

DIS-Projet Nr.	44 127	Programme Géothermie	Sous mandat de l'
DIS-Contrat Nr.	84 167		Office fédéral de l'énergie

Rapport final du 19 novembre 2002

Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse

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	Optimisation des dimensions	4
2.2	Précision et fiabilité	5
2.3	Performances	6
2.4	Etalonnage et mesures	6
2.5	Automatisation	6
2.6	Accréditation	7
3	Commentaires et conclusion	7

Annexes:

A1: Exemple d'un test de réponse thermique du terrain "Überbauung Unteres Hompeli" St-Gall

A2: Mode opératoire du module de chauffage LMS - EPFL

DIS-Projet Nr.:..... 44 127 DIS-Contrat Nr.:... 84 167	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
---	----------------------	---

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, a été optimisé pour effectuer également des tests de réponse sur les sondes géothermiques et déterminer les caractéristiques thermiques des sols (conductivité et capacité thermique). Les principales modifications effectuées au cours de ce projet ont porté sur:

- la réduction de volume, nécessaire afin de faciliter le transport sur les chantiers, qui a nécessité la reconstruction totale du module aux dimensions d'une palette
- le contrôle, l'amélioration de l'isolation et la mise en valeur de l'appareil,
- une nouvelle gamme de puissance est actuellement disponible
- l'automatisation partielle du test avec acquisition et traitement des données

Un étalonnage des différents capteurs a été effectué dans cette nouvelle configuration. Les résultats obtenus ont montré que la transformation du module de chauffage a amélioré la qualité des mesures. Ces travaux ont aussi permis de réaliser un mode opératoire complet et détaillé des tests de réponse dans le but d'une accréditation de cet essai au LMS.

Un premier test de réponse avec la nouvelle configuration a été réalisé avec succès dans le canton de St-Gall.

ABSTRACT

Within this projet, the heating equipment of the EPFL, carried out in 1998 to study the thermomechanical behavior of thermal piles, is optimized to also carry out response tests on the geothermic probes and to determine the thermal characteristics of soils (conductivity and heat capacity). The principal improvments made during this project are :

- the reduction of the volume of the heating equipment, necessary in order to facilitate the transport on the building sites,
- the control and the improvement of the insulation,
- a new range of power is currently available
- the partial automation of the test with acquisition and data processing.

A calibration of the various sensors was carried out in this new configuration. The results obtained showed that the transformation of the heating module improved quality of measurements. This work also made it possible to carry out a complete and detailed procedure for response tests for a forthcoming accreditation of this test.

A first response test with the new configuration was carried out successfully in the canton of St-Gall.

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. Ce prototype 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 principal du module de chauffage est de fournir des sollicitations thermiques au pieu. Accessoirement et moyennant quelques précautions d'utilisation et de mesure, il doit également permettre d'effectuer un « test de réponse » sur des pieux ou des sondes ; pour mémoire, un tel test de réponse permet 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 a envoyé une requête le 12 novembre 2001 à l'OFEN afin d'obtenir un financement pour l'optimisation et la finalisation de ce prototype sous une forme plus compacte, tout en améliorant ses propriétés et caractéristiques.

1.1 Objectifs du projet

Les objectifs de ce projet étaient les suivants:

- Optimisation des dimensions du module à des dimensions facilitant son transport.
- Contrôle, test et mise en valeur de l'appareillage.
- Automatisation du test.
- Acquisition et traitement automatique des données.
- Accréditation du test de réponse selon EN 45'000.

Le 7 février 2002 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 Dr L. Laloui, Chef de projet au LMS, pour la finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse. Ce contrat entrait en vigueur le 1 février 2002 et se terminera le 31 mars 2003.

1.2 Contexte du projet et champ d'application

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 conception future, il pourra être facilement transporté sur les emplacements prévus pour des essais pour être raccordé à toutes futures sondes.

Cet appareil est également 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 pourraient profiter de cette installation pour déterminer la conductibilité thermique des sols concernés et utilisables.

2 Description du projet

2.1 Optimisation des dimensions

Le premier prototype construit en 1998 par l'EPFL a été réalisé dans le cadre d'un projet de géothermie destiné à étudier le comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques. Tous les éléments qui le composait ont été montés dans un cube recouvert de panneaux en bois, dont les arrêtes étaient d'environ 1.80 m. Au vu de son encombrement, le transport ne pouvait être effectué que par un camion. Son déplacement n'était également pas aisé et demandait beaucoup de manutention avec des appareils de levage importants qui demandaient une main d'œuvre spécialisée, car leur manœuvre est délicate. De plus, les petites roulettes qui devaient faciliter son maniement se sont rapidement révélées inadaptées au vu des dimensions initiales de ce module de chauffage.

Ce prototype, qui pesait environ 300 kg, se composait principalement d'une chaudière électrique à faible contenance CIPAG ($P = 3, 6$ ou 9 kW), d'une pompe de circulation Grundfos ($Q_{\max} = 2,7$ m³/h), d'un vase d'expansion Stucklin (50 l) et de deux purgeurs automatiques / mélangeurs Flamcovent.

Différentes vannes permettaient d'isoler certains tronçons et de faire circuler dans le pieu ou le terrain de l'eau de refroidissement. Un limiteur de niveau d'eau Stucklin (Flow switch) permettait d'arrêter automatiquement l'alimentation de la chaudière en cas de débit insuffisant (p. ex. rupture d'un tube) et des soupapes de sécurité empêchaient la pression de dépasser une valeur d'environ 3 bar dans les différents composants du module.

En plus de ses trois niveaux de puissance, la température de la chaudière pouvait être réglée au moyen d'un thermostat ; et une sécurité indépendante contre la surchauffe déclenchait l'alimentation de la chaudière lorsque la température de cette dernière dépassait $\sim 90^{\circ}\text{C}$.

Les tuyaux, la chaudière ainsi que le module lui-même étaient isolés afin de diminuer au maximum les déperditions thermiques.

De ce fait la première préoccupation du LMS a été d'étudier la possibilité de diminuer le volume du premier prototype, en gardant tout son potentiel et en récupérant la majorité de ses composants.

Les critères suivants ont donc été pris en considération pour diminuer le volume:

- Le transport avec un système normalisé à la dimension d'une palette type CFF, permettant une expédition par route ou rail.
- La manipulation avec des engins de levage traditionnels, tels que trans-palettes, grue, pont-roulant, etc.
- Les dimensions des composants principaux, tels que la chaudière et le vase d'expansion
- Les longueurs rectilignes nécessaires pour la tubulure, principalement au droit du débit-mètre, afin de ne pas perturber la mesure de débit du fluide caloporteur par des turbulences.
- Une protection accrue des composants sans risque d'endommagement lors du transport.
- L'alimentation électrique par un coffret de distribution multi-tension, relié à l'extérieur par une prise électrique conventionnelle.

Cette réflexion nous a amené à utiliser une palette normalisée pour la base du module, sur laquelle nous avons vissé une plaque de PVC rigide. La hauteur a été dictée impérativement par les dimensions de la chaudière qu'il était impossible de réduire. Pour maintenir tout l'équipement intérieur, (tuyaux, vannes, vase d'expansion, etc.) un cadre métallique rigide a été solidement fixé sur la palette de base. Sur ce cadre, des traverses permettent encore le blocage ou le positionnement définitif des divers composants et de la tuyauterie. Il sert également de support pour les panneaux en bois destinés à la fermeture et à la protection du module de chauffage (Figure 1).



Figure 1: Vue du module de chauffage en cours de montage sur une palette CFF avec le cadre rigide de protection et l'isolation de la tuyauterie.

2.2 Précision et fiabilité

L'optimisation de ce module a permis de garder une qualité des mesures identique, voire supérieure à celle existant auparavant, grâce à une isolation thermique grandement améliorée, par rapport à celle qui existait auparavant, de tous les composants et une diminution des pertes de charges dans la tuyauterie.

De plus le positionnement des capteurs a également été l'objet d'une grande réflexion afin d'éviter toute perturbation parasite des mesures. Le débit-mètre a par exemple été monté à l'abri des remous du fluide coloripporteur, sur une portion rectiligne de la tuyauterie. Les capteurs de température ont aussi été disposés dans des zones à l'abri de ponts thermiques.

La miniaturisation du module a rendu possible une certaine concentration des capteurs et des câblages à proximité de l'appareil d'acquisition des données, ce qui les protège sensiblement des accidents lors de travaux, de branchements ou de réparations dans le module.

2.3 Performances

Une gamme plus étendue de puissance de chauffage est actuellement à disposition pour ce nouveau module; cependant le passage d'une gamme de puissance à l'autre devra toujours être effectué par le changement manuel des corps de chauffe dans la chaudière.

- Ancienne puissance: 3 – 6 – 9 kW (3 corps de chauffe de 3 kW)
- Nouvelle puissance: 1.6 – 3.2 – 4.8 kW (3 corps de chauffe de 1.6 kW)

La pompe de circulation initiale d'un débit maximum de 2.7 m³/h a également été changée. Le nouveau débit disponible est actuellement modulable et peut atteindre, sous de faibles pressions et avec une tuyauterie appropriée, 8 m³/h; de plus il existe encore la possibilité de monter les deux pompes en parallèle pour encore augmenter le débit maximum.

Lors de ces travaux, le débit-mètre a été révisé et réparé suite à une avarie due probablement à la présence d'un corps solide en circulation dans la tuyauterie qui a endommagé le capteur.

2.4 Etalonnage et mesures

Des tests d'étalonnage et de contrôle de ce module ont été effectués, de même que l'étalonnage de tous les capteurs installés dans le module de chauffage, qui consistent en 4 sondes de température (fluide entrant, fluide sortant, extérieure et intérieure), un débit-mètre et un compteur électrique à impulsions. Cet étalonnage a été effectué selon la méthode décrite au paragraphe A2.3 dans les annexes de notre rapport de décembre 1999 "Test en conditions réelles du comportement d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques"¹; il a été réalisé dans des conditions de laboratoire et in situ.

2.5 Automatisation

L'automatisation des mesures est effectuée par une unité d'acquisition automatique des données, telles que les températures (4 capteurs), le débit, la consommation électrique, au moyen d'un data-logger (Figure 2). Un ordinateur portable est utilisé pour le transfert des données dans un format ASCII qui est facilement exportable vers un tableur de type EXCEL pour un traitement plus approfondi des mesures et le calcul des résultats.

¹ OFEN, programme géothermie, décembre 1999, Projet 25'483 Contrat 66'100, rédigé par Dr L. Laloui, M. Moreni, G. Steinmann, Prof. L. Vulliet (LMS - EPFL) et par Dr A. Fromentin, Dr D. Pahud (LASSEN – EPFL)



Figure 2: Module de chauffage terminé avec les panneaux de protection. Au centre le coffret électrique et en haut le data-logger.

La capacité du data-logger est actuellement suffisante pour gérer l'auscultation automatique des capteurs et pour stocker toutes les données d'un test de réponse qui est effectué sur une période maximale de 10 jours. Cependant le système n'est pas à l'abri d'une panne qui dans ce cas ne peut être décelée que lors d'une visite sur le site.

2.6 Accréditation

L'accréditation selon l'EN 45'000 de l'essai de test de réponse pour sondes géothermiques est également en cours de validation. Elle a nécessité l'établissement d'un mode opératoire détaillé et de procédures d'étalonnage des capteurs et du module très précises, qui sont donnés en annexe.

Monsieur le Dr Daniel Pahud, concepteur initial de cet appareil a également été mis à contribution comme consultant externe pour des conseils lors de l'élaboration du cahier des charges.

3 Commentaires et conclusion

Un premier test de réponse a été effectué à St Gall avec ce module de chauffage optimisé (voir en annexe le rapport du LMS envoyé à NEK – UMWELTTECHNIK AG le 15 avril 2002). Les résultats de ce test ont donné entière satisfaction et ont permis d'apprécier les propriétés et la facilité de maniement de cet appareil. Le transport a été effectué par une simple petite remorque bâchée, tirée par une voiture de tourisme. De plus lors du test, le module est resté sur la remorque ce qui a limité l'emprise et n'a occasionné qu'un minimum de désagréments sur le chantier (Figure 3).

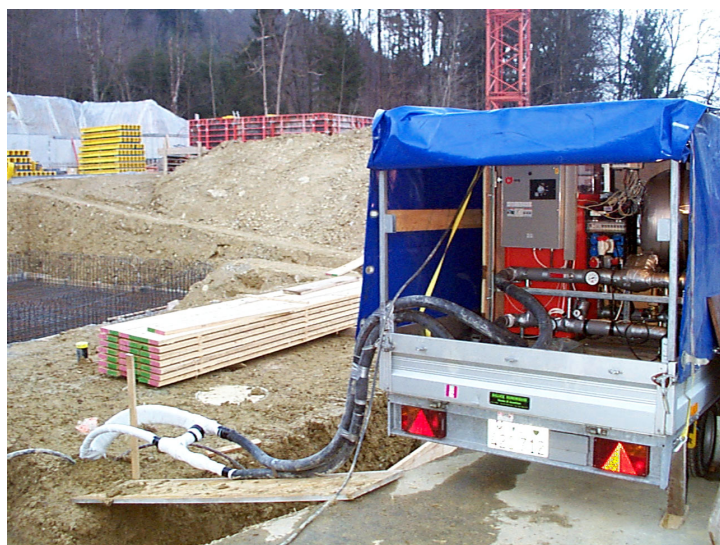


Figure 3 : Vue du module de chauffage du LMS- EPFL dans sa remorque de transport sur le site et détail de l'isolation des tuyaux de la sonde géothermique.

Les résultats de ce test seront publiés dans les revues spécialisées, qui sont encore à définir en collaboration avec l'OFEN. Ce module pourrait également être exposé lors de manifestation ou de rendez-vous traitants du domaine de la géothermie, et les résultats des futurs tests de réponse seront également disponibles auprès du public intéressé.

Les résultats de ce test ont permis de mettre en évidence la fiabilité de l'appareillage optimisé qui a parfaitement rempli les conditions fixées par le cahier des charges.

Une automatisation complète du test de réponse complet serait à examiner avec les moyens actuellement mis à disposition sur le marché. La diminution des coûts des appareils et des télécommunications, les techniques de communication et de transfert de données permettent d'envisager le pilotage de tout le dispositif d'acquisition des données à distance. La réception en temps réel des mesures, qui serait fort utile en cas de panne, peut même être prévue sur Internet avec les multiples possibilités offertes pour consulter la page de résultats depuis n'importe quel poste de travail connecté au Web.

Gilbert Steinmann

Dr Lyesse Laloui

Ingénieur civil ETS, REG-A

Chef du projet

- Annexe1: Test de réponse thermique du terrain "Überbauung Unteres Hompeli – St-Gall
Annexe2: Mode opératoire du module de chauffage LMS – EPFL

DIS-Projet Nr.:.....44 127 DIS-Contrat Nr.:... 84 167	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
--	----------------------	---

ANNEXE 1

Test de réponse thermique du terrain "Überbauung Unteres Hompeli" St-Gall

Exemple d'un test de réponse thermique du terrain Überbauung "Unteres Hompeli", St – Gall –

Avril 2002

A la demande du bureau NEK – Umwelttechnik AG à St-Gall, nous avons réalisé un test de réponse thermique du terrain, sur le chantier en construction "Unteres Hompeli", également à St-Gall.

Ce test de réponse a été effectué 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 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 1). Plusieurs vannes permettent d'isoler certains secteurs afin d'effectuer la purge du système ou de faire circuler de l'eau de refroidissement.

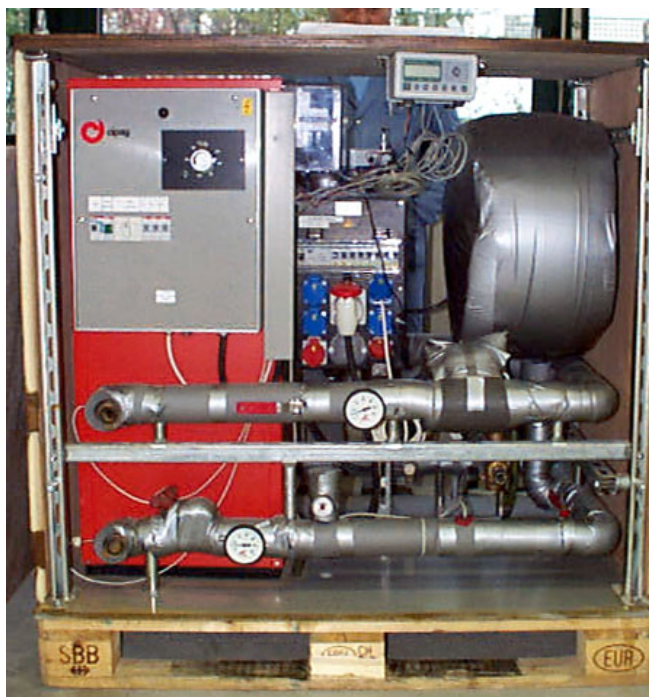


Figure 1 : Vue du module de chauffage utilisé pour le test de réponse

Un système complet de mesures et d'acquisition de données est également intégré dans ce module de chauffage pour l'enregistrement des paramètres suivants :

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

Le déroulement du test de réponse du terrain a duré 9 jours, y compris les trajets Lausanne – St Gall, en respectant le calendrier suivant:

lundi 18.02.2002 1 ^{er} jour	Trajet Lausanne – St Gall, connexion du module aux réseaux d'eau d'électricité, purge et test du système, mise en circulation du fluide dans la sonde sans chauffage, démarrage de l'acquisition des données.
mardi 19.02.2002 2 ^{ème} jour	Enclenchement du chauffage, avec circulation du fluide dans la sonde géothermique et poursuite de l'acquisition des mesures. Le chauffage de la sonde a été effectué à puissance thermique constante.
mercredi 20.02.2002 – mardi 26.02.2002 3 ^{ème} au 9 ^{ème} jour	Poursuite du test à puissance thermique constante, avec acquisition automatique des données
mardi 26.02.2002 9 ^{ème} jour	Arrêt du test, démontage de l'installation et trajet St Gall - Lausanne

Le dépouillement des mesures a été effectué au LMS - EPFL, à Lausanne, en collaboration avec le Dr Daniel Pahud du SUPSI à Lugano et les résultats détaillés des mesures sont donnés en annexe.

Caractéristiques de la sonde pilote géothermique

La réalisation de la sonde pilote a été effectuée sous votre contrôle par l'entreprise de sondage Grundag AG à Gossau. Elle avait les caractéristiques suivantes:

Emplacement:	La sonde pilote n° EWS 1.1 a été forée dans la zone du futur complexe de constructions "Unteres Hompeli" à St - Gall, au droit des bâtiments Sud <ul style="list-style-type: none">• Coordonnées : Y: 747.320 X: 256.420• Altitude : 685 m
Géologie et Géotechnique	Les sols rencontrés par les opérations de forage étaient les suivants : <ul style="list-style-type: none">• de 0 m à 9 m : Moraine argileuse• dès 9 m : Molasse (Mergel) (Molasse de St-Gall)
Profondeur:	Selon les indications de l'entreprise de forage, le sondage a atteint la profondeur de 250m, alors que la sonde n'a pu être descendue qu'à 220 m de profondeur
Forage:	La réalisation du forage a été effectuée le 22 janvier 2002 Les diamètres suivants ont été utilisés : <ul style="list-style-type: none">• de 0m à 3 m : Ø 246 mm (rotation à sec)• de 3 m à 12 m : Ø 159 mm (rotation à sec)• de 12 m à 250 m : Ø 130 mm (tricone à eau) Les matériaux extraits du forage ont été identifiés par le foreur.

Type de sonde: Sonde en double U, réalisée au moyen de tubes en polyéthylène noir (PE)

- diamètre extérieur : 40 mm
- diamètre intérieur : 32.6 mm
- épaisseur des parois : 3.7 mm

Les tubes de la sonde ne comportaient pas de distanceurs placés à des intervalles réguliers destinés à espacer les tubes.

De plus un cinquième tube, destiné à une mesure de la température complétait le dispositif.

Remplissage: Le remplissage de l'espace entre les tubes de la sonde thermique a été effectué par un coulis de bentonite, injecté par le bas du forage.

Protection: Les tubes de la sonde géothermique n'ont pas été protégés contre d'éventuelles dégradations. Cependant les extrémités étaient fermées par de la toile adhésive afin d'éviter une obstruction accidentelle (Figure 2).



Figure 2 : Détail de la sonde géothermique avant l'installation et vue du chantier

Mise en route du test de réponse

La disposition des installations du chantier a permis le positionnement de la remorque contenant le module de chauffage de manière idéale, à proximité immédiate de la sonde géothermique (Figure 3).

Quelques modifications des connecteurs ont cependant été nécessaire pour permettre le raccordement du module de chauffage au réseau d'eau et au tableau électrique du chantier.

Les tubes de la sonde thermique ont été connectés entre eux au moyen de deux raccords en Y, ont été équipés chacun d'un manchon galvanisé mâle par nos soins, puis reliés au module de chauffage par un tuyau souple isolé thermiquement de 1 pouce.

Une isolation thermique soignée de tous les tuyaux extérieurs au module de chauffage a encore été réalisée et complétée au moyen de bandages isolants disposés autour des tubes sur deux épaisseurs (Figures 3 et 4).

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

De plus un petit problème de programmation du data-logger, dû à une interruption de l'acquisition chaque nuit, nous a privé d'une partie des données.

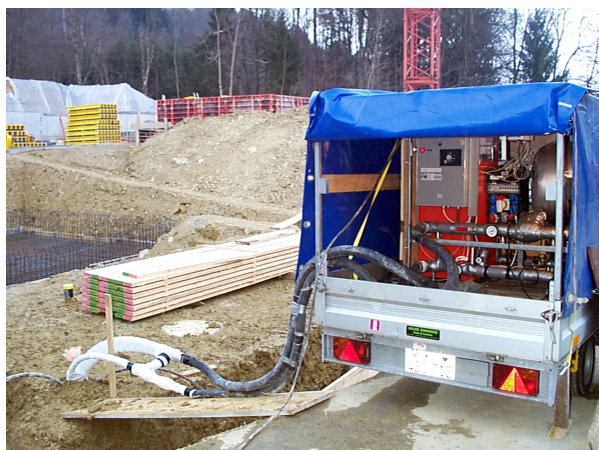


Figure 3 : Vue du module de chauffage du LMS - EPFL dans sa remorque de transport sur le site et détail de l'isolation des tuyaux de la sonde géothermique.



Figure 4 : Test de réponse en cours de réalisation. La bâche de la remorque est rabattue pour une meilleure isolation.

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.

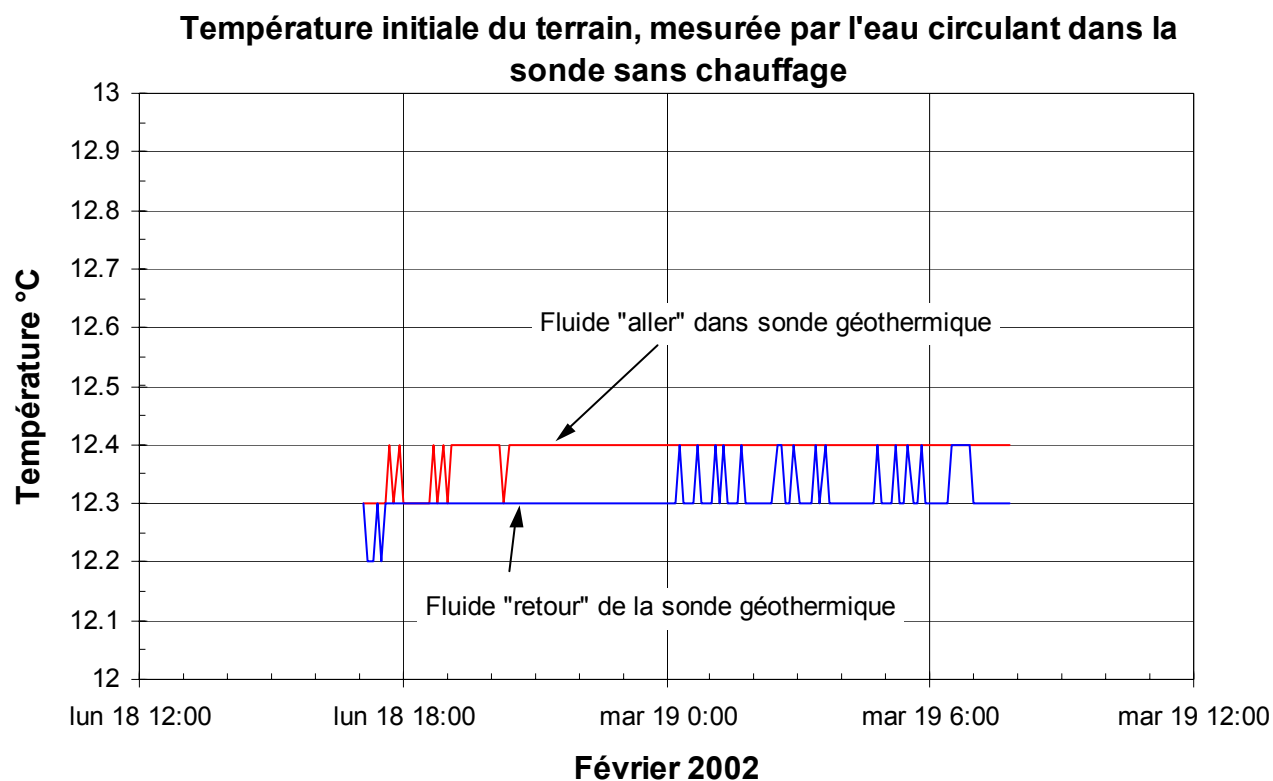
Cette interprétation comprend notamment une analyse de l'évolution de la température du fluide par la méthode dite de la source linéaire de chaleur. Au final les résultats suivants peuvent être calculés :

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

Les calculs et graphiques sont donnés ci-après, de manière détaillées. Ils ont été établis par le Dr Daniel Pahud en prenant en compte les caractéristiques moyennes suivantes de la sonde géothermique:

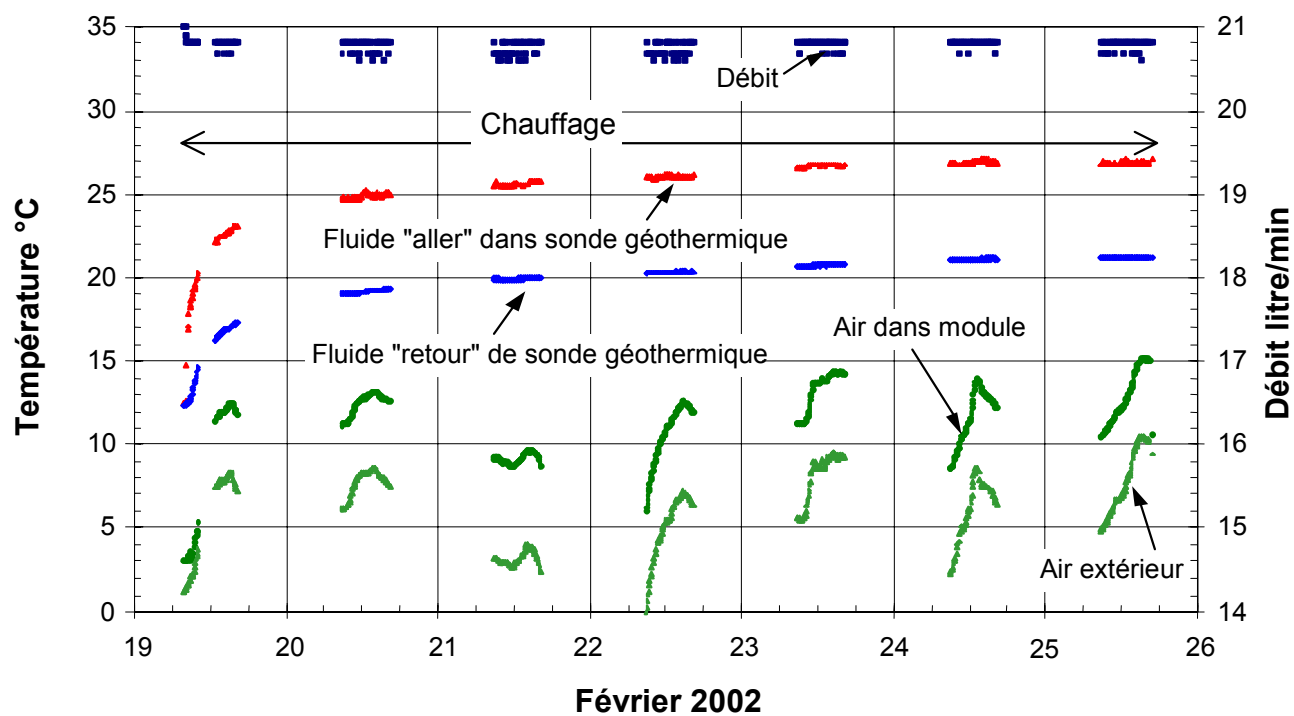
Profondeur	220 m
Diamètre moyen	0.132 m
Type de sonde	Double – U
Tube	polyéthylène
Diamètre externe tube \varnothing	40 mm
Epaisseur paroi tube	3.7 mm
Matériau de remplissage	bentonite
Fluide caloporteur lors du test	eau
Débit lors du test	1'250 litre/h

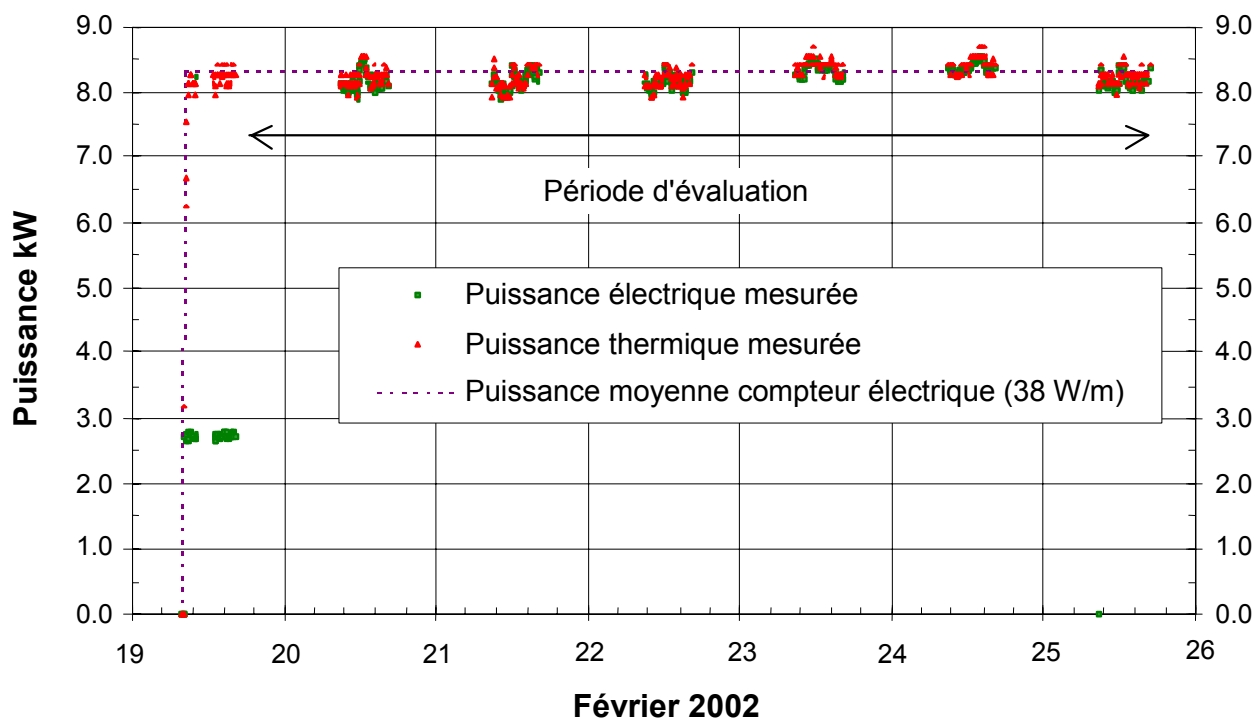
Température initiale moyenne du terrain



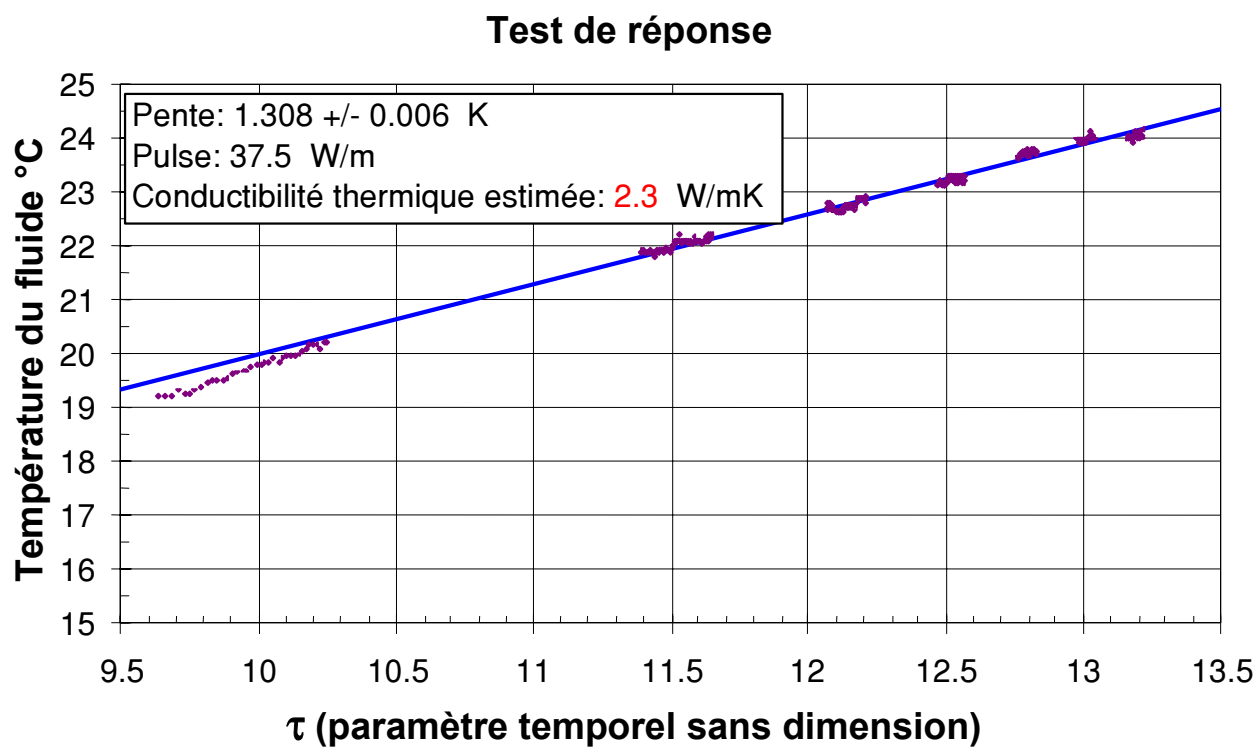
Température initiale moyenne mesurée de 12.4 °C.

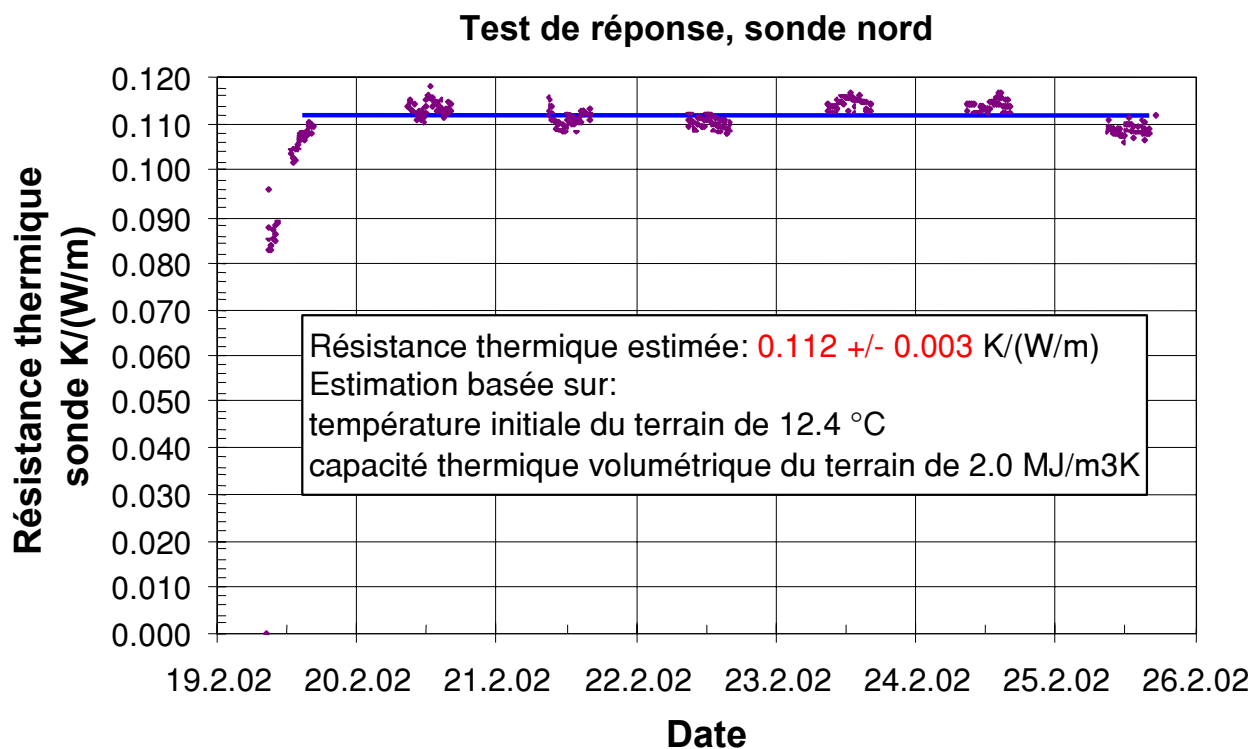
Mesures du test de réponse géothermique:





Analyse du test de réponse





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

Température moyenne initiale de la couche de terrain **12.4 °C.**

Conductibilité thermique moyenne de la couche de terrain **2.3 W/mK.**

Résistance thermique effective de la sonde **0.11 K/(W/m)**
 (dans les conditions du test: eau, régime d'écoulement non laminaire, débit de 1'250 litre/heure).

DIS-Projet Nr.:.....44 127 DIS-Contrat Nr.:... 84 167	Programme Géothermie	Sous mandat de l' Office fédéral de l'énergie
--	----------------------	---

ANNEXE 2

Mode opératoire du module de chauffage LMS - EPFL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

ENAC - Environnement Naturel,
Architectural et Construit

LMS - Laboratoire de Mécanique des Sols

Manuel d'utilisation du module de chauffage LMS-EPFL

Lausanne, mai 2002

RESUME

Ce mode opératoire décrit en détail les propriétés du module de chauffage de l'EPFL et son mode de fonctionnement ainsi que le principe de la mesure d'un test de réponse in situ avec des schémas de fonctionnement.

Les différents composants sont également énumérés de même que leurs caractéristiques et propriétés.

La marche à suivre pour l'installation du module de chauffage sur un emplacement d'essai est détaillée. Les connections (électriques et hydrauliques) et les tests préliminaires à effectuer sont décrits. L'utilisation et la mise en service du data-logger est détaillée de manière très précise. Les précautions à prendre en compte pendant le test de réponse sont soigneusement étudiées.

Les méthodes d'étalonnage des différents composants sont aussi énumérées.

ABSTRACT

This procedure describes in details the properties of the heating equipment of the EPFL and its operating system as well as the procedures for an in situ response test.

Different components of the equipment are also described as well as their properties.

The procedure for the installation of the heating equipment for an in situ test is detailed. The electric and hydraulic connections are described as well as the preliminary tests to carry out. The use of the data-logger system is detailed in a precise way. The precautions to be taken into account during the response test are carefully studied.

The calibration methods of the various components are also presented.

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	3
1.1	Description du module de chauffage	3
1.2	Schéma de principe	5
2	Désignation et fonction de chaque appareil	5
2.1	Chaudière	5
2.2	Limiteur de niveau d'eau (Flow-switch)	6
2.3	Pompe de circulation	6
2.4	Débitmètre	7
2.5	Compteur électrique de kWh	7
2.6	Système d'acquisition de mesure (Data logger)	7
3	Préparation de l'installation du module de chauffage	8
3.1	Raccordement électrique	8
3.2	Raccordement hydraulique	8
3.3	Mise en eau et purge du système	9
4	Test de fonctionnement	9
4.1	Mise en marche de l'installation	9
4.2	Utilisation du Data logger	10
4.2.1	<i>Particularité du système ALMEMO</i>	10
4.2.2	<i>Mise en service</i>	10
4.2.3	<i>Effacement des anciennes valeurs mesurées</i>	10
4.2.4	<i>Réglage de la cadence de scrutation.</i>	11
4.2.5	<i>Programmation de l'heure du début et de la fin d'une série de mesure.</i>	11
4.2.6	<i>Programmation de date de début et de fin.</i>	11
4.2.7	<i>Effacement des valeurs de début et de fin.</i>	11
4.2.8	<i>Démarrage et arrêt de la scrutation automatique des points de mesures.</i>	12
4.2.9	<i>Démarrer une scrutation automatique des points de mesure :</i>	12
4.2.10	<i>Arrêter la scrutation automatique des points de mesure :</i>	12
4.3	Transfert des données	12
4.3.1	<i>Matériel requis</i>	12
4.3.2	<i>Connexion électrique</i>	12
4.3.3	<i>Opérations sur le PC</i>	12
4.3.4	<i>Opérations sur le data logger</i>	13
5	Test de réponse	13
6	Etalonnage des composants	14
6.1	Sondes de température	14
6.2	Débitmètre	16
6.3	Compteur électrique	17

1 Introduction

1.1 Description du module de chauffage

Le Lasen et le LMS ont développé un module de chauffage qui se présente sous la forme d'un parallélépipède dont les dimensions sont les suivantes : largeur 0.8 m longueur 1.2 m et hauteur 1.1m.

Ce module est fixé sur une palette de type CFF, donc il est facilement déplaçable à l'aide d'un transpalette. De plus 4 crochets sont fixés sur le haut du module, ceci afin de pouvoir le soulever grâce à une grue ou un palan. (Figure 1)



Figure 1: Vue du module de chauffage en cours de montage sur une palette CFF avec le cadre rigide de protection et l'isolation de la tuyauterie.

Il est principalement composé d'une chaudière électrique dont la puissance peut être modulée par trois paliers de 3, 6 ou 9 kW (ou en changeant les corps de chauffe : 1.6, 3.2 ou 4.8), d'une pompe de circulation dont le débit peut atteindre au maximum 8 m³/h (sous de faibles pressions et avec une tuyauterie adaptée), d'un vase d'expansion de 50 litres et de deux dégazeurs-mélangeurs. Plusieurs vannes permettent d'isoler certains tronçons afin de pouvoir faire des purges ou de faire circuler de l'eau de refroidissement. Un Data logger complète cet équipement pour la récolte de données, notamment les températures aller et retour, les températures extérieure et intérieure au module, le débit mesuré par un débitmètre à hélice ainsi que la puissance électrique consommée par la chaudière (Figure 4).

Le module comporte quelques systèmes de sécurité en cas de problème. Un limiteur de niveau d'eau permet d'arrêter automatiquement l'alimentation électrique de la chaudière au cas où le débit serait insuffisant à la suite par exemple de la rupture d'un tube. Des soupapes permettent de limiter la pression dans le système à environ 3 bars. Une sécurité contre la surchauffe déclenche également l'alimentation de la chaudière si la température de cette dernière dépasse environ 90°C. En plus de ses trois niveaux de puissance, la température de la chaudière peut être réglée à l'aide d'un thermostat. Les déperditions thermiques du module ainsi que celles des tubes et de la chaudière sont limitées au maximum par une isolation adéquate.

L'énergie thermique est transmise au milieu à tester (sol ou structure géothermique) grâce à sonde en forme de U (ou de double U), réalisée avec des tubes en PE (Figure 2). La longueur de cette sonde est choisie en fonction de la profondeur intéressée par l'installation géothermique. Elle est soit liée directement à l'armature de la structure géothermique, soit directement introduite dans un forage à la profondeur souhaitée. Les tubes de la sonde thermique sont branchés directement sur les raccords du module de chauffage par des raccords de 1" (Figures 6 et 7) (après avoir été reliés entre-eux par des branchements en Y dans le cas de tubes multiples) (Figures 2 et 3).

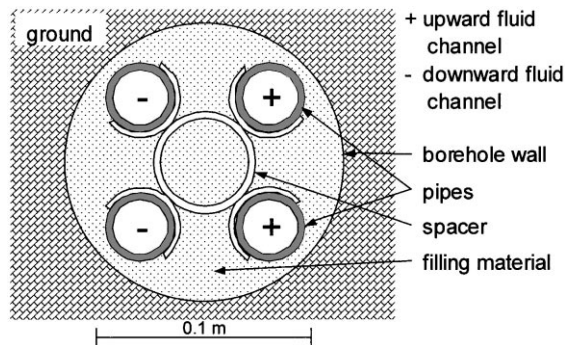


Figure 2: Coupe d'une sonde géothermique en double U (source: D. Pahud)

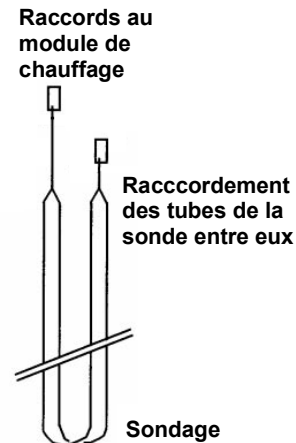


Figure 3: Schéma de raccordement d'une sonde en double U (source: D. Pahud)

1.2 Schéma de principe

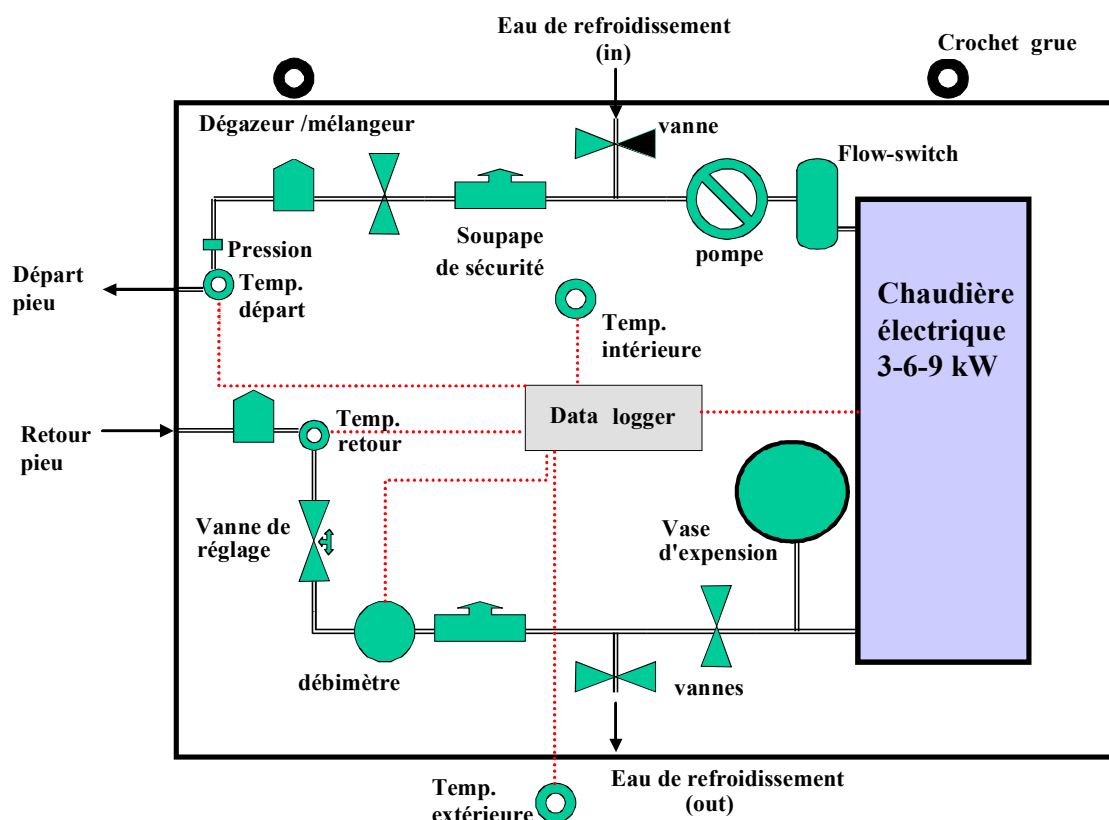


Figure 4: Schéma de fonctionnement du module de chauffage

2 Désignation et fonction de chaque appareil

2.1 Chaudière

Marque	Cipag
Modèle	EV
Adresse fournisseur	1604 Puidoux-Gare (021 / 926 66 66)
Puissance	3 ou 6 ou 9 kW ou en changeant les corps de chauffe 1.6 ou 3.2 ou 4.8 kW
Contenance en eau	Env. 30l
Pression de service	3 bars
Pression d'essai	4.5 bars
Temp. de service	Max. 90°C

2.2 Limiteur de niveau d'eau (Flow-switch)

Le flow-switch a pour objectif de protéger la chaudière contre la surchauffe due à un manque d'eau. Lorsque le niveau d'eau baisse en dessous d'un niveau défini, un flotteur déclenche un micro-rupteur qui bloque le dispositif. La chaudière est automatiquement mise hors service. Après élimination du défaut, l'installation doit être remise en marche en actionnant la touche de déblocage au niveau du limiteur de niveau d'eau.

Marque	SYR
Modèle	933.1
Adresse fournisseur	Thermibel La Croix-sur-Lutry (021/791 12 54)
Pression de service	max. 10 bar
Temp. de service	max. 120°C
Position de montage	Axe principal vertical

2.3 Pompe de circulation

Marque	Grundfos
Modèle	UPS 25-80 ou UPE 25-40
Adresse du fournisseur	Tobler SA Crissier
Débit	jusqu'à 8 m ³ /h, resp. 2.7 m ³ /h
Temp. du fluide	+ 15°C jusqu'à +110°C
Pression de service max.	10 bars

Pour augmenter le débit, ces deux pompes peuvent être branchées en parallèle, moyennant une petite modification du système (ajout de raccords en T avant et après la pompe principale)

2.4 Débitmètre

Marque	Almemo
Modèle	FH A915 VTH
Fournisseur	Interstar 6330 Cham Mr Blättler (041/741 84 42)
Plage de mesure	2 à 40 l/min.
Linéarité	± 1 % de la valeur mesurée
Reproductibilité	± 0.2 % de la valeur mesurée
Température permanente admise.	85°C /120°C

2.5 Compteur électrique de kWh

Ce compteur permet une mesure directe de la consommation électrique du module de chauffage et possède, en outre, une sortie pulsée ce qui permet de le connecter à un Data logger.

Marque	Rauscher & Stoecklin AG
Modèle	Wh 3063/640
Fournisseur	Interstar 6330 Cham Mr Blättler (041/741 84 42)
Impulsion en sortie	640 Imp./KWh
Précision de mesure	± 2 %

2.6 Système d'acquisition de mesure (Data logger)

Le Data logger est un système d'acquisition et d'affichage de mesures piloté par microprocesseur. Tous les capteurs sont raccordés sur cet appareil

Marque	Almemo
Modèle	3290 – 8
Fournisseur	Interstar 6330 Cham Mr Blättler (041/741 84 42)
Entrées	9 connecteurs
Mémoire	130KO mémoire (25000 valeurs mesurées)
Alimentation	12 V (adaptateur secteur 220V – 12V DC fourni)

Plusieurs types de capteurs sont connectés à ce data-logger, tels que :

- 3 sondes de température
- 1 sonde de débit hydraulique
- 1 compteur d'impulsion

3 Préparation de l'installation du module de chauffage

3.1 Raccordement électrique

Le module de chauffage comporte plusieurs appareils nécessitant une alimentation électrique, soit :

- La chaudière
- La pompe de circulation
- Le compteur électrique de kWh
- Le Data-logger
- Le limiteur de niveau d'eau (raccordé directement à la chaudière)

Tous ces appareils sont en principe connectés séparément à un unique tableau électrique situé à l'intérieur du module de chauffage. Le seul élément à alimenter depuis l'extérieur est donc ce tableau électrique qui est raccordé à une prise électrique mâle 25A 500V 3L + N + PE (Figure 5). La puissance nécessaire est de 15 kW.



Figure 5: Vue du connecteur électrique du module de chauffage

3.2 Raccordement hydraulique

Le remplissage de l'installation se fait via un régulateur de pression connecté au retour de l'installation. Ce régulateur permet de régler la pression d'entrée d'eau. Cette pression a été fixée à environ 3 bars maximum.

Pour pouvoir remplir l'installation il est nécessaire de disposer d'une prise d'eau sur le réseau avec un raccord rapide de 1" (Figures 6 et 7).



Figure 6: Raccord rapide pour l'eau de 1"



Figure 7: Détails du raccord rapide

3.3 Mise en eau et purge du système

Préalablement il est nécessaire raccorder le module de chauffage au réseau d'eau, ceci à l'aide d'un tuyau ayant un raccord rapide 1" (Figures 6 et 7) d'un côté et un raccord rapide 1/2" (ou adapté au raccord du point d'eau) de l'autre. Il faut ensuite ouvrir doucement l'alimentation (le régulateur limite la pression d'entrée à 3 bars). A ce moment on doit entendre l'air s'échapper par les purgeurs automatiques. Continuer le remplissage tout en surveillant la pression de l'installation, celle-ci ne doit pas dépasser ainsi les 3 bars. Une fois la pression d'environ 2.5 bars atteinte on peut couper le remplissage. Il est nécessaire à cet instant d'enclencher la pompe de circulation, afin de faire circuler l'eau dans l'installation et de permettre ainsi à l'air emprisonné de s'évacuer par les purgeurs. Au début de cet étape il devrait y avoir du bruit dans le circuit dû à l'air, une fois tout le système purgé, le bruit doit cesser.

4 Test de fonctionnement

4.1 Mise en marche de l'installation

Tout d'abord l'installation doit être remplie et purgée (voir chap. 3.3). Ensuite il faut enclencher la pompe de circulation en la raccordant au tableau électrique.

L'étape suivante consiste à mettre en marche la chaudière, pour se faire il faut d'abord enclencher l'interrupteur général (bouton 0-1) situé sur le panneau avant. Ce panneau comporte également trois disjoncteurs, chaque disjoncteur correspond au couplage de 2 corps de chauffe.

Donc il est possible, suivant le nombre de disjoncteur enclenché, de faire varier la puissance de 3 ou 6 ou 9 kW (si les corps de chauffe ont une puissance de 800W chacun, la puissance va varier de 1.6 puis 3.2 et enfin 4.8 kW).

Au début de l'essai il est recommandé de n'enclencher d'abord qu'un seul disjoncteur. Si la puissance n'est pas suffisante pour élever la température du fluide à la valeur désirée on peut alors enclencher le disjoncteur suivant.

Cette chaudière est aussi équipée d'un thermostat. Ce thermostat est utilisé pour la régulation de la chaudière lorsque la température préréglée est atteinte. Le réglage du thermostat se fait par tâtonnement, en effet les graduations du bouton rotatif ne sont pas significatives. Il est nécessaire de surveiller manuellement la température de l'installation et une fois la température atteinte il faut trouver le point où le thermostat déclenche la chaudière. Il serait utile de noter la position du curseur correspondant à la température voulue.

4.2 Utilisation du Data logger

4.2.1 Particularité du système ALMEMO

Les appareils de la série ALMEMO sont des systèmes d'acquisition et d'affichage de mesure pilotés par micro processeur.

Les capteurs de mesure et le Data logger sont raccordés entre eux au moyen d'un système breveté de connecteurs.

Ces connecteurs incorporent un support de données programmable, dans lequel sont mémorisés les paramètres des capteurs et du Data logger

Différents capteurs peuvent ainsi être raccordés sur le Data logger et grâce aux chips incorporées dans le connecteur l'appareil de mesure reconnaît automatiquement les caractéristiques correspondant comme :

- Type du capteur, désignation du capteur
- Plage de mesure
- Corrections de valeurs de mesure
- Mises à l'échelle
- Unité de mesure

Les mesures incorrectes ou une confusion entre les capteurs sont ainsi exclues

4.2.2 Mise en service

Raccorder les capteurs sur les embases M0 à M8 (Les capteurs se branchent indifféremment sur n'importe quel connecteur).

- Raccorder le Datalogger sur le secteur (voir chap. 4.3.2), contrôler la tension d'alimentation.
- Mettre l'appareil sous tension en appuyant sur l'interrupteur ON (la lampe de contrôle doit s'allumer).

4.2.3 Effacement des anciennes valeurs mesurées

Il est conseillé d'effacer les anciennes valeurs de mesures stockées dans le data-logger avant de commencer une mesure ou un test.

a) Il est possible de choisir entre 2 fonctions d'effacement différentes :

- Uniquement les mesures en mémoire . (Symbole "S Clr ")
- Effacement total de toutes les valeurs de mesure ainsi que les valeurs min., max. et moyenne de tous les canaux. (Symbole "A Clr" dans l'afficheur).

b) Sélectionner la fonction MEMOIRE avec le sélecteur rotatif et appuyez sur la touche <ENTREE> Le symbole "S Clr" apparaît en clignotant dans l'afficheur.

- Si vous voulez effacer les mesures en mémoire appuyez sur la touche <->(fonction). Le symbole "A Clr" apparaît en clignotant dans l'afficheur.
- Si vous voulez effacer toutes les valeurs appuyez sur la touche <Clr>. Le symbole "S----" apparaît dans l'afficheur.

4.2.4 Réglage de la cadence de scrutation.

Sélectionner la fonction "CYCLE DE MES. "

Régler la cadence de mesure désirées avec les touches <ENTREE>, <↑>,<↓> et <ENTREE>.

4.2.5 Programmation de l'heure du début et de la fin d'une série de mesure.

Sélectionner la fonction "HEURE" et appuyer sur la touche <FONCTION>. (Si aucune heure de début n'est programmée l'affichage représente -- -- -- A).

Saisir l'heure du début au format hh :mm :ss avec les touches <ENTREE>, <↑>,<↓>
07 :30 :00 A

Appuyez sur la touche <FONCTION> (Si aucune heure de fin n'est programmée l'affichage représente -- -- -- E).

Saisir l'heure de fin avec les touches <ENTREE>, <↑>,<↓> 18 :00 :00 E

4.2.6 Programmation de date de début et de fin.

Sélectionner la fonction DATE"et procéder de la même manière que pour les heures.

① Pour les fonctions "DATE" ou "HEURE"

Signification des symboles situé après les chiffres :

Sous le mode "HEURE"	H	heure actuelle
	A	heure début de mesure
	E	heure fin de mesure

Sous le mode "DATE"	D	date actuelle
	A	date début de mesure
	E	date fin de mesure

4.2.7 Effacement des valeurs de début et de fin.

Sélectionner la fonction "HEURE" ou "DATE" et effacer les valeurs programmées avec les touches <ENTREE>, <Clr>.

4.2.8 Démarrage et arrêt de la scrutation automatique des points de mesures.

Si une scrutation automatique est programmé, le mode de fonctionnement correspondant est caractérisé par une flèche dans l'afficheur.

4.2.9 Démarrer une scrutation automatique des points de mesure :

Appuyer sur la touche <MARCHE/ARRET>.

La flèche <MARCHE> s'allume dans l'afficheur. Si de la mémoire est activée, la flèche <MEMOIRE> s'allume dans l'affichage.

4.2.10 Arrêter la scrutation automatique des points de mesure :

Appuyer de nouveau sur la touche <MARCHE/ARRET>.

Les flèches <MARCHE>, <MEMOIRE> ne sont plus allumées. Seul le point de mesure sélectionné reste affiché et surveillé.

4.3 Transfert des données

4.3.1 Matériel requis

- PC portable (système d'exploitation: Windows 95 au min) avec le programme Terminal.EXE (+ cordon d'alimentation électrique)
 - Data-logger (avec son adaptateur secteur)
 - Câble de liaison série (prise DB 9 femelle à chaque extrémité).
- Le fichier Logger.trm doit être présent dans l'ordinateur

4.3.2 Connexion électrique

- Connecter le PC au secteur avec son cordon d'alimentation
- Connecter le data-logger au secteur grâce l'adaptateur 220V-12 Volt Dc
- Relier le PC au data logger avec le câble de liaison.

4.3.3 Opérations sur le PC

- Allumer le Data logger grâce au bouton ON (la lumière doit s'allumer)
- Démarrer le PC
- Lorsque la fenêtre "mot de passe " s'affiche, cliquer sur annuler. Windows démarre.
- Depuis la barre d'outils MS office, ouvrir le programme Terminal.EXE
- Une fenêtre Terminal s'ouvre
- Dans le menu déroulant "Fichier" de cette fenêtre aller sous "Ouvrir"
Nom du fichier : logger.trm
- Dans le menu déroulant "Transfert" aller sous "Recevoir un fichier texte"

Nom du fichier : données.txt ou autre

Le PC est maintenant prêt à recevoir un fichier.

Les paramètres par défaut du fichier "Logger.trm" sont les suivants:

Vitesse de transmission:	9'600 bauds
Bits de données:	8
Bits d'arrêts:	1
Parité:	Aucun
Contrôle de flux:	Xon / Xoff

4.3.4 Opérations sur le data logger

Paramétrer l'édition du fichier:

- Sélectionner la fonction CYCLE D'IMP. avec le sélecteur rotatif
- Régler le canal de sortie avec la touche "Clr"
- Choisissez le mode "t U" (édition de toutes les valeurs des cycles de mesure sous forme de tableau)
- Commuter le sélecteur rotatif sur la fonction MEMOIRE
- Appuyez sur la touche "sortie"
- Les données doivent maintenant s'afficher à l'écran du PC en même temps qu'elles s'enregistrent sur le fichier.

5 Test de réponse

Les différentes étapes liées à la réalisation d'un essai de test de réponse vont être dictées par le maître de d'œuvre ou l'ingénieur chargé de l'étude, en collaboration avec chef du projet, et surtout en fonction du but recherché et à atteindre. La Figure 8 montre un test de réponse en cours de réalisation.

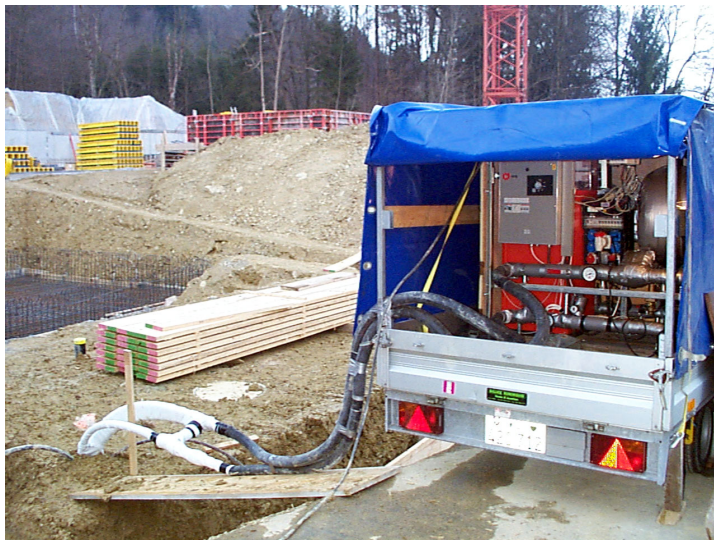


Figure 8 : Vue du module de chauffage du LMS - EPFL dans sa remorque de transport sur un site et détail de l'isolation des tuyaux de la sonde géothermique.

Les principes de l'essai sont toutefois toujours les mêmes:

1. Test et étalonnage de tous les capteurs
2. Mise en place du module sur le terrain et raccordement au réseaux d'eau et d'électricité (voir chap. 3.1 et 3.2).
3. Purge du module de chauffage (voir chap. 3.3)
4. Raccordement du module de chauffage à la sonde géothermique (voir chap. 1.1) et isolation soignée des tubes et raccords hors sol entre le module de chauffage.
5. Détermination de la température du terrain par circulation de l'eau dans la sonde géothermique sans mise en marche de la chaudière jusqu'à l'équilibre entre les températures de sortie et d'entrée dans le module de chauffage. L'équilibre est généralement atteint après quelques heures de fonctionnement ou une nuit complète. Lors de cette opération le data-logger doit être enclenché et stocker les données du débit, des températures et de la consommation électrique de la pompe.
6. Contrôle général du module pour détecter des éventuelles fuites ou anomalies et récupération des données enregistrées sur le data-logger.
7. Mise en marche de la chaudière avec réglage de la température maximum désirée (chap. 4.1) et du data-logger qui sera connecté à tous les capteurs (chap. 4.2). Le chauffage est tout d'abord limité avec le thermostat sur 1, puis progressivement augmenté sur les positions 2 et 3 (pleine puissance) en fonction de la montée en température du fluide caloporteur. Le chauffage va être poursuivi le plus longtemps possible, ce qui permettra d'affiner au mieux les résultats. Dans la pratique courante le test dure environ 7 à 10 jours consécutifs.
8. Arrêt du chauffage et de la pompe de circulation, récupération des données enregistrées sur le data-logger, purge du module de chauffage, débranchements et déconnexion des différents raccords. Nettoyage et rangement du module et des accessoires.

6 Etalonnage des composants

Les capteurs de mesure relatifs au module de chauffage consistent en 4 sondes de température, un débitmètre et un compteur électrique.

6.1 Sondes de température

Des résistances platines PT100 Almemo sont utilisées pour la mesure des températures. Les mesures des PT100 sont effectuées par le biais de 4 fils, de manière à ne pas dépendre de la résistance propre des fils. L'étalonnage des PT100 est été effectué à plusieurs températures (10, 20, 30, 40 et 50°C par ex.) dans un bain thermostatique. La température de référence est mesurée par un thermomètre à quartz préalablement étalonné. Un exemple de graphique montrant l'évolution des températures lors d'un étalonnage est montrée dans la Figure 9.

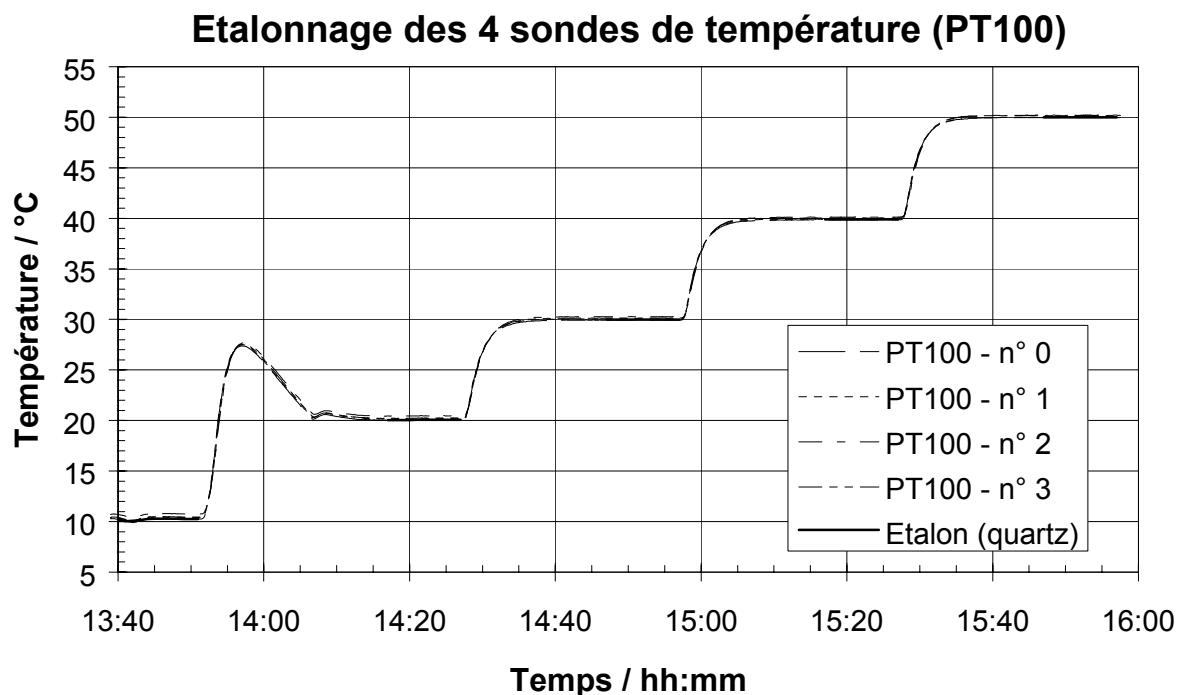


Figure 9: Exemple de l'évolution des températures des 4 sondes de mesure PT100 lors de leur étalonnage.

Un exemple des déviations avec la température de référence obtenues est montré dans la Figure 10 pour les 4 sondes de température.

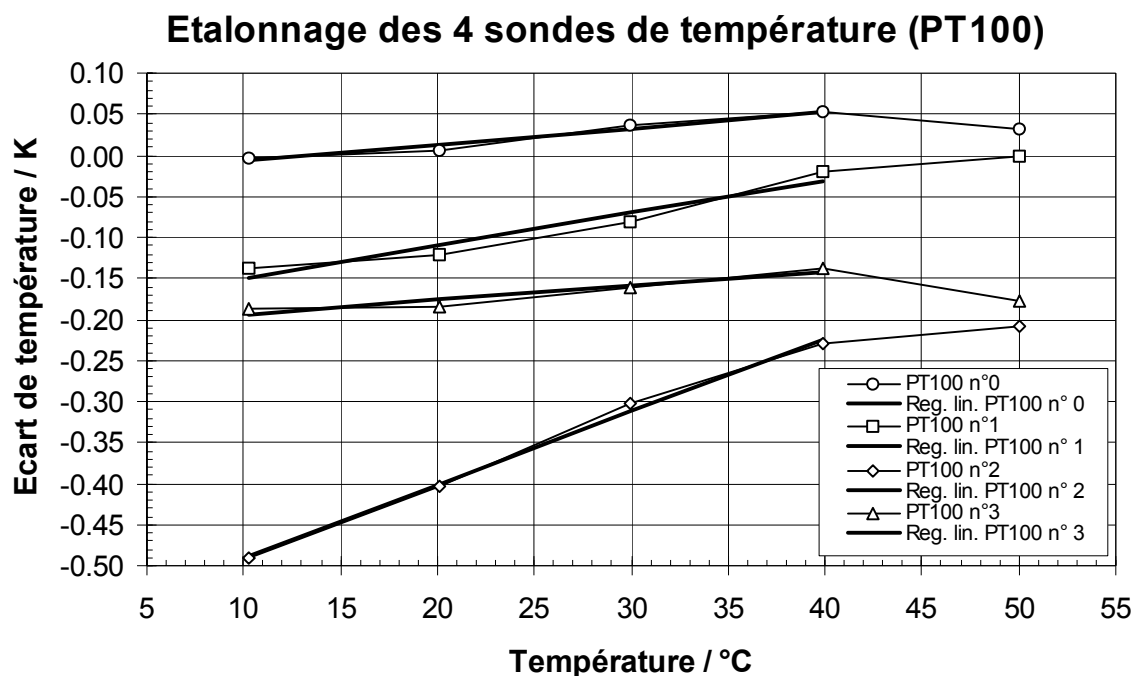


Figure 10: Exemple d'écart des mesures de température avec la température de référence. Les régressions linéaires sont établies et validés pour l'intervalle de température 10 - 40 °C.

Le tableau ci-après donne les valeurs des écarts de température des PT100, relatifs à la température de référence, définis par ($T_{\text{référence}} - T_{\text{mesurePT100}}$), pour chaque capteur PT100 (dans l'exemple pris en compte).

Temp. Référence	Ecart PT100 n°0	Ecart PT100 n°1	Ecart PT100 n°2	Ecart PT100 n°3
10.27 °C	0.00 K	-0.14 K	-0.49 K	-0.19 K
20.06 °C	0.01 K	-0.12 K	-0.40 K	-0.19 K
29.97 °C	0.04 K	-0.08 K	-0.30 K	-0.16 K
39.90 °C	0.05 K	-0.02 K	-0.23 K	-0.14 K
50.00 °C	0.03 K	0.00 K	-0.21 K	-0.18 K

La température corrigée est obtenue par la relation donnée dans le tableau précédent est la suivante:

$$T_{\text{corrigé}} = (T_{\text{mesurée}} - \text{BASE}) \times \text{FACTEUR}$$

Les valeurs de BASE et FACTEUR (pour cet exemple d'étalonnage) sont données ci-après pour chaque capteur des PT100. Ces facteurs de correction ne sont valables que pour des températures comprises entre 10 et 40 °C.

Facteurs de correction	PT100 n°0	PT100 n°1	PT100 n°2	PT100 n°3
BASE	0.0263 K	0.1892 K	0.5809 K	0.2105 K
FACTEUR	1.00196	1.00398	1.00903	1.00171

Pour les mesures de température supérieures à 40 °C, les températures sont corrigées en se basant sur les corrections à 50 °C et 40 °C. La correction à 40 °C est choisie comme étant la correction obtenue avec la régression linéaire.

6.2 Débitmètre

Le débit d'eau total circulant dans les tubes du pieu est mesuré par le débitmètre Almemo FV A915 au moyen d'une turbine axiale. Le débit est mesurable dans une plage de 2 à 40 litres/min. Un contrôle de la mesure du débit, effectué en pesant l'eau issue d'un débit constant durant un intervalle de temps donné, permet de confirmer la précision annoncée de 1% des mesures effectuées avec le débitmètre. Si les valeurs diffèrent de cette valeur de $\pm 1\%$, il faudrait refaire l'étalonnage plusieurs fois avec des débits différents et calculer un facteur de correction.

La Figure 11 montre un exemple d'étalonnage du débitmètre.

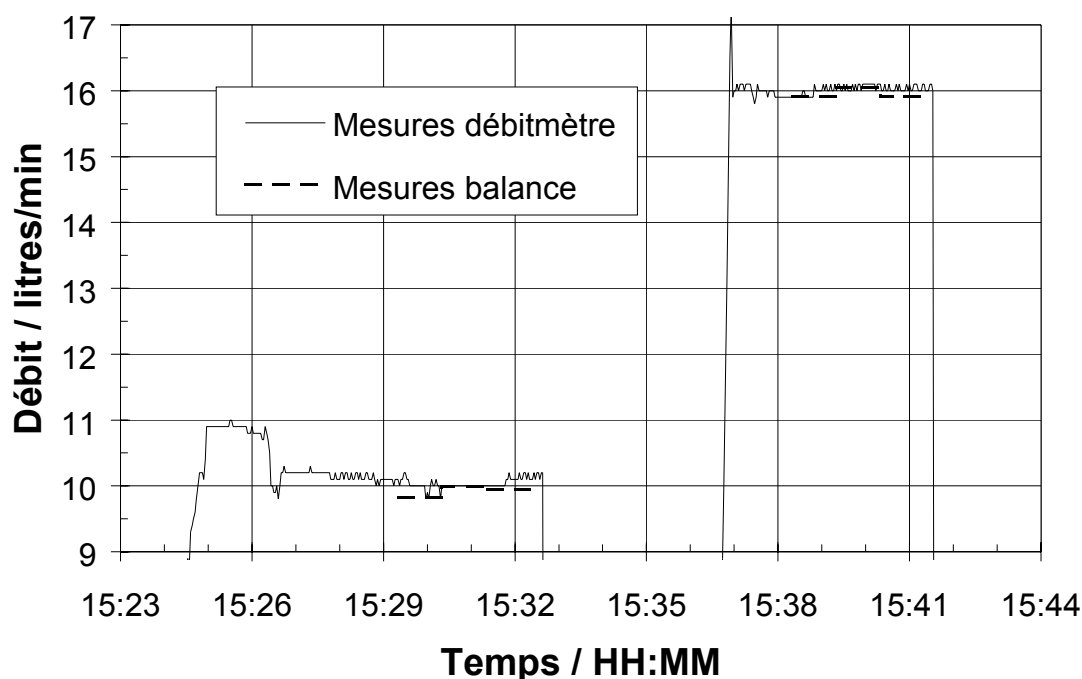


Figure 11: Exemple de comparaison des mesures de débit avec le débitmètre et avec la balance.

Lors de cet exemple, la température de l'eau était de 14 °C pendant les mesures. Avec une masse volumique de 999.3 kg/m³, la masse mesurée de l'eau est convertie en volume. Globalement, le débitmètre surestime légèrement les mesures effectuées avec la balance (1% à 10 litres/min et 0.4 % à 16 litres/min). Compte tenu de la précision de la mesure de masse (± 0.15 kg) et de la quantité mesurée, la précision de la balance est au mieux de 0.5% à 10 litre/min et de 0.3% à 16 litre/min. La précision des mesures de débit est conforme à la précision annoncée par le fabriquant et ne nécessite pas un étalonnage particulier.

6.3 Compteur électrique

Un compteur électrique Rausher&Stoecklin est utilisé. Le type de compteur utilisé, Wh 3063/640, est un compteur triphasé dont la précision de mesure est annoncée à $\pm 2\%$. Aucun étalonnage n'a été prévu pour ce compteur.