

**Protocole de test  
de réponse thermique**

Rapport final

**BRGM/RP-60816-FR**  
Mars 2012

Mars 2012



# Protocole de test de réponse thermique

Rapport final

**BRGM/RP-60816-FR**

Mars 2012

Ce rapport a été sous-traité au bureau d'étude Ventilone

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM

**Coordinateur du projet : P. Monnot (BRGM)**

**Auteur : C. Reiss (Ventilone)**

Avec la collaboration de  
**C. Maragna (BRGM), P. Monnot (BRGM)**

|                       |
|-----------------------|
| <b>Vérificateur :</b> |
| Nom : P. MONNOT       |
| Date : 03.04.12       |
| Signature :           |

|                      |
|----------------------|
| <b>Approbateur :</b> |
| Nom : A. DESPLAN     |
| Date : 06/05/12      |
| Signature :          |

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**



**Mots-clés** : Géothermie Basse Énergie, Test de Réponse Thermique, Protocole.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Reiss C.** (Ventilone) (2012) – Protocole de test de réponse thermique. Rapport final. BRGM/RP-60816-FR, 44 p., 22 fig.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le test de réponse thermique, nécessaire en préambule au dimensionnement des champs de sondes géothermiques verticales (SGV), est une opération simple dans le principe mais qui nécessite d'être rigoureusement menée pour produire des résultats fiables et réellement représentatifs du contexte géologique.

Le but du présent document est d'accompagner le lecteur dans la compréhension des techniques mises en œuvre, et de lui permettre d'exercer un œil critique quant à l'analyse de prestations effectuées en la matière. Parallèlement, et en l'état actuel de la normalisation, ce document tente de constituer une base d'information aussi complète que possible sur les pratiques de mise en œuvre. Celles-ci devraient idéalement être respectées par les prestataires, afin que les résultats produits le soit en toute transparence et puissent être recoupés par un homme de l'art.

En première partie du document, on présente quelques **définitions**, en particulier sur le test de réponse thermique (TRT) lui-même, la température stabilisée du sol, la conductivité, la chaleur spécifique et la résistance thermique de la sonde. Ces définitions ont pour objectif de bien caler la terminologie et fixer les postulats de base sur lesquels sont fondés les TRT.

Dans une deuxième partie, on présente plus spécifiquement le **protocole de réalisation du TRT**, le principe général mais également les mesures réalisées in-situ et les paramètres déterminés numériquement. Le protocole consiste à déterminer, dans un premier temps, la **température initiale** du sous-sol (deux méthodes décrites : le relevé du log thermique et la mesure par circulation), puis de déterminer la **conductivité thermique** moyenne des terrains au droit de la sonde et la **résistance thermique** moyenne de la sonde. Deux méthodes sont présentées : la première la plus simple et la plus couramment utilisée est la détermination de la conductivité par application de la théorie de la source linéaire infinie (LSI) de chaleur ; la seconde étant la détermination de la conductivité par modélisation thermique en deux ou trois dimensions de la SGV et de son environnement. Cette seconde méthode exige le recours à un logiciel de calcul scientifique ou à un modèle numérique dédié au dimensionnement des SGV. On termine cette partie par un exemple d'application concret, avec des valeurs typiques, permettant de retracer la procédure d'analyse des données et de calcul des paramètres de dimensionnement.

En troisième partie du document, on décrit les **différents composants** d'un TRT : la sonde test, la présentation d'un appareil type pour réchauffer le sous-sol ainsi que les **principes de mise en œuvre** (délai entre la pose de la sonde et la mesure des températures, choix des paramètres du test, durée du test).

À la fin du document, on décrit le contenu d'un rapport type et on donne l'ordre de grandeur des principaux résultats que l'on devrait retrouver à l'issue de la réalisation d'un TRT : conductivité thermique, capacité calorifique, résistance thermique de la sonde et influence de la présence d'un aquifère si tel est le cas.



## Sommaire

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Définitions .....</b>                                                                                   | <b>11</b> |
| 1.1. TEST DE RÉPONSE THERMIQUE (TRT) .....                                                                    | 11        |
| 1.2. TEMPÉRATURE STABILISÉE DU SOL .....                                                                      | 11        |
| 1.3. CONDUCTIVITÉ .....                                                                                       | 11        |
| 1.3.1. La conduction de chaleur .....                                                                         | 11        |
| 1.3.2. Importance de la conductivité dans le dimensionnement des SGV .....                                    | 12        |
| 1.4. CHALEUR SPÉCIFIQUE ET CAPACITÉ CALORIFIQUE .....                                                         | 14        |
| 1.5. RÉSISTANCE THERMIQUE DE LA SONDE .....                                                                   | 15        |
| <b>2. Principe du test de réponse thermique .....</b>                                                         | <b>17</b> |
| 2.1. PRINCIPE GÉNÉRAL .....                                                                                   | 17        |
| 2.2. MESURE DE LA TEMPÉRATURE INITIALE .....                                                                  | 17        |
| 2.2.1. Relevé du Log Thermique .....                                                                          | 18        |
| 2.2.2. Mesure par circulation .....                                                                           | 18        |
| 2.3. MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE MOYENNE DU TERRAIN<br>ET DE LA RÉSISTIVITÉ THERMIQUE DE LA SGV ..... | 19        |
| 2.3.1. Théorie de la source linéaire de chaleur .....                                                         | 20        |
| 2.3.2. Détermination par simulation .....                                                                     | 21        |
| 2.4. EXEMPLE D'APPLICATION .....                                                                              | 22        |
| 2.4.1. Méthode de la source linéaire de chaleur .....                                                         | 22        |
| 2.4.2. Méthode par simulation .....                                                                           | 24        |
| <b>3. Composants du TRT .....</b>                                                                             | <b>25</b> |
| 3.1. SONDE DE TEST .....                                                                                      | 25        |
| 3.2. PRÉSENTATION D'UN APPAREIL TYPE .....                                                                    | 25        |
| 3.3. PRÉCISION DE L'APPAREIL .....                                                                            | 27        |
| 3.3.1. Régulation .....                                                                                       | 27        |
| 3.3.2. Erreur due à l'absence de régulation .....                                                             | 27        |
| 3.3.3. Pertes et Apports thermiques, isolation .....                                                          | 28        |
| <b>4. Procédures de mise en œuvre .....</b>                                                                   | <b>31</b> |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1. DÉLAI ENTRE LA POSE ET LA MESURE .....               | 31        |
| 4.2. MESURE DE LA TEMPÉRATURE STABILISÉE DU SOUS-SOL..... | 31        |
| 4.2.1. Cas du Log Thermique .....                         | 31        |
| 4.2.2. Cas du relevé par circulation .....                | 31        |
| 4.3. CHOIX DES PARAMÈTRES DU TEST .....                   | 32        |
| 4.4. DURÉE DU TEST.....                                   | 33        |
| 4.5. INTERRUPTION INVOLONTAIRE DU TEST .....              | 33        |
| <b>5. Résultats.....</b>                                  | <b>35</b> |
| 5.1. CONTENU DU RAPPORT .....                             | 35        |
| 5.2. DONNÉES DU PROJET .....                              | 35        |
| 5.2.1. Dispositif de mesure .....                         | 35        |
| 5.2.2. Sonde test .....                                   | 35        |
| 5.2.3. Analyse bibliographique .....                      | 35        |
| 5.2.4. Paramètres de test .....                           | 36        |
| 5.2.5. Courbes obtenues .....                             | 37        |
| 5.2.6. Résultats .....                                    | 39        |
| 5.2.7. Interprétation .....                               | 39        |
| <b>6. Ordre de grandeur des résultats attendus .....</b>  | <b>41</b> |
| 6.1. CONDUCTIVITÉ ET CAPACITÉ CALORIFIQUE.....            | 41        |
| 6.2. RÉSISTANCE DE SONDE .....                            | 41        |
| 6.3. PRÉSENCE D'UN AQUIFÈRE .....                         | 43        |

## Liste des illustrations

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Flux de chaleur et température.....                                                        | 12 |
| Figure 2 : Influence de la conductivité sur le gradient de température.....                           | 13 |
| Figure 3 : Valeurs typiques de conductivité et capacité calorifique. ....                             | 14 |
| Figure 4 : Exemple de détermination de la capacité calorifique en fonction d'une coupe<br>forage..... | 15 |
| Figure 5 : Exemple de log thermique obtenu sur forage 90 m. ....                                      | 18 |
| Figure 6 : Exemple de convergence obtenue par simple circulation. ....                                | 19 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 7 : Théorie de la source linéaire de chaleur .....                                 | 20 |
| Figure 8 : Paramètres d'un test. ....                                                     | 22 |
| Figure 9 : Évolution des températures E/S sonde pendant un test.....                      | 22 |
| Figure 10 : Tracé logarithmique de la température moyenne du fluide. ....                 | 23 |
| Figure 11 : Détermination de l'asymptote. ....                                            | 23 |
| Figure 12 : Reproduction d'un test en environnement simulé. ....                          | 24 |
| Figure 13 : Sondes de tests usuelles. ....                                                | 25 |
| Figure 14 : Principe d'un appareil de TRT. ....                                           | 27 |
| Figure 15 : Interruption momentanée d'un test. ....                                       | 34 |
| Figure 16 : Estimation préliminaire type.....                                             | 36 |
| Figure 17 : Report des paramètres du test. ....                                           | 37 |
| Figure 18 : Report des grandeurs appliquées pendant le test. ....                         | 37 |
| Figure 19 : Report des valeurs de température obtenues. ....                              | 38 |
| Figure 20 : Report du tracé logarithmique et de l'asymptote obtenus. ....                 | 38 |
| Figure 21 : Tableau des conductivités et capacités calorifique par type de matériau. .... | 41 |
| Figure 22 : Abaque des résistances de sonde pour sonde type double U. ....                | 42 |



# 1. Définitions

## 1.1. TEST DE RÉPONSE THERMIQUE (TRT)

Un test de réponse thermique est une opération préliminaire au dimensionnement d'un champ de sondes. Il se compose d'une série de mesures qui s'étalent sur plusieurs jours. Il est réalisé sur site à l'aide d'une sonde géothermique pilote (sonde test installée sur le site même du futur système géothermique). De ce fait, les mesures effectuées ne sont valables que dans le contexte de sa réalisation, notamment en ce qui concerne le *type* et la *profondeur* de la sonde de test. Ainsi, la sonde de test doit impérativement être représentative, du point de vue de sa conception (forage, type de sonde utilisée, cimentation) et de sa profondeur, des sondes qui seront mises en place dans l'installation future.

Ainsi, pour un même site, un test effectué sur une sonde de 100 m produit des résultats qu'il serait hasardeux, à moins d'une justification géologique fiable, d'extrapoler à une sonde de 80 m ou de 120 m de profondeur.

Les mesures effectuées permettent de caractériser les propriétés thermiques moyennes du sous-sol sur le site, telles que, au minimum :

- la **température moyenne stabilisée du sous-sol** ;
- la **conductivité thermique** du milieu rencontré ;
- la **qualité**, en tant qu'échangeur thermique, de la sonde de test.

## 1.2. TEMPÉRATURE STABILISÉE DU SOL

La température moyenne stabilisée du sous-sol est sa température naturelle – c'est-à-dire celle du sous-sol au repos. La température du sous-sol relevée n'est valable que sur la profondeur de la sonde de test.

Il existe principalement deux méthodes pour obtenir celle-ci, qui seront détaillées par la suite :

- méthode de convergence par circulation dans la sonde de test ;
- méthode basée sur le relevé de gradient thermique (log thermique).

## 1.3. CONDUCTIVITÉ

### 1.3.1. La conduction de chaleur

La conduction thermique est une transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Lorsque deux points distants sont à des températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , avec  $\theta_1 > \theta_2$ , une densité de flux de chaleur  $\Phi$  (en Watt/m<sup>2</sup>, i.e. puissance thermique traversant une unité de surface) s'instaure entre ces deux points et « s'écoule » (est

transférée) de  $\theta_1$  à  $\theta_2$ . Inversement, lorsqu'une densité de flux de chaleur est appliquée à un solide, il s'instaure un gradient de température dans ce solide.

Densité de flux de chaleur et gradient de température sont liés par la Loi de Fourier :

$$\Phi = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

dans laquelle  $\lambda$  est la *conductivité* propre du milieu (W/m.K).

Ainsi par exemple, en régime permanent dans un solide, sous l'action d'une densité de flux de chaleur  $\Phi$  (W/m<sup>2</sup>), deux points distants d'une épaisseur  $e$  selon la direction du flux seront portés à des températures différentes  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , de sorte que :

$$\Phi = -\lambda \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda}{e} (\theta_1 - \theta_2)$$

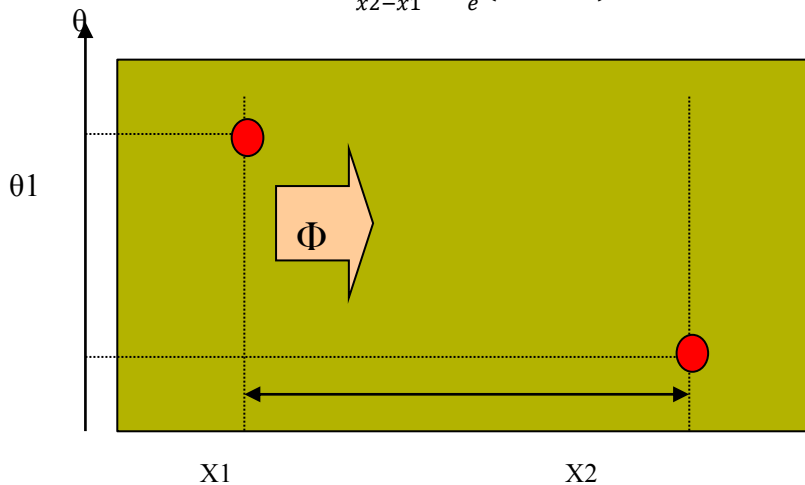


Figure 1 : Flux de chaleur et température.

On note que, pour une même densité de flux de chaleur  $\Phi$  cette différence de température est inversement proportionnelle à la valeur de la conductivité.

### 1.3.2. Importance de la conductivité dans le dimensionnement des SGV

Dans notre cas, le flux de chaleur est généré par l'installation géothermique. Plaçons-nous dans le cas du chauffage d'un bâtiment : Lorsque le bâtiment appelle une puissance calorifique  $Q_{cal}$ , la pompe à chaleur prélève une puissance thermique  $Q_{fr}$  (Watt) sur les sondes (dans le cas du rafraîchissement d'un bâtiment, le bâtiment prélève une puissance  $Q_{fr}$  et la PAC injecte dans le sol une puissance  $Q_{cal}$ ). Nous noterons dans ce qui suit  $Q$  la puissance échangée entre la PAC et le sol, que ce soit en mode chauffage ou climatisation. Cette puissance est répartie sur le linéaire  $L$  (mètres) de sondes composant l'installation géothermique. Un flux linéaire (W/m) de chaleur, proportionnel à  $Q/L$  traverse les différents milieux rencontrés (paroi du tube de la boucle de sonde géothermique, cimentation, sous-sol), caractérisés chacun par sa conductivité propre. Le sol ayant une température stable « à l'infini », un gradient de température se crée entre la sonde – et donc le fluide la parcourant – et le sous-sol « à l'infini ». Comme indiqué dans la figure suivante, ce gradient est d'autant plus important

que la conductivité, en particulier celle du sous-sol, est faible. De ce fait, pour une même température du sol, pour un même linéaire de sondes et pour une même puissance appliquée aux sondes géothermiques, la température du fluide en sortie de sonde sera d'autant plus basse que la conductivité du sous-sol est faible.

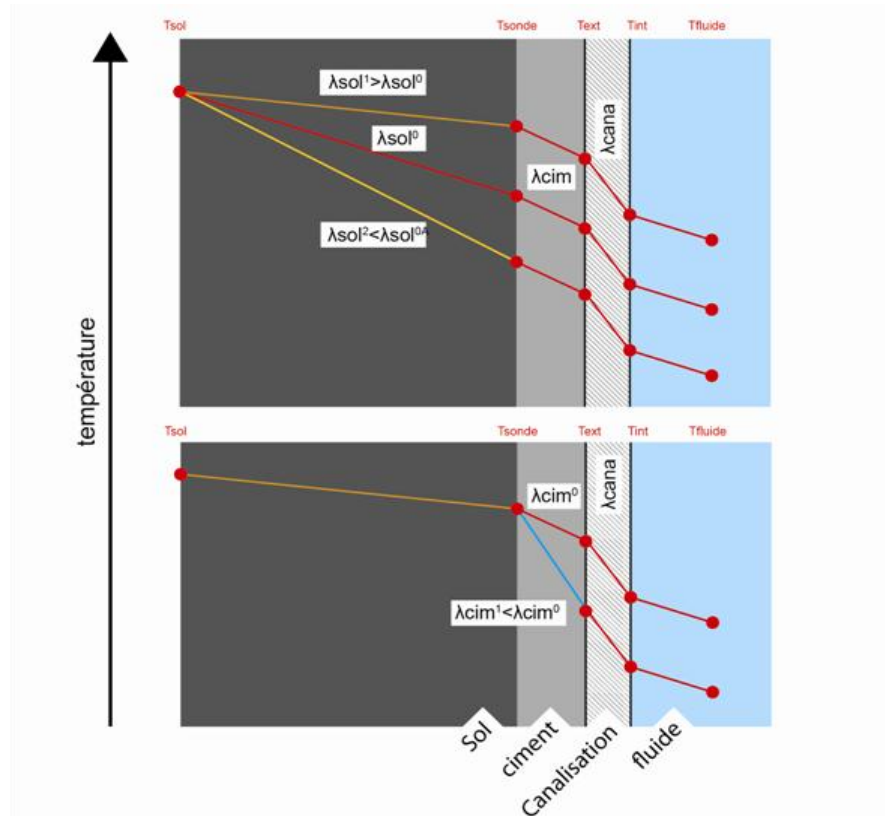


Figure 2 : Influence de la conductivité sur le gradient de température.

Le comportement et la performance des pompes à chaleur, alimentée en calories par le fluide en sortie des sondes, est directement lié au niveau de température du fluide : le coefficient de performance (COP) se dégrade lorsque la température de sortie de SGV diminue (en mode chauffage) et lorsque la température de sortie de SGV augmente (en mode climatisation). Afin de permettre aux pompes à chaleur de fonctionner correctement, il est donc nécessaire d'ajuster le linéaire de sondes L à la puissance requise Q en fonction de la conductivité du sous-sol<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Pour une même typologie du besoin (c'est-à-dire une même évolution temporelle de la puissance échangée), l'augmentation du linéaire de SGV se traduit par une augmentation de la surface d'échange entre le fluide et le terrain, donc une augmentation de la température de sortie d'échange géothermique (en mode chauffage), donc une amélioration du COP de la PAC, et donc une diminution de la consommation d'électricité du compresseur de la PAC. Ainsi, le dimensionnement de l'installation consiste à trouver un optimum économique entre l'investissement (linéaire de SGV) et les coûts de fonctionnement (électricité consommée par le compresseur de la PAC) au cours des N années de fonctionnement.

Le but du dimensionnement est précisément d'établir le linéaire et la topologie d'implantation des SGV pour permettre le fonctionnement optimal de l'installation : on comprend donc que sans connaissance précise de la conductivité du sous-sol, cet exercice ne peut être correctement mené à son terme.

## 1.4. CHALEUR SPÉCIFIQUE ET CAPACITÉ CALORIFIQUE

La chaleur spécifique **C<sub>fen</sub>** J/kg.K d'une matière (par exemple le sol) est la chaleur (en Joules) qu'il faut fournir pour élever un kilogramme de cette matière d'un degré (ou Kelvin). Dans notre cas il est plus aisé de raisonner en terme de volume : la Capacité calorifique (**C<sub>p</sub>**) en J/m<sup>3</sup>.K est la chaleur qu'il faut fournir pour élever 1 m<sup>3</sup> de matière d'un degré (ou Kelvin).

Connaissant la coupe forage, on se reporte à des tables bibliographiques pour établir celle-ci. La capacité calorifique est en moyenne de 2,1 MJ/m<sup>3</sup>.K, cette valeur est relativement stable pour les différentes roches rencontrées (faible écart type) – cependant, son estimation doit être faite au cas par cas. L'écart-type relatif sur la capacité calorifique est inférieur à l'écart-type relatif sur la conductivité thermique (cf. table ci-dessous tirée de la SIA-384/6). C'est pour cette raison que l'on ne cherche pas à déduire la capacité calorifique des données mesurées lors du TRT. De plus, la capacité calorifique a une influence mineure sur le dimensionnement du champ de sondes (cf. SIA 384/6).

|                            | Type de roche                                   | Conductivité thermique $\lambda$ W/(m.K) |                              | Capacité thermique spéc. $c_p$ MJ/(m <sup>3</sup> .K) |                              | Densité $\rho$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> |
|----------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|
|                            |                                                 | Plage des valeurs                        | Valeur de calcul recommandée | Plage des valeurs                                     | Valeur de calcul recommandée |                                                  |
| Terrains meubles           | Argile sèche                                    | 0,4 – 1,0                                | 0,6                          | 1,5 – 1,6                                             | 1,5                          | 1,8 – 2,0                                        |
|                            | Argile saturée d'eau                            | 0,6 – 2,3                                | 1,4                          | 2,0 – 2,8                                             | 2,3                          | 2,0 – 2,2                                        |
|                            | Sable sec                                       | 0,3 – 0,8                                | 0,5                          | 1,3 – 1,6                                             | 1,4                          | 1,8 – 2,2                                        |
|                            | Sable saturé d'eau                              | 1,5 – 4,0                                | 2,3                          | 2,2 – 2,8                                             | 2,4                          | 1,9 – 2,3                                        |
|                            | Gravier/pierrres, sec                           | 0,4 – 0,5                                | 0,4                          | 1,3 – 1,6                                             | 1,4                          | 1,8 – 2,2                                        |
|                            | Gravier/pierrres, saturé d'eau                  | 1,6 – 2,0                                | 1,7                          | 2,2 – 2,6                                             | 2,3                          | 1,9 – 2,3                                        |
|                            | Moraine compacte                                | 1,7 – 2,4                                | 1,8                          | 1,5 – 2,5                                             | 2,0                          | 1,9 – 2,5                                        |
|                            | Tourbe                                          | 0,2 – 0,7                                | 0,4                          | 0,5 – 3,8                                             | 1,6                          | 0,5 – 0,8                                        |
| Roches sédimentaires       | Roche molassique suisse                         | voir tableau 7                           |                              | 1,8 – 2,6                                             | 2,1                          | 2,4 – 2,7                                        |
|                            | Argilite                                        | 1,1 – 3,5                                | 1,9                          | 2,1 – 2,4                                             | 2,2                          | 2,4 – 2,6                                        |
|                            | Gris                                            |                                          | 2,3                          | 1,8 – 2,6                                             | 2,1                          | 2,2 – 2,7                                        |
|                            | Conglomérat/brièche                             | 1,3 – 5,1                                | 2,6                          | 1,8 – 2,6                                             | 2,1                          | 2,2 – 2,7                                        |
|                            | Roche marneuse                                  | 1,5 – 3,5                                | 2,1                          | 2,2 – 2,3                                             | 2,2                          | 2,3 – 2,6                                        |
|                            | Roche calcaire                                  | 2,5 – 4,0                                | 2,8                          | 2,1 – 2,4                                             | 2,2                          | 2,4 – 2,7                                        |
|                            | Roche sulfatée (anhydrite, gypse)               | 1,3 – 2,8                                | 1,6                          |                                                       | 2,0                          |                                                  |
| Roches de fond magmatiques | Granite                                         | 2,1 – 4,1                                | 2,8                          | 2,1 – 3,0                                             | 2,4                          | 2,4 – 3,0                                        |
|                            | Diorite                                         | 2,0 – 2,9                                | 2,3                          |                                                       | 2,7                          | 2,9 – 3,0                                        |
|                            | Gabbro                                          | 1,7 – 2,5                                | 2,0                          |                                                       | 2,6                          | 2,8 – 3,1                                        |
| Roches de fond métamorphes | Schistes argileux                               | 1,5 – 2,6                                | 1,9                          | 2,2 – 2,5                                             | 2,3                          | 2,4 – 2,7                                        |
|                            | Marbre                                          | 1,3 – 3,1                                | 1,9                          |                                                       | 2,0                          | 2,5 – 2,8                                        |
|                            | Quartzite                                       | 5,0 – 6,0                                | 5,3                          |                                                       | 2,1                          | 2,5 – 2,8                                        |
|                            | Micaschistes                                    | 1,5 – 3,1                                | 2,0                          | 2,2 – 2,4                                             | 2,3                          | 2,4 – 2,7                                        |
|                            | Gneiss                                          | 1,9 – 4,0                                | 2,6                          | 1,8 – 2,4                                             | 2,0                          | 2,4 – 2,7                                        |
|                            | Amphibolite                                     | 2,1 – 3,6                                | 2,6                          | 2,0 – 2,3                                             | 2,1                          | 2,6 – 2,9                                        |
| Matériaux divers           | Mélange de ciment/bentonite (ramplissage durci) |                                          | 0,8                          |                                                       | 3,0                          | 1,2                                              |
|                            | Béton                                           | 0,9 – 2,0                                | 1,4                          |                                                       | 1,8                          | 2,0 – 2,42                                       |
|                            | Glace (-10 °C)                                  |                                          | 2,32                         |                                                       | 1,87                         | 0,91                                             |
|                            | Polyéthylène (PE100)                            |                                          | 0,4                          |                                                       | 1,63                         | 0,96                                             |
|                            | Air (0 °C – 20 °C)                              |                                          | 0,02                         |                                                       | 0,0012                       | 0,00124                                          |
|                            | Acier                                           |                                          | 60,0                         |                                                       | 3,12                         | 7,8                                              |
|                            | Eau (10 °C)                                     |                                          | 0,6                          |                                                       | 4,15                         | 0,99                                             |

Figure 3 : Valeurs typiques de conductivité et capacité calorifique.

Pour chaque couche géologique rencontrée, et en fonction des données bibliographiques retenues, la capacité calorifique est identifiée. Ensuite, le calcul de la valeur moyenne est effectué en pondérant les valeurs obtenues par l'épaisseur des couches correspondantes.

| Altitudes      | Géologie                                                                                         | Capacité calorifique moyenne |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 0 m – 6 m      | Sablo-argileux, sables + graviers                                                                | 2,5 MJ/m <sup>3</sup> .K     |
| 6 m – 8 m      | Graviers propres, saturés                                                                        | 2,5 MJ/m <sup>3</sup> .K     |
| 8 m – 16 m     | Calcaire altéré                                                                                  | 2,2 MJ/m <sup>3</sup> .K     |
| 16 m – 100 m   | Calcaire / Marnes, avec forte proportion de calcaire en gros blocs décimétriques, passages d'eau | 2,2 MJ/m <sup>3</sup> .K     |
| <b>Moyenne</b> | <b>2,22 MJ/m<sup>3</sup>.K</b>                                                                   |                              |

Figure 4 : Exemple de détermination de la capacité calorifique en fonction d'une coupe forage.

### 1.5. RÉSISTANCE THERMIQUE DE LA SONDE

En régime stationnaire, pour une sonde de profondeur L dont on extrait une puissance Q (soit une puissance linéique  $q = Q/L$ ), la résistance thermique  $R_b$  (K/W.m<sup>-1</sup>) de la sonde lit de manière asymptotique les niveaux de température du fluide ( $T_{\text{fluide}}$ ) et du sol à la périphérie du forage ( $T_{\text{forage}}$ ) à la quantité d'énergie injectée par mètre linéaire ( $q$ , en W/m) de sonde selon la relation :

$$T_{\text{fluide}} \sim T_{\text{forage}} + q \cdot R_b \Rightarrow q \sim (T_{\text{fluide}} - T_{\text{forage}})/R_b$$

La résistance thermique est propre à une sonde donnée, c'est un paramètre qualitatif de celle-ci (plus la résistance est faible, meilleure est la qualité de la sonde car pour une même puissance, l'écart de température entre la paroi du forage et le fluide est d'autant plus faible).

La résistance thermique d'une sonde est directement liée à la qualité de sa pose. Ainsi deux sondes de même type et de même profondeur placée dans un même terrain peuvent présenter des résistances thermiques différentes : *la mesure de la résistance de sonde permet ainsi de valider une procédure d'installation de la sonde, qui devra être ensuite appliquée - ou améliorée - le plus rigoureusement possible par le foreur lors du déploiement du champ de sondes.*



## 2. Principe du test de réponse thermique

### 2.1. PRINCIPE GÉNÉRAL

Le principe du test repose sur l'observation, depuis la surface du sol, des régimes de température en entrée et sortie ( $T_e$  et  $T_s$ ) de la sonde test lorsque qu'un échelon de puissance lui est appliqué. Ce principe offre l'avantage de n'effectuer les mesures qu'à l'entrée et la sortie de la sonde, c'est-à-dire au niveau du sol, et ne nécessite pas d'instrumenter le sous-sol (*i.e.* pas de capteurs de mesure placés en sous-sol).

L'échelon de puissance est réalisé par une injection de chaleur dans le sol maintenue constante au cours du temps. Pour ce faire, un équipement de chauffage chauffe le fluide en sortie de sonde et le réinjecte en entrée de sonde (circulation). Le système est donc bouclé.

La puissance injectée, en WATT est (rappel :  $1W = 1J/s$ ) :

$$P = Q_m \cdot C_{pf} \cdot (T_e - T_s) = Q_f \cdot \rho \cdot C_{pf} \cdot (T_e - T_s)$$

- **$Q_m$**  est le débit massique (kg/s) ;
- **$Q_f$**  le débit volumique ( $m^3/s$ ) ;
- **$\rho$**  la densité du fluide ( $kg/m^3$ ) ;
- **$C_{pf}$**  la chaleur spécifique du fluide (J/kg.K).

Il est donc important de connaître ces paramètres avec précision, c'est pourquoi on évitera les mélanges d'eau glycolée et on utilisera exclusivement de l'eau ( $C_p = 4180 J/kg.K$ ,  $\rho = 1000 kg/m^3$ ).

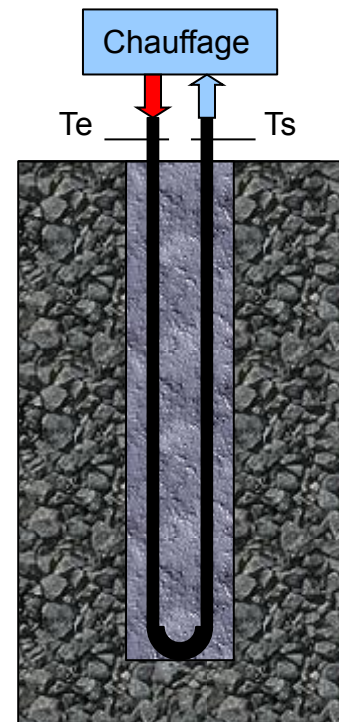
Par ailleurs, la stabilité de la puissance injectée est un facteur déterminant pour le bon déroulement de la mesure. Ceci implique donc que le dispositif de test permette :

- un maintien du *débit* aussi stable que possible ;
- un maintien de la *différence de température* ( $T_e - T_s$ ) aussi stable que possible.

Par la suite, on note  **$T_f$**  la température moyenne du fluide, soit  **$T_f = (T_e + T_s)/2$**

### 2.2. MESURE DE LA TEMPÉRATURE INITIALE

La mesure de la température stabilisée du sous-sol nécessite que *la sonde de test soit au repos et en équilibre thermique avec le sous-sol*. La mesure doit donc impérativement être réalisée *avant* l'injection de chaleur. On peut alors, à cette



condition seulement, relever la température naturelle du sous-sol. On présente ci-après deux méthodes admissibles : le relevé du log thermique, et la mesure par circulation.

### 2.2.1. Relevé du Log Thermique

Le relevé du log thermique se fait en introduisant dans la sonde un capteur de température relié à la surface par un câble, par lequel on relève la température mesurée. Le capteur est descendu doucement par palier, à chaque palier l'opérateur attend que la mesure soit stabilisée et l'enregistre. La délicatesse doit être de rigueur afin de créer le moins de mélange possible du fluide dans la sonde pendant la descente du capteur, afin d'obtenir les mesures les plus précises possible :

- avantage : on dispose du gradient de température sur la hauteur de la sonde, mesure précise ;
- inconvénient : opération fastidieuse, la précision dépend de la qualité de l'opérateur.

Exemple de relevé de log thermique pour une sonde de 90 m, mesure effectuée tous les 2,5 m :

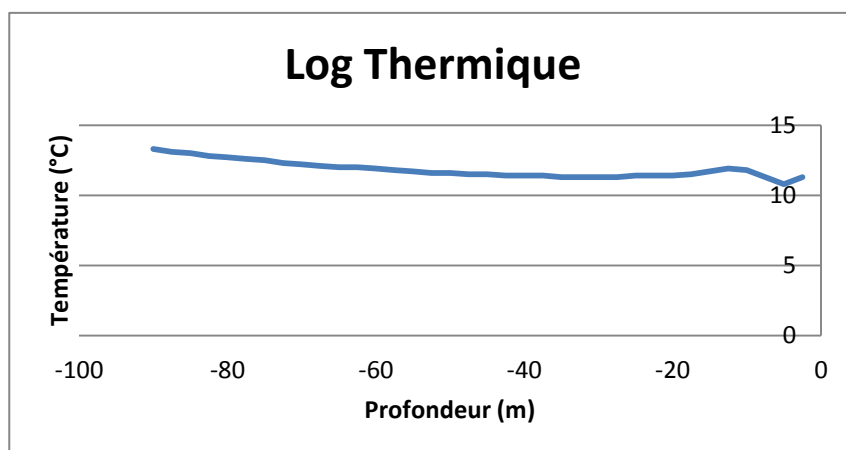


Figure 5 : Exemple de log thermique obtenu sur forage 90 m.

L'enregistrement fait apparaître l'augmentation de la température du sol en fonction de la profondeur.

### 2.2.2. Mesure par circulation

La mesure par circulation est de loin la plus utilisée, cependant elle ne permet que de relever la température moyenne sur la hauteur de la sonde. La température de stabilité est obtenue par simple circulation dans les sondes, chauffage à l'arrêt. La mesure s'effectue sur  $T_e$  et  $T_s$ . Du fait de la différence de température du sol entre le haut et la base de la sonde (cf. paragraphe précédent), la mesure de la température moyenne du fluide  $T_f = (T_e + T_s)/2$  va présenter des oscillations qui vont tendre à disparaître au fur et à mesure que la température du fluide s'homogénéise. Il faut donc attendre que la mesure soit stable pour obtenir la température moyenne du fluide, qui correspond alors à la température moyenne du sous-sol.

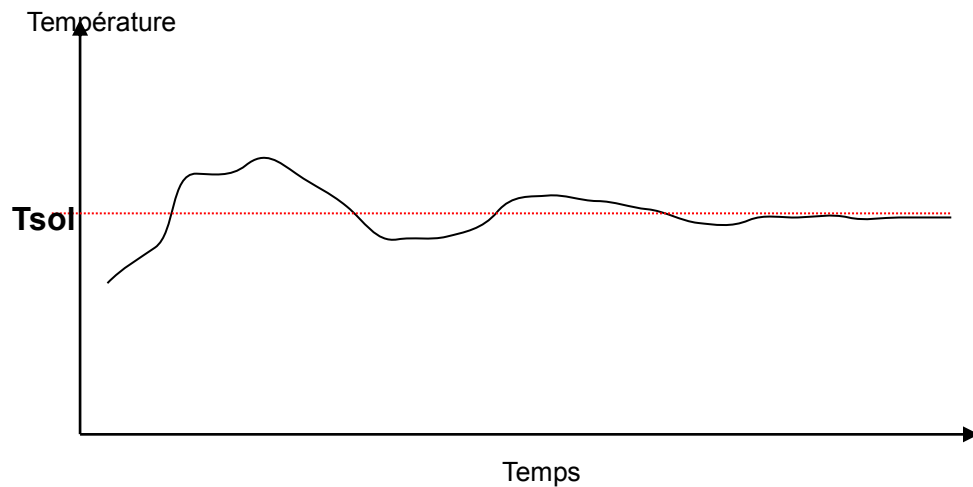


Figure 6 : Exemple de convergence obtenue par simple circulation.

La durée moyenne de la circulation est d'environ  $\frac{1}{2}$  heure pour une sonde de 100 m de profondeur, cette durée variant avec la profondeur de la sonde (*i.e.* plus la sonde est profonde, plus la durée de circulation nécessaire à l'obtention d'une température stable est longue) :

- avantage : procédé intégré au test de réponse thermique (préambule) ;
- inconvénient : mesure d'une température moyenne, précision discutable (influence du remplissage de l'appareil de test, influence thermique de la pompe de circulation).

### 2.3. DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE MOYENNE DU TERRAIN ET DE LA RÉSISTIVITÉ THERMIQUE DE LA SGV

La conductivité thermique moyenne du terrain et la résistivité thermique de la SGV peuvent être déterminées à partir de trois grandeurs mesurées pendant la phase de circulation à puissance constante :

- le débit effectif dans la sonde  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{hr}$  ou  $\text{kg/s}$ ) ou, au minimum, l'énergie injectée  $P$  (W) ;
- les températures  $T_e$  et  $T_s$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;
- la puissance injectée  $P$  (W).

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la conductivité thermique moyenne du terrain en fonction de l'évolution temporelle de la température moyenne de fluide caloporteur. Nous en présentons deux méthodes, la première la plus simple et la plus couramment utilisée et la seconde étant plus complexe exigeant un logiciel de calcul spécifique :

- la détermination de la conductivité par application de la théorie de la source linéaire infinie (LSI) de chaleur, méthode la plus couramment utilisée. Il s'agit du modèle le plus simple de SGV, où l'évolution de la température du fluide est liée aux paramètres thermophysiques du terrain par une équation relativement simple, facile à manipuler ;
- la détermination de la conductivité par modélisation thermique en deux ou trois dimensions de la SGV et de son environnement. À l'opposé de la méthode la LSI, cette méthode, plus complexe, exige le recours à un logiciel de calcul scientifique ou à un modèle numérique dédié au dimensionnement des SGV.

Quelle que soit la méthode retenue, le principe général de l'interprétation du TRT consiste à ajuster les paramètres que sont la conductivité thermique moyenne du terrain et la résistivité thermique de la SGV de manière à ce que le modèle choisie reproduise l'évolution observée de la température moyenne du fluide.

### 2.3.1. Théorie de la source linéaire de chaleur

La théorie de la source linéaire infinie de chaleur consiste à considérer la sonde de test comme une source linéaire, verticale (*i.e.* un filament), générant un flux de chaleur radial (horizontal) et isotrope (*i.e.* « s'écoulant » dans toutes les directions horizontales)  $q$  (W/m) dans un milieu infini (le sol) de conductivité  $\lambda$  (W/m.K) et de capacité calorifique  $C_p$  (J/m<sup>3</sup>.K). On note  $a = \lambda / C_p$  la diffusivité thermique du terrain (en m<sup>2</sup>/s). La conception exacte de la sonde (nombre et disposition des tubes dans la SGV, propriétés thermophysiques des éléments constitutifs de la SGV elle-même) ne rentre pas en compte, ainsi, la source de chaleur est considérée comme située au centre du forage, lui-même considéré comme cylindrique, de rayon  $r_b$ .

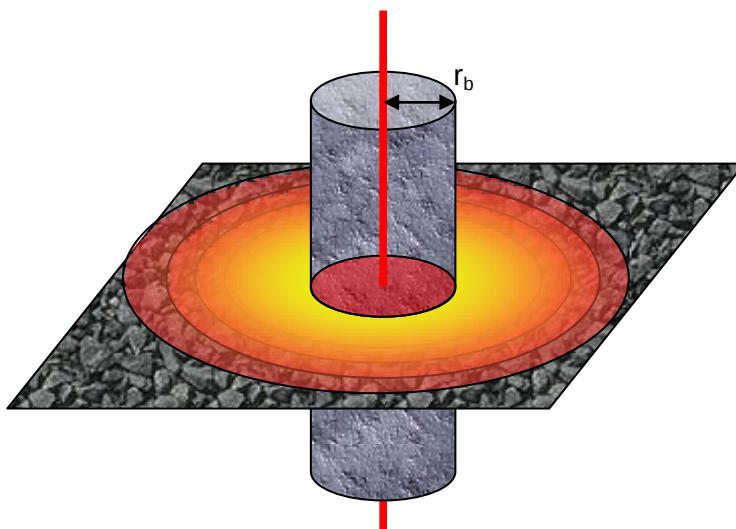


Figure 7 : Théorie de la source linéaire de chaleur.

Dans ces conditions, la température à une distance (rayon)  $r$  et à l'instant  $t$  est donnée par l'équation :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Quand  $at/r^2$  est suffisamment grand, la formule précédente peut être approchée :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right)$$

où  $\gamma$  est la constante d'Euler ( $\gamma = 0,5772$ ).

On estime que l'erreur engendrée par l'approximation est au maximum de 2,5 % lorsque  $at/r^2 > 20$ , et de 10 % lorsque  $at/r^2 > 5$ .

En appliquant cette formule pour  $r = r_b$ , on obtient ainsi la température à la frontière du forage. En tenant compte de la résistance thermique de la sonde  $R_b$  (cf. 0 ?), on obtient finalement une équation régissant la température moyenne du fluide  $T_f$  :

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + qR_b = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + T_0 + qR_b$$

qui est de la forme  $T_f(t) = A \ln(t) + B$ .

En appliquant le principe du test tel que décrit en 2.1, l'enregistrement des températures en entrée et sortie de sonde permet de mesurer la température moyenne du fluide. En se débarrassant des premières heures de la mesure, afin de s'assurer que  $at/r^2$  soit suffisamment grand pour que les approximations faites soient valables, puis en traçant la température moyenne du fluide sur une échelle logarithmique, on doit obtenir une droite permettant d'établir, numériquement ou graphiquement, A (pente de la droite) et B (origine de la droite). Connaissant les paramètres du test et la valeur estimée de  $C_p$ , A permet alors de calculer  $\lambda$ , puis B permet de calculer  $R_b$ .

### 2.3.2. Détermination par simulation

Dans ce cas, le test est reproduit par simulation en tenant compte des paramètres physiques de la sonde de test (profondeur, diamètre de forage) et des paramètres du test. Les paramètres internes de la sonde de test (cimentation, écartement des tubes etc.) sont ajustés par simulation afin de reproduire la résistance thermique de la sonde.

Cette méthode nécessite de disposer d'un code de calcul précis et fiable, généralement aux éléments finis, afin de minimiser l'erreur inhérente au calcul. De ce fait, cette méthode n'est en pratique que peu utilisée.

Elle ne se justifie en fait que lorsque l'on souhaite, par la suite, analyser dynamiquement le comportement de la sonde et observer l'impact de la modification de certains paramètres physique de la sonde (modification de la cimentation, écartement...). Elle peut également servir à calibrer le modèle numérique utilisé par la STD, lorsque le code de calcul le permet.

## 2.4. EXEMPLE D'APPLICATION

| Paramètres du test                            |                           |  |
|-----------------------------------------------|---------------------------|--|
| Capacité calorifique du sol estimée           | 2,22 MJ/m <sup>3</sup> .K |  |
| Type de sonde test                            | PE Double U DN32          |  |
| Profondeur de la sonde test                   | 100 m                     |  |
| Diamètre forage (rayon)                       | 0,132 m (0.066 m)         |  |
| Fluide utilisé                                | eau                       |  |
| Capacité fluide C <sub>pf</sub>               | 4,18 MJ/m <sup>3</sup> .K |  |
| Débit D                                       | 1,2 m <sup>3</sup> /h     |  |
| Écart entrée/sortie ΔT                        | 4 K                       |  |
| Puissance thermique P <sub>th</sub>           | 5 573 W                   |  |
| Puissance thermique par mètre p <sub>th</sub> | 55,7W/m                   |  |
| Durée du test                                 | 70 h                      |  |

Figure 8 : Paramètres d'un test.

La température moyenne du sol, relevée par circulation dans la sonde, est de **12,82 °C**.

L'enregistrement des températures en entrée et sortie de sonde pendant le test est présenté ci-après.

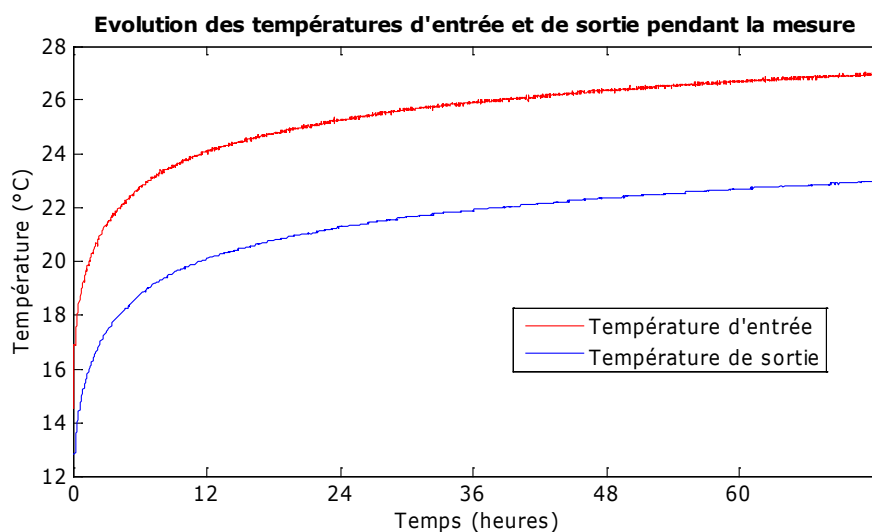


Figure 9 : Évolution des températures E/S sonde pendant un test.

### 2.4.1. Méthode de la source linéaire de chaleur

Le tracé de la température moyenne du fluide  $(T_e + T_s)/2$ , à partir de 24 heures sur une échelle logarithmique donne le résultat suivant :

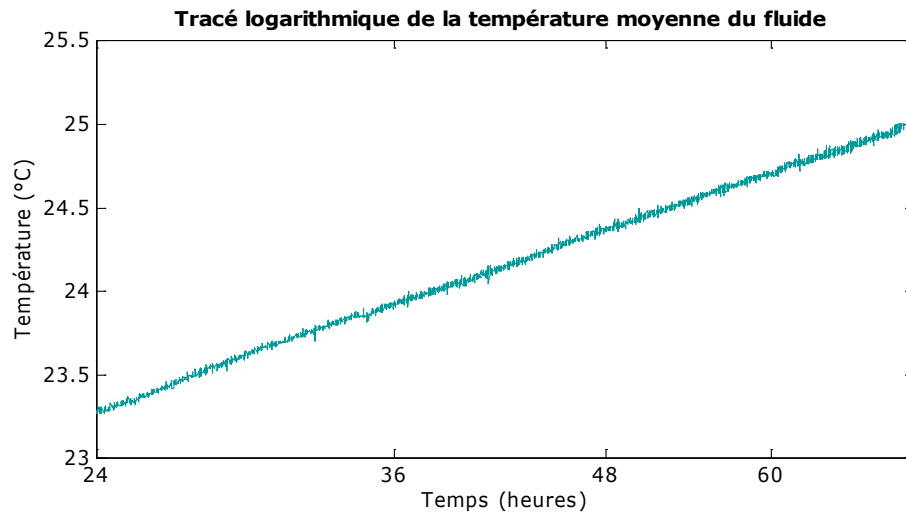


Figure 10 : Tracé logarithmique de la température moyenne du fluide.

L'asymptote déterminée graphiquement est la suivante :

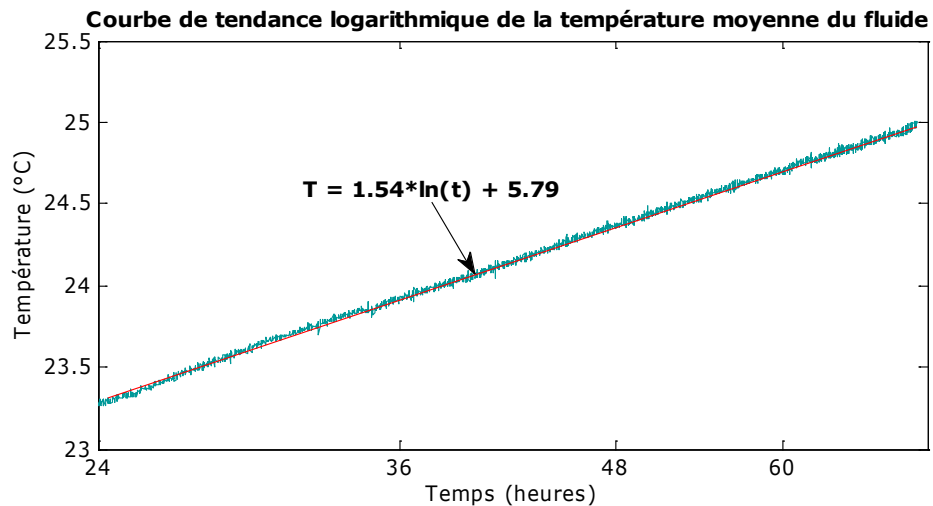


Figure 11 : Détermination de l'asymptote.

soit  $1,54 = q/(4\pi\lambda) = 55,7/(4\pi\lambda)$ , d'où  $\lambda = 55,7/(4\pi \cdot 1,54) = \mathbf{2,88 \text{ W/m.K}}$

On déduit  $R_b$  :  $5,79 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) + T_0 + qR_b$  donc  $R_b = \mathbf{0,076 \text{ K/W.m}^{-1}}$

Dans notre cas ( $24\text{h} = 86\,400 \text{ s}$ ),  $at/r^2 = (2,88 \cdot 86\,400)/(2\,220\,000 \cdot 0,066^2) = 25,7$  : l'approximation est de bonne qualité, générant une erreur inférieure à 2 %.

### 2.4.2. Méthode par simulation

On modélise la sonde de test puis on reproduit le test de réponse thermique en environnement simulé et on ajuste les paramètres recherchés (conductivité). On agit sur la qualité de la cimentation (conductivité ciment) et l'écartement des tuyaux pour parvenir à une réplique exacte du test :

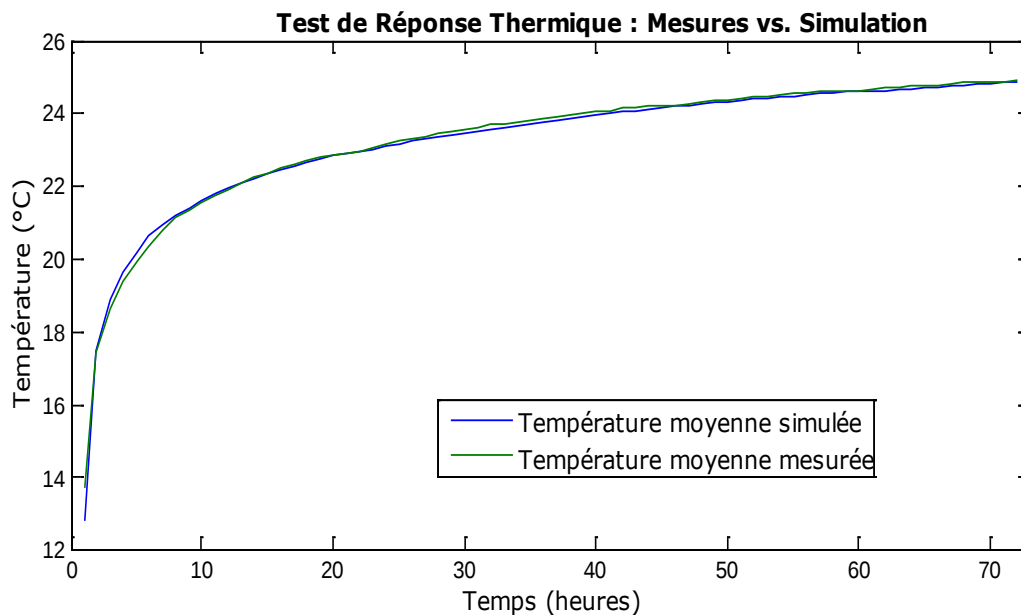


Figure 12 : Reproduction d'un test en environnement simulé.

Les caractéristiques retenues pour la simulation du test sont les suivantes :

- température initiale à  $T = 0$  : 12,82 °C ;
- sol :  $CpV = 2\,220 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{C}^\circ$  ;
- fluide (Eau) :  $\lambda = 0,598 \text{ W/mC}^\circ$ ,  $Cp = 4\,182 \text{ J/kg} \cdot \text{C}^\circ$ , densité  $1\,000 \text{ kg/m}^3$  ;
- tuyaux (PEHD) :  $\lambda = 0,46 \text{ W/mC}^\circ$ ,  $Cp = 1\,760 \text{ J/kg} \cdot \text{C}^\circ$ , densité  $= 955 \text{ kg/m}^3$  ;
- profondeur : 100 m ;
- nombre de U par sonde : 2 ;
- diamètre forage : 0,132 m ;
- diamètres tuyaux : extérieur : 0,032 m, intérieur : 0,0262 m.

La simulation concorde avec la mesure pour les paramètres suivants :

- **sol** :  $\lambda = 2,88 \text{ W/mC}^\circ$  ;
- **ciment** :  $\lambda = 2,0 \text{ W/mC}^\circ$ ,  $CpV = 2\,000 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{C}^\circ$  ;
- **écartement tuyaux (entraxe)** : 0,04 m.

### 3. Composants du TRT

#### 3.1. SONDE DE TEST

La sonde de test doit être représentative des sondes prévues dans le chantier futur.

Lorsque la théorie de la source linéaire de chaleur est appliquée, la sonde de test doit être conforme au modèle retenu, c'est à dire présenter des caractéristiques telles que son diamètre puisse être considéré comme négligeable par rapport à sa longueur. De ce fait, les SGV de type simple U, double U, coaxiale ou spiralée dans des forages de diamètres usuels (de 100 mm à 200 mm) sont acceptables. Eskilson propose l'introduction d'un temps caractéristique  $t_s$  au-delà duquel l'approximation de la ligne source infinie n'est plus valable :

$$t_s = \frac{H^2}{90\alpha_{sol}}$$

avec : H : la profondeur de le SGV (m) ;

$\alpha_{sol} = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol}C_{p,sol}}$  : la diffusivité thermique du sol (m<sup>2</sup>/s)

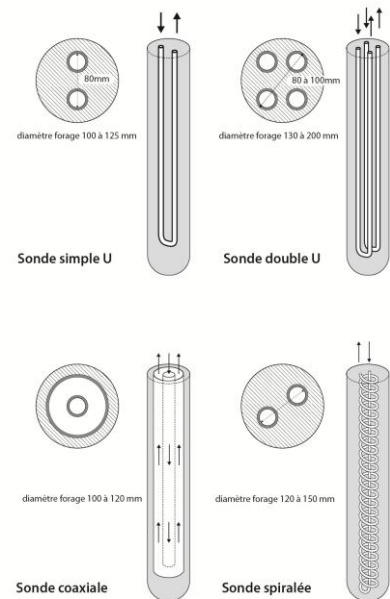


Figure 13 : Sondes de tests usuelles.

Par contre, l'utilisation de corbeilles (faible profondeur, diamètre élevé) est très discutable.

L'équation présentée ci-dessus ne peut pas être utilisée pour l'interprétation d'un TRT sur un échangeur plan (capteur horizontal).

#### 3.2. PRÉSENTATION D'UN APPAREIL TYPE

Un appareil de test de réponse thermique fonctionne en *mode chauffage*. Bien que théoriquement la source linéaire de chaleur puisse être appliquée en refroidissement, il est en effet plus simple de contrôler la puissance de chauffe que la puissance de refroidissement. La production contrôlée de chaleur (par ex. le réglage d'une intensité électrique parcourant une résistance de chauffage) est en effet plus simple à mettre en œuvre que la production d'une puissance frigorifique (nécessitant un groupe de production de froid plus conséquent que la simple résistance). L'appareil doit comporter, au minimum :

- un organe de chauffage permettant de réguler, ou à défaut calibrer, la puissance injectée dans le sol ;
- une pompe de circulation permettant de réguler, ou à défaut calibrer, le débit de circulation dans la sonde ;
- des capteurs de température platine, minimum PT100 classe B<sup>2</sup> ou équivalent, permettant de relever :
  - la température en sortie de l'appareil (entrée de sonde),
  - la température en entrée de l'appareil (sortie de sonde) ;
- un système de mesure d'énergie : soit par relevé de la puissance thermique injectée (puissance du réchauffeur, par exemple par mesure tension/intensité électrique consommée ou énergie primaire consommée) et/ou par mesure de débit (permettant le calcul, plus précis, de la puissance injectée selon la formule décrite en 2.1) ;
- un système d'enregistrement, à intervalles réguliers, des grandeurs mesurées décrites précédemment. La période d'enregistrement des mesures est au minimum de 10 minutes, et peut descendre jusqu'à 30 secondes.

L'appareil doit de plus intégrer les sécurités nécessaires à la protection des personnes (protection contre la surchauffe, notamment) et de manière générale être conçu selon les normes en vigueur.

L'utilisateur doit pouvoir justifier de la précision des capteurs de mesure utilisés dans l'appareil. Lorsque la puissance injectée est mesurée par le biais du relevé de la consommation électrique ou primaire consommée, le comptage ne doit concerner que l'énergie consommée par l'organe de chauffage et non par l'appareil dans son ensemble afin de ne pas parasiter la mesure.

---

<sup>2</sup> Note sur les capteurs de températures platine

Les capteurs de températures platine ont une résistance qui varie avec la température : en mesurant la résistance électrique du capteur, on peut donc connaître la température du milieu.

Le capteur platine PT100 est le thermomètre le plus commun. Il présente une résistance de 100 Ohms à 0 °C. Pour un capteur PT100 classe B, la variation de résistivité est d'environ 0,4 ohms/°C, avec une précision de  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ . La précision est de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  pour un capteur PT100 classe A. Il est nécessaire de s'assurer que le dispositif de mesure de la résistivité ait une précision au moins égale à celle du capteur utilisé. De plus, le câble reliant le capteur de température au dispositif de mesure présente lui aussi une résistance électrique arbitraire, qui vient donc s'ajouter à celle du capteur et donc pollue la mesure : il est donc impératif de câbler le capteur avec 3 ou 4 fils et d'utiliser un dispositif de mesure adéquat : dans ce cas, deux fils permettent de mesurer la résistance de l'ensemble sonde P100 + câble, le troisième fil permet de mesurer la résistance du câble seule : on obtient donc la résistance propre à la sonde P100 en soustrayant la résistance du câble mesurée à la résistance de l'ensemble mesurée.

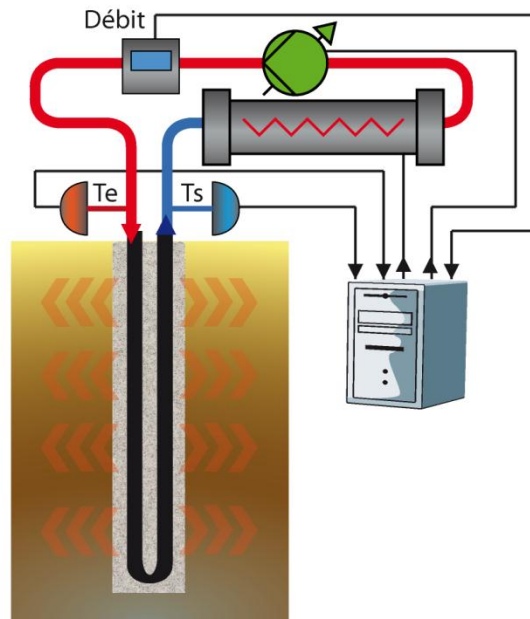


Figure 14 : Principe d'un appareil de TRT.

### 3.3. PRÉCISION DE L'APPAREIL

Outre la précision des capteurs servant à la mesure, deux facteurs influent sur la précision de celle-ci :

- la présence ou non de régulation de la puissance injectée ;
- les pertes thermiques sur la chaîne de mesure.

#### 3.3.1. Régulation

La régulation consiste à maintenir la puissance injectée par la sonde test aussi stable que possible. Étant donné que la puissance  $P = Q_m \cdot C_{pf} \cdot (T_e - T_s)$ ,  $Q_m$  étant le débit de circulation,  $C_{pf}$  la chaleur spécifique du fluide circulant et  $T_e$  et  $T_s$  les températures en entrée et sortie de sonde test, la régulation concerne simultanément :

- le maintien d'un débit de circulation  $Q_m$  constant ;
- le maintien d'un écart de température constant  $T_e - T_s$ . Ceci peut être fait soit en régulant l'écart de température voulu (régulation directe), soit en régulant la puissance électrique consommée par le dispositif de chauffage (régulation indirecte).

Un appareil régulé permet l'ajustement précis des consignes de débit et de chauffage afin de s'adapter à tous les cas de figure.

#### 3.3.2. Erreur due à l'absence de régulation

La régulation n'est à ce jour pas obligatoire. Dans ce cas, l'appareil doit permettre l'ajustement des consignes de débit et de chauffage au moins par palier afin de

s'adapter à tous les cas de figure. Cependant, lorsque l'appareil est alimenté par le réseau électrique, l'absence de régulation va entacher la mesure d'une erreur inhérente à la variation de tension de celui-ci. Ce phénomène ne se produira pas si la source d'énergie est stable (par exemple, groupe électrogène régulé).

En effet la tension peut varier de 10 % par rapport à sa valeur nominale, du fait de la stabilité inhérente au réseau (producteurs, consommateurs instantanés) (ERDF, [www.erdfdistribution.fr](http://www.erdfdistribution.fr)). Un appareil de test électrique utilisant une résistance thermique  $R$ , la puissance de chauffe délivrée est  $P = UI = U^2/R$  ( $U$  tension (V),  $I$  intensité (A),  $R$  résistance (Ohm)). Pour une puissance de référence  $P_{ref}$  voulue, calculée pour la tension de référence  $U_{ref}$  (par exemple 230 V ou 400 V) ( $P_{ref} = U_{ref}^2/R$ ), la puissance effective peut varier entre  $(0,9*U_{ref})^2/R = 0,81*P_{ref}$  et  $(1,1*U_{ref})^2/R = 1,21*P_{ref}$ . La puissance d'un appareil de test non régulé et raccordé au réseau peut ainsi varier de 20 % pendant le test, ce qui se répercute, dans le pire des cas, sur la conductivité mesurée, et ne permet pas d'observer finement le comportement thermique de la sonde (bruit de fond important).

### **3.3.3. Pertes et apports thermiques, isolation**

Les pertes thermiques concernent :

- la dissipation thermique parasite lorsque l'appareil fonctionne par température ambiante froide ;
- les apports thermiques parasites lorsque l'appareil fonctionne par température ambiante chaude.

#### ***Appareil avec régulation***

Lorsque l'appareil est muni d'une régulation contrôlant la puissance injectée par l'appareil, celle-ci prend en compte les pertes ou apports thermiques internes de l'appareil : *l'isolation interne* (ou calorifugeage) de celui-ci n'est donc pas nécessaire.

#### ***Appareil sans régulation***

Dans ce cas, aucun contrôle n'est effectué, et les pertes ou apports thermiques internes de l'appareil viennent se soustraire ou s'ajouter à la puissance injectée, ce qui induit une erreur sur la mesure. Dans ce cas, *le circuit hydraulique de l'appareil doit être intégralement et soigneusement calorifugé* pour minimiser l'influence climatique sur celui-ci.

#### ***Influence de la position des capteurs***

Une distance plus ou moins grande sépare généralement l'appareil de la sonde de test, le raccordement entre les deux étant réalisé par des canalisations (aller/retour).

- Lorsque les capteurs de température sont solidaires de l'appareil, la mesure des régimes de températures ne doit pas être perturbée par les déperditions au niveau

des canalisations : celles-ci doivent être impérativement calorifugées (appareil régulé ou non régulé).

- Lorsque les capteurs de température sont placés directement sur les sondes, donc à distance de l'appareil :
  - soit l'appareil n'est pas régulé, dans ce cas la mesure des régimes de températures ne doit pas être perturbée par les déperditions au niveau des canalisations : celles-ci doivent être impérativement calorifugées,
  - soit l'appareil est régulé et la régulation s'effectue sur les températures mesurées sur la sonde de test : dans ce cas les déperditions sont prises en compte par la régulation, le calorifugeage des canalisations est alors inutile.



## 4. Procédures de mise en œuvre

### 4.1. DÉLAI ENTRE LA POSE ET LA MESURE

La sonde de test étant posée, la cimentation effectuée, il est nécessaire de s'assurer que celle-ci soit prise pour, d'une part, atteindre un niveau de performance (conductivité) stable, et d'autre part pour éviter que la prise de la cimentation, plus ou moins exothermique (*i.e.* génératrice de chaleur) ne viennent interférer avec les mesures en cours.

De ce fait, on admet généralement un délai minimum de **5 à 7 jours** entre la cimentation et le début du test.

### 4.2. MESURE DE LA TEMPÉRATURE STABILISÉE DU SOUS-SOL

#### 4.2.1. Cas du Log Thermique

Lorsque la mesure est effectuée par relevé du gradient thermique le long de la sonde, il est impératif de minimiser le déplacement du fluide dans la sonde lorsque le capteur de température y est introduit. Il est donc nécessaire de boucher, avec des bouchons prévus à cet effet, les extrémités de la sonde en surface autres que celle utilisée pour l'introduction du capteur de température.

#### 4.2.2. Cas du relevé par circulation

##### *Influence de la pompe de circulation*

Dans ce cas, la pompe de circulation va naturellement dissiper une petite quantité de chaleur dans le fluide : celui-ci va donc se réchauffer tant que la circulation aura lieu. Ainsi, une fois que les oscillations sont amorties (cf. ?), la mesure doit être relevée sans tarder.

Dans la pratique, la durée de circulation nécessaire ne devrait pas dépasser 30 mn.

##### *Influence de la mise en eau de l'appareil de test*

Il est nécessaire de limiter autant que possible le volume d'eau additionnel qui est introduit dans le circuit lors de la mise en eau de l'équipement de test afin de ne pas fausser la mesure. Idéalement, il convient de mesurer le volume additionnel mis en œuvre ainsi que la température de celui-ci avant remplissage de l'appareil pour corriger la valeur mesurée.

Par exemple, une sonde double U DN32 de 100 m entièrement remplie représente un volume de  $4 \times 100 \times \pi \times (0,0131)^2 = 0,2156 \text{ m}^3$ . Le remplissage de l'appareil met en œuvre un volume additionnel de 30 litres à 20 °C, la température moyenne mesurée à l'issue

de la phase de circulation est de 13 °C. La température initiale du volume d'eau au repos dans la sonde était donc T<sub>0</sub>, tel que  $13 = (T_0 \cdot 0,2156 + 20 \cdot 0,02) / 0,2356$ , soit T<sub>0</sub> = 12,35 °C. La valeur mesurée après remplissage de l'appareil présente donc dans ce cas une erreur de 5,2 % (surestimation).

#### 4.3. CHOIX DES PARAMÈTRES DU TEST

Pour la mesure de conductivité et le calcul de la résistance thermique de la sonde, la puissance injectée dans le sol est choisie dans une fourchette comprise entre 40 et 80 W/m de sonde test. Idéalement, la puissance injectée pendant le test est d'environ **50 W/m**.

La différence de température entre l'entrée et la sortie de sonde doit être comprise entre **3 °C et 7 °C**.

Le débit doit être suffisant pour que l'écoulement du fluide dans la sonde soit **turbulent** afin de garantir un échange thermique suffisant.

De plus, le débit doit être équivalent au débit par sonde utilisé en exploitation afin que la résistance de sonde mesurée soit représentative des sondes futures. En effet, le débit entre en compte dans le coefficient d'échange thermique entre le fluide et l'extérieur du tube de la boucle de sonde (*i.e.* Plus le débit est élevé, meilleur est l'échange). Cela impacte donc la résistance thermique de la sonde.

Dans la pratique, le débit doit être de l'ordre de :

- 0,5 à 1 m<sup>3</sup>/h pour une sonde double U DN25 (*i.e.* la moitié pour une sonde simple U) ;
- 0,7 à 1,4 m<sup>3</sup>/h pour une sonde double U DN32 (*i.e.* la moitié pour une sonde simple U) ;
- 0,9 à 1,6 m<sup>3</sup>/h pour une sonde double U DN 40 (*i.e.* la moitié pour une sonde simple U).

Cependant ces valeurs peuvent être revues à la hausse en fonction de la puissance qui doit être injectée (influence de la profondeur de la sonde).

Dans la pratique, le choix de la puissance d'injection résulte d'un compromis acceptable, au cas par cas, entre le débit et la différence de température qui sera appliquée entre l'entrée et la sortie de la sonde de test.

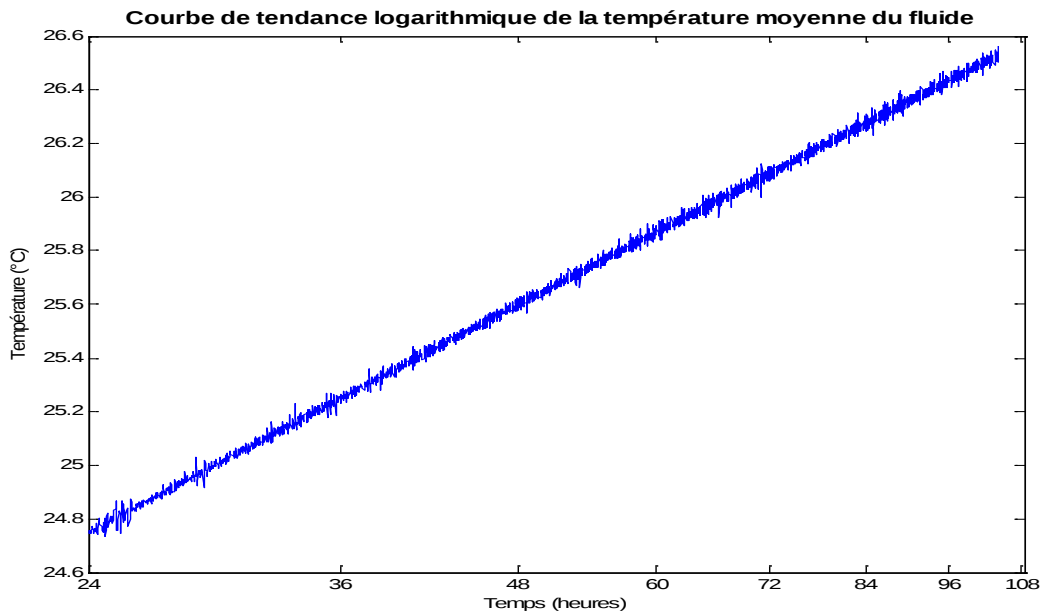
Ainsi par exemple pour une sonde double U DN32 de 100 m de profondeur, les paramètres du test (fluide : eau, Cp = 4,180 kJ/kg.K) peuvent être :

- débit : 1,2 m<sup>3</sup>/h (= 1 200/3 600 kg/s) ;
- écart de température : 4 K ;
- donc puissance de test :  $1\,200 \cdot 4 \cdot 4\,180 / 3\,600 = 5\,573$  W ;
- donc puissance injectée par mètre de sonde :  $5\,573 / 100 = 55,7$  W/m. On est proche des 50 W/m.

#### 4.4. DURÉE DU TEST

La méthode communément admise étant l'application de la théorie de la source linéaire de chaleur, il est nécessaire d'obtenir au minimum 36 heures de mesures valides pour pouvoir effectuer une régression fiable. Cette durée s'ajoute à la durée de mise en régime du test, qui varie entre 12 et 24 heures, et qui n'est pas prise en compte dans la régression (cf. 2.3.1).

La durée du test est donc au minimum de **48 h, voire 72 h**. Cependant, un test de trop longue durée n'est pas forcément plus informatif. En effet, étant donné que la régression se fait sur une échelle logarithmique, celle-ci rend l'information d'autant moins pertinente que la durée augmente (« tassement » des résultats dans la durée). L'exemple suivant montre cet état de fait.



#### 4.5. INTERRUPTION INVOLONTAIRE DU TEST

Lorsqu'un test est interrompu, par suite d'un défaut d'alimentation par exemple, il peut être relancé dans le délai le plus court possible, le plus tôt étant le mieux. L'exemple suivant montre une interruption secteur ayant duré 20 minutes. La reprise immédiate du test a permis à celui-ci de reprendre son cours.

Lorsqu'un test est avorté pour une raison quelconque et qu'il n'est pas relancé dans l'immédiat, il est nécessaire de reprogrammer une mesure. La nouvelle tentative risque d'être perturbée par la rémanence des calories injectées lors du précédent test. Il est donc nécessaire, entre deux tentatives, de laisser passer un délai minimum afin de s'assurer que le sol ait retrouvé un équilibre thermique satisfaisant. Le délai est

d'autant plus long que le précédent test était avancé, et que la puissance injectée était élevée. Dans la pratique, il faut attendre au minimum 10 jours.

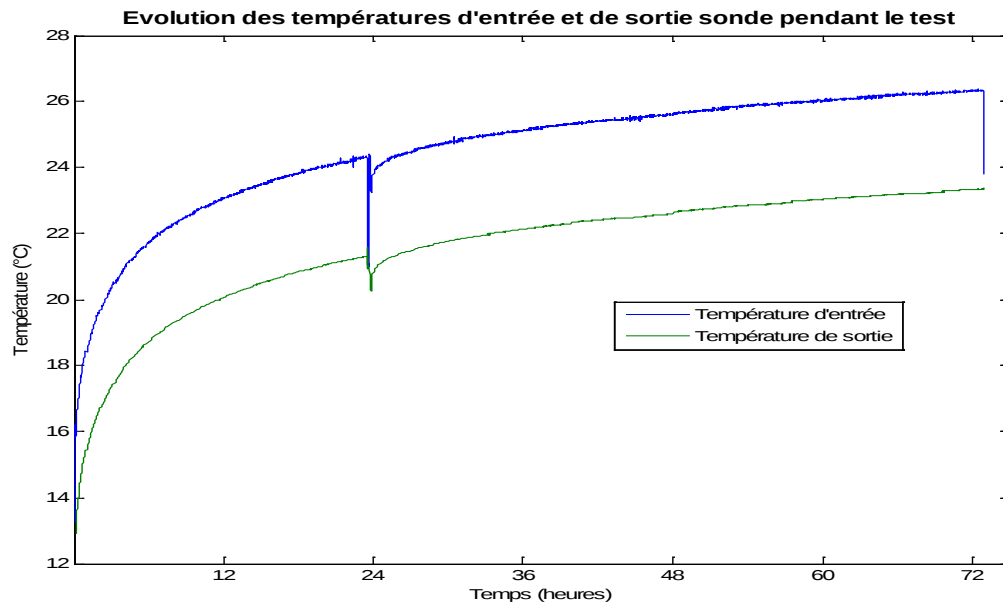


Figure 15 : Interruption momentanée d'un test.

La température stabilisée du sous-sol qui doit cependant être retenue, en tout état de cause, est celle relevée lors de la première tentative.

## 5. Résultats

### 5.1. CONTENU DU RAPPORT

Le rapport doit permettre à un tiers de pouvoir interpréter la qualité du travail effectué.

Il doit contenir les informations nécessaires pour que les calculs puissent être vérifiés par un tiers.

Il doit contenir les informations nécessaires afin de lever les incertitudes sur les résultats, ou tout au moins afin d'apporter des éléments de réponse en cas d'anomalies relevées, sur les régimes de température notamment.

### 5.2. DONNÉES DU PROJET

- Localisation exacte du projet ;
- identité des intervenants (forage, mesure, contrôle).

#### 5.2.1. Dispositif de mesure

Le rapport de test devrait présenter :

- le dispositif de mesure utilisé, précisant notamment :
  - la présence ou l'absence de régulation,
  - la position des capteurs de températures sur l'appareil ;
- l'emplacement de l'appareil vis-à-vis de la sonde testée lors de la mesure.

#### 5.2.2. Sonde test

Le rapport de test doit présenter les données relatives à la sonde de test :

- profondeur du forage, diamètre de forage, méthode de forage utilisée ;
- type de sonde (marque, modèle), profondeur effective de la sonde de test ;
- type de cimentation utilisée (marque, conductivité) ;
- coupe géologique obtenue, avec indication des arrivées d'eau constatées et éventuellement les débits estimés.

#### 5.2.3. Analyse bibliographique

Le rapport doit contenir l'estimation de la capacité calorifique du sol, évaluée sur la base de la coupe géologique pondérée par les valeurs moyennes obtenues dans la littérature (cf. SIA 386-6).

Le rapport *devrait* contenir l'estimation de la conductivité thermique du sol évaluée sur la base de la coupe géologique pondérée par les valeurs moyennes obtenues dans la littérature.

Les calculs estimatifs de la capacité calorifique et de la conductivité thermique doivent prendre en compte l'épaisseur des couches géologiques rencontrées (moyenne pondérée par l'épaisseur de chaque couche).

L'exemple suivant montre une telle estimation, basée sur la SIA 386-6.

| Altitudes      | Géologie                                                                                         | Capacité calorifique moyenne   | Conductivité moyenne |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0 m – 6 m      | Sablo-argileux, sables + graviers                                                                | 2,5 MJ/m <sup>3</sup> .K       | 2,2 W/m.K            |
| 6 m – 8 m      | Graviers propres, saturés                                                                        | 2,5 MJ/m <sup>3</sup> .K       | 1,8 W/m.K            |
| 8 m – 16 m     | Calcaire altéré                                                                                  | 2,2 MJ/m <sup>3</sup> .K       | 2,8 W/m.K            |
| 16 m – 100 m   | Calcaire / Marnes, avec forte proportion de calcaire en gros blocs décimétriques, passages d'eau | 2,2 MJ/m <sup>3</sup> .K       | 2,8 W/m.K            |
| <b>Moyenne</b> |                                                                                                  | <b>2,22 MJ/m<sup>3</sup>.K</b> | <b>2,74 W/m.K</b>    |

Figure 16 : Estimation préliminaire type.

Cet exemple est celui utilisé en 2.4, pour lequel la conductivité mesurée est de 2,88 W/(m.K). La conductivité mesurée est ainsi proche de la conductivité théorique. Cependant, lorsque celles-ci diffèrent de manière importante, il est intéressant d'en chercher la cause : présence d'un aquifère actif (augmentation plus ou moins importante de la conductivité apparente), cavité ou défaut de cimentation (diminution plus ou moins importante de la conductivité apparente)...

#### 5.2.4. Paramètres de test

Le rapport doit contenir une description des paramètres utilisés pendant le test, à savoir :

- la durée du test ;
- la nature du fluide utilisé, ainsi que sa chaleur spécifique (J/kg.K) ;
- la puissance injectée (en W) et injectée par mètre (W/m) ;
- le débit appliqué (m<sup>3</sup>/h) ;
- la différence de température appliquée entre l'entrée et la sortie de la sonde test.

Le rapport doit présenter l'évolution des paramètres du test sur la durée de celui-ci, afin de pouvoir juger de la stabilité de la puissance effectivement injectée.

Exemple, pour le test décrit en 2.4. :

| Paramètres du test                     |                           |  |
|----------------------------------------|---------------------------|--|
| Fluide utilisé                         | eau                       |  |
| Capacité fluide $C_{pf}$               | 4,18 MJ/m <sup>3</sup> .K |  |
| Débit D                                | 1,2 m <sup>3</sup> /h     |  |
| Écart entrée/sortie $\Delta T$         | 4 K                       |  |
| Puissance thermique $P_{th}$           | 5 573 W                   |  |
| Puissance thermique par mètre $p_{th}$ | 55,7W/m                   |  |
| Durée du test                          | 70 h                      |  |

Figure 17 : Report des paramètres du test.

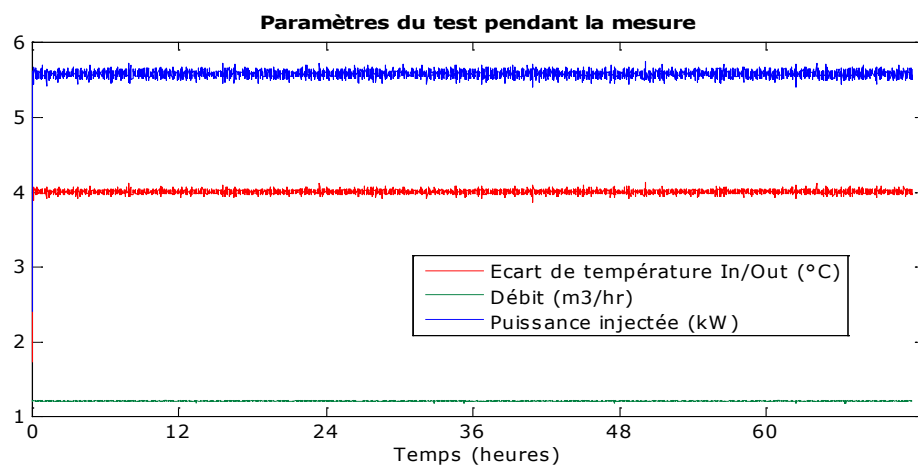


Figure 18 : Report des grandeurs appliquées pendant le test.

### 5.2.5. Courbes obtenues

Le rapport doit présenter les régimes de température obtenus pendant le test :

- température en entrée et sortie de sondes en fonction du temps ;
- température moyenne du fluide en fonction du logarithme népérien du temps ( $\ln(t)$ ) sur la durée servant au calcul de la conductivité ;
- régression linéaire obtenue sur la température moyenne en fonction du logarithme népérien du temps sur la durée servant au calcul de la conductivité.

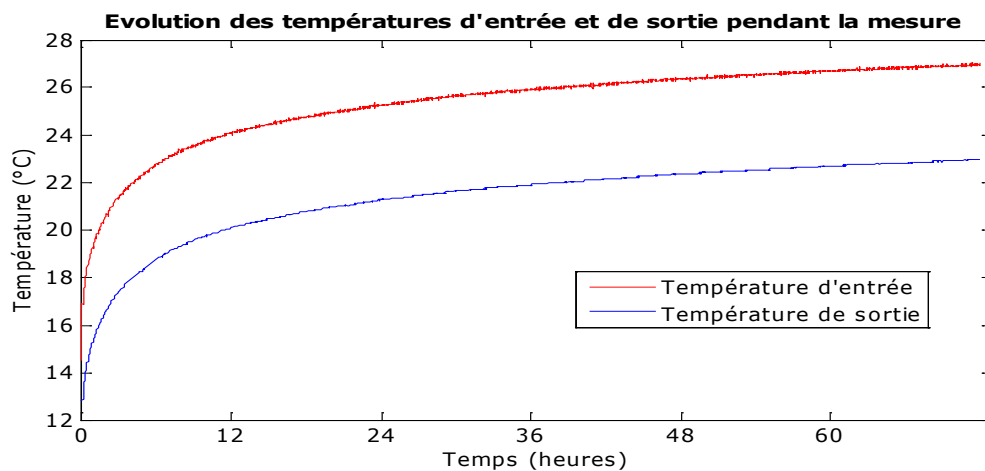


Figure 19 : Report des valeurs de température obtenues.

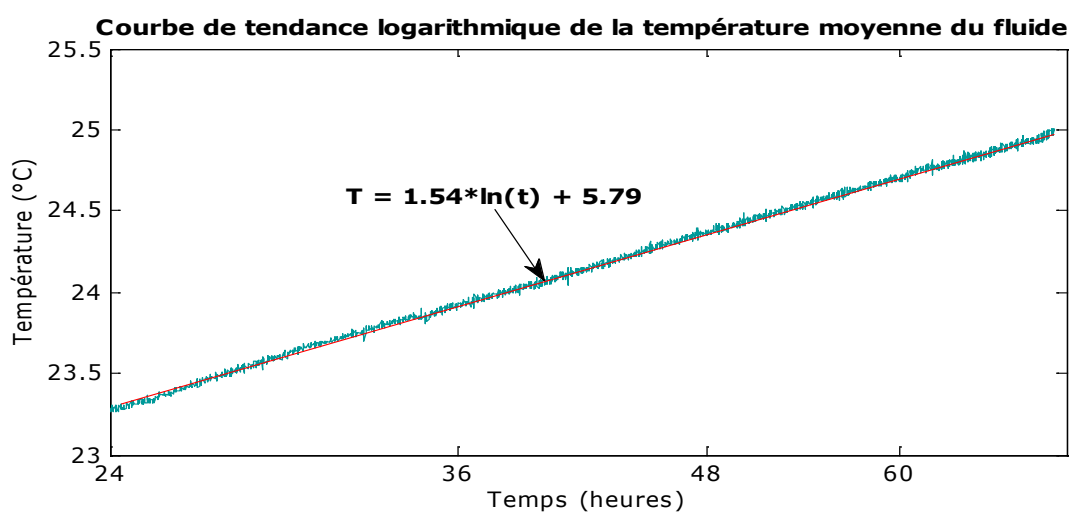
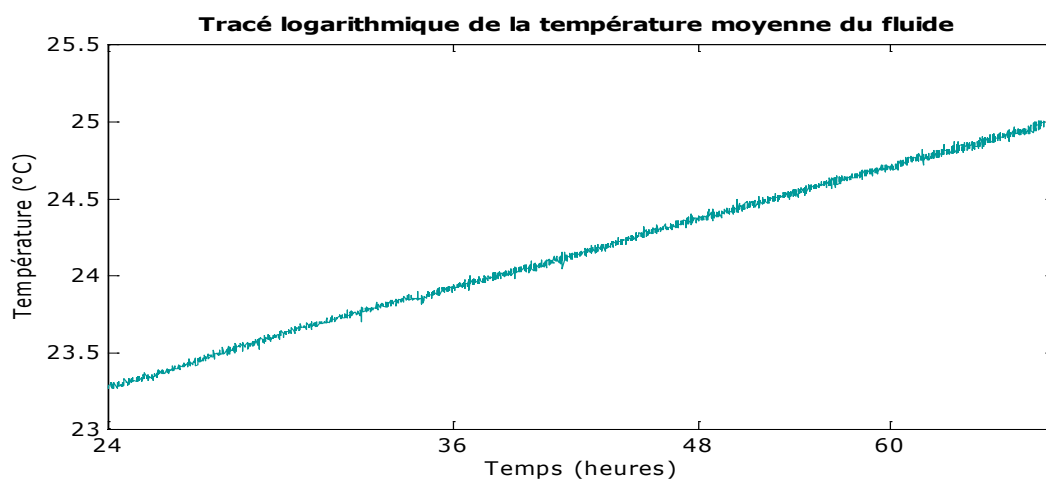


Figure 20 : Report du tracé logarithmique et de l'asymptote obtenus.

### 5.2.6. Résultats

Le rapport doit présenter :

- la température stabilisée du sol relevé, soit par mesure du gradient thermique soit par circulation ;
- la capacité calorifique estimée en 5.2.3, ainsi que les fourchettes de conductivité thermique tirées des abaques pour le type de lithologie identifiée à partir de la coupe géologique) ;
- la conductivité thermique calculée sur la base de la régression linéaire obtenue ;
- la résistance thermique de la sonde obtenue.

Le rapport *devrait* présenter en outre la valeur obtenue pour  $at/r^2$  (cf. 2.3.1).

### 5.2.7. Interprétation

Le rapport devrait, lorsque cela est nécessaire, tenter d'apporter des éléments de réponse permettant d'expliquer :

- une conductivité anormalement élevée ou anormalement faible pour la géologie rencontrée ;
- une résistance de sonde anormalement élevée ou anormalement faible pour le type de sonde utilisée.



## 6. Ordre de grandeur des résultats attendus

### 6.1. CONDUCTIVITÉ ET CAPACITÉ CALORIFIQUE

|                            | Type de roche                                   | Conductivité thermique $\lambda$<br>W/(m.K) |                              | Capacité thermique spéc. $c_p$<br>MJ/(m <sup>3</sup> .K) |                              | Densité $\rho$<br>10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> |
|----------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                            |                                                 | Plage des valeurs                           | Valeur de calcul recommandée | Plage des valeurs                                        | Valeur de calcul recommandée |                                                     |
| Terrains meubles           | Argile sèche                                    | 0,4 – 1,0                                   | 0,6                          | 1,5 – 1,6                                                | 1,5                          | 1,8 – 2,0                                           |
|                            | Argile saturée d'eau                            | 0,8 – 2,3                                   | 1,4                          | 2,0 – 2,8                                                | 2,3                          | 2,0 – 2,2                                           |
|                            | Sable sec                                       | 0,3 – 0,8                                   | 0,5                          | 1,3 – 1,6                                                | 1,4                          | 1,8 – 2,2                                           |
|                            | Sable saturé d'eau                              | 1,5 – 4,0                                   | 2,3                          | 2,2 – 2,8                                                | 2,4                          | 1,9 – 2,3                                           |
|                            | Gravier/pierrailles, sec                        | 0,4 – 0,5                                   | 0,4                          | 1,3 – 1,6                                                | 1,4                          | 1,8 – 2,2                                           |
|                            | Gravier/pierrailles, saturé d'eau               | 1,6 – 2,0                                   | 1,7                          | 2,2 – 2,6                                                | 2,3                          | 1,9 – 2,3                                           |
|                            | Moraine compacte                                | 1,7 – 2,4                                   | 1,8                          | 1,5 – 2,5                                                | 2,0                          | 1,9 – 2,5                                           |
| Roches sédimentaires       | Tourbe                                          | 0,2 – 0,7                                   | 0,4                          | 0,5 – 3,8                                                | 1,6                          | 0,5 – 0,8                                           |
|                            | Roche molassique suisse                         | voir tableau 7                              |                              | 1,8 – 2,6                                                | 2,1                          | 2,4 – 2,7                                           |
|                            | Argilite                                        | 1,1 – 3,5                                   | 1,9                          | 2,1 – 2,4                                                | 2,2                          | 2,4 – 2,6                                           |
|                            | Gris                                            |                                             | 2,3                          | 1,8 – 2,6                                                | 2,1                          | 2,2 – 2,7                                           |
|                            | Conglomérat/brèche                              | 1,3 – 5,1                                   | 2,6                          | 1,8 – 2,6                                                | 2,1                          | 2,2 – 2,7                                           |
|                            | Roche marneuse                                  | 1,5 – 3,5                                   | 2,1                          | 2,2 – 2,3                                                | 2,2                          | 2,3 – 2,6                                           |
|                            | Roche calcaire                                  | 2,5 – 4,0                                   | 2,8                          | 2,1 – 2,4                                                | 2,2                          | 2,4 – 2,7                                           |
| Roches de fond magmatiques | Roche sulfatée (anhydrite, gypse)               | 1,3 – 2,8                                   | 1,6                          |                                                          | 2,0                          |                                                     |
|                            | Granite                                         | 2,1 – 4,1                                   | 2,8                          | 2,1 – 3,0                                                | 2,4                          | 2,4 – 3,0                                           |
|                            | Diorite                                         | 2,0 – 2,9                                   | 2,3                          |                                                          | 2,7                          | 2,9 – 3,0                                           |
| Roches de fond métamorphes | Gabbro                                          | 1,7 – 2,5                                   | 2,0                          |                                                          | 2,6                          | 2,8 – 3,1                                           |
|                            | Schistes argileux                               | 1,5 – 2,6                                   | 1,9                          | 2,2 – 2,5                                                | 2,3                          | 2,4 – 2,7                                           |
|                            | Marbre                                          | 1,3 – 3,1                                   | 1,9                          |                                                          | 2,0                          | 2,5 – 2,8                                           |
|                            | Quartzite                                       | 5,0 – 6,0                                   | 5,3                          |                                                          | 2,1                          | 2,5 – 2,8                                           |
|                            | Micaschistes                                    | 1,5 – 3,1                                   | 2,0                          | 2,2 – 2,4                                                | 2,3                          | 2,4 – 2,7                                           |
|                            | Gneiss                                          | 1,9 – 4,0                                   | 2,6                          | 1,8 – 2,4                                                | 2,0                          | 2,4 – 2,7                                           |
|                            | Amphibolite                                     | 2,1 – 3,6                                   | 2,6                          | 2,0 – 2,3                                                | 2,1                          | 2,6 – 2,9                                           |
| Matériaux divers           | Mélange de ciment/bentonite (remplissage durci) |                                             | 0,8                          |                                                          | 3,0                          | 1,2                                                 |
|                            | Béton                                           | 0,8 – 2,0                                   | 1,4                          |                                                          | 1,8                          | 2,0 – 2,42                                          |
|                            | Glace (-10 °C)                                  |                                             | 2,32                         |                                                          | 1,87                         | 0,91                                                |
|                            | Polyéthylène (PE100)                            |                                             | 0,4                          |                                                          | 1,63                         | 0,96                                                |
|                            | Air (0 °C – 20 °C)                              |                                             | 0,02                         |                                                          | 0,0012                       | 0,00124                                             |
|                            | Acier                                           |                                             | 60,0                         |                                                          | 3,12                         | 7,8                                                 |
|                            | Eau (10 °C)                                     |                                             | 0,6                          |                                                          | 4,15                         | 0,99                                                |

Figure 21 : Tableau des conductivités et capacités calorifique par type de matériau.

### 6.2. RÉSISTANCE DE SONDE

Le diamètre et la profondeur du forage, la nature de la cimentation, la qualité de la pose (adhérence de la cimentation à la sonde), le matériau de la sonde et ses propriétés physiques (design, écartement des tubes dans le cas des sondes en U) jouent chacun un rôle dans la résistance thermique de la sonde. Celle-ci est par contre indépendante de la puissance utilisée pour le test.

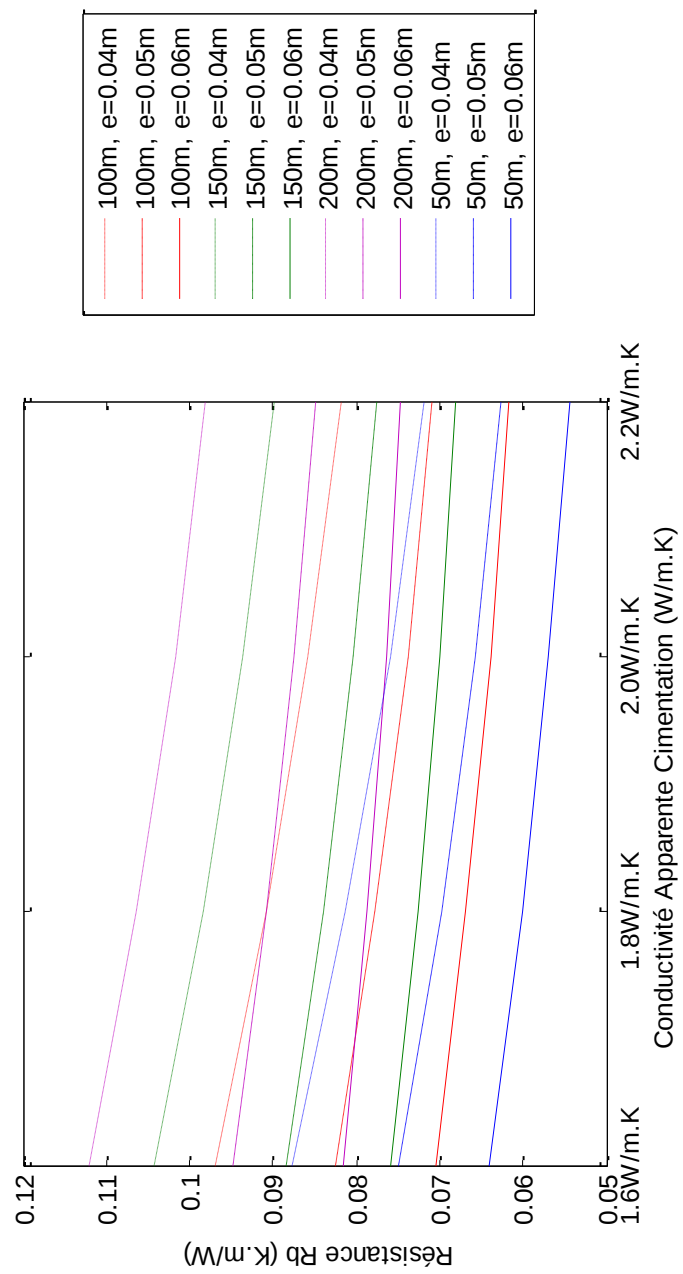


Figure 22 : Abaque des résistances de sonde pour sonde type double U.

Les abaques suivants sont obtenus par simulation numériques, pour une sonde de 50, 100, 150 et 200 m double U placée dans un forage de 150 mm de diamètre (*i.e.* diamètre commun). Les valeurs obtenues sont fournies à titre indicatif, cependant elles sont conformes aux valeurs relevées sur le terrain et constituent donc une base tangible pour juger de la qualité effective d'une sonde.

Les abaques sont obtenues en agissant sur deux paramètres essentiels à la qualité de la sonde, à savoir la conductivité apparente de la cimentation (de 1,6 à 2,2 W/m.K et l'écartement (entraxe) entre les tubes de la sonde (de 4 cm à 6 cm) :

- La conductivité de la cimentation : on montre ainsi que plus la conductivité est élevée, meilleure est la résistance de sonde. Attention ! la conductivité de la cimentation est la conductivité apparente de celle-ci, ainsi :
  - la conductivité apparente tient compte du coulis utilisé,
  - la conductivité apparente tient compte de la qualité de la pose de la cimentation, c'est-à-dire de la réalisation d'une bonne interface entre la sonde et le sous-sol,
  - ainsi, un coulis de forte conductivité mal injecté (*i.e.* présentant des cavités plus ou moins importantes entre la sonde et le sous-sol) présentera une conductivité apparente plus faible que celle annoncée par le matériau utilisé. Inversement, une résistance très faible pour un ciment de qualité moyenne peut indiquer que, bien que la sonde soit de très bonne qualité, la cimentation est incomplète : une partie de la sonde se trouve « à nu » dans un milieu saturé exposé à un déplacement de nappe, par exemple.
- l'écartement des tubes (entraxe) : il joue un rôle important dans la mesure où le rapprochement des tubes de l'échangeur favorise l'échange thermique par flux croisés entre les canalisations de descente et de remontée : ainsi, plus l'écartement est faible, plus le fluide se charge d'une énergie thermique (court-circuit thermique) qui augmente la résistance mesurée et donc pénalise la qualité de la sonde : c'est le cas généralement des sondes posées sans écarteurs. Ce phénomène est d'ailleurs inhérent, à diamètre de forage constant, à l'accroissement de la profondeur de la sonde, c'est la raison pour laquelle la résistance de sonde croît avec la profondeur de celle-ci.

### 6.3. PRÉSENCE D'UN AQUIFÈRE

La présence d'un aquifère immobile dope généralement la conductivité du milieu. Lorsque la nappe est en mouvement, le déplacement de matière évacue les calories injectées par le module de test : les régimes de températures en entrée et sortie de sonde évoluent d'autant moins que le déplacement de matière est important, la conductivité mesurée est donc d'autant plus importante.

La conductivité mesurée selon la source linéaire de chaleur n'est donc qu'apparente. Elle intègre la conductivité (isotrope) propre à la géologie rencontrée, mais également la dispersion des calories anisotrope par déplacement de matière. Ainsi, il n'est pas rare de constater des conductivités apparentes bien supérieures à l'estimation faite (par exemple, 12 W/m.K pour un sol *a priori* donné pour 2 W/m.K).

Dans ce cas, il convient de recouper ce résultat avec la présence d'eau relevée par la coupe forage. Et il convient également d'interpréter le résultat avec les précautions qui s'imposent : quelle est l'origine de l'écoulement ? Est-il constant dans le temps (*i.e.* la conductivité mesurée à l'instant T sera-t-elle valable en toutes saisons) ? Quelles sont les caractéristiques de l'écoulement qui impacteront le comportement du champ de sondes, et comment l'intégrer dans la STD ?

Bien souvent, le recours à une analyse hydrogéologique plus poussée permettrait alors d'apporter des réponses bénéfiques au futur champ de sondes.



**Centre scientifique et technique**  
**Département Géothermie**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34