

DIS-Projet Nr.	100 391	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
DIS-Contrat Nr.	150 488		

Rapport final du 17 mars 2004

Automatisation et télétransmission des données pour les tests de réponse du terrain

Élaboré par:

Dr Lyesse Laloui
Chef du projet

Gilbert Steinmann
Ingénieur civil ETS, REG-A

EPFL – ENAC
Laboratoire de Mécanique des Sols

Table des matières

Résumé - Abstract

1	Introduction	3
1.1	Objectifs du projet	3
1.2	Contexte du projet et champ d'application	3
2	Description du projet	4
2.1	Télétransmission des données	4
2.2	Système de télétransmission	4
2.3	Principe de fonctionnement	5
2.4	Tests du système	7
2.5	Perte de charge dans les sondes géothermique	8
2.6	Accréditation	8
3	Commentaires et conclusion	9

Annexes:

Annexe 1: Mode d'emploi du RMS-Lite

Annexe 2: Analyse des résultats en vue de l'accréditation du test de réponse thermique

Annexe 3: Musée des Confluences – Lyon: Tests de réponse thermique du terrain

RESUME

Dans le cadre de ce mandat, le module de chauffage de l'EPFL, réalisé en 1998 pour étudier le comportement thermo-mécanique d'un pieu énergétique ou de sondes géothermiques, a été modernisé. Avec les progrès récents des télécommunications, il est apparu qu'il serait très profitable de rendre cet appareil plus performant. Les mesures effectuées sur place peuvent dès lors être disponibles en temps réel sur l'Internet. De plus toute panne de courant est immédiatement signalée par SMS, ce qui permet de remédier très rapidement à un problème d'électricité.

La demande d'accréditation du test de réponse a été effectuée selon la norme EN 45'000 et la méthode d'analyse et d'interprétation des résultats a été mise au point.

Un premier test de réponse avec la nouvelle configuration a été réalisé à Lyon (France) début 2004.

ABSTRACT

Within this projet, the heating equipment of the EPFL, carried out in 1998 to study the thermomechanical behavior of thermal piles, has been up-dated. With the new telecommunication technologies it seemed that this equipment could be more performed. The in-situ measurement could be then aviable in real time via internet. Any electrical problem will be immediately announced via SMS which able us to correct that in very short time.

The accreditation procedure following EN 45'000 norm is in progress. The analysis and interpretation tools were also up-dated.

A first thermal response test has been cary out using this up-dated equipment in Lyon (France) in early 2004.

1 Introduction

Le module pour réaliser les tests de réponse en possession de l'EPFL avait bénéficié en 1998 pour son développement d'un soutien financier de l'OFEN. Il a été utilisé tel quel sur le chantier de l'EPFL (pour un test sur le comportement thermo-mécanique d'un pieu) et pour un autre test de réponse où il a donné entière satisfaction. Ces essais ont également démontré les possibilités et la fiabilité de cet appareillage.

Le rôle initial du module de chauffage était de fournir des sollicitations thermiques sur un pieu. Après son optimalisation réalisée en 2002, également avec le soutien de l'OFEN, moyennant quelques précautions d'utilisation et de mesure, cet appareil est à même d'effectuer des tests de réponse des sondes géothermiques; pour mémoire, de tels essais permettent de déterminer les caractéristiques thermiques du pieu (ou de la sonde) et du sol avoisinant.

Au vu de la qualité des résultats obtenus lors des différents essais réalisés avec ce module, le LMS (Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL) a formulé une nouvelle requête le 18 juillet 2003 à l'OFEN afin d'obtenir un financement pour la modernisation de ce module de chauffage, qui comprendrait entre autre une télétransmission en temps réel des données sur l'Internet.

Une requête pour l'accréditation selon la norme EN 45'000 de l'essai du test de réponse a également été déposée. Elle est actuellement en cours d'évaluation.

1.1 Objectifs du projet

Les objectifs de ce projet étaient les suivants:

- Élaboration et construction d'un système performant de transmission de données.
- Amélioration de la fiabilité des tests de réponse.
- Accréditation du test de réponse selon la norme EN 45'000.

Le 29 septembre 2003 un contrat entre l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS) a été signé par MM H. U. Schärer, chef de section des énergies renouvelables à l'OFEN et M. Geissman, responsable géothermie. Ce contrat entrait en vigueur le 1^{er} octobre 2003 et se terminait le 15 décembre 2003.

1.2 Contexte du projet et champ d'application

Depuis son optimalisation en 2002, ce module de chauffage pour les tests de réponse des sondes géothermiques est actuellement, et à notre connaissance le seul appareillage fonctionnel en Suisse avec de telles performances. Dans sa nouvelle conception, il est facilement transporté sur les emplacements prévus d'essais pour être raccordé à toutes futures sondes géothermiques.

Cet appareil est également toujours performant pour réaliser des tests de stockage de chaleur dans les sols au moyen de géostructures (pieux thermiques par exemple).

Tous les projeteurs d'installations géothermiques et réalisateurs suisses de constructions d'échangeurs de chaleur dans le terrain peuvent profiter de cette installation pour déterminer la conductibilité thermique et la capacité calorifique des sols concernés et utilisables.

2 Description du projet

2.1 Télétransmission des données

Pour le développement et la réalisation du système de télétransmission, le LMS s'est approché de la société GEODEV. Cette entreprise, basée à Manno au Tessin travaille en étroite collaboration avec le SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana). Elle a également déjà collaboré à plusieurs reprises avec le LMS sur des projets de recherche, notamment dans la mise au point de la transmission de données pour des appareils de surveillance de glissements de terrain tels que les DICLAS ou les GPS. GEODEV a également tout le savoir-faire pour traiter et analyser les différents langages des appareils d'acquisition de mesure (data-logger) et pour les intégrer dans leur système de transmission.

La description du programme des travaux a été définie d'un commun accord entre le LMS et GEODEV et elle a débouché sur les tâches à effectuer suivantes:

- Programmation des différentes fonctions du data-logger
- Transmission sécurisée des données enregistrées sur le data-logger
- Contrôle et réparation en temps réel des erreurs de transmission
- Prise en charge et contrôle du Modem pour la télétransmission des données sur le réseau GSM
- Gestion des alarmes par SMS en cas de coupure de courant.

Tout ce travail a été effectué sur la base d'éléments existants et développés par GEODEV. L'adaptation de ce matériel a cependant été nécessaire pour répondre aux besoins particuliers de cette installation.

2.2 Système de télétransmission

Le fonctionnement du système RMS-Lite de télétransmission développé par GEODEV fonctionne sur le principe suivant:

Une carte avec un micro-processeur industriel est chargée du pilotage de tout le système. Elle est connectée au data-logger et à un Modem GSM. L'énergie est fournie par le secteur et une batterie tampon, afin de pallier à toute coupure de courant. La figure 1 montre les différents composants de cet appareillage. Le tout est confiné dans un coffret étanche placé dans le module de chauffage.

Ce système nécessite encore un ordinateur relié à un Modem.

Un programme de paramétrage du data-logger et de connections au travers du réseau GSM, fourni par GEODEV doit encore être chargé dans l'ordinateur. Il effectue la transmission des données depuis le module de chauffage et de leur traitement.

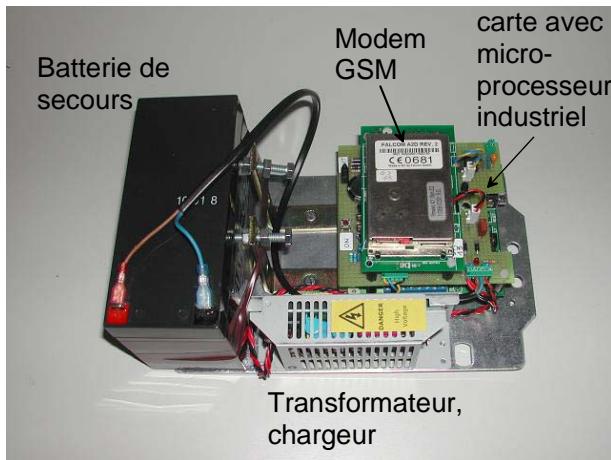


Figure 1: système de télétransmission RMS-lite développé par GEODEV

2.3 Principe de fonctionnement

La télétransmission des données peut être effectuée de 2 manières différentes, ce qui permet d'effectuer des tests de fonctionnement du module avec un ordinateur portable ou alors au moyen d'un serveur connecté à l'Internet. Le fonctionnement du système se fait selon une des deux méthodes suivantes:

1. Système sur ordinateur portable:
 - Le Modem GSM du système RMS-lite, est relié au data-logger placé sur le module de chauffage puis mis en marche (voir le mode d'emploi donné dans l'annexe 1). Il est alors en attente d'un appel téléphonique.
 - Le programme "RMS-lite for data-logger" chargé sur un PC distant est ensuite initialisé avec le numéro de téléphone du Modem GSM, la date, l'heure et la fréquence des télétransmissions. Dès ces valeurs introduites, le programme effectue alors un appel du Module GSM. Ce programme dispose d'une aide en ligne en cas de problèmes de fonctionnement.
 - Une fois la communication établie, le Modem GSM est initialisé, puis il se synchronise, au travers de son micro-processeur, avec l'ordinateur distant. Les paramètres d'appel (date, heure, intervalle des transmissions, etc.) sont ainsi enregistrés sur place et la première transmission de données depuis le data-logger est effectuée.
 - Simultanément à leur transmission, toutes les données sont contrôlées par le micro-processeur afin d'éviter la perte de valeurs.
 - A la fin de la transmission, la communication GSM est coupée et le système RMS-lite est mis en veille jusqu'à la prochaine transmission. Il se mettra en attente d'un nouvel appel pour effectuer une télétransmission de données à l'heure choisie.
 - Si une alarme (panne de courant) est détectée pendant la veille ou lors de la transmission, un message court de type SMS est alors envoyé sur trois numéros de téléphone portable.
 - Les données peuvent alors être immédiatement visualisées sous la forme de graphiques ou de tableaux numériques sur l'ordinateur distant. Ces derniers sont directement exportables vers des tableurs en vue d'un traitement approfondi.

2. Système sur serveur relié à l'Internet:

- Le principe de cette connexion est identique au précédent, cependant la mise en route du RMS-lite connecté au module de chauffage est effectuée à distance depuis le serveur. Il faut alors prendre un soin tout particulier avec la synchronisation de l'heure entre les deux appareils (micro-processeur et serveur). Il s'agit d'éviter que l'appel pour la demande de transmission de données soit effectué en dehors de la période d'éveil du RMS-lite.
- Cependant le grand avantage de cette méthode lors d'un test de réponse est que les données transmises sont immédiatement disponibles sur l'Internet, donc visibles en tout temps depuis n'importe quel ordinateur relié au réseau.
- Il faut cependant disposer d'un nom d'utilisateur (User Name) et d'un mot de passe (Password) pour éviter une utilisation non-autorisée des données.
- Les tableaux numériques peuvent également être téléchargés sur un tableau en vue du traitement approfondi des données.

Les figures 2 et 3 montrent schématiquement les principes de fonctionnement de la transmission des données.

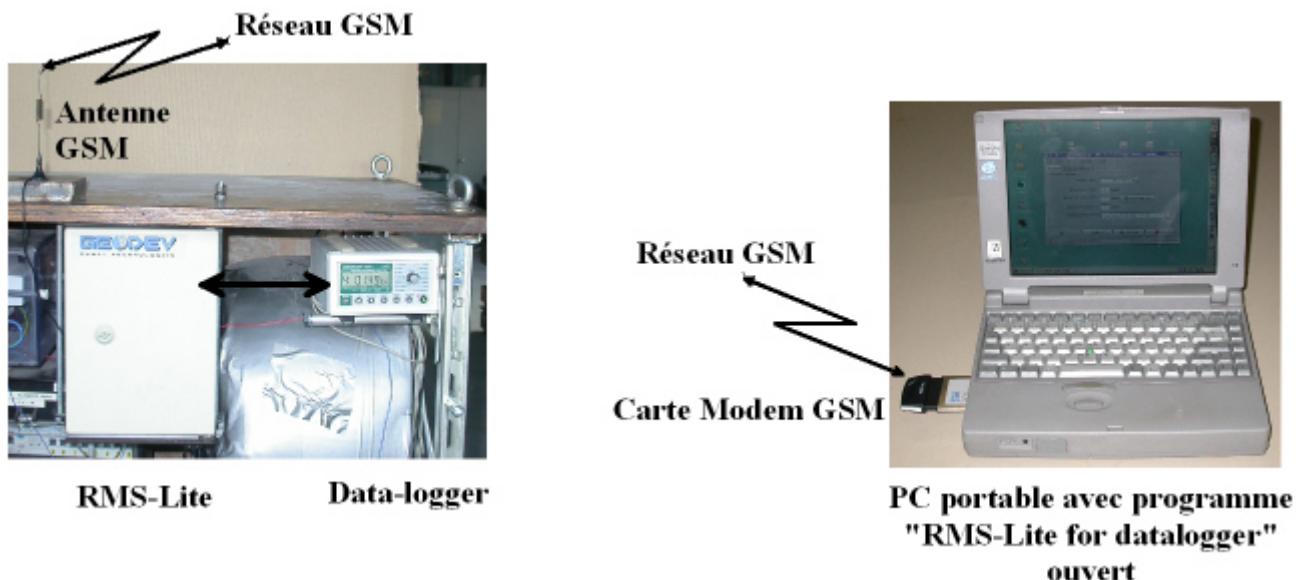


Figure 2: Télétransmission sur un ordinateur portable

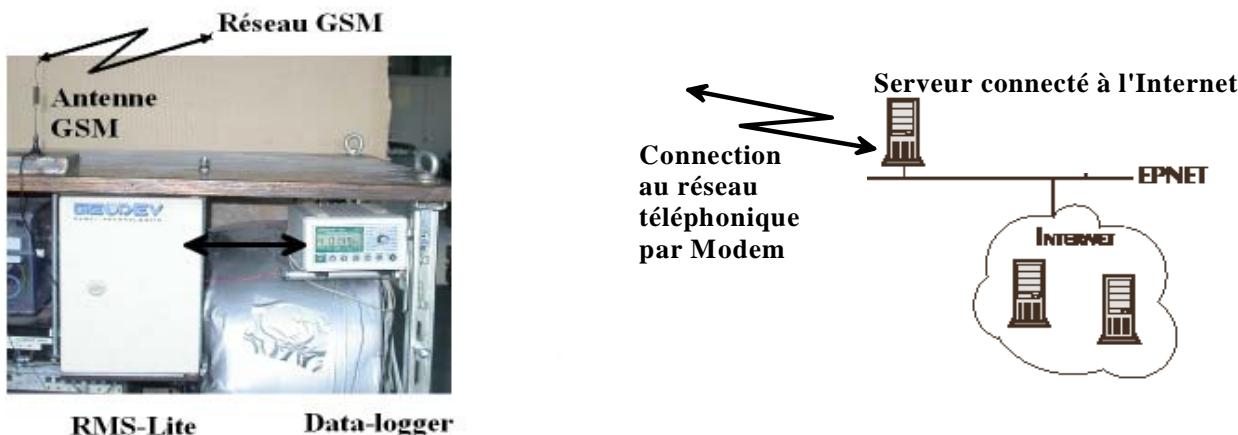


Figure 3: Télétransmission depuis un serveur relié à l'Internet

2.4 Tests du système

Des essais ont été effectués en laboratoire pour tester en vraie grandeur le système de télétransmission des données. Quelques problèmes sont apparus avec le système d'exploitation Windows XP qui est très rigoureux en matière de sécurité; dès lors le paramétrage des modems devient très difficile, ce qui perturbe l'établissement des communications. Ce problème a été résolu avec l'utilisation d'un système d'exploitation moins récent en attendant une nouvelle version du logiciel "RMS-lite for data-logger". La figure 4 montre des copies d'écran d'ordinateur avec la représentation graphique et les tableaux numériques obtenus pendant ces tests.

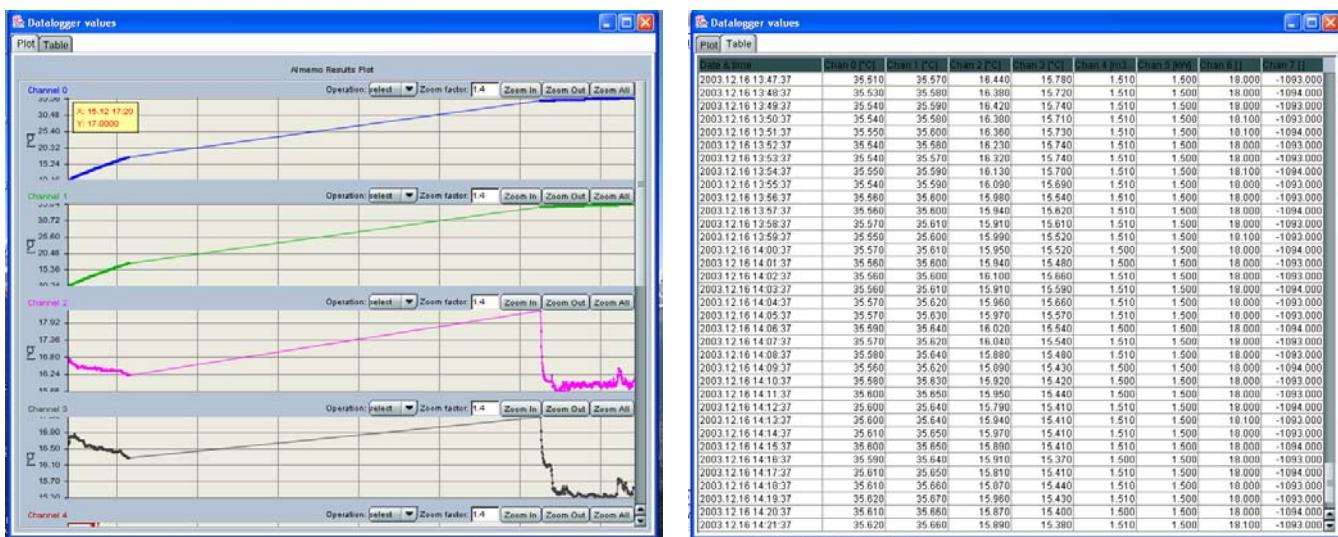


Figure 4: Exemples de résultats sous la forme de graphiques et de tableaux numériques

2.5 Perte de charge dans les sondes géothermique

La perte de charge dans les sondes géothermiques est un élément important à mesurer. Il permet le contrôle du bon fonctionnement de la sonde par la mesure de la différence de pression du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie de la sonde. La méthode retenue pour effectuer cette mesure a été de placer deux capteurs de pression sur les tubulures du module de chauffage à proximité immédiate des connexions extérieures (aller et retour du fluide caloporteur). Ces capteurs de pression sont également reliés au data-logger. Les deux capteurs de pression mis en place sont visibles sur la figure 5 (en bas et à gauche) près des tuyaux d'alimentation de la sonde.

La perte de charge dans la sonde géothermique est calculée par la différence de pression entre le capteur "aller" et le capteur "retour". Elle est déterminée pour les conditions du test, à savoir:

- le débit lors de l'essai
- le fluide utilisé
- la température obtenue

2.6 Accréditation

L'accréditation selon la norme EN 45'000 de l'essai de test de réponse pour sondes géothermiques est en cours de validation. Le mode opératoire détaillé et de procédures d'étalonnage des capteurs et du module très précis, avait été élaboré en 2002.

La demande officielle de soumettre cet essai à une procédure définitive pour l'accréditation du test de réponse thermique du terrain a été effectuée lors de la séance de direction du LMS du 4 décembre 2003 selon le manuel de qualité du LMS.

Monsieur le Dr Daniel Pahud, concepteur initial de cet appareil, a également été mis à contribution comme consultant externe pour des conseils concernant la méthode utilisée pour l'exploitation et l'analyse des résultats des tests de réponse. Le chapitre qui traite des méthodes de calculs et les références doit impérativement figurer avec le mode opératoire et les méthodes de calibrage.

Le document préparé à cette occasion figure dans l'annexe 2.

3 Commentaires et conclusion

La figure 5 montre le module de chauffage du LMS avec son système de télétransmission des données.



Figure 5 : Vue du module de chauffage du LMS-EPFL avec le système de télétransmission RMS-Lite

Deux tests de réponse thermique du terrain, avec cette nouvelle configuration du module de chauffage, ont été effectués à Lyon, sur le site du futur Musée des Confluences. Cet édifice sera construit sur l'emplacement actuel du boulodrome entre le Rhône et la Saône.

Ces essais ont été réalisés en janvier 2004 et se sont déroulés dans de très bonnes conditions. Les résultats obtenus avec le nouveau module de chauffage étaient de bonne qualité. Le rapport final sur ces essais est donné dans l'annexe 3 de ce document. Les résultats de ces tests seront encore publiés dans les revues spécialisées, qui sont encore à définir en collaboration avec l'OFEN.

Ce module pourrait également être exposé lors de manifestations ou de rendez-vous traitants du domaine de la géothermie. De plus, les résultats des futurs tests de réponse seront également disponibles auprès du public intéressé.

Afin de pallier aux inconvénients de la communication depuis les modems intégrés aux ordinateurs qui est sujette à des perturbations et à un paramétrage délicat, une prochaine amélioration du système devrait permettre de faire l'initialisation du Modem et du micro-processeur situés dans le module de chauffage directement à partir de l'Internet. Pour cela, il faudrait que le programme "RMS-Lite for data-logger" puisse être activé depuis n'importe quel ordinateur relié au Web, ce qui est de plus en plus aisé et faisable actuellement.

Gilbert Steinmann

Dr Lyesse Laloui

Ingénieur civil ETS, REG-A

Chef du projet

DIS-Projet Nr.	100 391	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
DIS-Contrat Nr.	150 488		

ANNEXE 1

Mode d'emploi du RMS-Lite

INSTALLATION & RESET RMS-lite

EPFL version

Procedure to install RMS-lite station:

1. Insert SIM card into GSM modem. Be careful at the correct orientation (fig.1);
2. Press black switch "RESET RTC" to reset internal timer, for at least 5 seconds (fig.2);
3. Connect data-logger;
4. Connect main power supply;
5. Connect backup battery. Be careful at the right polarity (fig.3);
6. Press orange switch "ON" to start up the station for at least 5 seconds (fig.2);
7. Wait until the red led is blinking (fig.4);
8. The station is ready to be configured, via remote software, after about 1 minute from start up.



fig.1

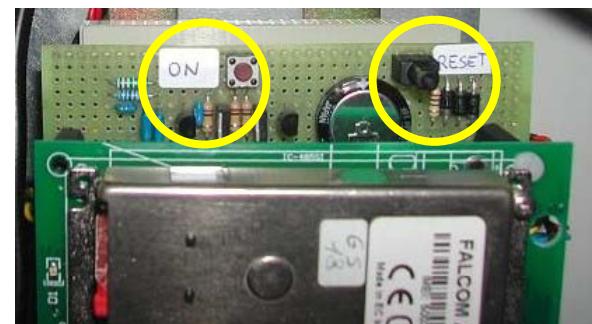


fig.2

Procedure to reset RMS-lite station:

- A. Disconnect backup battery (fig.3);
- B. Disconnect main power supply;
- C. Disconnect data-logger;
- D. Press black switch "RESET RTC" to reset internal timer, for at least 5 seconds (fig.2);
- E. Continue from previous point 3.

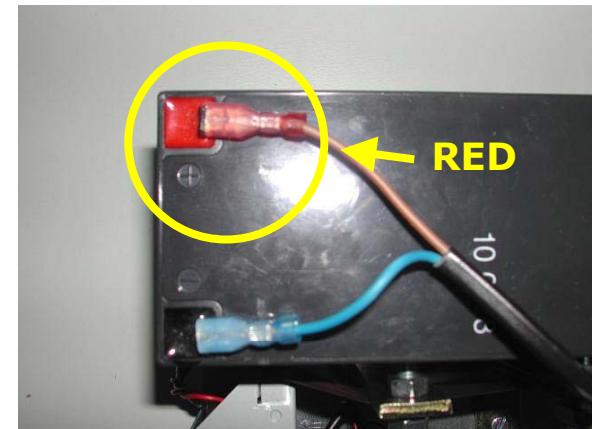


fig.3

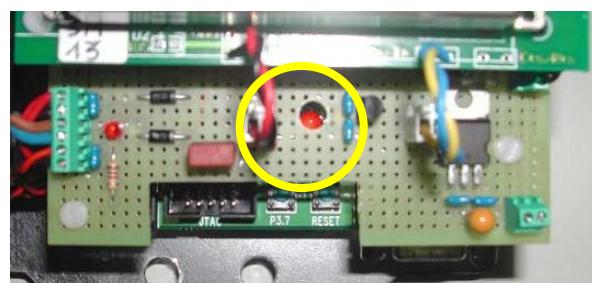


fig.4

DIS-Projet Nr.	100 391	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
DIS-Contrat Nr.	150 488		

ANNEXE 2

Analyse des résultats en vue de l'accréditation du test de réponse thermique

1 Analyse des résultats

Les mesures sur les sondes géothermiques datent des premières expériences réalisées en 1983 par G. Hellström et P. Eskilson (voir bibliographie) en Suède. En Suisse plusieurs expériences ont été réalisées dans ce domaine dans les années 90, notamment par l'EPFL (pièce échangeur soumis à de sollicitations thermo-mécaniques, tests de réponses de sondes géothermiques) et par le Dr D. Pahud (SUPSI) (test de sondes géothermiques à Peseux (1996), à l'aéroport de Zurich (1998) et au centre D4 de la SUVA (1999)).

La méthode de calcul est basée sur la théorie de la source de chaleur linéaire, décrite dans la littérature. Elle est effectuée à partir de l'analyse statistique par régression linéaire, qui suit la méthode développée en Suède, pour déterminer la conductivité thermique du terrain et la résistance thermique d'une sonde géothermique. Ce calcul est effectué en suivant les 3 étapes ci-dessous:

1.1 Calcul de la conductivité thermique λ

L'estimation de la conductivité thermique du terrain λ [W/(m·K)] est effectuée sur la base l'évaluation statistique qui prend en compte les paramètres suivants:

- la longueur de la sonde géothermique
- la puissance d'injection
- l'évolution de la température du fluide circulant dans la sonde géothermique (réponse du terrain).

La validation du test de réponse devra également être effectuée à partir des valeurs obtenues en cours d'essai afin de permettre la détection d'un fonctionnement anormal. Elle portera sur le contrôle des paramètres suivants:

- le débit qui doit être constant
- la puissance injectée qui doit également être constante
- l'évolution de la température ambiante au cours du temps

1.2 Calcul de la résistance thermique effective de la sonde R_b^*

L'estimation de la résistance thermique effective d'une sonde géothermique R_b^* [K/(W/m)] est calculée à partir de la puissance transférée par mètre de sonde, pour chaque degré d'écart entre le fluide et le terrain sur le pourtour de la sonde géothermique. Cette résistance est influencée principalement par les paramètres suivants:

- la longueur de la sonde
- la puissance d'injection
- la capacité thermique volumétrique du terrain
- le diamètre du forage
- la température initiale du terrain

Dès lors il est possible de calculer, si l'on connaît la puissance q de la pompe à chaleur, l'écart de température entre le terrain et la sonde géothermique par la relation:

$$q \text{ (W/m)} = \frac{\Delta T \text{ (K)}}{R_b^* \text{ [K/(W/m)]}}$$

En première approximation si l'on admet que la puissance d'extraction d'une PAC (pompe à chaleur) $q = 50 \text{ (W/m)}$ et que la valeur typique de la résistance thermique vaut environ $R_b^* \approx 0.1 \text{ [K/(W/m)]}$, la relation ci-dessus donne un écart de température de 5 (K) entre la sonde géothermique et le terrain.

1.3 Contrôle de la plausibilité des estimations

Ce contrôle consiste à recalculer la résistance thermique effective de la sonde géothermique $R_b^* \text{ [K/(W/m)]}$ au moyen du programme informatique EED (Earth Energy Designer) développé par l'université de Lund en Suède (adresse Internet: <http://www.buildingphysics.com/earth1.htm>).

Cette démarche permet une appréciation de la qualité des résultats obtenus à partir des données du test de réponse.

2 Résultats du test de réponse

Sur la base des mesures et de leur interprétation, le test de réponse de la sonde géothermique permettra de fournir les caractéristiques suivantes:

- **La température moyenne du terrain**

Cette valeur est obtenue lors de la première phase du test, avec une circulation du fluide sans chauffage, qui est poursuivie jusqu'à l'équilibre de la température.

- **La conductivité thermique du terrain λ**

La marge d'erreur de cette grandeur sera estimée à partir de l'incertitude des paramètres:

- de la sonde,
- des mesures,
- des transferts de chaleur du dispositif de chauffage en surface avec l'environnement ambiant

- **La résistance thermique effective de la sonde R_b^***

Cette grandeur est valable uniquement dans les conditions du test.

- **La perte de charge dans la sonde géothermique**

Elle est donnée pour les conditions du test, à savoir:

- le débit lors de l'essai
- le fluide utilisé
- la température obtenue.

3 Fixation des conditions du test

3.1 Sélection de la puissance

La sélection de la puissance **P** (W) doit être déterminée avant le déplacement sur le chantier, car elle peut nécessiter le changement de corps de chauffe dans la chaudière du module. Elle prend en compte:

- la puissance injectée optimale **q** (W/m) devrait être comprise entre 30 et 50 W/m lors du test de réponse
- la longueur **H** (m) de la sonde

Dès lors: $P(W) = q(W/m) \cdot H(m)$

Actuellement, sur le module de chauffage les puissances suivantes sont à disposition et combinables entre-elles:

- 3 fois 3 kW (puissance de 3, 6 ou 9 kW)
- 3 fois 1.6 kW (puissance de 1.6, 3.2 ou 4.8 kW)

3.2 Sélection du débit

Le débit devra être fixé en fonction de l'écart de température ΔT_{in-out} qu'il serait souhaitable d'obtenir entre l'entrée et la sortie de la sonde. Idéalement il devrait être compris entre 3 et 5 K. Il peut être estimé au moyen de la relation suivante:

$$P(kW) = 4.18 (kJ/l \cdot K) \cdot Q (l/s) \cdot \Delta T_{in-out} (K)$$

Avec: 4.18 chaleur spécifique de l'eau (kJ/lK)

3.3 Contrôle de l'augmentation de la température du fluide

Au cours de la phase de chauffage du test, la température du fluide circulant dans la sonde augmente. Une estimation de l'augmentation de la température est effectuée pour contrôler que la température du fluide reste dans des limites acceptables (typiquement à moins de 40 – 50°C). L'augmentation de la température du fluide ΔT est estimée avec les relations suivantes :

$$\Delta T (K) = [R_q + R_b] \cdot q$$

Dans laquelle:

ΔT	(K)	augmentation de la température du fluide au cours du test
R_q	[K/(W/m)]	Résistance thermique du terrain
R_b	[K/(W/m)]	Résistance thermique de la sonde géothermique
q	(W/m)	Puissance injectée

Dans la formule ci-dessus, la résistance R_q est déterminée par la formule :

$$R_q = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln 4 \cdot a \cdot t / r_b^2 - \gamma \right) \quad (\text{Thèse Eskilson})$$

Avec:

a	(m^2/s)	diffusivité thermique (ordre de grandeur: $10^{-6} m^2/s$)
t	(s)	durée de la phase de chauffage en seconde
r_b	(m)	rayon de la sonde
γ	(-)	constante d'Euler = 0.5772
λ	(W/m·K)	conductivité thermique du terrain (admise pour ce calcul égale à 2 W/m·K ou une valeur attendue pour le type de terrain traversé par la sonde)

La température finale moyenne du fluide sera alors égale à la température initiale du terrain augmentée de l'écart de température du fluide ΔT .

4 Bibliographie

D. Pahud, B. Matthey (2001), Comparison of the thermal performance double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ. *Energy and buildings* 33, pp. 503-507.

P. Eskilson, G. Hellström, B. Wanggren (1987), Response Test for heat with 25 Boreholes. Measured Data, Notes on heat transfer. 9.1-1987, Departments of buildings Technology and Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden, and Monitoring Centre for Energy Research, Royal Institute of technology, Stockholm, Sweden.

P. Eskilson (1987), Thermal analysis of heat extraction Boreholes (1987), These, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.

L. Laloui, M. Moreni, G. Steinmann, A. Fromentin, D. Pahud (1998), Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis des sollicitations thermo-mécaniques. Rapport Office fédéral de l'énergie. Programme géothermie, Berne, Suisse.

Bennet J. et al. 1987. Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder, notes on heat transfer 3-1987, Dept. of Building technology and mathematical physics, University of Lund.

Hellström G., Eskilson P. 1995. Earth Energy Designer, Preliminary version. Dept. of Mathematical Physics, University of Lund (S).

Matthey B., Pahud D. 1995. Recherche des paramètres permettant d'elever la température moyenne circulant dans les sondes en terre. 2^{ème} rapport intermédiaire, travaux effectués en 1995, mesure et test in situ.

Pahud D. 1999. Etude pilote pour les bâtiments du centre SUVA Lucerne. Analyse des réponses de 2 sondes tests et optimisation du stockage diffusif. Rapport intermédiaire, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse.

Pahud D., Fromentein A. et Hubbuch M. 1998. Response - Test für die Energiepfahl anlage Dock Midfield, Zürich Flughafen. Messung der Bodenleitfähigkeit in situ. Bundesamt für Energie, Bern, Switzerland.

DIS-Projet Nr.	100 391	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
DIS-Contrat Nr.	150 488		

ANNEXE 3

Musée de Confluences – Lyon Tests de réponse thermique du terrain

**Musée des Confluences - Lyon
Tests de réponse thermique du terrain**

Réalisation d'essais dans des sondes géothermiques
sur les terrains du futur musées des Confluences à Lyon

Mandat:
TECFOR Sàrl – Besançon
Via SERL (Société d'Équipement du Rhône et de Lyon)

Étude n° S5987

février 2004



Photomontage GEO novembre 2003

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	2
2 DOCUMENTS REÇUS	2
3 FORAGES ET SONDES GÉOTHERMIQUES	3
3.1 Réalisation des forages	3
3.2 Relevé des forages	3
3.3 Essais d'eau	4
3.4 Mise en place des sondes géothermiques	5
3.5 Caractéristiques de la sonde pilote géothermique	5
4 TESTS DE RÉPONSE	8
4.1 Appareillage	8
4.2 Calendrier des tests de réponse	9
4.3 Modalités des tests de réponse	9
5 DÉPOUILLEMENT DES RÉSULTATS	11
5.1 Résultats du test de réponse	11
5.2 Résumé des résultats	12

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1:	Relevé des forages
ANNEXE 2:	Rapport Dr Daniel Pahud

1 INTRODUCTION

La ville de Lyon va construire un nouveau musée des sciences et des sociétés: le Musée des Confluences, qui sera inauguré en 2007. Cet édifice sera réalisé à l'extrémité de la presqu'île qui sépare la Saône et le Rhône, occupée actuellement par le Boulodrome de Lyon.

Le Maître d'œuvre, la Société d'Équipement du Rhône et de Lyon (SERL) a envisagé pour ce bâtiment une solution de stockage de chaleur dans les géostructures. Une séance d'information et de travail a eu lieu sur ce sujet le 13 juin 2003 au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL (LMS) avec la participation du bureau ALTO - INGENERIE SA de Lille (F) mandaté pour l'étude ce projet et de l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) qui a une bonne expérience dans ce type de construction. Lors de cette réunion, le LMS a présenté la faisabilité de stockage thermique dans les géostructures et l'équipement de mesure dont il dispose.

A la suite de cette séance, le bureau ALTO INGENERIE SA a demandé au LMS de lui présenter une offre pour la réalisation de 2 tests de réponse thermique du terrain. Notre offre a été établie en octobre 2003 sur la base d'un rapport de géotechnique et d'un essai de pompage réalisé sur le site en 2002 et 2003.

Pour des questions administratives le maître d'œuvre (SERL) a attribué le mandat global de réalisation des sondes géothermiques et de leurs tests à l'entreprise TECFOR Sàrl de Besançon (F) le 5 décembre 2003. Cette entreprise a soumis au LMS les tests de réponse thermique du terrain.

2 DOCUMENTS REÇUS

Le bureau d'études ALTO INGENERIE SA nous a fait parvenir les documents suivants:

- Musée des Confluences, boulodrome de Lyon. Étude géotechnique complémentaire, rapport du 14 mars 2003, établi par EEG SIMECSOL. Ce rapport contient les résultats des essais pressiométriques, des essais de perméabilité et les relevés des forages.
- Musée des Confluences, boulodrome de Lyon. Essai de pompage, rapport du 23 septembre 2003, établi par ARCADIS, EEG SIMECSOL. Ce rapport donne les résultats d'un essai de pompage réalisé dans un puits de 450 mm de diamètre et de 22 m de profondeur.
- Offre globale TECFOR et LMS du 6 novembre 2003 pour la réalisation des sondes géothermiques et les tests de réponse.
- Lettre de commande de SERL du 5 décembre 2003.

3 FORAGES ET SONDES GÉOTHERMIQUES

3.1 Réalisation des forages

Les forages destinés à recevoir les sondes géothermiques ont été réalisés du 16 au 19 décembre 2003 par l'entreprise TECFOR Sàrl de Besançon (F).

Ces forages ont été carottés à sec (hormis l'eau présente dans le sol) et les matériaux extraits placés dans des caisses à carotte couvertes.

3.2 Relevé des forages

Les relevés de ces 2 forages ont été effectués par un ingénieur du LMS lors de la perforation pour le forage 1 et lors du premier test de réponse pour le forage 2. La description des sols rencontrés est donnée sur les coupes de forage qui figurent dans l'annexe 1 de ce rapport. Cette annexe contient également un plan de situation avec la position géographique et une documentation photographique des 2 forages. Le graphique ci-dessous (figure 1) résume les différentes couches rencontrées par ces forages.

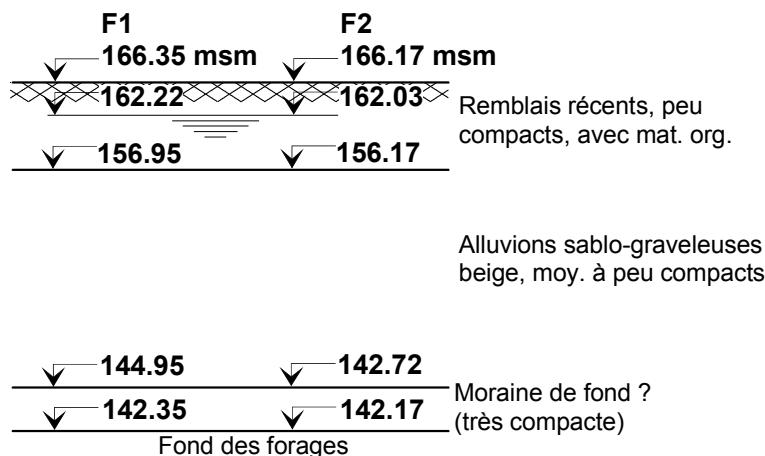


Figure 1: Résumé des coupes de forages

Il faut noter que les caractéristiques des sols étaient très semblables à celles décrites dans le rapport de SIMECSOL de mars 2003. Cependant en profondeur, ces 2 nouveaux forages ont mis en évidence une couche qui pourrait s'apparenter (au vu des difficultés rencontrées par les foreurs) à de la moraine de fond très compacte. Par contre, les 2 forages n'ont pas atteint le substratum molassique.

3.3 Essais d'eau

Des essais d'eau ont été effectués par le personnel de l'entreprise TECFOR Sàrl en cours de perforation. L'exploitation des résultats, comme convenu dans notre offre, a été réalisée par le LMS en suivant les recommandations de la norme SN 670'390a et en utilisant les formules suivantes:

$$k = \frac{Q}{F \cdot H} \quad (\text{m/s})$$

avec: k: coefficient perméabilité de Darcy (m/s)
 Q: débit injecté (constant) (m^3/s)
 H: charge hydraulique (m)
 F: facteur de forme de la cavité (m):

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \sqrt{\frac{L^2}{D^2} - 1}}{\ln\left(\frac{L}{D} + \sqrt{\frac{L^2}{D^2} - 1}\right)} \quad (\text{m})$$

avec: L: Longueur de la cavité testée (m)
 D: Diamètre du forage (0.178 m)

Le tableau suivant donne les résultats de ces essais.

Essai / Localisation	Débit injecté Q (m^3/s)	Charge hydraulique H (m)	Facteur de forme de la cavité F (m)	Coefficient de perméabilité k (m/s)
F1 de 6.0 à 8,0 m	$6.67 \cdot 10^{-3}$	4.13	4.02	$4.02 \cdot 10^{-4}$
F1 de 18.0 à 19.0 m	$2.50 \cdot 10^{-4}$	4.13	2.56	$2.36 \cdot 10^{-5}$
F2 de 12.0 à 13.0 m	$6.67 \cdot 10^{-3}$	4.14	2.56	$6.29 \cdot 10^{-4}$

Il faut noter que les valeurs de la perméabilité obtenues par ces essais complémentaires correspondent aux résultats des essais effectués lors des campagnes de forage précédentes (voir rapports de SIMECSOL).

3.4 *Mise en place des sondes géothermiques*

Une fois les forages terminés, les sondes géothermiques, pré-montées (figures 2 et 3) ont été poussées au fond des sondages. Des distanceurs ont été placés entre les tubes à intervalles réguliers (env. 3 m) lors de l'introduction de la sonde à l'intérieur du tubage. Le revêtement a été ensuite enlevé simultanément au remplissage de la cavité par un coulis de bentonite afin d'éviter tout risque d'éboulement des parois des forages.



Figure 2: Détail de la tête de la sonde géothermique

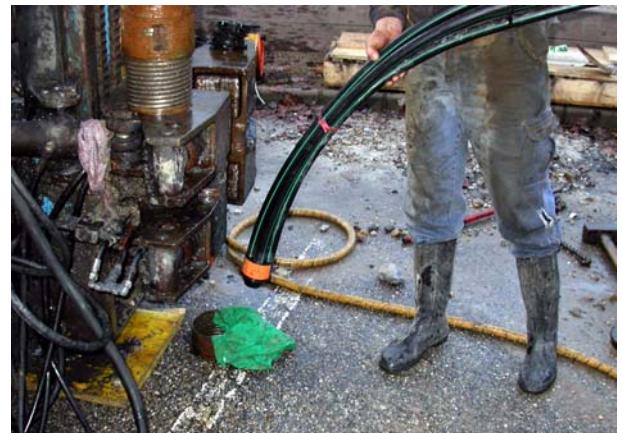


Figure 3: Début de la mise en place de la sonde géothermique

3.5 *Caractéristiques de la sonde pilote géothermique*

Les sondes géothermiques pilotes (forage et pose) mises en place par l'entreprise Tecfor Sàrl de Besançon (F) avaient les caractéristiques suivantes:

Caractéristique	Sonde géothermique n°1	Sonde géothermique n°1
Emplacement: (voir annexe 1)	<p>Parking devant le bâtiment du boulodrome de Lyon</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 166.35 msm • Date du forage: 16 et 17 décembre 2003 	<p>Passage entre deux terrain de jeux de boule, au sud-ouest du boulodrome</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altitude : 166.17 msm • Date du forage: 17 au 19 décembre 2003
Profondeur:	<p>Forage: 24 m</p> <p>La sonde géothermique a une longueur de 23.50 m</p>	<p>Forage: 24 m</p> <p>La sonde géothermique a une longueur de 23.50 m</p>
Forage:	<p>Le diamètre suivant a été utilisé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de 0m à 24 m : Ø 178 mm (revêtement) <p>Les matériaux extraits du forage ont été identifiés le 17 décembre 2003 par le LMS.</p>	<p>Le diamètre suivant a été utilisé :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de 0m à 24 m : Ø 178 mm (revêtement) <p>Les matériaux extraits du forage ont été identifiés le 12 janvier 2003 par le LMS.</p>
Type de sonde: (Figures 2 et 3)	<p>Sonde réalisée au moyen de 4 tubes en polyéthylène noir (PE) reliés en tête.</p> <ul style="list-style-type: none"> • diamètre extérieur : 32 mm • diamètre intérieur : 26 mm • épaisseur des parois : 3 mm <p>Les tubes de la sonde comportent de distanceurs placés à des intervalles réguliers destinés à espacer les tubes.</p>	<p>Sonde réalisée au moyen de 4 tubes en polyéthylène noir (PE) reliés en tête.</p> <ul style="list-style-type: none"> • diamètre extérieur : 32 mm • diamètre intérieur : 26 mm • épaisseur des parois : 3 mm <p>Les tubes de la sonde comportent de distanceurs placés à des intervalles réguliers destinés à espacer les tubes.</p>
Remplissage:	<p>Le remplissage de l'espace entre les tubes de la sonde géothermique a été effectué par un coulis de injecté depuis le haut.</p>	<p>Le remplissage de l'espace entre les tubes de la sonde géothermique a été effectué par un coulis de injecté depuis le haut.</p>
Protection:	<p>Tube carré (0.5 x 0.5 m) en béton avec couvercle</p>	<p>Tube carré (0.5 x 0.5 m) en béton avec couvercle</p>

La figure 4 montre le schéma des sondes géothermiques utilisées pour l'étude de faisabilité des géostructures du futur Musée des Confluences à Lyon. Elle complète la description donnée ci-dessus et montre les raccordements tels qu'ils ont été réalisés.

Schéma des sondes géothermiques pendant les tests de réponse thermique

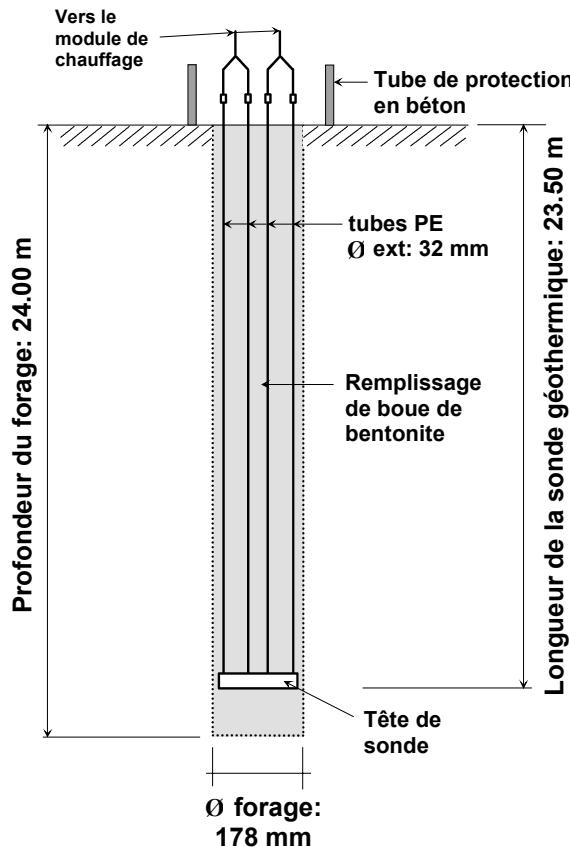


Figure 4 : Schéma des sondes géothermiques mises en place à Lyon

4 TESTS DE RÉPONSE

4.1 Appareillage

Les tests de réponse thermique du terrain ont été effectués par notre personnel et au moyen du module de chauffage que possède le laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS). Il est constitué entre autre d'une chaudière électrique de puissance modulable jusqu'à 9 kW, d'une pompe de circulation dont le débit peut atteindre 2.5 m³/h, d'un vase d'expansion de 50 l et de dégazeurs-mélangeurs (figure 5). Plusieurs vannes permettent d'isoler certains secteurs afin d'effectuer la purge du système ou de faire circuler de l'eau de refroidissement.



Figure 5 : Vue du module de chauffage utilisé pour le test de réponse dans sa nouvelle configuration (télétransmission des données, coffret central et capteurs de pression, en bas à gauche)

Un système complet de mesures et d'acquisition de données (Data-Logger) est intégré dans ce module de chauffage pour l'enregistrement des paramètres fournis par 8 capteurs :

- la température aller et retour du fluide caloporteur
- les températures extérieure et intérieure du module
- le débit du fluide caloporteur
- la consommation électrique
- la pressions aller et retour du fluide caloporteur

Pour ces tests de réponse thermique du terrain, nous avons utilisé un système de télétransmission en temps "pseudo-réel" des données par GSM, nouvellement implémenté sur le module de chauffage. Avec cette configuration, les valeurs enregistrées dans le Data-Logger sont transmises directement sur un serveur relié à Internet. Ce développement permet encore l'envoi d'une alarme sous la forme d'un SMS en cas de coupure d'électricité.

4.2 Calendrier des tests de réponse

Les tests de réponse thermique du terrain ont duré 15 jours, y compris les trajets Lausanne – Lyon, en respectant le calendrier suivant:

Lundi 12.01.04 1 ^{er} jour	Trajet Lausanne-Lyon, mise en place du module. Connexion électrique (SERL), branchement des capteurs et raccordement de la tuyauterie à la sonde géothermique (TECFOR). Remplissage et purge du module de chauffage avec de l'eau. Mise en route du test et de l'acquisition des données à environ à 15 h (sans chauffage). Fermeture du module.
Mardi 13.01.04 2 ^{ème} jour	Contrôle du fonctionnement et enclenchement du chauffage (10h20) à une puissance de 1.5 kW, avec circulation du fluide dans la sonde géothermique et poursuite de l'acquisition des mesures. Retour du personnel à Lausanne.
Dimanche 18.01.04 7 ^{ème} jour	Arrêt du test, suite à une fuite sur les raccords de la sonde géothermique
Lundi 19.01.04 8 ^{ème} jour	Trajet Lausanne-Lyon, arrêt du module de chauffage. Débranchement des capteurs et de l'alimentation électrique. Vidange du module, débranchement des raccords sur la sonde géothermique. Transport du module de chauffage sur le 2 ^{ème} site d'essai. Connexion électrique (LMS), branchement des capteurs et raccordement de la tuyauterie à la sonde géothermique (LMS). Remplissage et purge du module de chauffage avec de l'eau. Mise en route du test et de l'acquisition des données à environ à 15 h (sans chauffage). Fermeture du module.
Mardi 20.01.04 9 ^{ème} jour	Contrôle du fonctionnement et enclenchement du chauffage (10h20) à une puissance de 1.5 kW, avec circulation du fluide dans la sonde géothermique et poursuite de l'acquisition des mesures. Retour du personnel à Lausanne.
Vendredi 23.01.04 12 ^{ème} jour	Visite imprévue sur le site pour remettre en marche le système de télétransmission des données qui avait été arrêté à la suite d'une erreur de manipulation.
Lundi 26.01.04 15 ^{ème} jour	Trajet Lausanne-Lyon, arrêt du module de chauffage. Débranchement des capteurs et de l'alimentation électrique. Vidange du module, débranchement des raccords sur la sonde géothermique. Rapatriement du module de chauffage à Lausanne

4.3 Modalités des tests de réponse

L'acheminement du module de chauffage dans sa remorque de transport directement sur les emplacements d'essais a été facilité par la configuration du terrain (figures 3 et 4). Les opérations de protection contre les intempéries ont également été simplifiées par le fait qu'il n'a pas été dû être déchargé (figure 9).



Figure 6 : Vue générale du 1^{er} test de réponse sur le parking devant le boulodrome.



Figure 7 : Situation du 2^{ème} forage entre les jeux de boule extérieurs .

Le module de chauffage a été raccordé au moyen d'une rallonge branchée, par le service d'électricité de la ville de Lyon, à un tableau électrique situé à l'intérieur du bâtiment du boulodrome de Lyon.

Les tubes de la sonde thermique ont été connectés entre eux au moyen de deux raccords en Y. Ils ont été équipés chacun d'un manchon en PE par les soins de l'entreprise Tecfor et le LMS, puis reliés au module de chauffage par 2 tuyaux souples de 1 pouce, isolés thermiquement (figure 8).

Une isolation thermique soignée de tous les tuyaux extérieurs au module de chauffage et de la sonde géothermique a encore été réalisée ou complétée au moyen de bandages de mousse isolante disposés autour des tubes sur deux épaisseurs.



Figure 8: Détail de l'isolation des tuyaux par des bandes en mousse.



Figure 9: Module de chauffage fermé, protégé par la bâche de la remorque, lors des tests de réponse thermique.

Il faut encore noter que les mesures n'ont concerné que la sonde thermique elle-même, sans mesures de la température du terrain par une autre sonde.

Les dates d'exécution de ces tests ont été choisies d'un commun accord avec le bureau ALTO INGENIERIE et le SERL en fonction de nos disponibilités et de l'avancement des travaux de forage.

5 DÉPOUILLEMENT DES RÉSULTATS

Le dépouillement des mesures a été effectué au LMS - EPFL, à Lausanne, en collaboration avec le Dr Daniel Pahud du SUPSI à Canobbio (TI). Les résultats détaillés de l'interprétation de ces tests de réponse thermique du terrain, ainsi que les graphiques réalisés à partir des mesures sont donnés dans l'annexe 2 (Rapport Dr. Daniel Pahud).

5.1 Résultats du test de réponse

Les valeurs enregistrées sur place par le Data-Logger ont été utilisées pour effectuer l'interprétation des résultats du test de réponse.

Cette interprétation comprend notamment une analyse de l'évolution de la température du fluide par la méthode dite de la source linéaire de chaleur. Au final les résultats suivants peuvent être calculés :

- la température moyenne du terrain le long de la sonde avant le chauffage
- la résistance thermique de la sonde.
- la conductivité thermique du terrain le long de la sonde

Les calculs et graphiques, donnés de manière détaillées dans l'annexe 2 (rapport Dr Daniel Pahud), ont été établis en prenant en compte les caractéristiques moyennes suivantes pour les sondes géothermiques:

Profondeur	23.50 m
Diamètre moyen	0.178 m
Type de sonde	4 tubes reliés en tête
Tube	Polyéthylène (PE) noir
Diamètre externe tube ø	32 mm
Épaisseur paroi tube	3 mm
Entre axe des distanceurs (deux tubes opposés)	8 cm
Matériau de remplissage	Coulis de Bentonite
Fluide caloporteur lors du test	eau
Débit moyen lors du test	Sonde 1: 490 litre/h - Sonde 2: 380 litre/h
Température maximale obtenue	Sonde 1: 30.0 (°C) - Sonde 2: 32.5 (°C)

Pour mémoire, les sondes géothermiques réalisées au moyen de 4 tubes reliés en tête ont été étudiées comme des sondes en double - U classiques.

5.2 Résumé des résultats

Les résultats principaux de ce test de réponse sont résumés ci-après :

	Sonde 1	Sonde 2
Température moyenne initiale de la couche de terrain	13.9 ± 0.5 °C	13.1 ± 0.5 °C
Conductibilité thermique moyenne de la couche de terrain	2.7 ± 0.2 W/(mK)	2.4 ± 0.2 W/(mK)
Résistance thermique effective de la sonde (dans les conditions du test)	0.08 ± 0.02 K/(W/m)	0.11 ± 0.5 K/(W/m)

Les valeurs ci-dessus sont valables pour les conditions du test en régime d'écoulement non laminaire, et avec des débits de: 490 litre/heure (sonde 1)
380 litre/heure (sonde 2)

Enfin, pour les besoins du dimensionnement du système avec pieux échangeurs, il est recommandé de se baser sur la valeur la plus pessimiste de la conductibilité thermique. Les valeurs recommandées pour le dimensionnement sont donc :

Conductibilité thermique moyenne du terrain pour le dimensionnement : **2.2 W/(mK)**

L'ingénieur chargé de l'étude



G. Steinmann

Le chef du projet



Dr L. Laloui

Annexes: Mentionnées

Copies: Dr. Harald L. Gorhan, Neudoerfli 10, CH-5600 Lenzburg
Dr Daniel Pahud, LEEE – SUPSI Canobbio (TI)

Musée des Confluences - Lyon Tests de réponse thermique du terrain

Réalisation d'essais dans des sondes géothermiques
sur les terrains du futur musées des Confluences à Lyon

Étude n° S5987

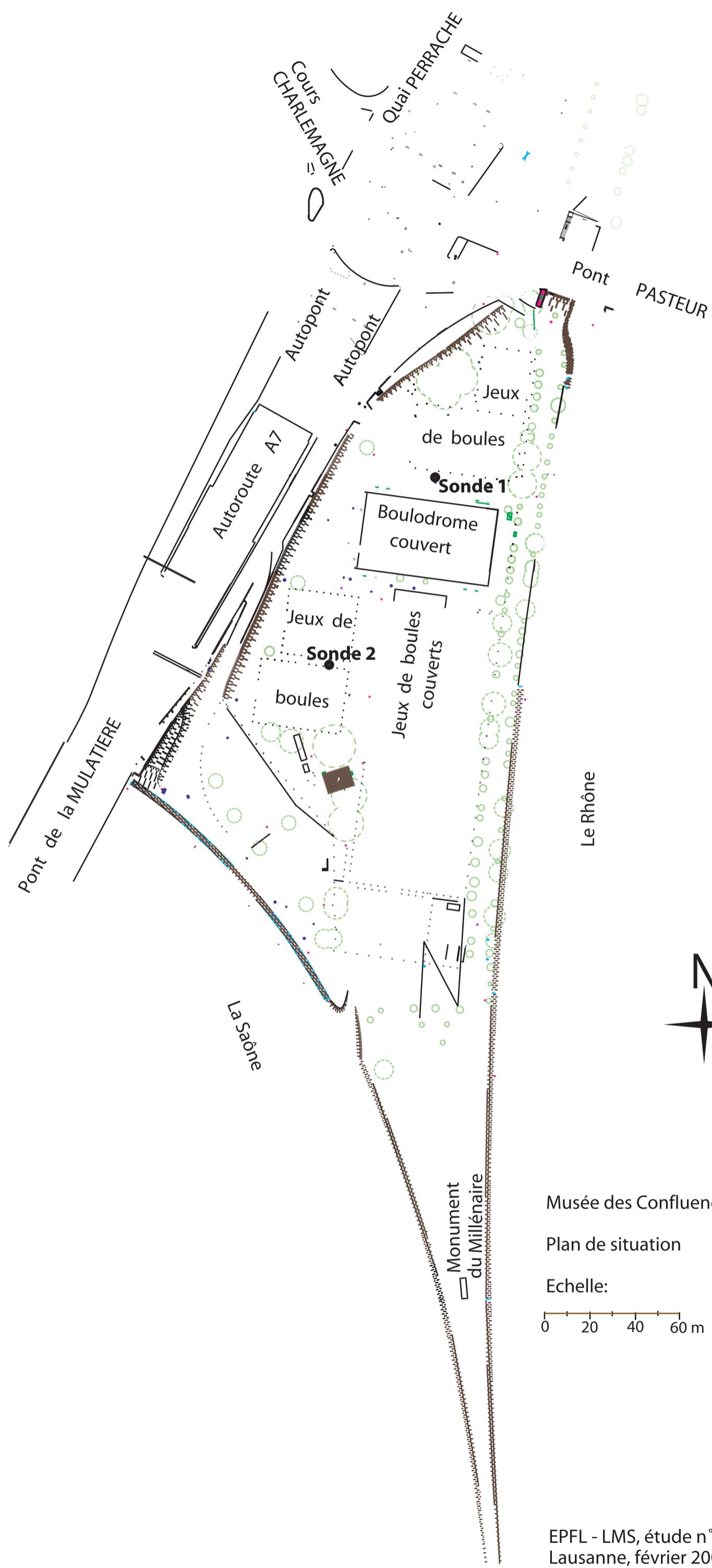
février 2004

ANNEXE 1

Relevé des forages

Contenu:

- Plan de situation
- Coupe des forages
- Photographies des caisses de carottes



Musée des Confluences - LYON

Plan de situation

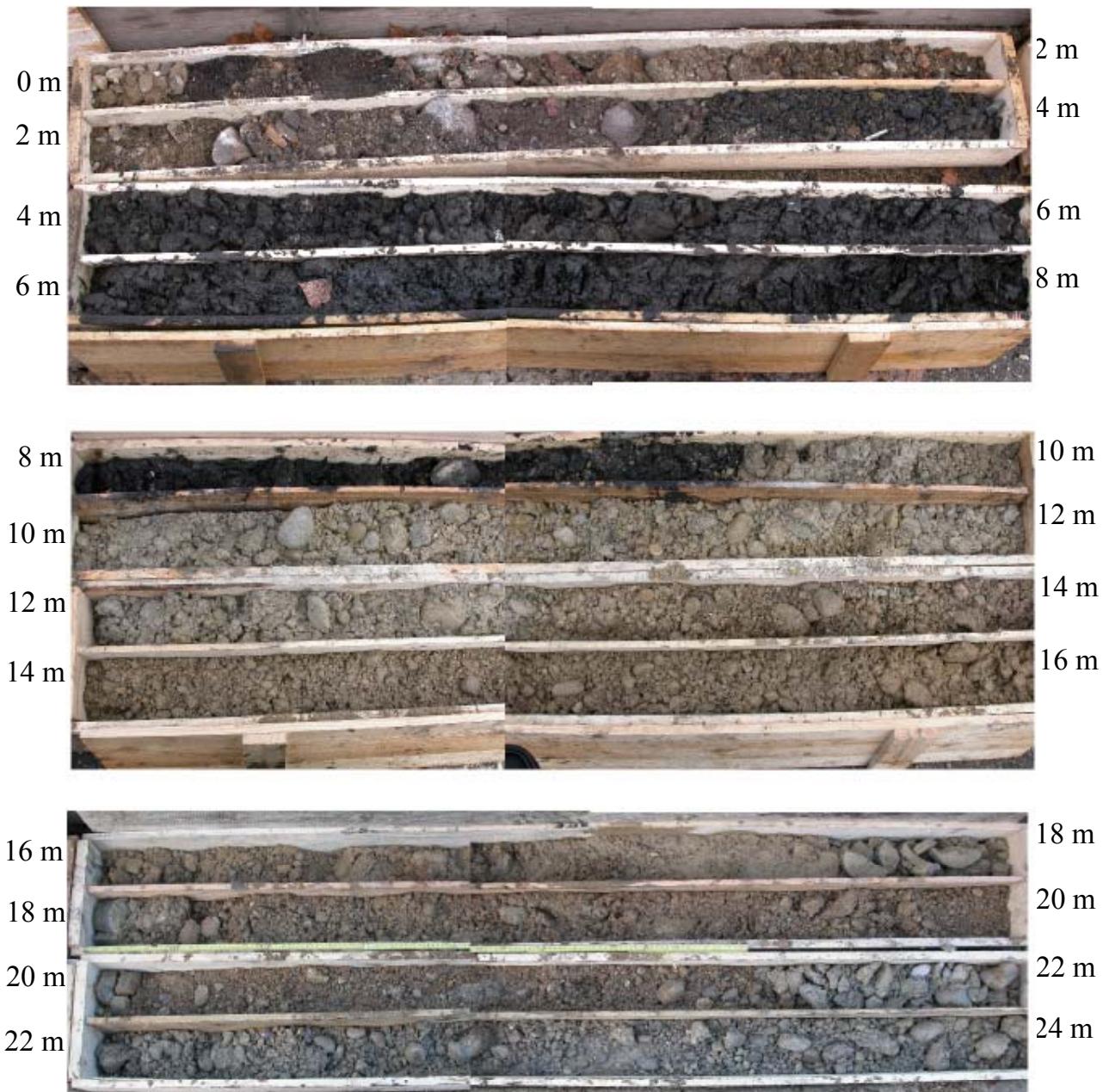
Echelle:

0 20 40 60 m

Musée des Confluences - Lyon

Tests de réponse thermique du terrain

Forage 1



Musée des Confluences - Lyon

Tests de réponse thermique du terrain

Forage 2





ENAC – ENVIRONNEMENT NATUREL ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

**Musée des Confluences - Lyon
Tests de réponse thermique du terrain**

Réalisation d'essais dans des sondes géothermiques
sur les terrains du futur musées des Confluences à Lyon

Étude n° S5987

février 2004

ANNEXE 2

Rapport Dr Daniel Pahud

**INSTITUT DES INFRASTRUCTURES, DES RESSOURCES ET DE L'ENVIRONNEMENT
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLS**

OBJET

Test de réponse – Musée des Confluences – Lyon

TITRE

**Test de réponse des 2 sondes géothermiques
de 24 m pour le Musée des Confluences à
Lyon**

REDACTION RAPPORT

Dr. Daniel Pahud, SUPSI – DACD – LEEE

daniel.pahud@supsi.ch

LUOGO E DATA

Lugano/Trevano, 4 février 2004

Test de réponse des 2 sondes géothermiques de 24 m pour le Musée des Confluences à Lyon

Caractéristiques des sondes géothermiques

	Sonde géothermique 1	Sonde géothermique 2
Longueur forage	24 m	24 m
Diamètre forage	0.178 m	0.178 m
Longueur sonde	23.5 m	23.5 m
Type de sonde	Double – U	Double – U
Tube	polyéthylène	polyéthylène
Diamètre externe tube ø	32 mm	32 mm
Entre axe de deux tubes opposés (« distanceur »)	8 cm	8 cm
Epaisseur paroi tube	3 mm	3 mm
Matériau de remplissage	Boue de bentonite	Boue de bentonite
Fluide caloporteur lors du test	eau	eau
Débit lors du test	490 litre/h	380 litre/h

Résumé des résultats des tests de réponse

	Sonde 1	Sonde 2
Température moyenne initiale de la couche de terrain	13.9 ± 0.5 °C	13.1 ± 0.5 °C
Conductibilité thermique moyenne de la couche de terrain	2.7 ± 0.2 W/(mK)	2.4 ± 0.2 W/(mK)
Résistance thermique effective de la sonde (dans les conditions du test)	0.08 ± 0.02 K/(W/m)	0.11 ± 0.5 K/(W/m)

Pour un terrain de composition similaire et saturé en eau, une conductibilité thermique d'environ 2 W/(mK) est attendue. La résistance thermique effective de la sonde, calculée avec les caractéristiques des sondes, se situe entre 0.11 et 0.16 K/(W/m) pour un diamètre de forage compris entre 0.14 et 0.18 m.

Les tests de réponse ont livré des valeurs plus élevées de la conductibilité thermique et plus basse de la résistance thermique effective. Ceci est une indication que les transferts de chaleur sont en réalité plus importants que les transferts prédicts par le modèle de la source linéaire de chaleur. Une raison possible est la faible longueur des sondes, dont les effets de bords (haut et bas) ne sont plus négligeables. Un autre effet pourrait être les transferts de chaleur supplémentaires induits par convection naturelle et/ou forcée de l'eau souterraine.

A l'endroit de la sonde 1, les transferts de chaleur sont encore plus importants que dans la zone de la sonde 2. Ceci pourrait être l'indication d'un mouvement régional de l'eau souterraine plus important dans cette zone, avec une arrivée d'eau à température légèrement plus grande que celle du terrain (la température initiale du terrain est plus élevée que dans la zone 2). Une interprétation de l'hydrogéologie locale devrait permettre de valider ces constatations.

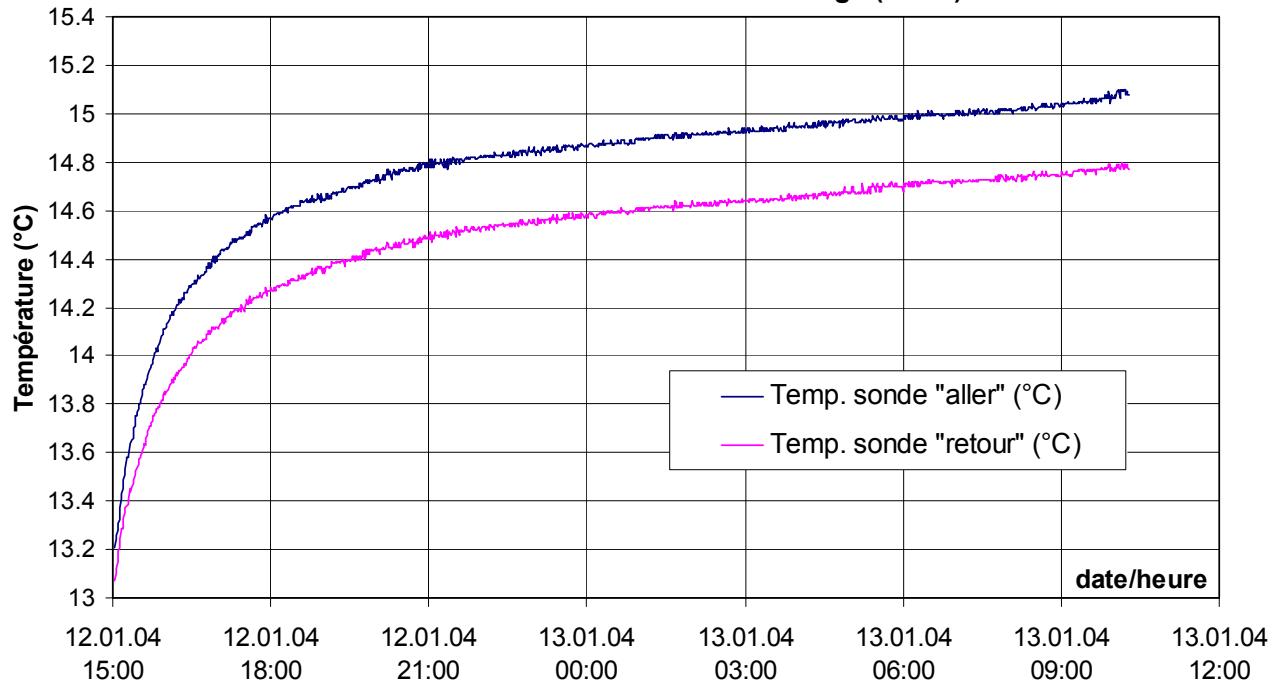
Pour les besoins du dimensionnement du système avec pieux échangeurs, il est recommandé de se baser sur la valeur la plus pessimiste de la conductibilité thermique. Les valeurs recommandées pour le dimensionnement sont donc :

Conductibilité thermique moyenne du terrain pour le dimensionnement : **2.2 W/(mK)**

Température initiale du terrain : **13.5 ± 0.5 °C**

Température initiale moyenne du terrain pour la zone 1

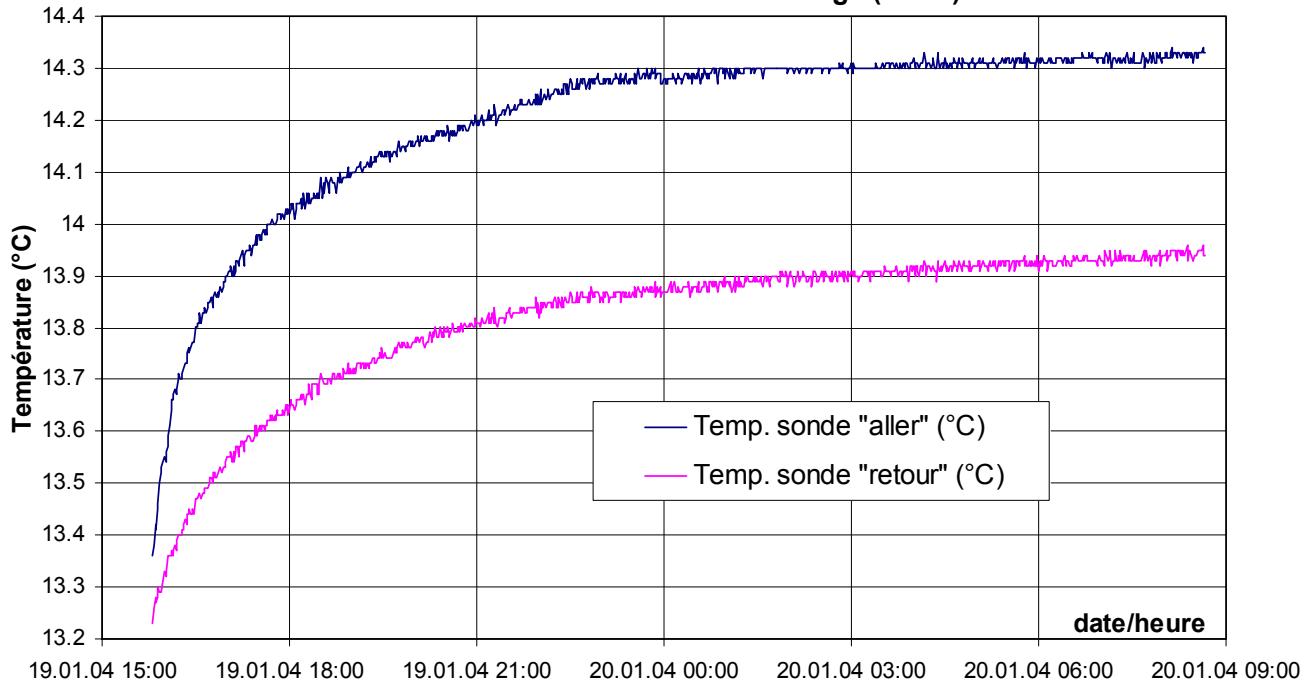
Musée des Confluences - Lyon
Test 1: température initiale du terrain, mesurée par le fluide
circulant dans la sonde sans chauffage (détail)



	Mesure /calcul	Erreurs param	Erreurs Tterrain	
Température initiale du terrain				
avec puissance pompe au temps t	14.9 18	0.2	°C	0.2
puissance thermique pompe	130	40	W	0.3
R _b (résistance sonde 1)	0.08	0.05	K/(W/m)	0.3
r _b (rayon sonde 1)	0.075	0.02	m	0.1
lambda terrain	2.7	0.2	W/(mK)	0.0
RoCp terrain	2400000		J/(m ³ K)	
Rterrain = Rpulse(temps)	0.099		K/(W/m)	
Tterrain sans effet chauffage pompe	13.9		0.5	°C

Température initiale moyenne du terrain pour la zone 2

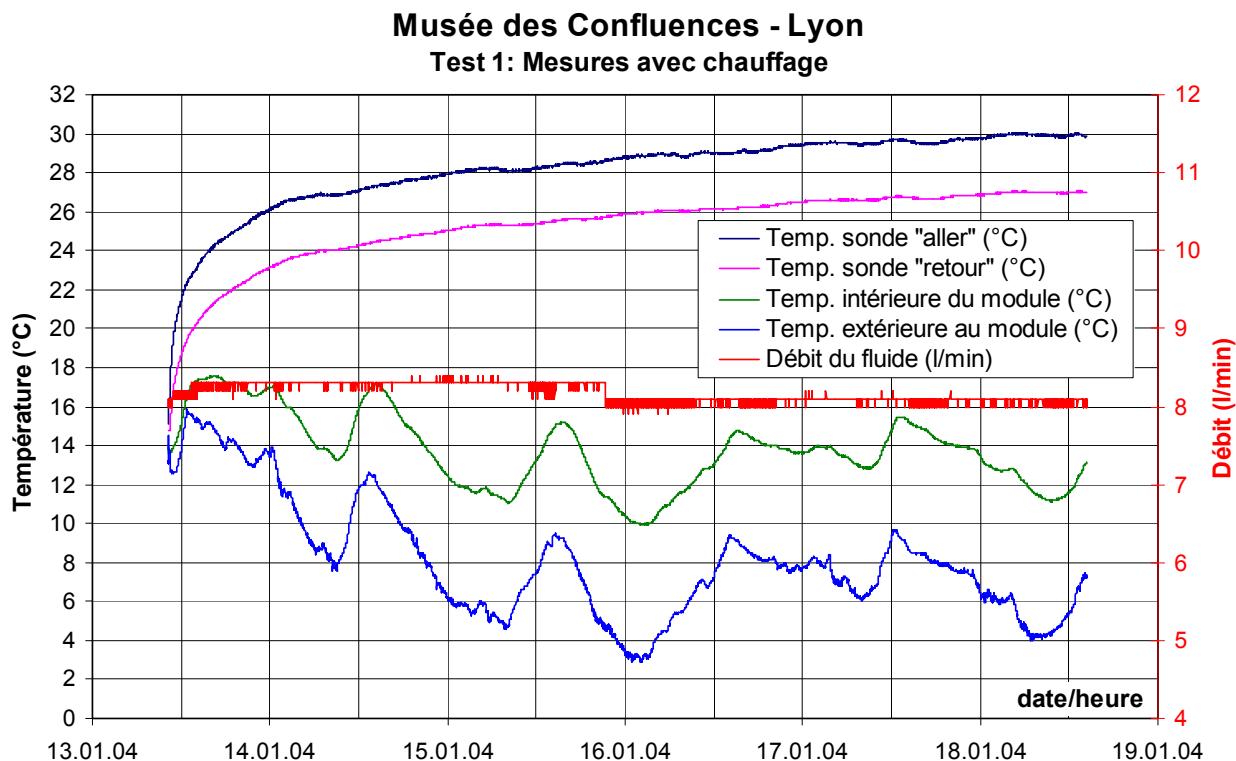
Musée des Confluences - Lyon
Test 2: température initiale du terrain, mesurée par le fluide
circulant dans la sonde sans chauffage (détail)



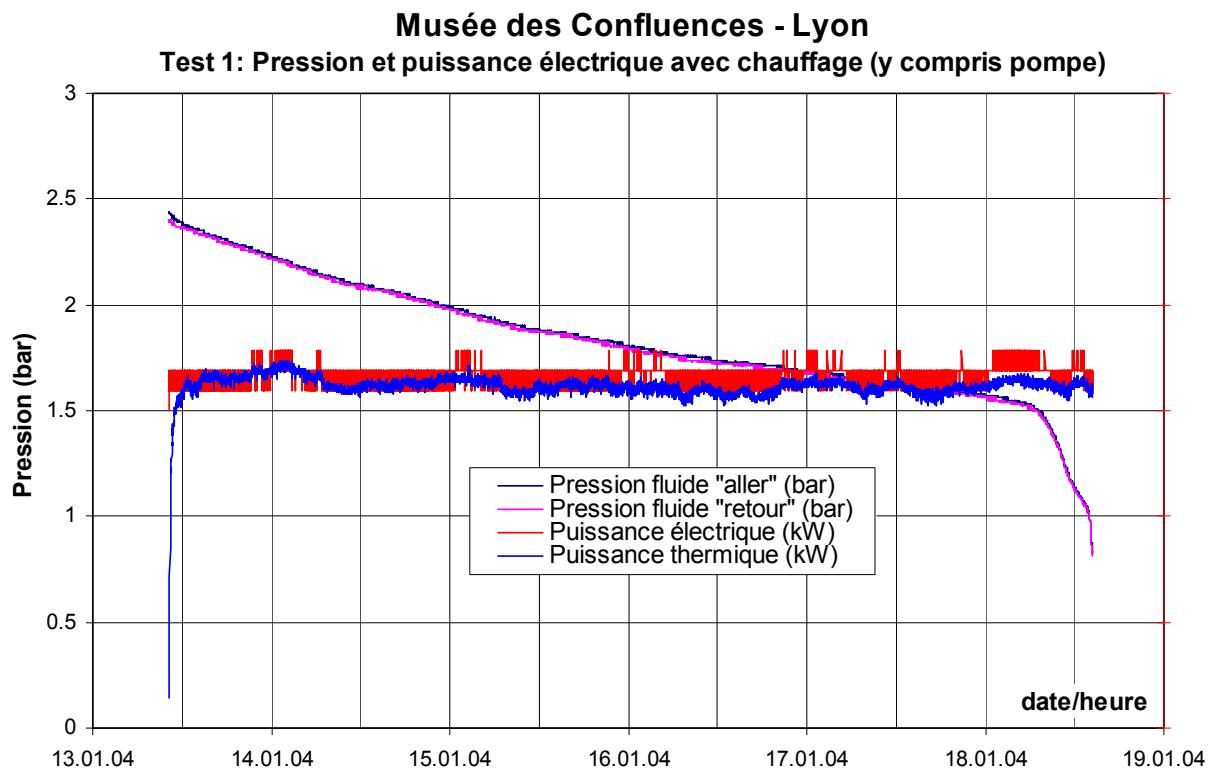
	Mesure /calcul	Erreurs param	Erreurs Tterrain
Température initiale du terrain			
avec puissance pompe au temps t	14.1 11	0.2	°C heures
puissance thermique pompe	130	40	W
R _b (résistance sonde 2)	0.09	0.05	K/(W/m)
r _b (rayon sonde 2)	0.075	0.02	m
lambda terrain	2.4	0.2	W/(mK)
R _{oCp} terrain	2400000		J/(m ³ K)
R _{terrain} = R _{pulse} (temps)	0.092		K/(W/m)
Tterrain sans effet chauffage pompe	13.1	°C	0.5

Test de réponse sonde 1

Mesures de température et de débit

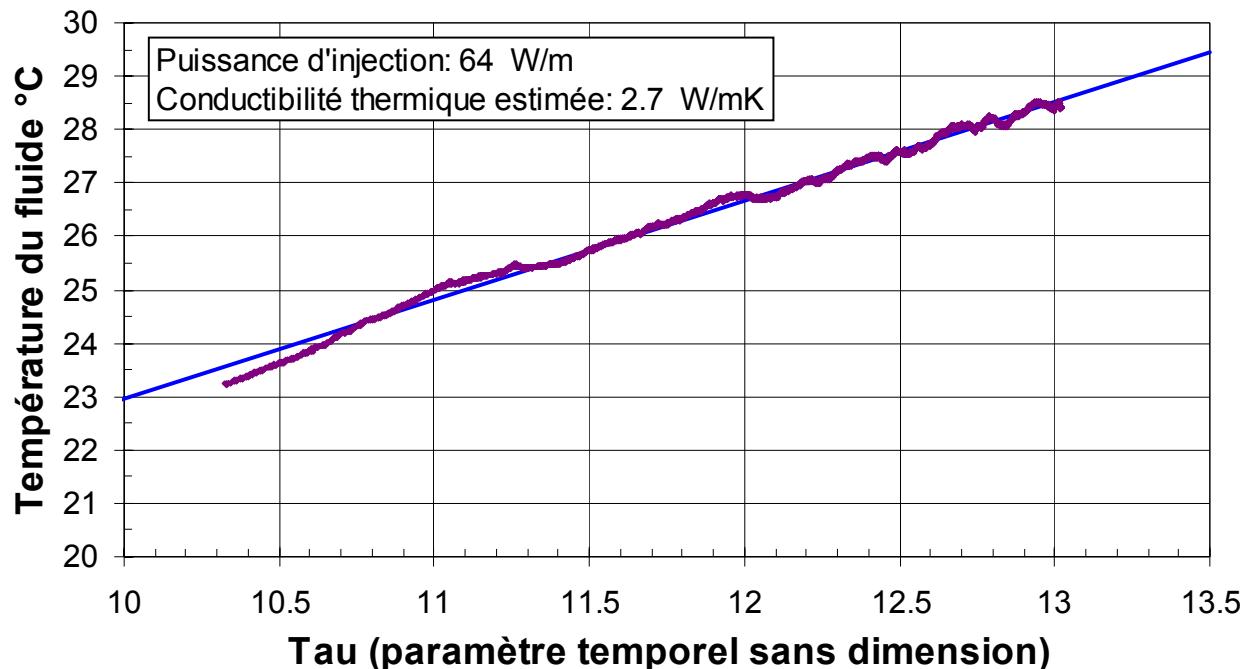


Mesures de pression et de puissance

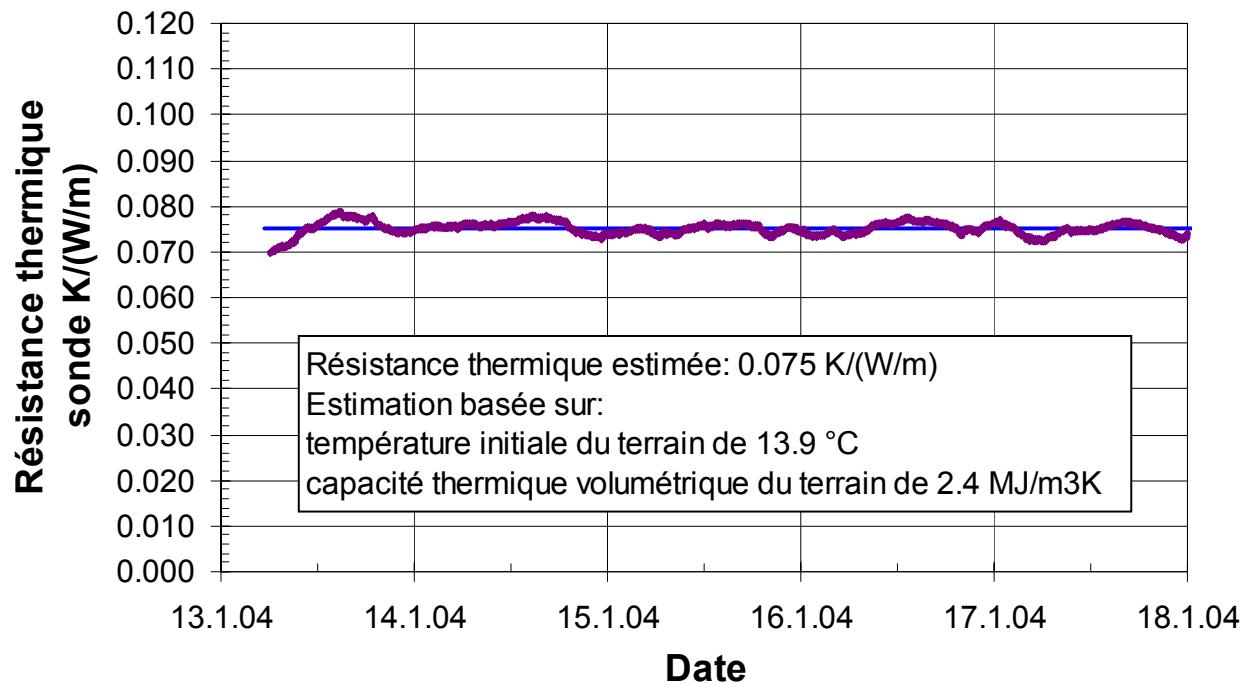


Le test de réponse 1 est évalué avec la puissance électrique et un facteur de perte de l'équipement en surface de 5(W/K) entre la température moyenne du fluide et la température de l'air extérieur.

Musée des Confluences - Lyon, test 1



Musée des Confluences - Lyon, test 1



Les erreurs sur l'estimation de la conductibilité thermique du terrain et de la résistance thermique effective de la sonde sont évaluées en considérant les incertitudes sur les grandeurs suivantes :

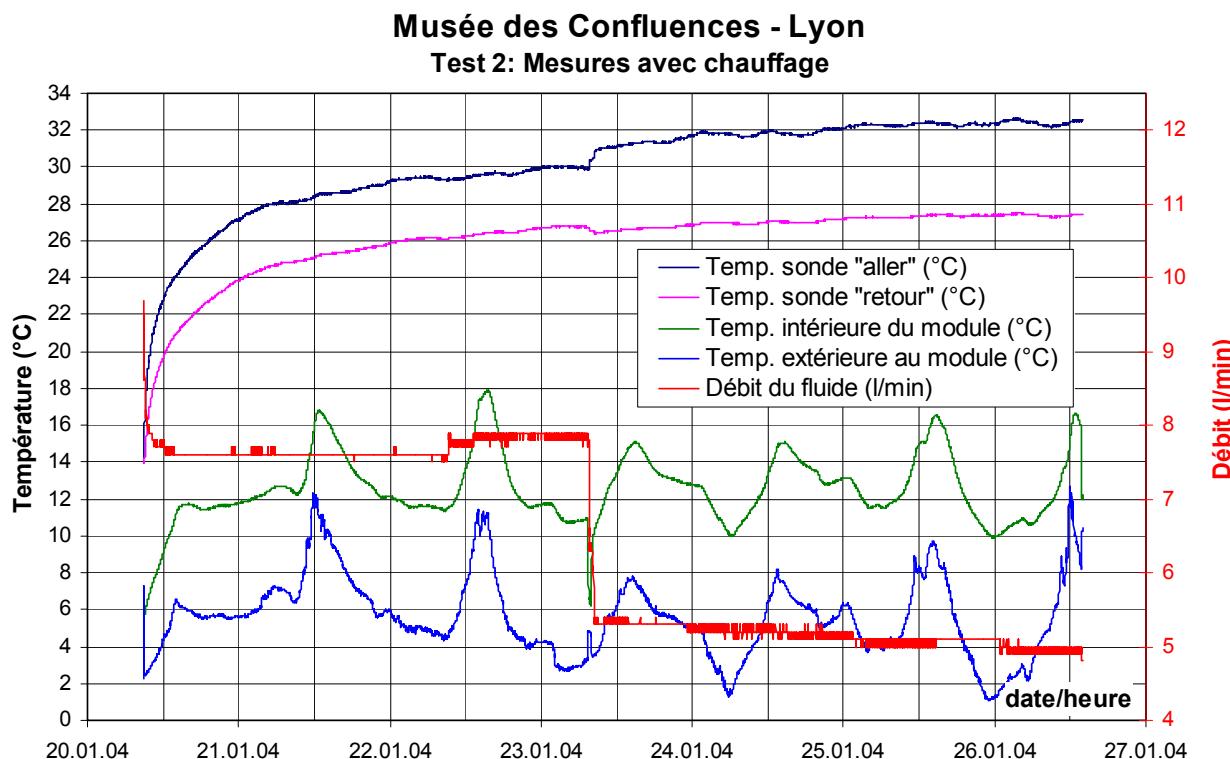
- puissance thermique effectivement injectée dans le terrain
- facteur de perte thermique de l'équipement en surface
- longueur de la sonde
- rayon du forage
- température initiale du terrain
- capacité thermique volumétrique du terrain

	Mesure/donnée	Erreur	Erreur Lambda W/(mK)	Erreur Rb K/(W/m)
Puissance thermique injectée:	1.57 kW	-5%	-0.14	0.005
Pertes thermiques équipement:	5 W/K	5	-0.15	0.007
Longueur sonde 1:	24.5 m	0.5	-0.05	0.002
Rayon forage 1:	0.075 m	0.02	0	0.014
Température initiale terrain:	13.9 °C	0.5	0	-0.008
Capacité therm. volumétrique terrain:	2.4 MJ/m3K	0.5	0	0.006

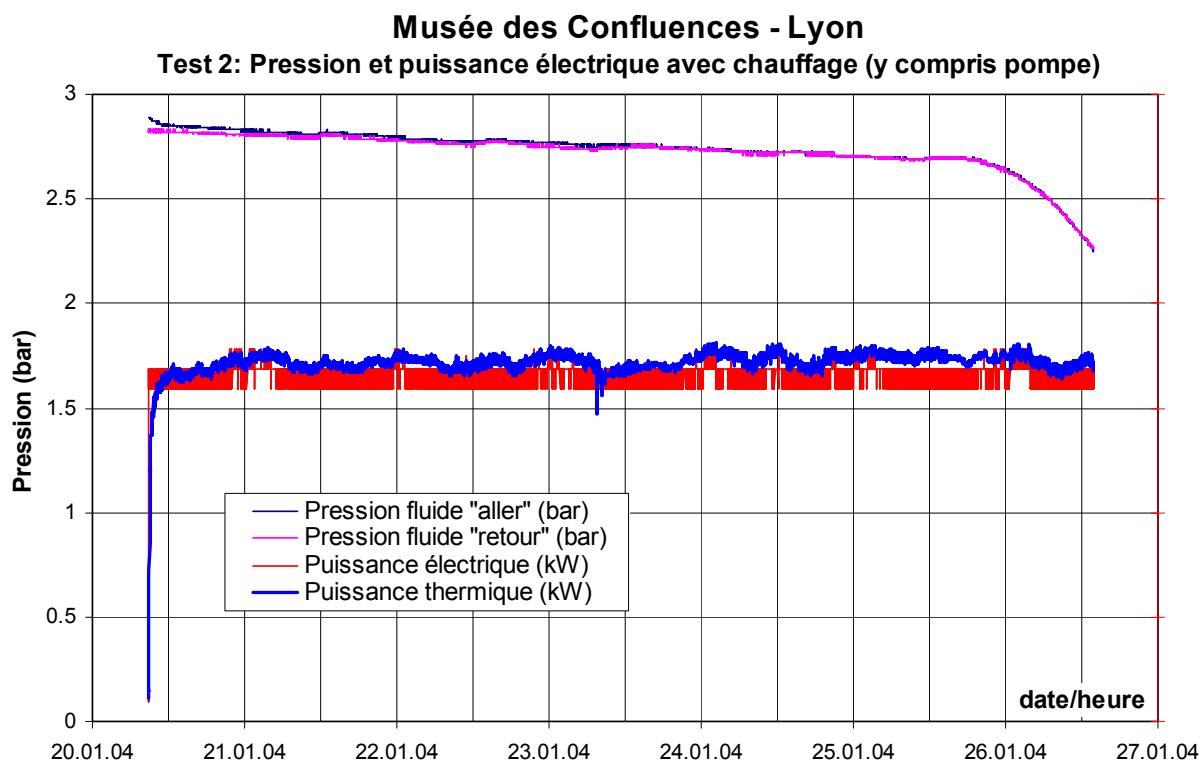
	Estimation	erreur
Lambda (conductibilité thermique terrain)	2.7 W/(mK)	0.2 W/(mK)
Rb (résistance thermique effective de la sonde)	0.075 K/(W/m)	0.02 K/(W/m)

Test de réponse sonde 2

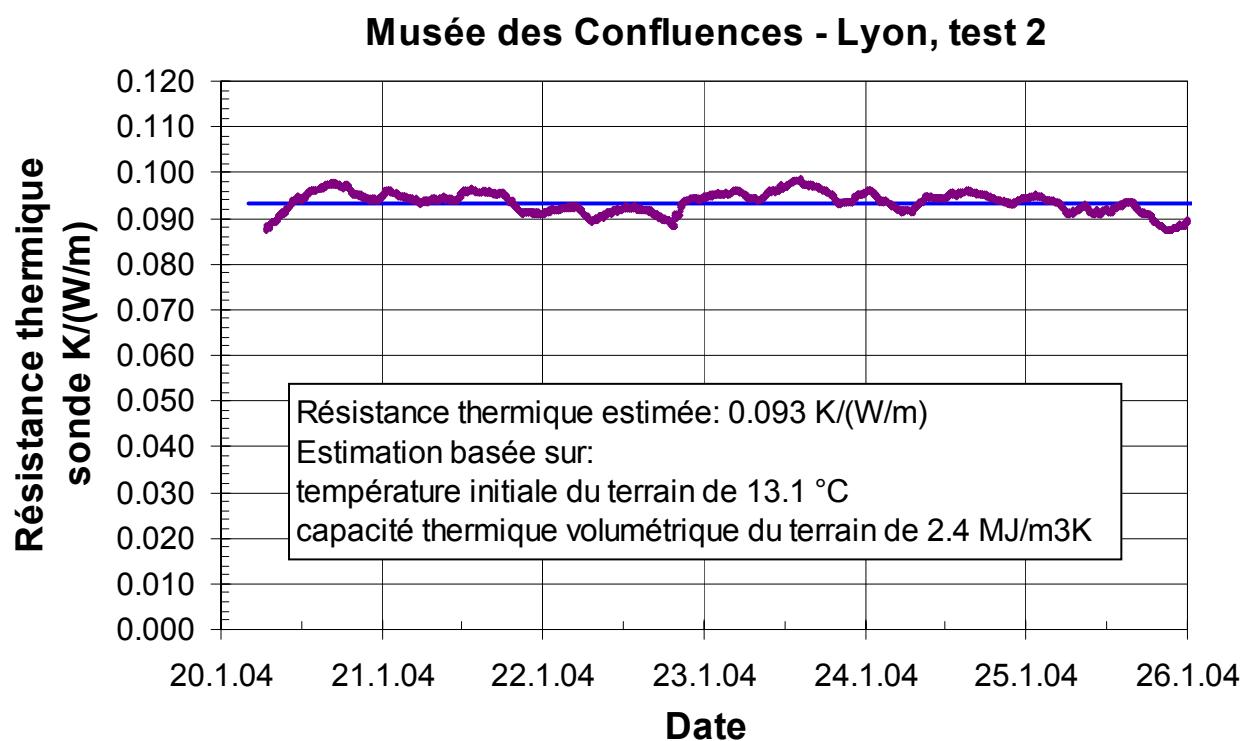
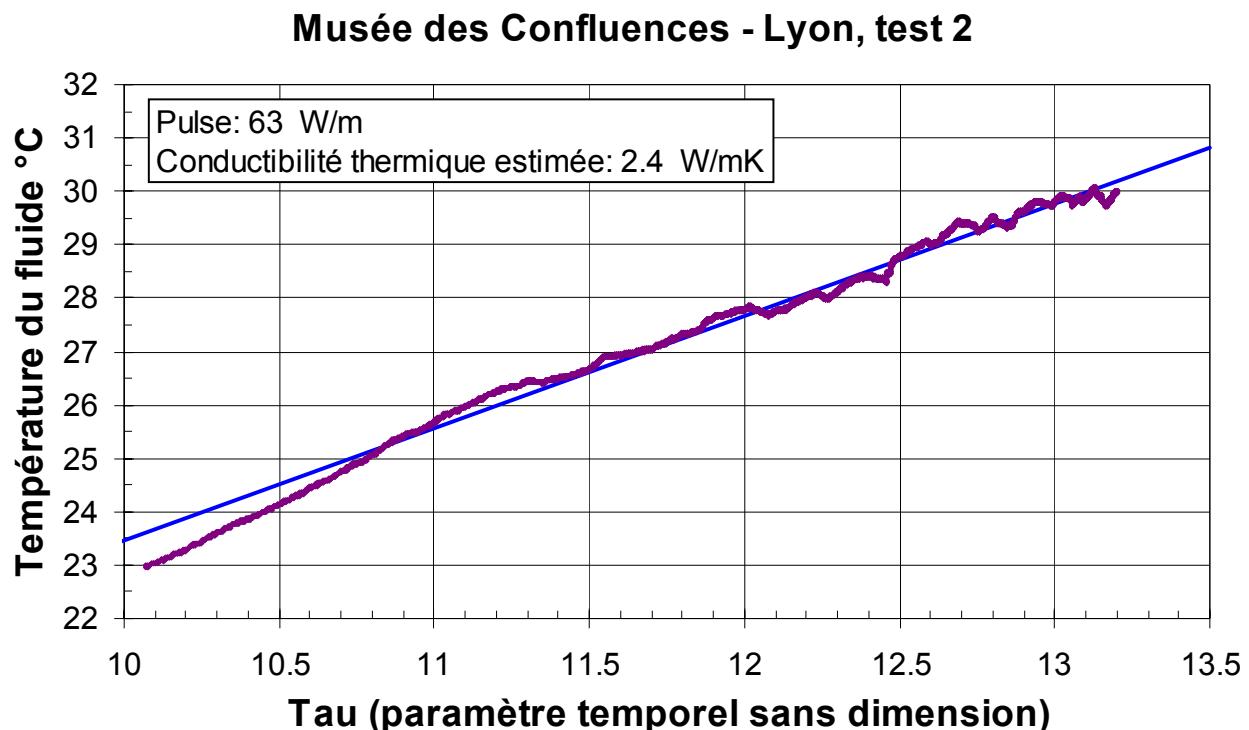
Mesures de température et de débit



Mesures de pression et de puissance



Le test de réponse 2 est évalué avec la puissance électrique et un facteur de perte de l'équipement en surface de 5(W/K) entre la température moyenne du fluide et la température de l'air extérieur.



Les erreurs sur l'estimation de la conductibilité thermique du terrain et de la résistance thermique effective de la sonde sont évaluées en considérant les incertitudes sur les grandeurs suivantes :

- puissance thermique effectivement injectée dans le terrain
- facteur de perte thermique de l'équipement en surface
- longueur de la sonde
- rayon du forage
- température initiale du terrain
- capacité thermique volumétrique du terrain

	Mesure/donnée	Erreur	Erreur Lambda	Erreur Rb
			W/(mK)	K/(W/m)
Puissance thermique injectée:	1.54 kW	-5%	-0.12	0.007
Pertes thermiques équipement:	5 W/K	5	-0.15	0.012
Longueur sonde 2:	24.5 m	0.5 m	-0.05	0.003
Rayon forage 2:	0.075 m	0.02 m	0	0.016
Température initiale terrain:	13.1 °C	0.5 K	0	-0.008
Capacité therm. volumétrique terrain:	2.4 MJ/m3K	0.5 MJ/m3K	0	0.006

	Estimation	erreur
Lambda (conductibilité thermique terrain)	2.4 W/(mK)	0.2 W/(mK)
Rb (résistance thermique effective de la sonde)	0.093 K/(W/m)	0.02 K/(W/m)