



Programm
Wärmespeicherung

Response - Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen

Messung der Bodenleitfähigkeit in situ

ausgearbeitet durch
Dr D. Pahud, Dr A. Fromentin
EPFL - LASEN, CH - 1015 Lausanne

Markus Hubbuch
Electrowatt Engineering AG c/o ARGE ZAYETTA
Operations Center, CH - 8058 Zürich - Flughafen

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Résumé

Dans le cadre de l'étude relative au dimensionnement d'un système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs pour le Dock Midfield à l'aéroport de Zürich, deux forages ont été forés dans la zone du futur bâtiment. Ils ont été équipés chacun avec une sonde géothermique, de manière à pouvoir effectuer un test de réponse pour déterminer la conductibilité thermique du terrain in situ.

Le déroulement du projet, des mesures et de l'analyse des mesures sont synthétisées dans ce rapport. Une conductibilité thermique moyenne du terrain est établie pour les dimensionnements futurs, en l'estimant à sa valeur minimum de manière à conserver une marge de sécurité quant à sa variation possible dans le terrain. Une valeur moyenne de **1.8 W/mK** est établie.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement l'Office Fédéral de l'Energie pour son soutien financier sans lequel cette étude n'aurait pas pu être effectuée. Toutes les personnes et entreprises qui ont collaboré de près ou de loin au bon déroulement des tests de réponse sont également remerciées.

Table des matières:

1. Projektbeschrieb.....	p. 1
2. Versuchsbeschrieb.....	p. 1
3. Beschrieb der Sonden.....	p. 1
4. Beschrieb der Versuchseinrichtung.....	p. 1
5. Beschrieb der Messeinrichtung.....	p. 2
6. Termine.....	p. 3
7. Durchführung der Response-Tests.....	p. 3
8. Ungestörte Bodentemperatur.....	p. 4
9. Wärmeleitfähigkeit des Bodens.....	p. 4
10. Folgerungen.....	p. 5

Appendices:

Appendice 1: Théorie du test de réponse

Appendice 2: Mesures effectuées pour les deux tests de réponses

Appendice 3: Modèle pour le calcul de la puissance thermique injectée dans le terrain

Appendice 4: Estimation de la conductibilité thermique du terrain dans les zones du forage
Est et Ouest

Anhang 5: Geologisches Profil der Sonde West

Anhang 6: Schemaskizze der Versuchseinrichtung

Anhang 7: Übersichtsplan der Sondenstandorte

Anhang 8: Fotos der Versuchseinrichtung

1. Projektbeschreibung

Zur Energiegewinnung ist für das Dock Midfield geplant, die Fundationspfähle als Energiepfähle zu nutzen. Um diese neuartige Anlage sicher planen zu können, ist ein sogenannter Response-Test zur Bestimmung der thermischen Bodenkennwerte erforderlich. Dazu wurden zwei Erdsonden auf 33 Meter Tiefe abgeteuft. Diese wurden so erstellt, dass sie eventuell später zu Messzwecken genutzt werden können. Die Sonden wurden entsprechend den örtlichen Möglichkeiten so weit auseinander wie möglich erstellt, um die Änderung der Geologie erfassen zu können.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

2. Versuchsbeschreibung

Der Respose-Test wurde durch die Firma Electrowatt Engineering AG und die EPF Lausanne durchgeführt. Während ca. 1 Woche wurde jede der beiden Sonden mit elektrisch erwärmten Wasser (ca. 1,5 kW Leistung resp. ca. 50 W/m Sondenlänge, konstant) durchflossen. Mittels Datenlogger wurden die Temperaturen und die Abkühlung registriert. Aus diesen Daten werden die thermischen Bodenkennwerte berechnet. Der Response-Test sowie die Simulationsrechnungen der EPFL werden vom Bundesamt für Energiewirtschaft finanziell unterstützt (Energie 2000 Pilot- und Demonstrationsprojekt). Nach dem Versuch wurden die Sonden stillgelegt. Sie können später eventuell mit Temperaturmesssonden ausgerüstet und zu Messzwecken genutzt werden.

3. Beschreibung der Sonden

Die beiden Sonden befinden sich im östlichen resp. westlichen Teil des geplanten Dock-Gebäudes, um die Veränderung des Bodenaufbaus zu erfassen. Für die Standorte siehe den Katasterplan. Die Erdsonden sind bis 3 Meter in die Grundmoräne gebohrt, mit Doppel-U-Rohr Durchmesser 23/26 mm aus HDPE ausgerüstet und mit Bentonit/Zementmischung hinterfüllt. Sie sind 33,5 Meter lang. Nach dem Bau des Dock Midfield enden die beiden Erdsonden unter der Bodenplatte.

4. Beschreibung der Versuchseinrichtung

Die hydraulische Versuchseinrichtung wurde durch den Unterhaltsdienst der FIG gebaut und installiert. Für die Wasserwärmung wurde ein handelsüblicher Elektroboiler mit 1500 W max. Leistung eingesetzt. Der Boiler wurde statt mit Kalt- und Warmwasser mit Vor- und Rücklauf angeschlossen, in einem geschlossenen System. Eine unregelmäßige Heizungspumpe (die kleinste erhältliche) wurde in den Vorlauf eingebaut. Danach folgt ein STA-Regulierventil mit Messstutzen zur Einstellung des Durchflusses. Zur Druckhaltung wurde ein

Expansionsgefäß und zur Sicherheit ein Sicherheitsventil eingebaut. Im Anhang finden sich eine Skizze sowie Fotos der Versuchseinrichtung. Die ganze Versuchseinrichtung wurde mit Armaflex so gut als möglich isoliert. Am Sondenstandort wurde die Versuchseinrichtung in einen gemieteten Baucontainer installiert. Die Stromversorgung zu den Sondenstandorten konnte glücklicherweise von den Baugrubenversuchen übernommen werden. So standen an beiden Orten Baustromverteiler in der Nähe zur Verfügung.

5. Beschrieb der Messeinrichtung

Für die Auswertung der Response-Tests sind genaue Temperaturmessungen in Vor- und Rücklauf sowie die genaue Kenntnis der zugeführten Wärmeleistung resp. des Durchflusses.

Temperaturmessungen: Es wurden mit einem Messsystem, bestehend aus geeichten PT-100 Temperaturfühlern und einem Datenlogger, die folgenden Temperaturen gemessen:

- Vorlauf (in einer mit Wärmeleitfluid gefüllten Tauchhülse)
- Rücklauf (in einer mit Wärmeleitfluid gefüllten Tauchhülse)
- Innentemperatur (Temperaturfühler an Wand in Mitte der Raumhöhe)
- Aussentemperatur (an nördlicher Containerecke in ca. 2 Meter Höhe)

Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt 0,1 °C.

Durchflussmessung: Die Durchflussmessung erfolgte mit einem Messgerät für STA-Ventile. Dieses misst den Druckverlust über das Ventil. Mit der gespeicherten Ventilkennlinie und der eingegebenen Ventilposition rechnet das Gerät den Durchfluss. Die Daten werden im eingebauten Datenlogger gespeichert. Die Genauigkeit dieser Messung ist allerdings schlecht, wie wir feststellen mussten. Das Gerät mass einen etwa 27% zu hohen Durchflusswert. Die Abweichung ist wohl damit zu erklären, dass die gespeicherte Ventilkennlinie und die Wirkliche wegen den Herstelltoleranzen des Ventils nicht übereinstimmen.

Elektrische Leistungsmessung: Die elektrische Leistung und die bezogene Energie des Boilers und der Pumpe wurden mit mobilen Strommessgeräten für 230V-Verbraucher gemessen. Die Energie konnte nicht mit einem Datenlogger gespeichert werden, sondern musste jeweils manuell abgelesen werden. Die Leistung sowohl der Pumpe wie auch des Boilers sind etwa konstant. Zusätzlich standen ein Stromzangenmessgerät und ein geeichtes Universalmessgerät zur Verfügung. Eine Vergleichsmessung zwischen den beiden verwendeten Strommessgeräten und den beiden Handmessgeräten ergab eine Genauigkeit der Strommessung von besser als 1%.

6. Termine

Die beiden Erdsonden wurden am 21. Januar 1998 erstellt. Der Versuch der Sonde Ost fand vom 26. Januar bis 4. Februar 1998 statt. Anschliessend wurde die Messung zum Standort West umgebaut. Die Messung mit der Sonde West fand vom 16. bis 22 Februar 1998 statt. Davor wurde die Sonde eine Woche lang ohne Heizung durchspühlt, um Vereisungen zu vermeiden.

7. Durchführung der Response-Tests

Die Installation der Versuchseinrichtung und die Inbetriebnahme wurde durch das kalte Wetter erschwert. Neben den schlechten Arbeitsbedingungen war auch erschwerend, dass das Wasser in den 2 Tage zuvor eingebauten Erdsonden gefroren war und wieder aufgetaut werden musste.

Der Container wurde elektrisch geheizt. Das Ziel, die Innentemperatur gleich wie die Wassertemperatur zu halten und so Verluste und Messfehler zu vermeiden, konnte wegen der schlechten Isolation des Containers nicht ganz erreicht werden.

Beim versuchsweisen Einschalten des Boilers am ersten Standort (Ost) stellten wir fest, dass der Boiler die Leistung von 1,5 kW nicht erbrachte. Nach dem Überprüfen der Verkabelung fanden wir, dass dieser Leistungsverlust auf die lange 230V-Zuleitung zurückzuführen war, in der ein deutlicher Spannungsabfall auftrat. Wir installierten deshalb getrennte Kabel ab Baustromverteiler für Boiler, Pumpe sowie Heizung und Licht. Nun war der Spannungsabfall kleiner, und die thermostatisch geregelte Heizung konnte die Pumpe und den Boiler weniger beeinflussen.

Am Standort West war die Leitungslänge wesentlich kürzer und der Spannungsabfall war kleiner.

An beiden Standorten wurde zuerst die ungestörte Bodentemperatur gemessen, indem das Wasser ohne Heizung zirkulierte. Anschliessend wurde der Boiler eingeschaltet und die Anlage während je gut einer Woche störungsfrei betrieben. Die Messwerte wurden alle paar Tage mit einem Laptop ausgelesen und abgespeichert. Ausser einmal die Durchflussmesswerte gingen keine Messwerte verloren. Die Anlage war dicht. Die Stromversorgung und damit der Heizbetrieb und die Pumpe waren ohne Unterbruch.

Die Messungen zeigten einen Einfluss der Umgebungstemperatur (innen und aussen) auf die Wassertemperatur. Mit der Messung West ohne Heizung während einer Woche sowie dank der Lufttemperaturmessungen konnte dieser Fehler eingegrenzt und bei der Auswertung korrigiert werden.

Die Messdauer von gut 7 Tagen pro Sonde mit Heizbetrieb war gut gewählt.

8. Ungestörte Bodentemperatur

Das erste Resultat der Messung ist die ungestörte Bodentemperatur über die ersten 33 Meter Tiefe. Die Messung Ost ergab 11 °C, die Messung West 10 °C. Es stellt sich natürlich sofort die Frage, weshalb dieser Unterschied von einem Grad besteht. Die Sonden sind nur 185 Meter auseinander. Ein Messfehler kann ausgeschlossen werden, da die Temperaturen je im Vor- und Rücklauf gemessen wurden. Unsere Erklärung ist die folgende:

Die Messung West fand direkt neben einem kleinen Waldstück statt, die Messung Ost dagegen auf freiem Feld, in der Nähe eines Rollweges und einer Strasse. Das Waldstück bewirkt durch verstärkte Verdunstung und Beschattung eine örtliche Reduktion der durchschnittlichen Lufttemperatur. Dies wirkt sich offensichtlich auch auf die Bodentemperatur aus, welche in dieser Tiefe ja ein Abbild der durchschnittlichen Lufttemperatur darstellt. Dass sich diese Temperaturdifferenz so deutlich ausbildet, lässt sich auch mit dem fehlenden Grundwasserfluss erklären.

9. Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Le test de réponse permet de déterminer la conductibilité thermique effective moyenne du terrain traversé par la sonde géothermique utilisée pour procéder au test, de même que la résistance thermique de cette dernière. Ces deux paramètres conditionnent les transferts thermiques entre le fluide circulant dans la sonde et le terrain environnant. Inversement, la connaissance de ces paramètres permet de recalculer les transferts thermiques de la sonde pour n'importe quelle condition d'exploitation avec l'aide d'un modèle numérique approprié.

L'analyse des mesures a été effectuée au laboratoire de systèmes énergétiques (LASSEN) à l'école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) (cf. appendices 1 à 4). Une valeur pessimiste de la conductibilité thermique du terrain a été évaluée sur la base des imprécisions ou des incertitudes relatives aux principaux facteurs qui influent sur son estimation. Les résultats sont énumérés dans la table 9.1.

Conductibilité thermique moyenne du terrain	Forage Est	Forage Ouest
Valeur estimée	2.08 W/mK	1.93 W/mK
Valeur pessimiste	1.88 W/mK	1.79 W/mK

Table 9.1 Estimation de la conductibilité thermique du terrain pour les forages Est et Ouest.

Il est compréhensible que la conductibilité thermique moyenne du terrain soit légèrement supérieure pour le forage Est que pour le forage Ouest: contrairement au forage Ouest, le forage Est traverse une couche de gravier saturé en eau de 5.7 m d'épaisseur. Si l'on suppose une conductibilité thermique de 2.3 W/mK pour cette couche, valeur tout à fait réaliste pour du gravier saturé, la valeur moyenne du terrain en dessous doit avoir une valeur de 1.8 W/mK dans la situation "pessimiste", de manière à conserver la valeur moyenne de 1.88 W/mK sur toute la hauteur de la sonde. Cette couche de gravier est superficielle et sera enlevée lors de la

construction du Dock Midfield. En conséquence, il faut compter avec une valeur de 1.8 W/mK pour le terrain, adoptée comme valeur de dimensionnement pour les simulations numériques futures de l'installation avec pieux échangeurs du Dock Midfield.

Conductibilité thermique moyenne du terrain utilisée pour le dimensionnement du système avec pieux échangeurs: 1.8 W/mK

Cette valeur est tout à fait acceptable pour un terrain principalement composé d'argile et de limon saturé (Jäckli,1996¹). Elle confirme également le fait qu'un écoulement de l'eau souterraine est vraisemblablement très faible.

10. Folgerungen

Die Response-Tests und die vorgängig durchgeführten Simulationsrechnungen stimmen sehr gut überein. Damit und mit der genauen Kenntnis der Bodenleitfähigkeit kann von den Simulationsrechnungen der Energiepfahlanlage ein sehr wirklichkeitsnahes Resultat erwartet werden.

Die leichte Verschlechterung der Leitfähigkeit des Bodens (1.8 W/mK) gegenüber dem bisher angenommenen Wert (2.0 W/mK) hat eine kleine Verringerung der erreichbaren Leistung zur Folge. Die insgesamt speicherbare Energie und damit der Ertrag der Energiepfahlanlage pro Jahr ändert dagegen nicht.

¹ Airport 2000, 5. Baustappe Zurich Flughafen, Dock Midfield, Hydrogeologische Grundlagen für geothermische Nutzung, Dr. Heinrich Jäckli AG, Zürich.

Appendice 1: Théorie du test de réponse

Contenu:

A1.1 Introduction	p. A1.1
A1.2 Formulation analytique	p. A1.1
Références	p. A1.3

A1.1 Introduction

Le test de réponse est basé sur le transfert dans le terrain d'une puissance thermique constante par la sonde géothermique utilisée, dont la durée est suffisamment longue pour atteindre un régime stationnaire dans la sonde (atteint après environ 1 jour pour une sonde géothermique classique). Si la puissance thermique varie avant la période d'analyse, elle est approximée par une série de pulses thermiques d'intensité constante. Au cours de la durée du test, les transferts thermiques près de la sonde sont essentiellement radiaux. On suppose que la puissance thermique transférée par unité de longueur est constante le long de la sonde. Ces hypothèses permettent d'approximer la sonde par une source d'énergie thermique linéaire.

A1.2 Formulation analytique

Le flux de chaleur transféré par la sonde géothermique est formulé de la manière suivante:

$$q(t) = \begin{cases} q_1 & t_1 < t_2 \quad (t_1 = 0) \\ q_2 & t_2 < t_3 \\ \dots & \dots \\ q_N & t_N < t_{N+1} \end{cases} \quad (\text{A1.1})$$

$q(t)$: flux de chaleur transféré par mètre linéaire de sonde (W/m). Pour les temps antérieurs à $t_1=0$, le flux de chaleur est nul.

La solution générale est obtenue par le principe de superposition de la solution d'un simple pulse thermique (Eskilson et al., 1987):

$$T_f(t) - T_t = \frac{q_{ref}}{4\pi\lambda_t} \cdot \tau_N(t) + q_N \cdot \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_t} \cdot \left(\ln\left(\frac{4a_t}{r_f^2}\right) - \gamma \right) \right] \quad (\text{A1.2})$$

Le domaine de validité de l'équation (A1.2) est donné par:

$$t_N + \frac{5r_f^2}{a_t} < t < t_{N+1} \quad (\text{A1.3})$$

$T_f(t) = (T_{in}(t) + T_{out}(t))/2$: température moyenne du fluide définie par la moyenne arithmétique entre la température d'entrée et de sortie du fluide dans la sonde (°C);

T_t : température du terrain non perturbé (°C);

q_{ref} : flux de chaleur de référence arbitraire (W/m);

q_N : flux de chaleur échangé par la sonde, défini par la relation (A1.1) (W/m);

λ_t : conductibilité thermique du terrain (W/mK);

a_t : diffusivité thermique du terrain (m²/s);

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

r_f : rayon de la sonde géothermique (forage) (m);

γ : constante d'Euler = 0.5772;

$\tau_N(t)$: temps sans dimension, défini par la relation (A1.4) (-).

$$\tau_N(t) = \sum_{n=1}^N \frac{q_n - q_{n-1}}{q_{ref}} \cdot \ln(t - t_n) \quad (A1.4)$$

Le domaine de validité de l'équation (A1.4) est défini par l'équation (A1.3). Le flux de chaleur q_0 est nul.

Durant l'intervalle de temps $\left(t_N + \frac{5r_f^2}{a_t} < t < t_{N+1} \right)$, l'évolution de la température du fluide $T_f(t)$ est linéaire relativement à $\tau_N(t)$. La pente de la droite, ϕ , permet d'évaluer la conductibilité thermique du terrain par:

$$\lambda_t = \frac{q_{ref}}{4\pi \phi} \quad (A1.5)$$

Dans la situation où le flux de chaleur échangé par la sonde est approximé par deux pulses consécutifs, le temps sans dimension τ_2 se réduit à:

$$\tau_2(t) = \frac{q_1}{q_2} \cdot \ln(t - t_1) + \frac{q_2 - q_1}{q_2} \cdot \ln(t - t_2) \quad (A1.6)$$

Le flux de chaleur q_2 est choisi comme flux de référence. La température du fluide doit évoluer selon une courbe définie par la relation (A1.2), avec N égal à 2. Comme la sonde s'échauffe durant la période du test, une petite fraction du flux de chaleur est emmagasinée par la sonde, ce qui diminue d'autant le flux de chaleur injecté dans le terrain. Une valeur moyenne peut être estimée pour chaque intervalle de temps pour être utilisée comme correction sur les flux de chaleur q_1 et q_2 .

L'évaluation de la conductivité thermique du terrain nécessite la mesure de l'évolution de la température du fluide circulant dans la sonde, ainsi que la mesure des flux thermiques échangés par la sonde depuis le début des transferts thermiques. Une estimation de la capacité thermique de la sonde est également nécessaire.

L'évaluation de la résistance thermique de la sonde nécessite en plus la connaissance de la température du terrain non perturbé, les propriétés thermiques du terrain (conductivité thermique et capacité thermique volumique) et également le rayon (ou diamètre) de la sonde (forage).

Références

- Eskilson P., Hellström G., Wånggren B (1987) Response Test for a Heat Store with 25 Boreholes. Department of Building Technology and Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Eskilson P., (1987) Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Thesis. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.

Appendice 2: Mesures effectuées pour les deux tests de réponse

Contenu:

A2.1	Introduction	p. A2.1
A2.2	Mesures relatives au forage Est	p. A2.1
A2.2.1	Mesures ponctuelles des puissances et énergies électriques pour le forage Est	p. A2.1
A2.2.2	Mesures des températures pour le forage Est	p. A2.2
A2.2.3	Mesures des débits pour le forage Est	p. A2.2
A2.3	Mesures relatives au forage Ouest	p. A2.5
A2.3.1	Mesures ponctuelles des puissances et des énergies électriques pour le forage Ouest	p. A2.5
A2.3.2	Mesures des températures pour le forage Ouest	p. A2.6
A2.3.3	Mesures des débits pour le forage Ouest	p. A2.6
A2.4	Mesures des températures du fluide caloporteur (eau)	p. A2.6

A2.1 Introduction

Les mesures, décrites dans la partie 5 du rapport, consistent en trois groupes:

- mesures ponctuelles de la puissance et de l'énergie électrique consommée par le chauffe-eau et la pompe. Précision des mesures: environ 1%.
- mesures en continu de 4 températures (eau à l'entrée et à la sortie de la sonde, air du local et air extérieur). Elles sont mesurées toutes les 5 secondes et enregistrées par moyenne chaque 5 minutes grâce à un datalogger VNR Electronique SA. Les mesures de température, incluant l'appareillage électronique pour effectuer les mesures "4-fils" des PT100, ont une précision de l'ordre de 0.1 °C. Elles ont été calibrées les unes relativement aux autres dans la plage de température des tests de réponse.
- mesures en continu du débit par la vanne de contrôle du débit. Comme mentionné dans le rapport, ces mesures, effectuées par un autre datalogger, surestiment de près de 30 % le débit. Fort heureusement, ces mesures ne sont pas indispensables à l'analyse du test de réponse.

A2.2 Mesures relatives au forage Est

Le test de réponse du forage Est a duré environ 8 jours, du 27 janvier au 4 février 1998. La circulation de l'eau sans le chauffage du chauffe-eau a été effectuée durant un jour précédant la test de réponse, de manière à pouvoir estimer la température initiale du terrain. Les événements suivants sont notés:

Début de la circulation de l'eau dans la sonde:	lundi 26 janvier à 14h30
Enclenchement du chauffage du chauffe-eau:	mardi 27 janvier à 15h
Arrêt du test de réponse Est:	mercredi 4 février à 8h20

A2.2.1 Mesures ponctuelles des puissances et énergies électriques pour le forage Est

Les mesures, effectuées trois fois, sont reportées dans les tables A2.1 et A2.2:

Chauffe-eau	1 ^{re} mesure	2 ^{ième} mesure	3 ^{ième} mesure
Date	27.1.98 15h	29.1.98 13h20	4.2.98 8h20
Puissance instantanée	1'288 W	1'319 W	-
Energie depuis le début du chauffage	0 kWh	60.5 kWh	241.1 kWh
Durée	0h	46.33 h	185.33 h
Puissance moyenne	-	1'306 W	1'301 W

Table A2.1 Mesures électriques relative au chauffe-eau pour le forage Est

Pompe de circulation	1 ^{re} mesure	2 ^{ième} mesure	3 ^{ième} mesure
Date	27.1.98 15h	29.1.98 13h20	4.2.98 8h20
Puissance instantanée	≈ 30 W	27 W	-
Energie depuis le début du chauffage	0 kWh	1.230 kWh	4.894 kWh
Durée	0 h	46.33 h	185.33 h
Puissance moyenne	-	27 W	26 W

Table A2.2 Mesures électriques relative à la pompe de circulation pour le forage Est

Le chauffe-eau et la pompe de circulation ont consommé une puissance électrique moyenne de respectivement 1'301 et 26 W durant le test de réponse. Compte tenu de la concordance des mesures, aucune panne n'est à signaler (coupure électrique, fonctionnement de la pompe ou du chauffe-eau).

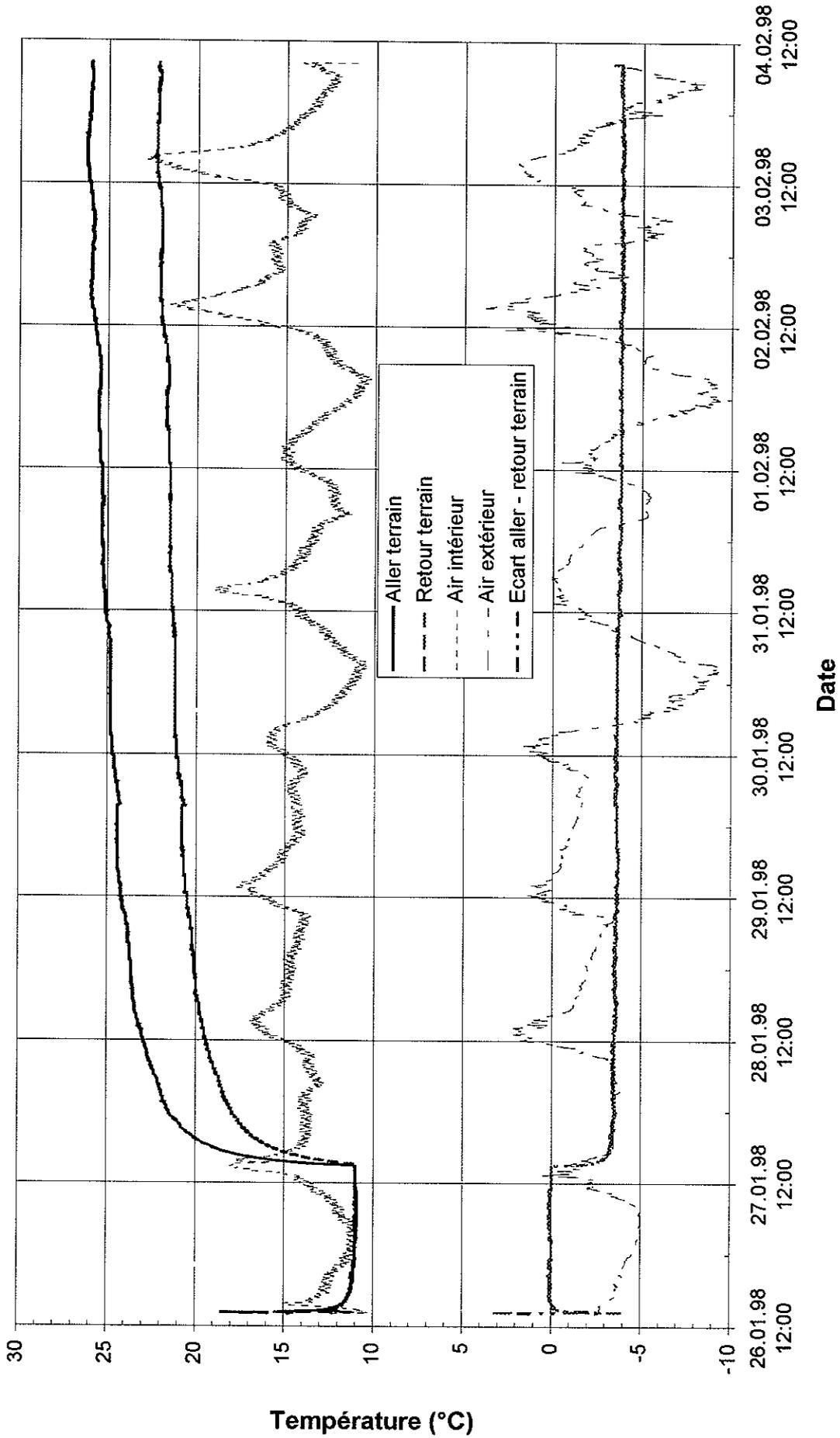
A2.2.2 Mesures des températures pour le forage Est

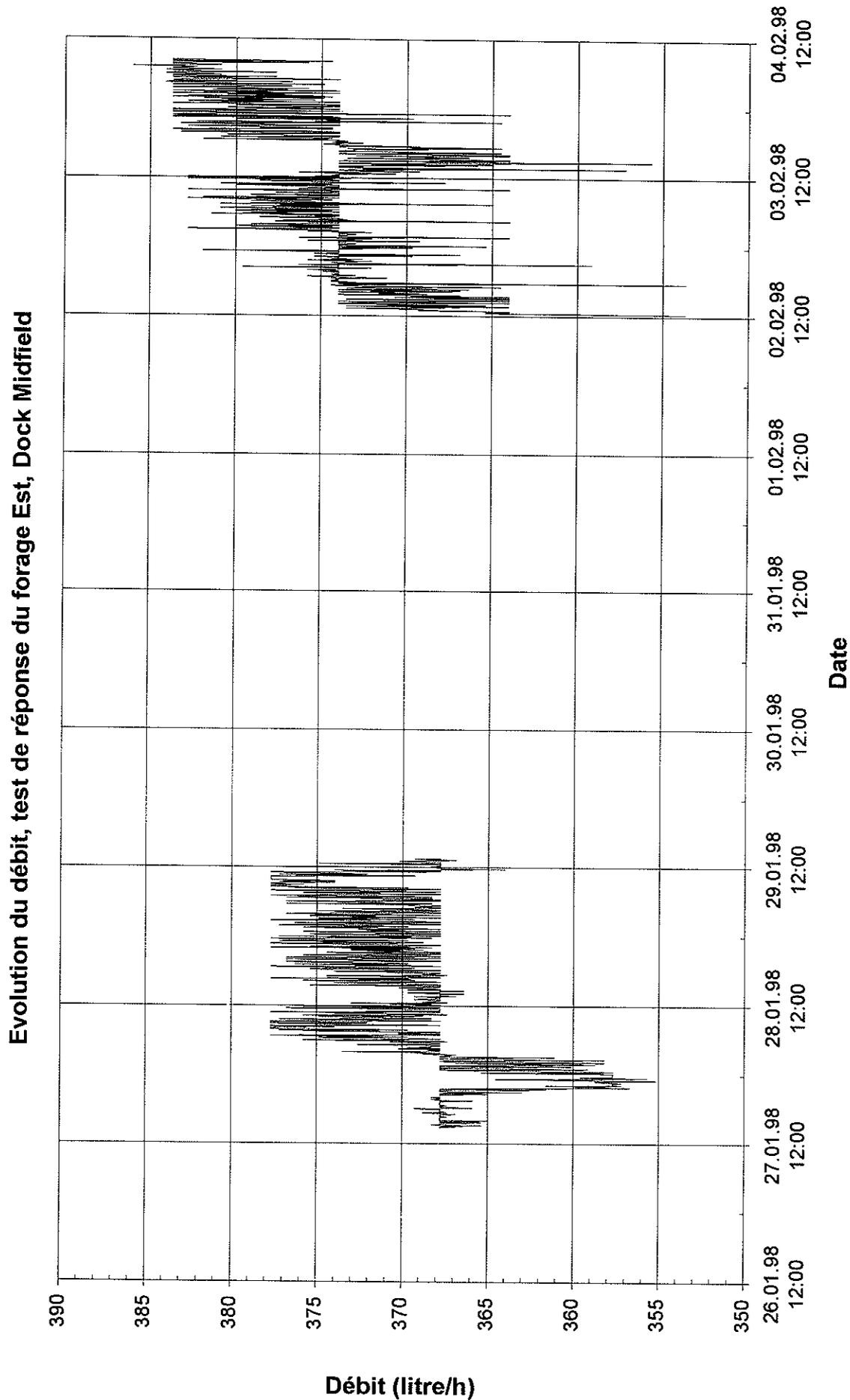
Les mesures de températures sont montrées sur la page A2.3. La température de l'eau dans la sonde atteint une valeur de 11 °C, qui doit être proche de la température initiale du terrain en valeur moyenne sur la hauteur de la sonde, soit les 33 premiers mètres de terrain.

A2.2.3 Mesures des débits pour le forage Est

L'évolution des débits mesurés figure à la page A2.4, de manière à montrer de manière qualitative sa variation dans le temps. Le trou observé dans son évolution correspond à une perte des mesures. Sur la base de l'écart de température et de la puissance électrique mesurée, le débit devrait avoir une valeur moyenne d'environ 300 litres/h.

Evolution des températures, test de réponse du forage Est, Dock Midfield





A2.3 Mesures relatives au forage Ouest

Le test de réponse du forage Ouest a duré environ 7 jours, du 16 février au 23 février 1998. La circulation de l'eau sans le chauffage du chauffe-eau a été effectuée dès la mise en place du dispositif sur le forage Ouest, soit le mercredi 4 février, de manière à ne pas risquer de geler l'eau dans les tubes en plastique placés à l'extérieur qui relie le forage au local tempéré. Les événements suivants sont notés:

Début de la circulation de l'eau dans la sonde:	mercredi 4 février à 12h
Enclenchement du chauffage du chauffe-eau:	lundi 16 février à 9h20
Arrêt du test de réponse Ouest:	lundi 23 février à 10h20

A2.3.1 Mesures ponctuelles des puissances et des énergies électriques pour le forage Ouest

Les mesures, effectuées trois fois, sont reportées dans les tables A2.3 et A2.4:

Chauffe-eau	1 ^{re} mesure	2 ^{ième} mesure	3 ^{ième} mesure
Date	16.1.98 9h20	18.2.98 15h53	23.2.98 10h21
Puissance instantanée	1'460 W	1'465 W	1'455
Energie depuis le début du chauffage	0 kWh	79.7 kWh	240.6 kWh
Durée	0h	54.55 h	169.02 h
Puissance moyenne	-	1'461 W	1'424 W

Table A2.3 Mesures électriques relative au chauffe-eau pour le forage Ouest

Pompe de circulation	1 ^{re} mesure	2 ^{ième} mesure	3 ^{ième} mesure
Date	16.1.98 9h14	18.2.98 15h52	23.2.98 10h21
Puissance instantanée	29 W	28 W	28 W
Energie depuis le début du chauffage	0 kWh	1.528 kWh	4.724 kWh
Durée	0 h	54.63 h	169.12 h
Puissance moyenne	-	28 W	28 W

Table A2.4 Mesures électriques relative à la pompe de circulation pour le forage Ouest

Le chauffe-eau et la pompe de circulation ont consommé une puissance électrique moyenne de respectivement 1'424 et 28 W durant le test de réponse. Compte tenu de la concordance des mesures, aucune panne n'est à signaler (coupure électrique, fonctionnement de la pompe ou du chauffe-eau).

A2.3.2 Mesures des températures pour le forage Ouest

Les mesures de températures sont montrées sur les pages A2.7, A2.8 et A2.9. Comme la mémoire du datalogger ne permet pas de stocker plus que 6 jours de mesures, un trou de mesure existe dans la première partie de la période sans chauffage, entre le 6 et le 10 février.

La température de l'eau dans la sonde avoisine une valeur de 10 °C, qui doit être proche de la température initiale du terrain en valeur moyenne sur la hauteur de la sonde, soit les 33 premiers mètres de terrain. On peut toutefois noter que la température de l'eau est influencée par la température ambiante du local, qui elle-même dépend des conditions météorologiques, et en particulier de la température extérieure.

A2.3.3 Mesures des débits pour le forage Ouest

L'évolution des débits mesurés figure à la page A2.10, de manière à montrer de manière qualitative sa variabilité. Toutes les mesures ne sont pas montrées. Sur la base de l'écart de température et de la puissance électrique mesurée, le débit devrait avoir une valeur moyenne inférieure à 300 litres/h.

A2.4 Mesures des températures du fluide caloporteur (eau)

Les mesures de température du fluide caloporteur, à l'aller comme au retour, sont influencées par la température du local, bien que les tuyaux soient isolés. Cet effet est particulièrement important lors du test de réponse du forage Ouest (voir p. A2.9), où la température de l'air du local varie de manière importante. La question qui se pose alors est la suivante:

- est-ce la température du fluide qui subit ces variations ou la mesure de température elle-même ?

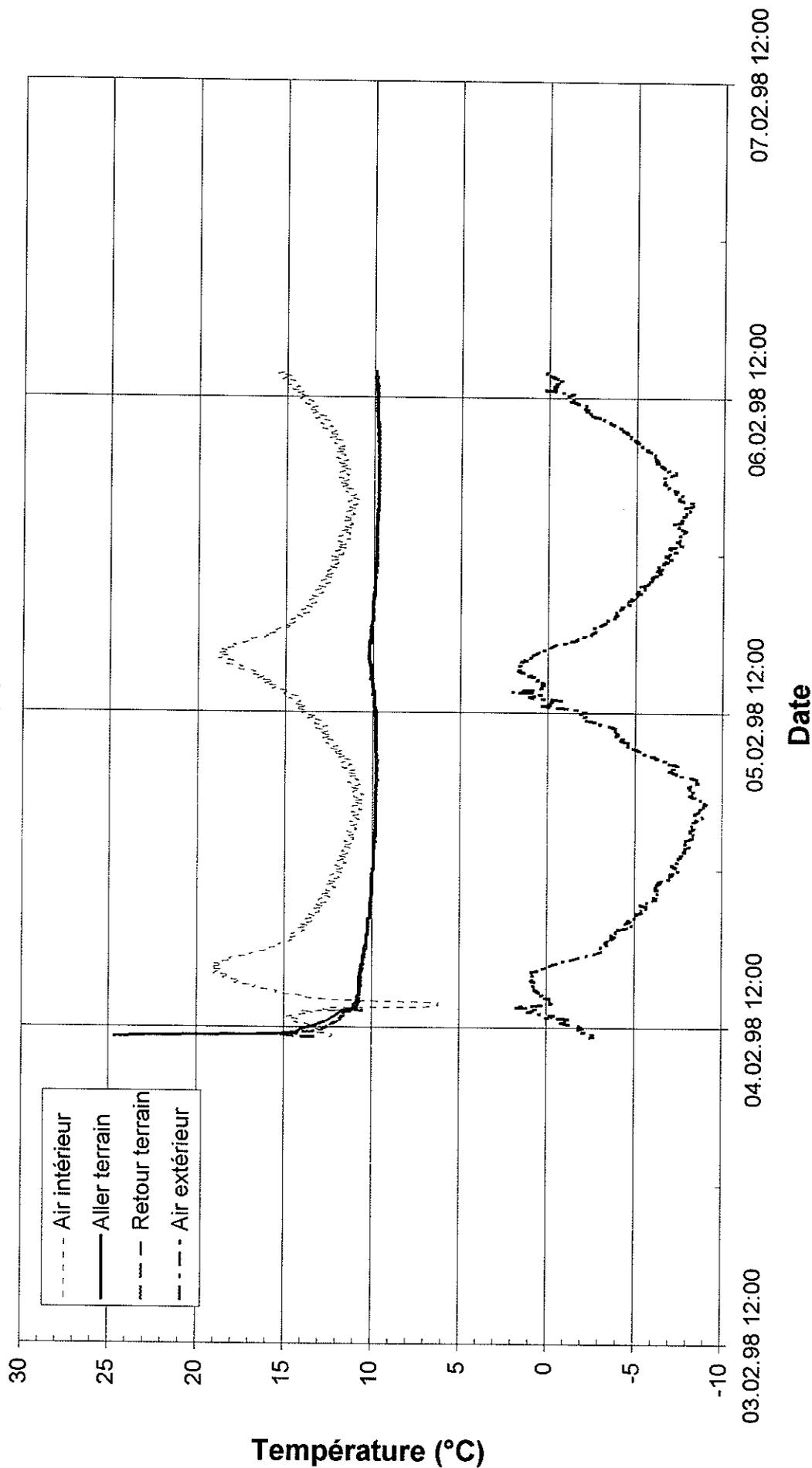
En effet, bien que la PT100 se trouve dans un doigt de gant dont l'extrémité a été remplie avec de la graisse thermique, un transfert de chaleur entre celle-ci et la pièce ne peut pas être complètement supprimé. En particulier, le culot du doigt de gant n'était pas isolé comme l'était le tuyau. En conséquence, les températures mesurées peuvent se trouver entre la température du fluide et de l'air ambiant, en fonction du rapport des coefficients de transfert thermique "fluide - PT100", et "PT100 - air du local".

Afin de lever ce doute, les culots des doigts de gant ont été isolés lors du test de réponse du forage Ouest, le 18 février vers 16 h. L'observation qualitative de l'évolution des températures du fluide caloporteur les jours suivants (voir p. A2.9) ne permet pas de déceler une modification de l'influence de la température du local sur les mesures des températures du fluide. Les variations de température sont donc principalement imputées à la variation de température du fluide et non à une erreur de mesure. La réponse à la question posée est formulée comme suit:

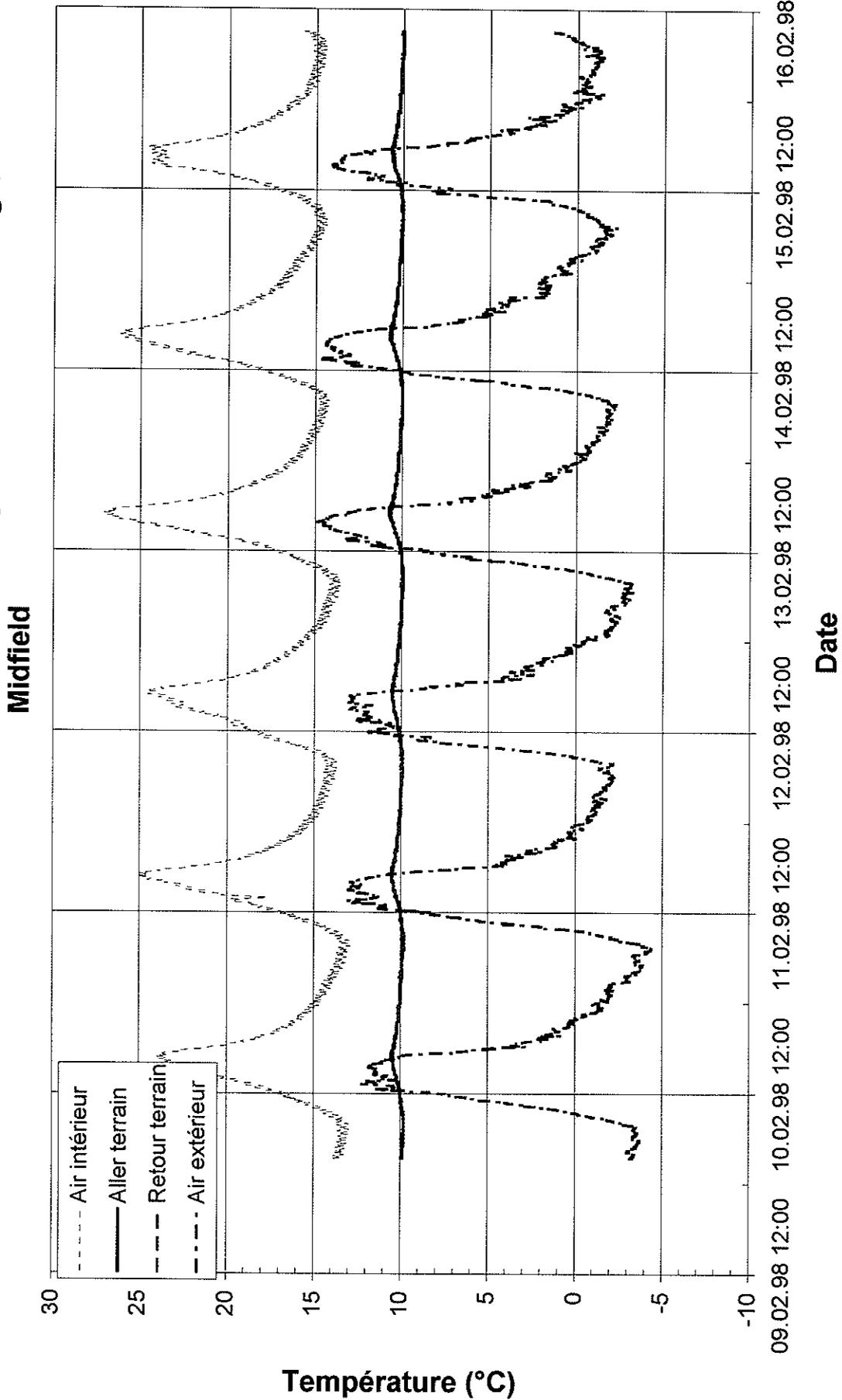
- une erreur de mesure ne peut pas expliquer les variations de température, ce qui laisse penser que c'est bien le fluide caloporteur qui les subit. En conséquence, les pertes thermiques du circuit hydraulique dans le local ne sont pas négligeables et superposent des variations de température à l'évolution attendue des températures du fluide.

Evolution des températures du 4 au 6 février, forage Ouest sans chauffage, Dock

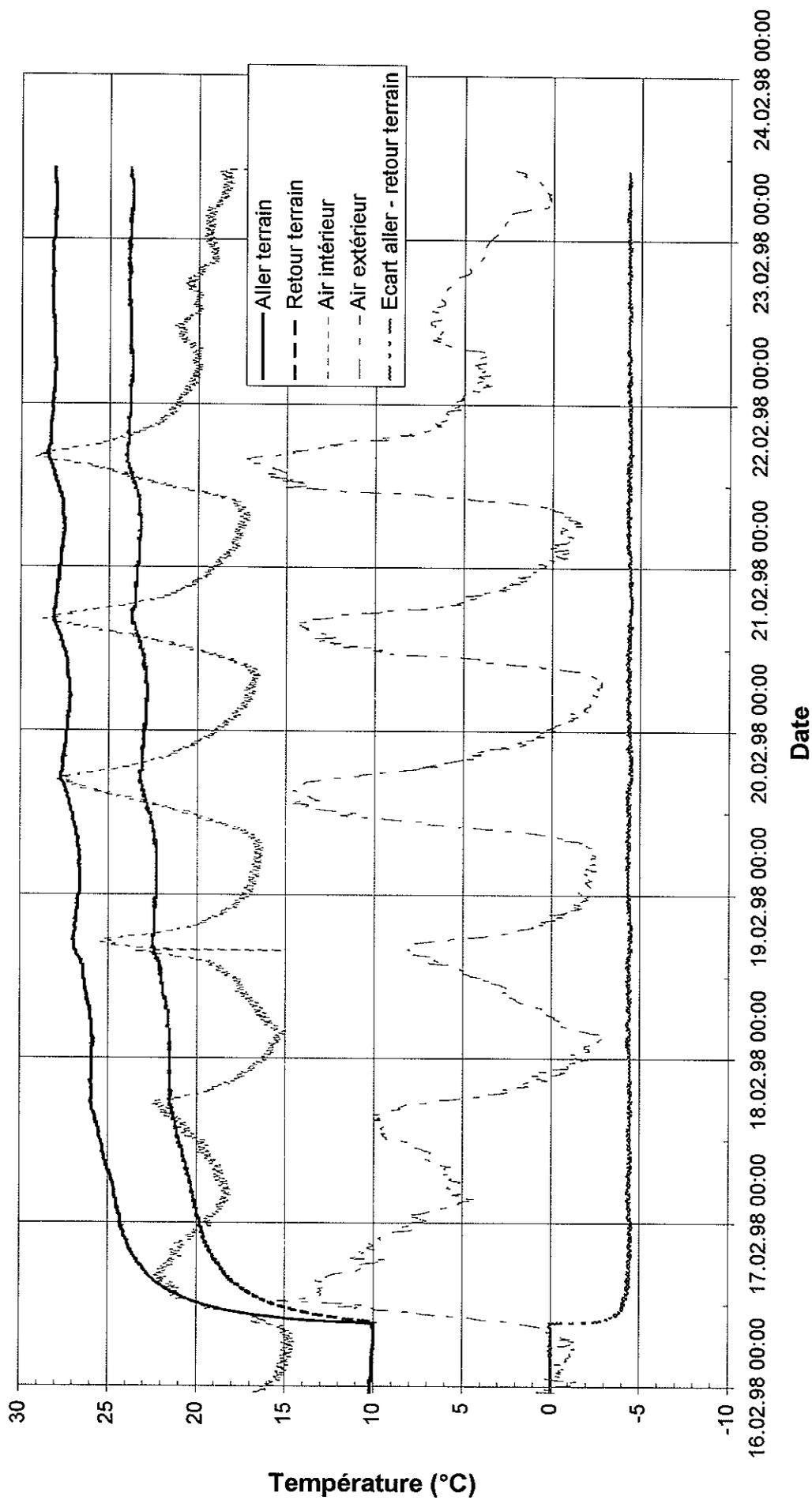
Midfield

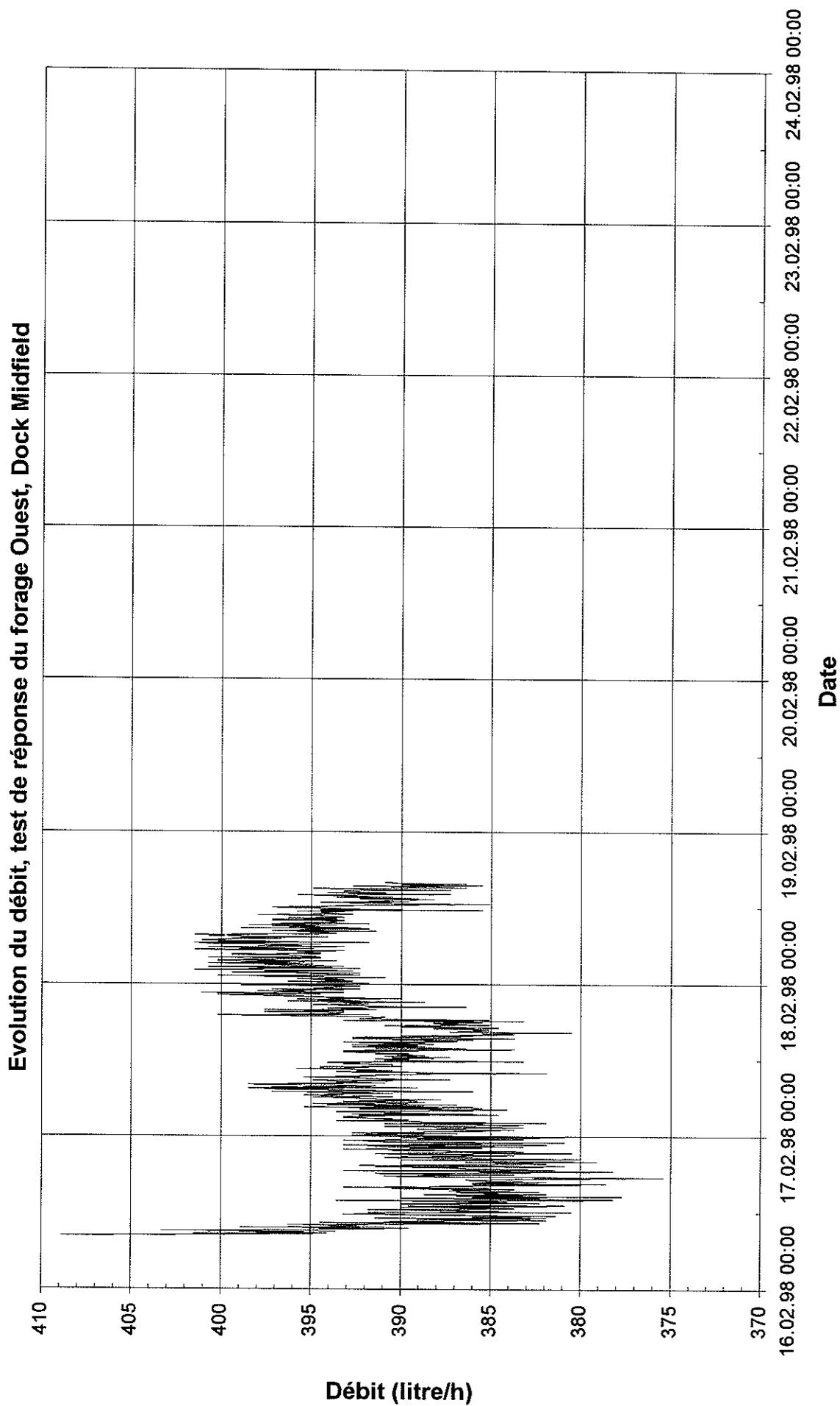


Evolution des températures du 10 au 16 février, forage Ouest sans chauffage, Dock



Evolution des températures, test de réponse du forage Ouest, Dock Midfield





Appendice 3: Modèle pour le calcul de la puissance thermique injectée dans le terrain

Contenu:

A3.1	Introduction	p. A3.1
A3.2	Calcul de la puissance thermique	p. A3.1
A3.3	Estimation de la capacité thermique de la sonde et du circuit hydraulique ...	p. A3.2
A3.4	Estimation par régression multilinéaire des pertes thermiques dans le local	p. A3.3

A3.1 Introduction

Seule les puissances électriques consommées par le chauffe-eau et la pompe de circulation sont mesurés et connus. Néanmoins, la puissance thermique qui est effectivement injectée dans le terrain n'est pas égale à la somme des deux puissances électriques. Premièrement, seule une fraction de ces puissances se retrouvera sous la forme de chaleur dans l'eau circulant dans la sonde. D'autre part, en raison de l'échauffement engendré par le test de réponse, une part de l'énergie thermique sera emmagasinée et "stockée" dans le circuit hydraulique et la sonde elle-même. Finalement, et c'est l'effet le plus important, les pertes thermiques du circuit hydraulique en surface (chauffe-eau, tuyaux, pompe, brides, etc.), malgré une isolation soignée, peuvent sensiblement réduire la puissance thermique injectée dans la sonde.

Dans cette appendice, la puissance thermique transférée dans le terrain est modélisée sur la base des hypothèses et des estimations suivantes:

- 100 % de l'énergie électrique consommée par le chauffe-eau est convertie en énergie thermique dans l'eau du circuit;
- 50 % de l'énergie électrique consommée par la pompe de circulation est convertie en énergie thermique dans l'eau du circuit;
- la capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde sont évalués sur la base de leurs caractéristiques;
- les pertes thermiques du circuit hydraulique sont estimées sur la base des mesures effectuées pendant la période sans chauffage du forage Ouest. La capacité thermique (circuit hydraulique et sonde) est également estimée par l'analyse de ces mesures.

A3.2 Calcul de la puissance thermique

La puissance thermique injectée dans le terrain (cf. équation A3.1), est égale à la puissance électrique convertie en puissance thermique dans le circuit hydraulique, diminuée des puissances thermiques engendrées par l'échauffement de ce dernier et par les pertes de chaleur dans le local. Les pertes thermiques à l'extérieur sont supposées être faibles en comparaison, puisque la longueur des tuyaux qui relient le local à la sonde n'excède pas 2 mètres et sont bien isolés. Comme les mesures montrent une bonne corrélation entre la température du local et la température extérieure, elles sont malgré tout prises en compte dans le coefficient de pertes thermiques relativement à la température du local lors de son estimation par les mesures.

$$P_{\text{terrain}}(t) = \eta_c P_{\text{el-c}} + \eta_p P_{\text{el-p}} - C_{\text{capa}} \frac{dT_f(t)}{dt} - U_{\text{loss}} (T_f(t) - T_{\text{local}}(t)) \quad (\text{A3.1})$$

- $P_{\text{terrain}}(t)$: puissance thermique nette transférée dans le terrain par la sonde géothermique (W);
 $P_{\text{el-c}}$: puissance électrique consommée par le chauffe-eau (W);
 η_c : fraction de l'énergie électrique convertie en énergie thermique du chauffe-eau (-);
 $P_{\text{el-p}}$: puissance électrique consommée par la pompe de circulation (W);
 η_p : fraction de l'énergie électrique convertie en énergie thermique de la pompe (-);
 $T_f(t) = (T_{\text{in}}(t) + T_{\text{out}}(t))/2$: température moyenne du fluide définie par la moyenne arithmétique entre la température d'entrée et de sortie du fluide dans la sonde (°C);
 $T_{\text{local}}(t)$: température mesurée de l'air ambiant du local (°C);
 C_{capa} : capacité thermique effective du circuit hydraulique et de la sonde (J/K);
 U_{loss} : pertes spécifiques du circuit hydraulique relativement à la température ambiante du local (W/K).

La puissance thermique injectée dans le terrain peut être calculée si la capacité thermique C_{capa} et les pertes spécifiques U_{loss} sont estimées.

A3.3 Estimation de la capacité thermique de la sonde et du circuit hydraulique

La capacité thermique C_{capa} pour chacun des deux tests de réponse est déterminée, bien que la longueur des sondes ne diffère que légèrement.

Les caractéristiques des sondes, formées par un double-U noyé dans de la bentonite, sont données dans la table A3.1, de même que les valeurs de capacité thermique. La capacité thermique du circuit hydraulique en surface est essentiellement constituée par la capacité du volume d'eau contenu dans le chauffe-eau et les tuyaux.

La capacité thermique des sondes Est et Ouest, en incluant le volume d'eau contenu dans le chauffe-eau et les tuyaux en surface, ont une capacité thermique pratiquement égale évaluée à **1,24 MJ/K**.

Paramètre des sondes	Sonde Est	Sonde Ouest
Type de sonde	double - U	double - U
Diamètre forage	0.12 m	0.12 m
Longueur sonde	33.2 m	33.4 m
Diamètre intérieur / extérieur des tubes en plastique	20.4 / 25 mm	20.4 / 25 mm
Matériau de remplissage	bentonite	bentonite
Capacité thermique des sondes	Sonde Est	Sonde Ouest
Capacité thermique du fluide caloporteur (eau)	4.18 MJ/m ³ K	4.18 MJ/m ³ K
Volume du fluide caloporteur dans la sonde	43 litres	44 litres
Capacité thermique du fluide caloporteur dans la sonde	181 kJ/K	183 kJ/K
Capacité thermique du matériau de remplissage	2.2 MJ/m ³ K	2.2 MJ/m ³ K
Volume du matériau de remplissage	310 litres	312 litres
Capacité thermique du matériau de remplissage	683 kJ/K	687 kJ/K
Capacité thermique totale de la sonde	864 kJ/K	870 kJ/K
Capacité thermique du fluide en surface (eau)	Sonde Est	Sonde Ouest
Volume du fluide caloporteur (chauffe-eau et tuyaux)	90 litres	90 litres
Capacité thermique du fluide (chauffe-eau et tuyaux)	376 kJ/K	376 kJ/K
Capacité totale C_{capa}	1'240 kJ/K	1'245 kJ/K

Table A3.1 Caractéristiques des sondes Est, Ouest, et capacité thermique associée.

A3.4 Estimation par régression multilinéaire des pertes thermiques dans le local

Le calcul des pertes thermiques n'est pas aussi aisé que pour celui de la capacité thermique, puisque l'influence des ponts thermiques, des brides et des sections de tuyaux dépourvu d'isolation n'ont pas une influence négligeable et sont difficiles à calculer. En revanche, les mesures de l'évolution de la température du fluide caloporteur durant la période sans chauffage permet de les estimer par régression multilinéaire.

Durant cette période, l'air du local a une température plus élevée que celle du terrain. Un transfert de chaleur, transporté par le fluide caloporteur, a lieu du local dans le terrain. Comme l'énergie thermique transférée est faible, la température du terrain n'augmente pas de manière significative dans le voisinage de la sonde. Cela permet d'écrire la puissance transférée par la sonde avec la relation suivante:

$$P_{\text{terrain}}(t) = (T_f(t) - T_{\text{terrain}}) \frac{H}{R_b} \quad (\text{A3.2})$$

$P_{\text{terrain}}(t)$: puissance thermique nette transférée dans le terrain par la sonde géothermique (W);
 $T_f(t) = (T_{\text{in}}(t) + T_{\text{out}}(t))/2$: température moyenne du fluide définie par la moyenne arithmétique entre la température d'entrée et de sortie du fluide dans la sonde (°C);
 T_{terrain} : température du terrain non perturbé (°C);
 H : longueur active du forage (m);
 R_b : résistance thermique effective du forage (K/(W/m)).

L'approximation suivante est utilisée pour évaluer la dérivée temporelle de $T_f(t)$:

$$\frac{dT_f(t)}{dt} = \frac{T_f(t) - T_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (\text{A3.3})$$

Δt : intervalle de temps utilisé pour enregistrer les mesures, 5 minutes (s);
 $T_f(t)$: température moyenne du fluide pour le pas de temps courant (°C);
 $T_f(t-\Delta t)$: température moyenne du fluide pour le pas de temps précédent (°C);

NB : normalement, il faudrait prendre la différence des températures instantanées au début et à la fin de l'intervalle de temps considéré. Ces températures ne sont pas enregistrées, et compte tenu du faible pas de temps relativement aux variations temporelles de la température, cette approximation est tout à fait satisfaisante.

L'évolution de la température du fluide au cours du temps, $T_f(t)$, est exprimée comme une combinaison linéaire de $T_{\text{local}}(t)$, la température de l'air du local, et de $T_f(t-\Delta t)$, sa valeur durant le pas de temps précédant, grâce aux relations A3.1 à A3.3:

$$T_f(t) = m_0 + m_1 T_{\text{local}}(t) + m_2 T_f(t-\Delta t) \quad (\text{A3.4})$$

$T_f(t)$: température moyenne du fluide pour le pas de temps courant (°C);
 $T_{\text{local}}(t)$: température mesurée de l'air ambiant du local (°C);
 $T_f(t-\Delta t)$: température moyenne du fluide pour le pas de temps précédent (°C);

Les constantes m_0 , m_1 et m_2 sont déterminées par les relations suivantes:

$$m_0 = \frac{T_{\text{terrain}} \frac{H}{R_b} + \eta_p P_{\text{el-p}}}{\left(\frac{H}{R_b} + U_{\text{loss}} + \frac{C_{\text{capa}}}{\Delta t} \right)} \quad (\text{A3.5})$$

$$m_1 = \frac{U_{\text{loss}}}{\left(\frac{H}{R_b} + U_{\text{loss}} + \frac{C_{\text{capa}}}{\Delta t} \right)} \quad (\text{A3.6})$$

$$m_2 = \frac{\frac{C_{\text{capa}}}{\Delta t}}{\left(\frac{H}{R_b} + U_{\text{loss}} + \frac{C_{\text{capa}}}{\Delta t} \right)} \quad (\text{A3.7})$$

T_{terrain} : température du terrain non perturbé ($^{\circ}\text{C}$);

H : longueur active du forage (m);

R_b : résistance thermique effective du forage ($\text{K}/(\text{W}/\text{m})$).

U_{loss} : pertes spécifiques du circuit hydraulique relativement à la température ambiante du local (W/K).

C_{capa} : capacité thermique effective du circuit hydraulique et de la sonde (J/K);

Δt : intervalle de temps utilisé pour enregistrer les mesures, 5 minutes (s);

$P_{\text{el-p}}$: puissance électrique consommée par la pompe de circulation (W);

η_p : fraction de l'énergie électrique convertie en énergie thermique de la pompe (-);

Les coefficients m_0 , m_1 et m_2 sont estimés par régression multilinéaire. La connaissance de H , R_b , $P_{\text{el-p}}$ et η_p permet, une fois les coefficients m_0 , m_1 et m_2 connus, de déterminer U_{loss} , C_{capa} et T_{terrain} . Ils sont calculés avec:

$$U_{\text{loss}} = \frac{H}{R_b} \frac{m_1}{(1 - m_1 - m_2)} \quad (\text{A3.8})$$

$$C_{\text{capa}} = \frac{H}{R_b} \frac{m_2}{(1 - m_1 - m_2)} \Delta t \quad (\text{A3.9})$$

$$T_{\text{terrain}} = \frac{m_0}{(1 - m_1 - m_2)} - \frac{R_b}{H} \eta_p P_{\text{el-p}} \quad (\text{A3.10})$$

La résistance thermique effective du forage n'est pas connue à priori et doit être calculée. Comme elle est estimée par l'analyse du test de réponse, il faut s'assurer que la valeur utilisée ici soit compatible avec la valeur estimée ultérieurement, ce qui peut demander de recommencer toute la démarche avec une valeur adéquate de la résistance thermique R_b . Les valeurs suivantes sont utilisés pour les paramètres R_b et H :

- résistance thermique effective du forage R_b : 0.15 K/(W/m)
- longueur du forage H : 33.4 m

Les paramètres P_{cl-p} et η_p n'ont qu'une influence mineure sur la détermination de $T_{terrain}$ (-0.06 °C) et sont négligés ($\eta_p P_{cl-p} = 0$).

La régression multilinéaire a un coefficient de corrélation de 0.998. Les résultats sont montrés dans la table A3.2:

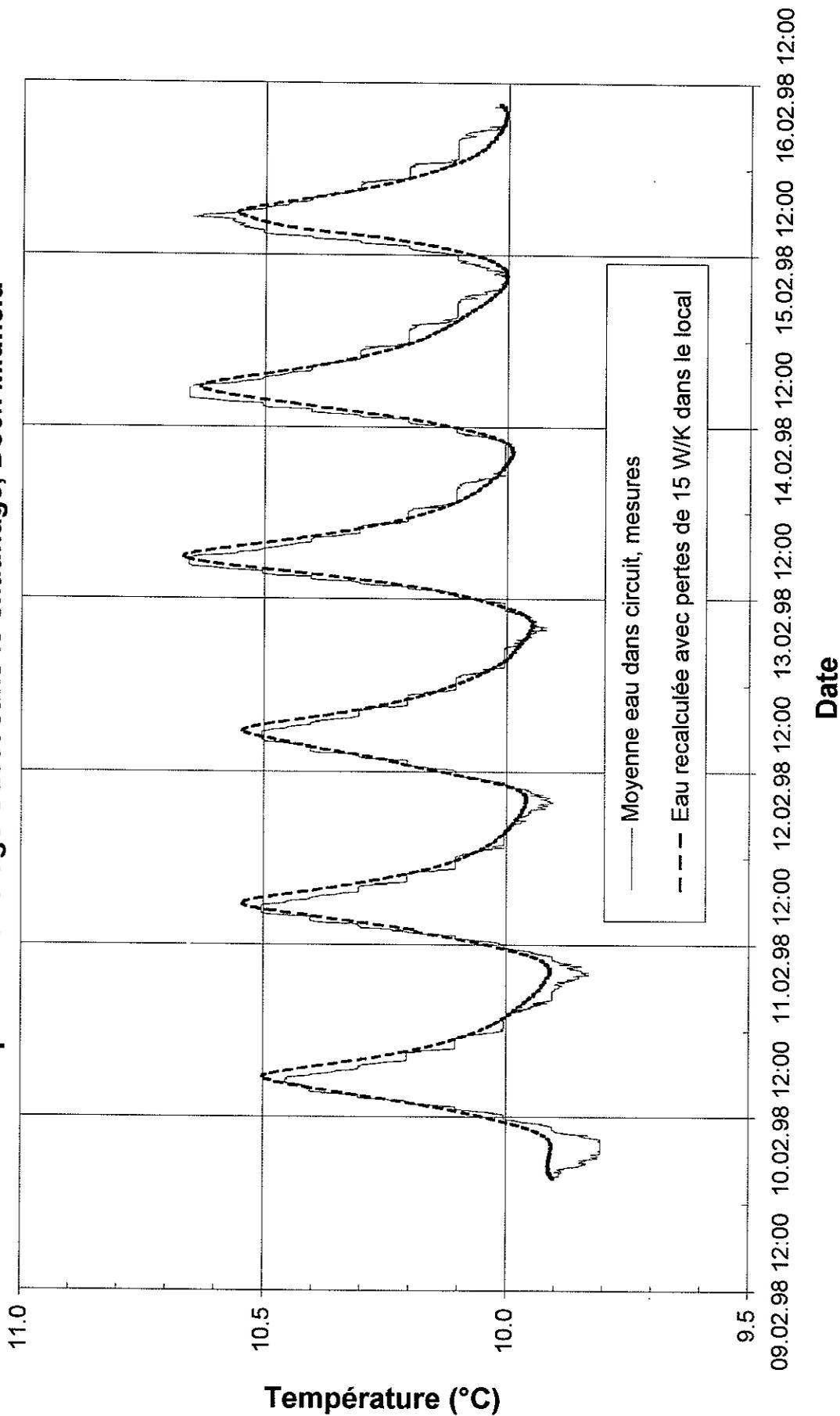
Régression multilinéaire	m_0	m_1	m_2
Valeur	0.5035 °C	0.003564 -	0.9444 -
Incertitude	0.0263 °C	0.000175 -	0.0029 -
Paramètre:	Estimation	Minimum	Maximum
U_{loss}	15.2 W/m	11.9 W/m	19.9 W/m
C_{capa}	1.21 MJ/K	0.99 MJ/K	1.51 MJ/K
$T_{terrain}$	9.7 °C	8.7 °C	10.8 °C

Table A3.2 Paramètres estimés par régression multilinéaire.

L'estimation de la capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde (1.21 MJ/K) est tout à fait compatible avec la valeur obtenue dans la section précédente (1.24 MJ/K). La température initiale du terrain, quand à elle, avoisine les 10 °C.

Les pertes spécifiques du circuit hydraulique relativement à la température ambiante du local sont fixées à 15 ± 5 (W/K) dans l'analyse des deux tests de réponse. Sur la page suivante, les évolutions de la température moyenne du fluide mesurée et calculée par le modèle utilisé sont montrées et permettent d'apprécier qualitativement la qualité de la régression multilinéaire.

Comparaison des températures mesurées et calculées du fluide caloporteur, test de réponse du forage Ouest sans le chauffage, Dock Midfield



Appendice 4: Estimation de la conductibilité thermique du terrain dans les zones du forage Est et Ouest

Contenu:

A4.1	Introduction	p. A4.1
A4.2	Analyse du test de réponse pour le forage Est	p. A4.1
A4.3	Analyse du test de réponse pour le forage Ouest	p. A4.6

A4.1 Introduction

La puissance thermique injectée dans le terrain est calculée à l'aide des mesures et du modèle de calcul déterminé dans l'appendice 3. Pour les besoins de l'analyse, deux pulses consécutifs et constants sont utilisés pour représenter l'évolution de la puissance thermique injectée, et déterminés de manière à conserver l'énergie thermique injectée. Le premier pulse dure jusqu'à ce que la puissance thermique injectée dans le terrain devienne relativement constante, ce qui permet d'éviter que la valeur moyenne du pulse sur la durée du test ne soit inférieure aux valeurs "instantanées" de puissance pendant la période analysée (pour $t > t_2 + 5r_f^2/a$, voir appendice 1). En réalité, compte tenu de la variabilité de la puissance thermique en raison de pertes thermiques variables dans le local, un seul pulse aurait probablement suffi.

La température moyenne du fluide caloporteur mesurée est reportée en fonction du temps sans dimension défini par la relation (A1.6) de l'appendice 1. La pente de la droite permet d'obtenir la conductibilité thermique du terrain avec la relation (A1.5). Finalement, la résistance thermique de la sonde est calculée pour chaque pas de temps avec la relation (A1.2). Une valeur moyenne est ensuite déterminée avec les valeurs obtenues.

A4.2 Analyse du test de réponse pour le forage Est

La puissance thermique injectée dans le terrain, l'estimation de la conductibilité thermique du terrain et de la résistance de la sonde sont montrés dans les graphiques des pages A4.3, A4.4 et A4.5. Les principaux paramètres utilisés pour effectuer les analyses sont rappelés:

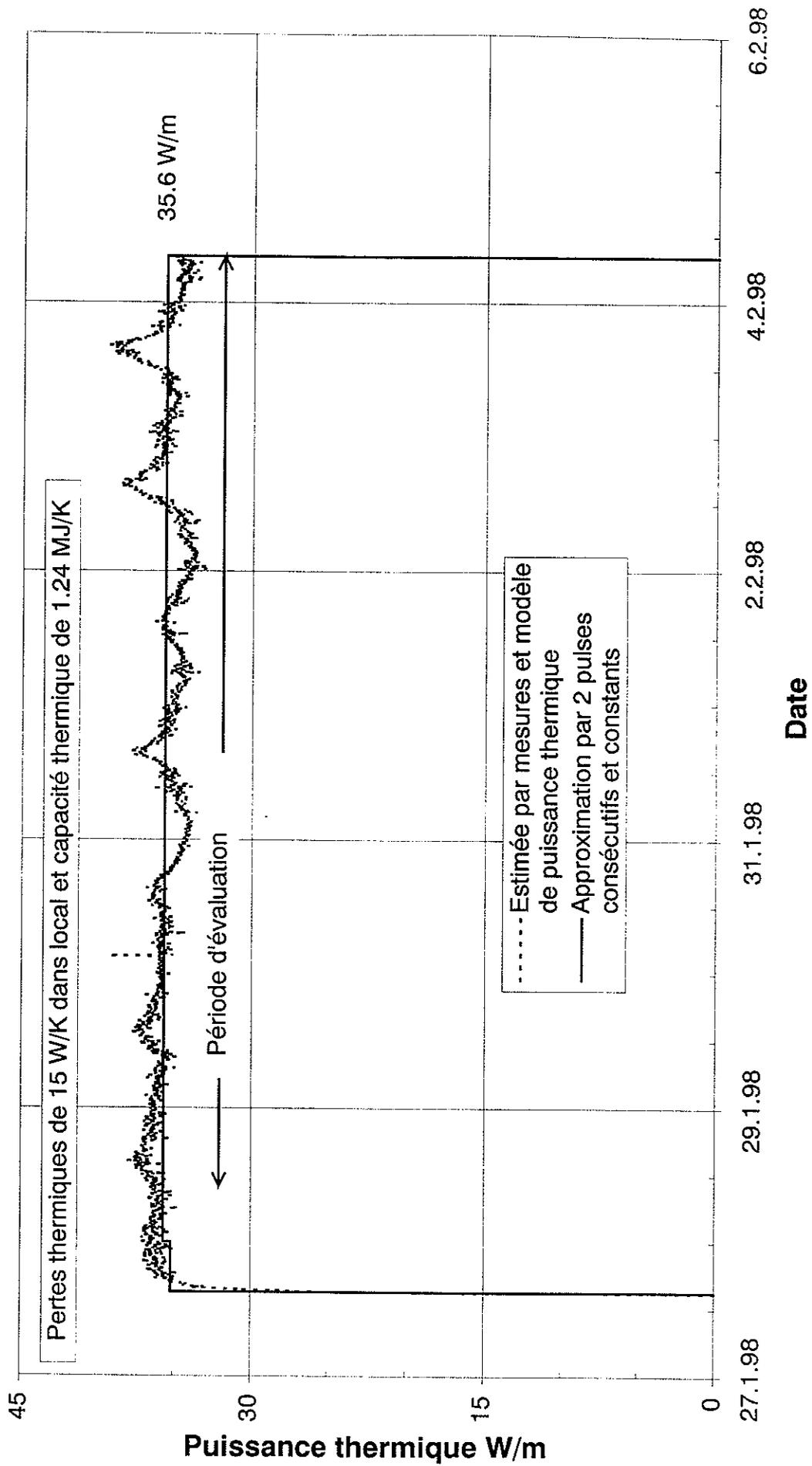
- | | |
|---|-------------------------|
| • puissance électrique convertie en puissance thermique dans l'eau: | 1'314 W |
| • pertes thermiques dans le local: | 15 W/K |
| • longueur active de la sonde: | 33.2 m |
| • capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde: | 1.24 MJ/K |
| • diamètre du forage: | 12 cm |
| • température initiale du terrain: | 10.8 °C |
| • capacité thermique volumique du terrain: | 2.2 MJ/m ³ K |

On peut relever que les deux derniers paramètres n'ont pas influence sur la détermination de la conductibilité thermique du terrain. Ils sont nécessaires pour estimer la résistance thermique de la sonde. La capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde, de même que le diamètre du forage, ont une influence négligeable sur l'estimation de la conductibilité thermique dans leur domaine de variation. Cette dernière est donnée dans la table A4.1, de manière à évaluer sa valeur pessimiste, utilisée comme valeur de sécurité pour dimensionner un système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs. La résistance thermique de la sonde est accessoirement montrée dans la table A4.1.

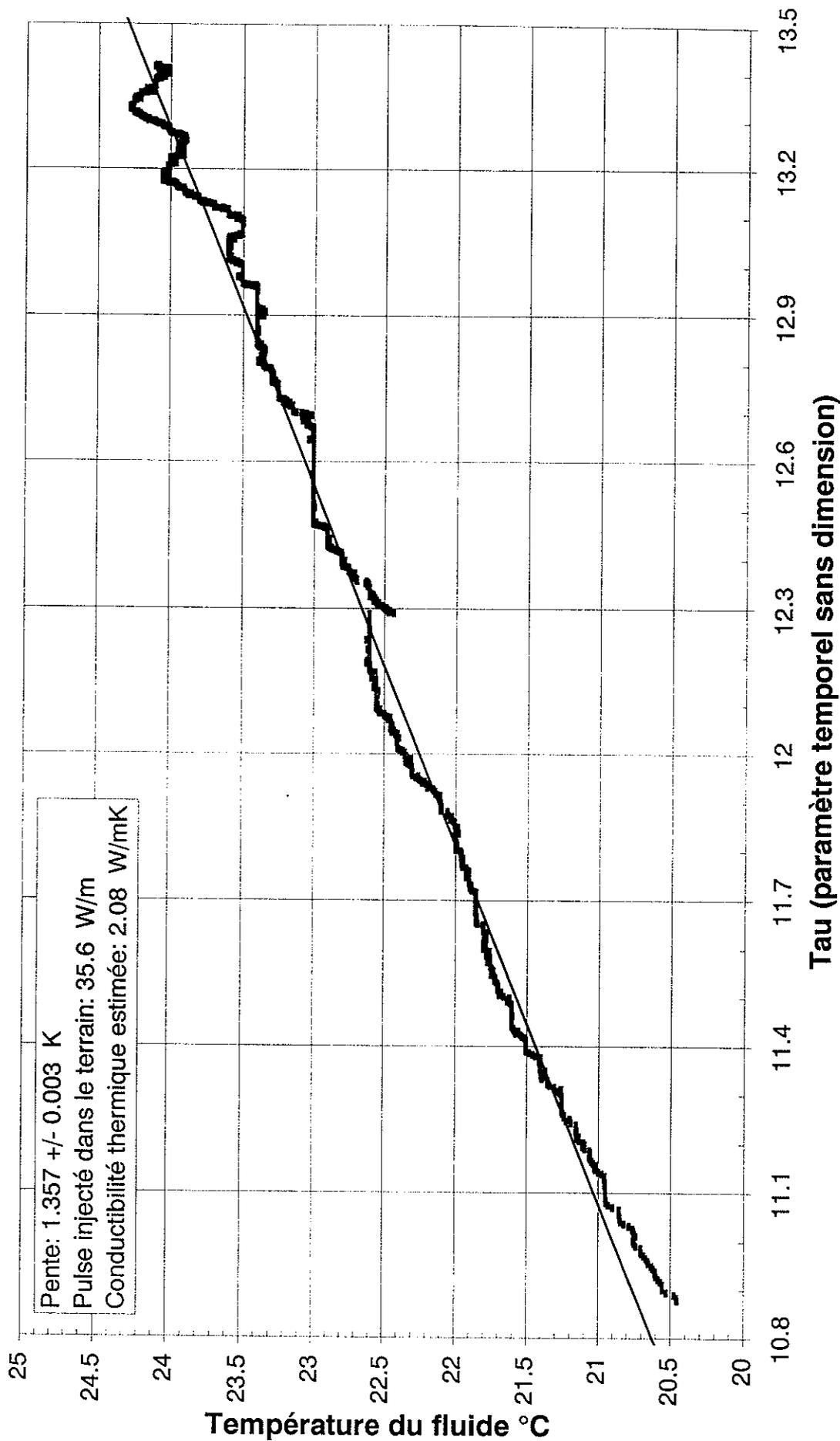
Paramètre	Conductibilité thermique du terrain W/mK	Résistance thermique du forage K/(W/m)
Paramètres par défaut	2.08	0.148
Pertes thermiques dans local: + 5W/K (15W/K => 20W/K)	2.00	0.154
Dérive des mesures de température: + 0.1 K sur la durée du test	1.94	0.151
Longueur active du forage: + 0.5 m (33.2 m => 33.7 m)	1.91	0.154
Puissance électrique: - 1% (1'314 W => 1'311 W)	1.88	0.156
Si l'on suppose que la couche de gravier saturé en eau, d'épaisseur 5.7 m, a une conductibilité thermique de 2.3 W/mK	1.80	0.156

Table A4.1 Estimation de la conductibilité thermique moyenne du terrain et influence de l'incertitude des principaux paramètres.

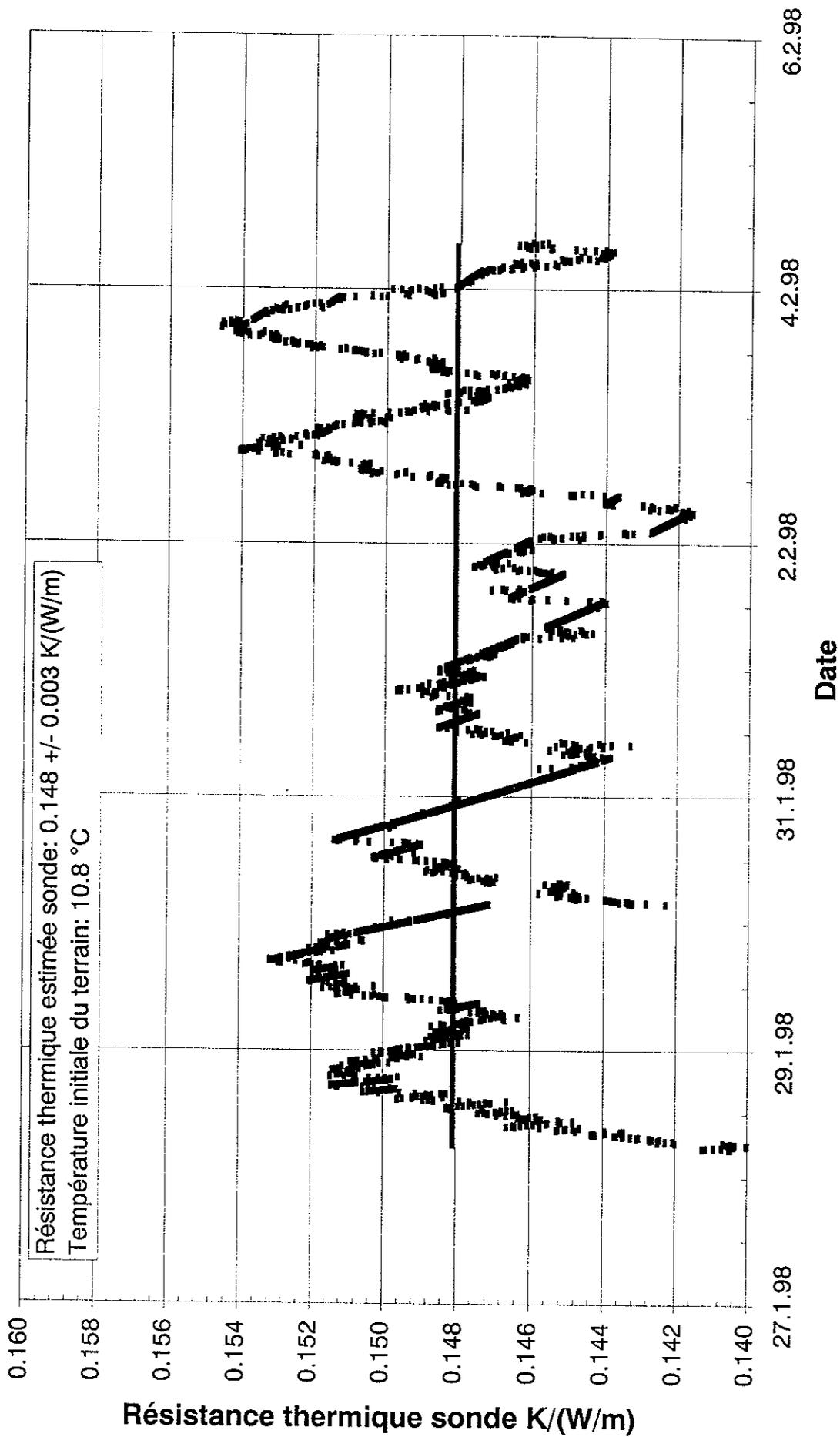
Test de réponse, forage Est, Dock Midfield



Test de réponse, forage Est, Dock Midfield



Test de réponse, forage Est, Dock Midfield



A4.3 Analyse du test de réponse pour le forage Ouest

La puissance thermique injectée dans le terrain, l'estimation de la conductibilité thermique du terrain et de la résistance de la sonde sont montrés dans les graphiques des pages A4.7, A4.8 et A4.9. Les principaux paramètres utilisés pour effectuer les analyses sont rappelés:

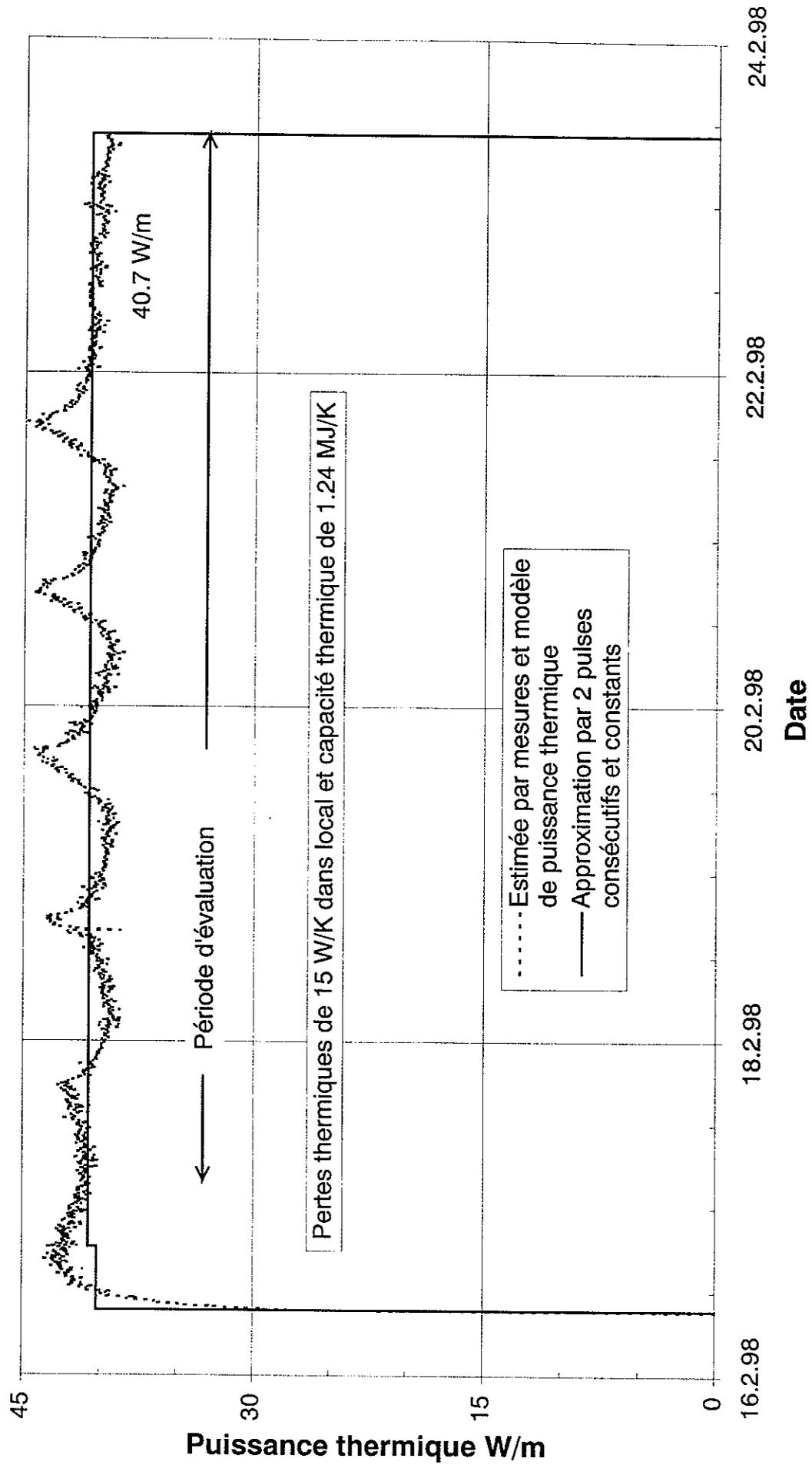
- puissance électrique convertie en puissance thermique dans l'eau: 1'438 W
- pertes thermiques dans le local: 15 W/K
- longueur active de la sonde: 33.4 m
- capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde: 1.24 MJ/K
- diamètre du forage: 12 cm
- température initiale du terrain: 9.7 °C
- capacité thermique volumique du terrain: 2.2 MJ/m³K

On relève à nouveau que les deux derniers paramètres n'ont pas influence sur la détermination de la conductibilité thermique du terrain, mais sont nécessaire pour l'estimation de la résistance thermique de la sonde. La capacité thermique du circuit hydraulique et de la sonde, de même que le diamètre du forage, ont une influence négligeable sur l'estimation de la conductibilité thermique dans leur domaine de variation. Cette dernière est donnée dans la table A4.2, de manière à évaluer sa valeur pessimiste, qui sera utilisée comme valeur de sécurité pour dimensionner un système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs. La résistance thermique de la sonde est accessoirement montrée dans la table A4.2.

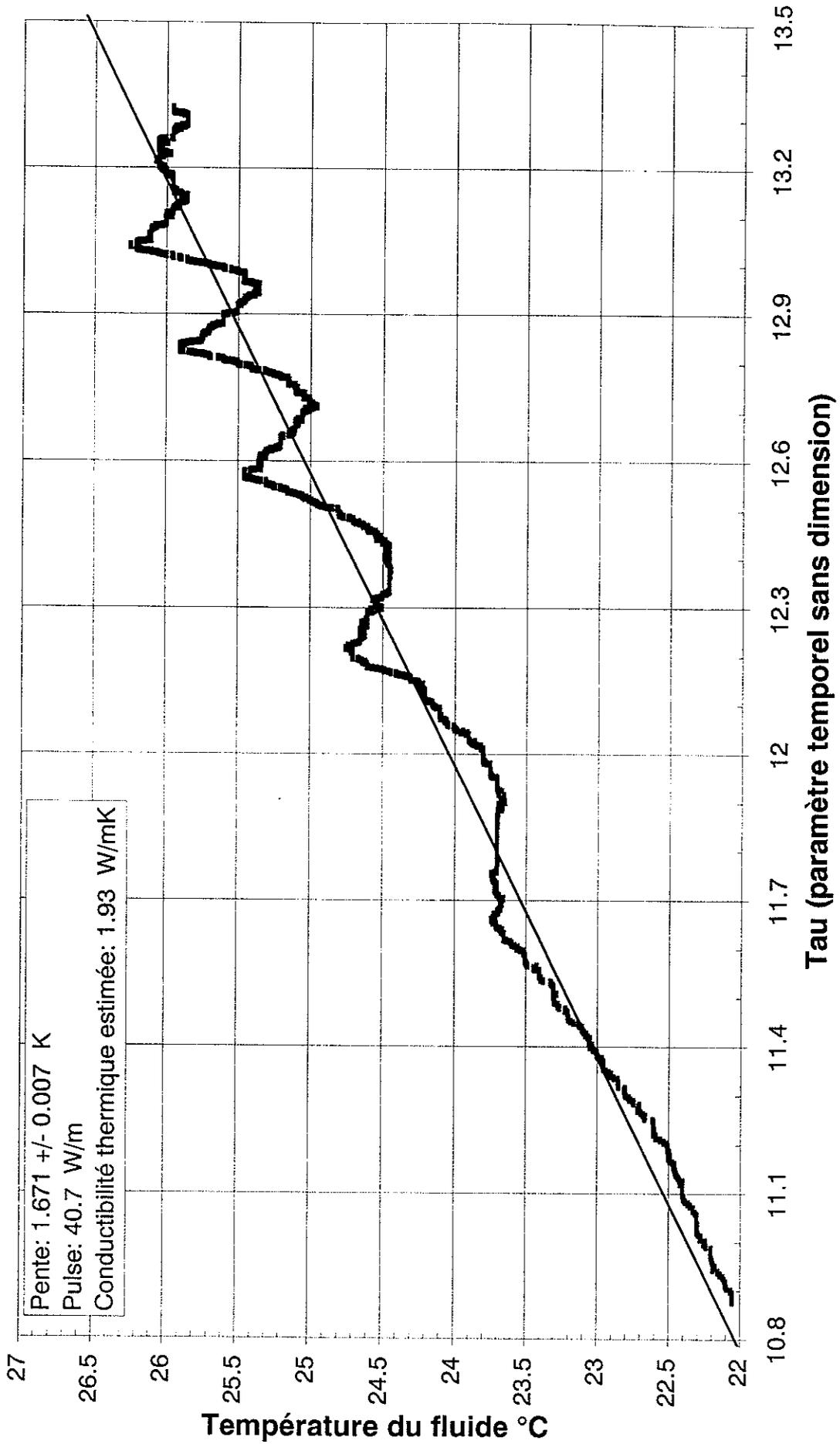
Paramètre	Conductibilité thermique du terrain W/mK	Résistance thermique du forage K/(W/m)
Paramètres par défaut	1.93	0.169
Pertes thermiques dans local: + 5W/K (15W/K => 20W/K)	1.88	0.171
Dérive des mesures de température: + 0.1 K sur la durée du test	1.84	0.169
Longueur active du forage: + 0.5 m (33.4 m => 33.9 m)	1.81	0.172
Puissance électrique: - 1% (1'438 W => 1'424 W)	1.79	0.174

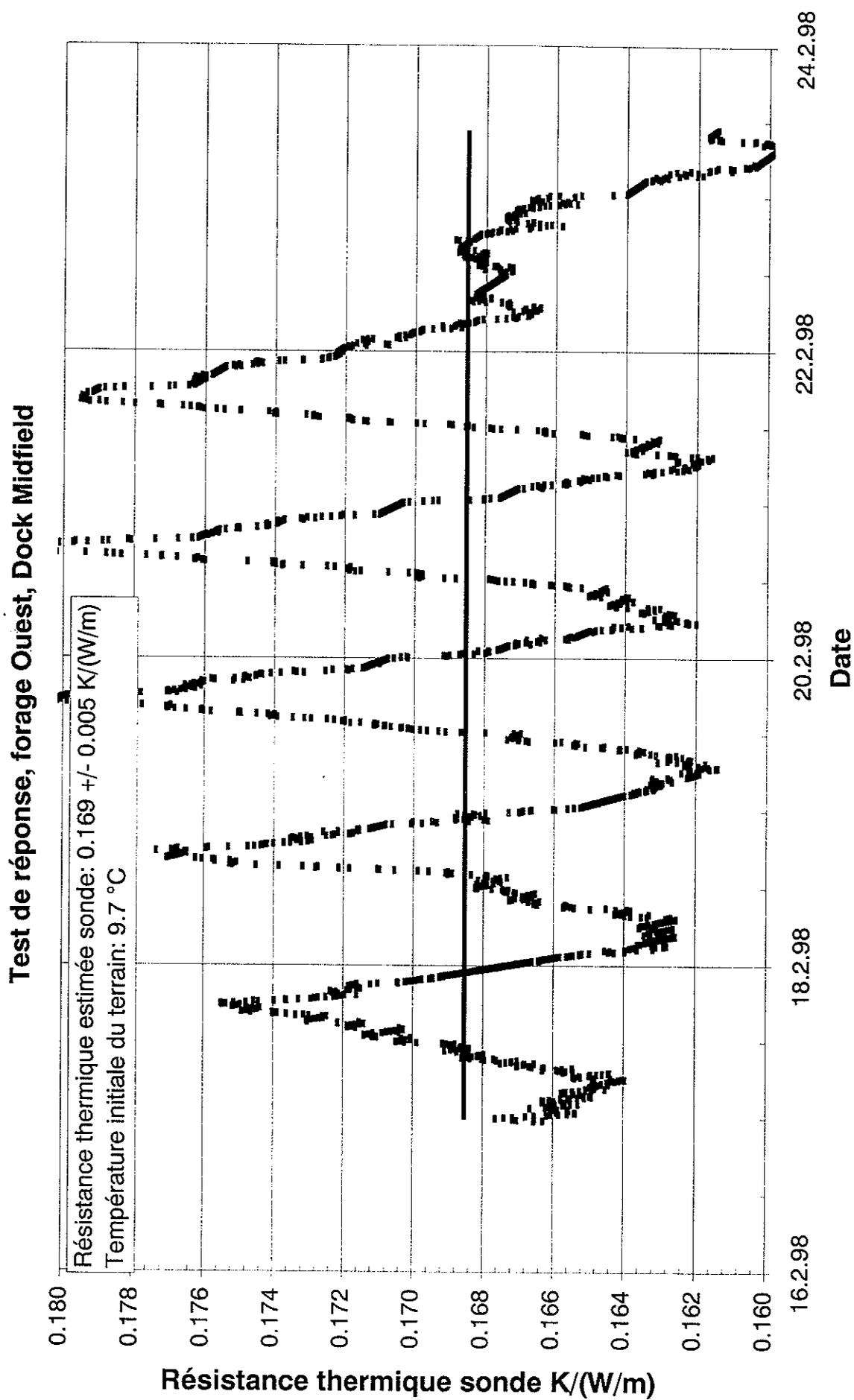
Table A4.2 Estimation de la conductibilité thermique moyenne du terrain et influence de l'incertitude des principaux paramètres.

Test de réponse, forage Ouest, Dock Midfield



Test de réponse, forage Ouest, Dock Midfield





Anhang 5: Geologisches Profil der Sonde West

5. Bauetappe

Bauherrschaft: ~~Tiefbauamt des Kantons Zürich~~ **FIG**
 Ingenieur: ARGE ZAYETTA, Operationszentrum, Postfach, 8058 Zürich-Flughafen
 Bohrlinse: Grundtag AG, Gossau
 Ausführungsdatum: 21.1.1998
 Koordinaten: 684'199.4 / 257'290.1
 Kote OK Terrain: 423.34 m ü. M.

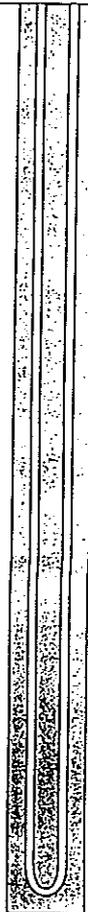
Massstab 1:200

Objekt Nr. 7201
 Datum 7201KL
 Gez. MÜ
 Datum: 30.1.98

Dr. Heinrich Jäckli AG

8049 Zürich
 Ummattalstrasse 289
 Tel 01 - 341 25 00
 Fax 01 - 341 31 47

Geologische Aufnahme:
 Dr. S. Mützenberg

Bohrart	geologische Identifikation	Tiefen ab OK Terrain in m	Beschreibung des Bohrgutes (Profilardarstellung gestützt auf Probenahmen alle 2 m)	Bohrlochversuche/Einbau
Bohrart: Imlochhammer, Spülung Luft/Klar-Wasser	Oberflächenschichten	2.00	grauer, siltiger Feinsand mit wenig Kies	 <p style="text-align: right;">Erdsonde Sondentiefe 33.5 m</p>
	Schotter (?)	4.00	grauer, sandiger Feinkies	
	Seeablagerungen	6.00	grauer, siltig-sandiger Feinkies	
			grauer, toniger Silt ab 24 m vereinzelt, ab 30 m reichlich Feinkies	
evtl. Moräne	30.00 34.00			

Anhang 6: Schemaskizze der Versuchseinrichtung

NOTIZ an: Versuch Erdsonden

von:

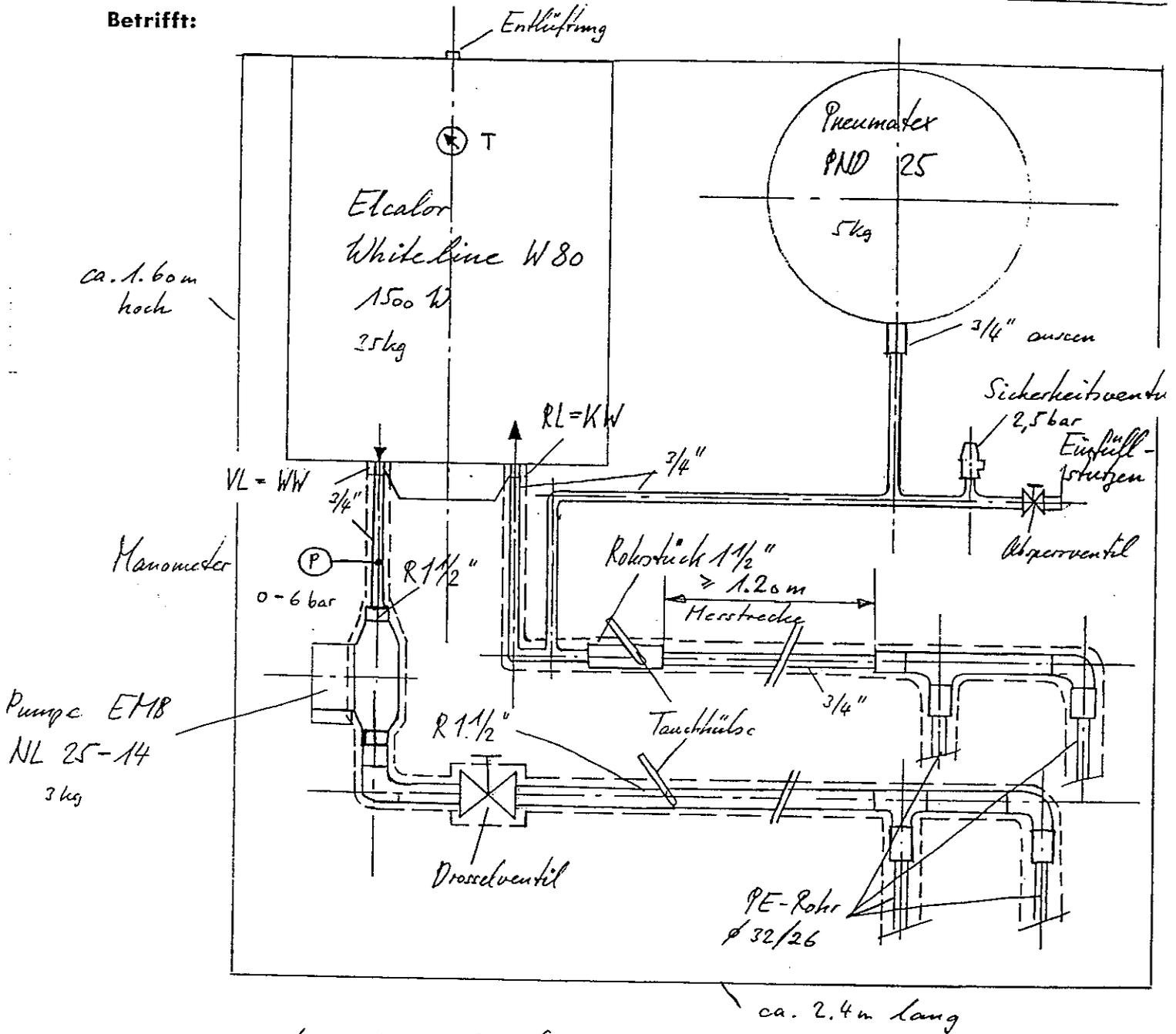
Nr.:

Kopien an:

Auftrag: Müdfield

Datum: 14. 11. 97

Betrifft:



Isolation Armaflex

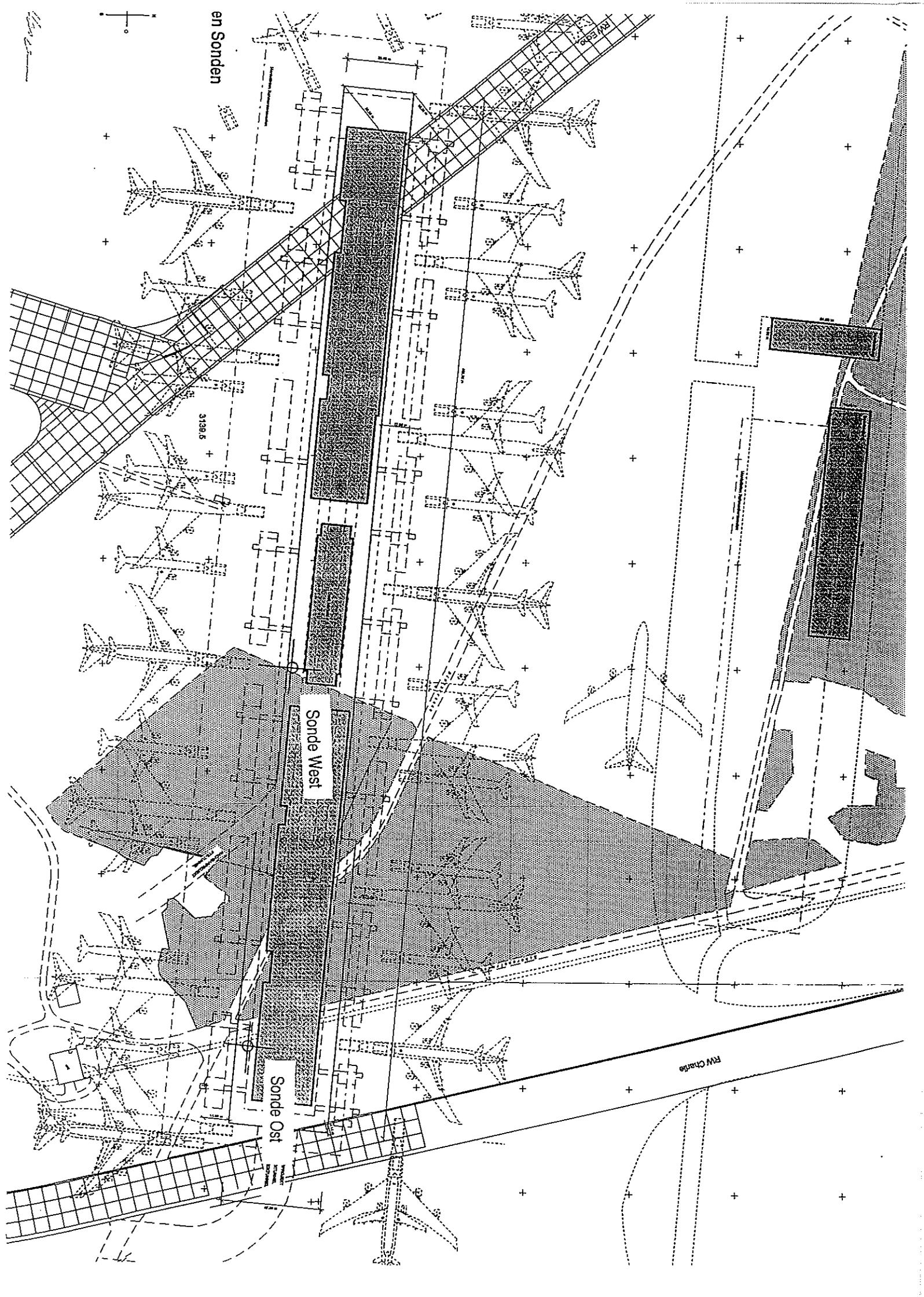
Fülldruck ca. 0,5 bar, Wasser

1 : 100

ARGE ZAVETTA
DOCK AND FIELD
ZÜRICH FLUGHAFEN

14. 11. 97 KHM

Anhang 7: Übersichtsplan der Sondenstandorte



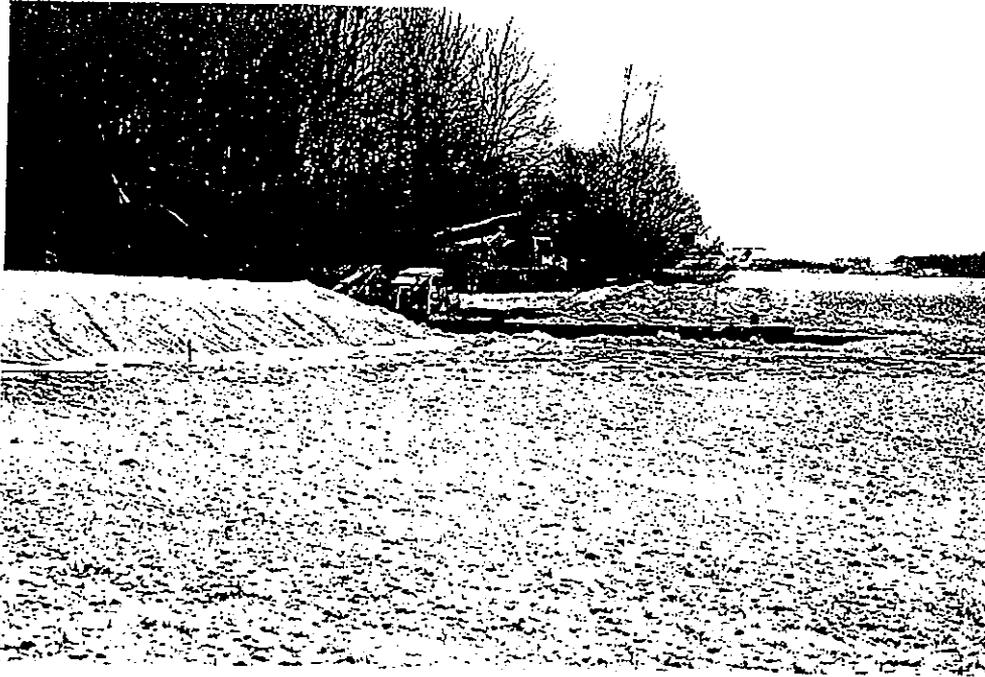
en Sonden

Sonde West

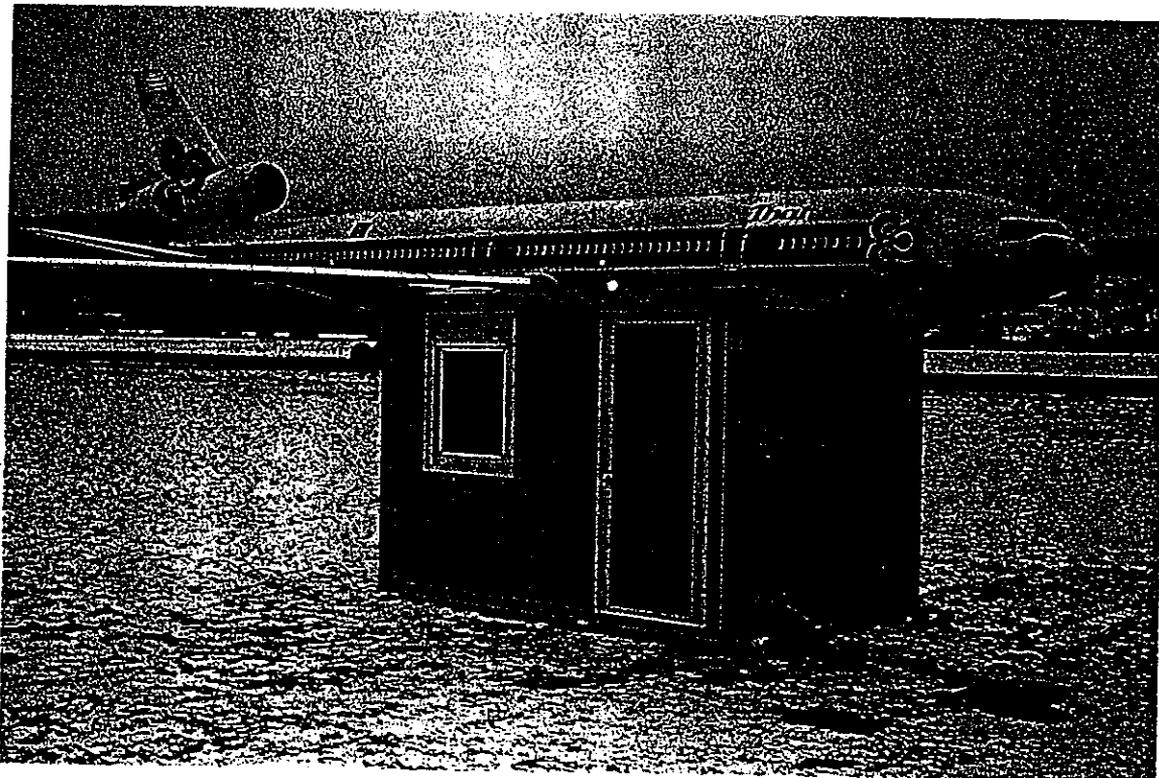
Sonde Ost

RW Chanbe

Anhang 8: Fotos der Versuchseinrichtung

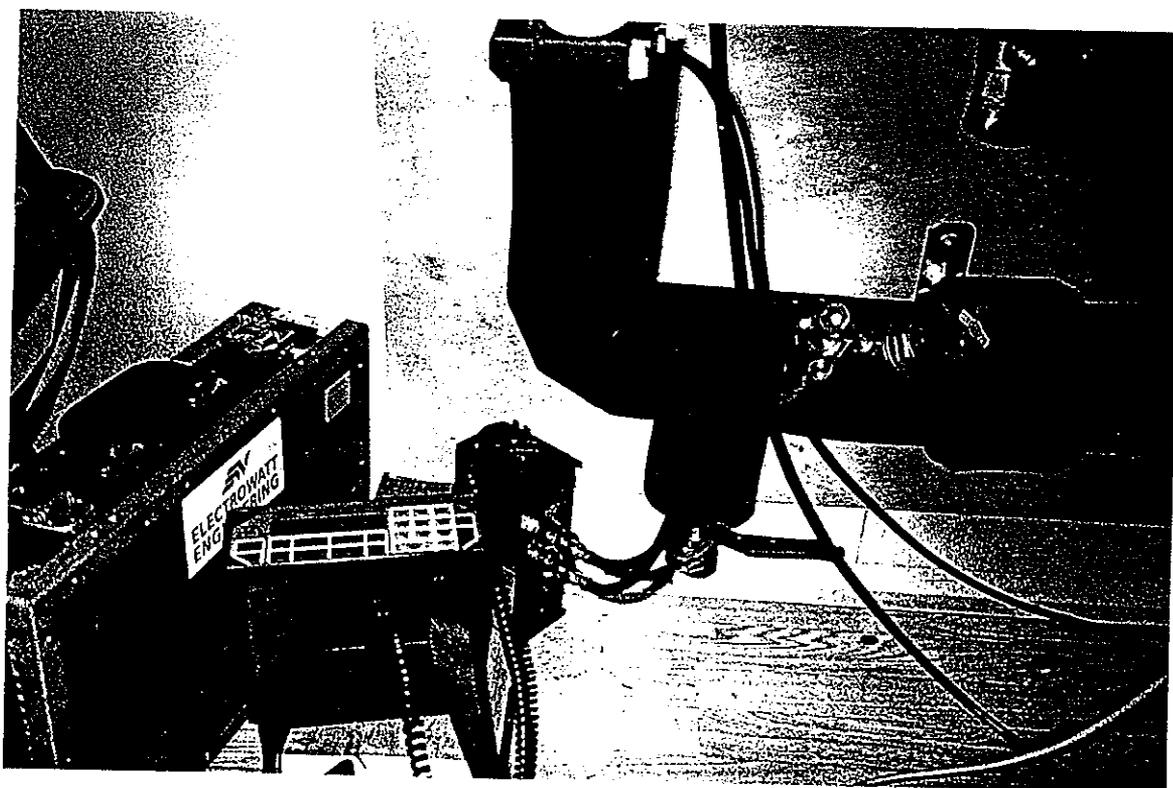
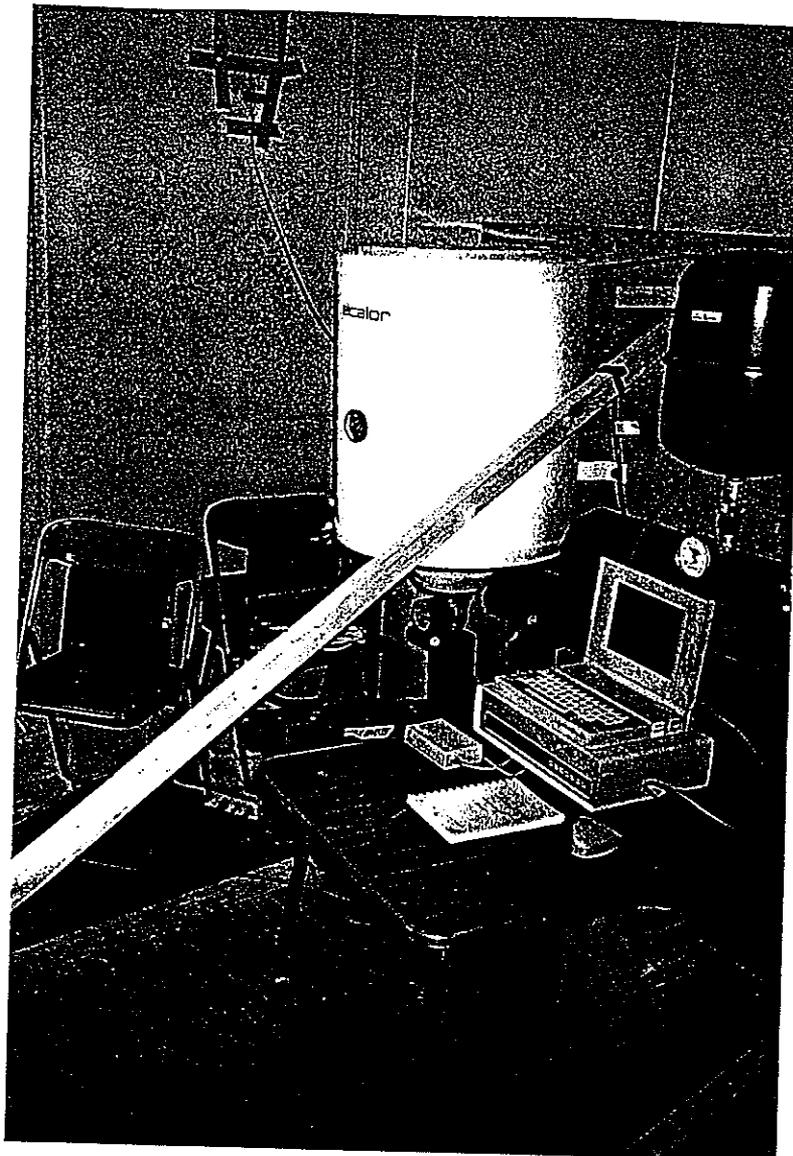


Bohrgerät beim Standort West neben dem Waldstück



Container und Sonde Ost neben dem Rollweg

Innenansicht Container mit
Versuchseinrichtung
Auf dem Tisch der Datenlogger
für die Temperaturmessungen



STA-Reguliert Ventil und Messgerät für die Durchflussmessung



Tuyaux reliant la sonde géothermique Est au local tempéré. Un bouchon de mousse isolante a été injecté dans les 20 premiers centimètres du forage.