d'environ 0.04 K/(W/m). Si une puissance thermique de 50 W/m est extraite de la sonde, un gain de +2 K est réalisé sur le fluide caloporteur. Enfin, un module de test de réponse transportable a été développé au LASSEN - EPFL. Il permet de caractériser in situ les propriétés thermiques du terrain et d'une sonde géothermique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Office fédéral de l'énergie pour son soutien financier.

REFERENCES

1. Hellström G. (1991), Ground Heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems. 1. Theory, Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
2. Eskilson P. (1987), Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Thesis, Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
3. Mathey B. et Pahud D. (1996), Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales et destinées à l'alimentation de pompes à chaleur, Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Programme Géothermie, Berne, Suisse.
4. Mathey B., Pahud D. et Buchi J. (1996) Améliorer la productivité des sondes en terre : calculs et mesures in situ. Géothermie; Energie der Zukunft, Tagungsband 4, Bussman W. (ed.), Konstanz, Schweiz
5. Laloui L., Moreni M., Steinmann G., Fromentin A. et Pahud D. (1998), Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques, Rapport intermédiaire de juillet 1998, Office fédéral de l'énergie, Programme Géothermie, Berne, Suisse.
6. Pahud D., Fromentin A., Hubbuch M. (1998), Response - Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen, Zwischenbericht, Juni 1998, Bundesamtes für Energie, Programm Wärmespeicherung, Bern, Schweiz.
7. Pahud D., Fromentin A., Hubbuch M. (1999), Heat exchanger pile system for heating and cooling at Zürich airport. IEA Heat Pump Centre Newsletter, Volume 17 - No. 1/1999, pp. 15 - 16.
8. Hellström G. and Sanner B. (1994), Software for Dimensioning of Deep Boreholes for Heat Extraction, Proceedings Calorstock'94, pp 195 - 200, Espoo, Finland.