

GUIDE A LA REDACTION D'UN CAHIER DES CHARGES

Pour tout bénéficiaire d'un concours financier de l'ADEME
dans le cadre du dispositif d'aide à la décision

CAHIER DES CHARGES REALISATION D'UN TEST DE REPONSE THERMIQUE DE TERRAIN (TRT)

*Pour la réalisation d'une opération de PAC sur champ de sondes
géothermiques verticales (CSGV) ou sur géostructures énergétiques
dans les secteurs résidentiel collectif, tertiaire ou industriel*

COLLECTION DES CAHIERS DES CHARGES
D'AIDE A LA DECISION

SOMMAIRE

1 - PREAMBULE	4
2 - OBJECTIFS DU DOCUMENT	5
3 - REALISATION DU TEST DE REPONSE THERMIQUE DU TERRAIN	6
3.1 - OBJECTIFS DU TRT	6
3.2 - PRINCIPE DU TRT.....	6
3.3 - COMPOSANTS DU TRT	8
3.3.1 - SGV de Test.....	8
3.3.2 - Présentation d'un appareil type.....	8
3.3.3 - Précision de l'appareil de TRT	9
3.4 - PROCEDURE DE MISE EN ŒUVRE	10
3.4.1 - Délai entre la pose et la mesure.....	10
3.4.2 - Mesure de la température stabilisée du sous-sol	10
3.4.3 - Choix des paramètres du test.....	11
3.4.4 - Durée du test.....	11
3.4.5 - Interruption involontaire du test.....	11
4 - INTERPRETATION DU TRT.....	12
5 - RESULTATS ET CONTENU DU RAPPORT DE TRT	14
5.1 - DONNEES DU PROJET.....	14
5.2 - DISPOSITIF DE MESURE.....	14
5.3 - SGV TEST	14
5.4 - ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
5.5 - PARAMETRES DE TEST.....	15
5.6 - COURBES OBTENUES.....	15
5.7 - RESULTATS	15
5.8 - INTERPRETATION	15
5.9 - SUITES A DONNER.....	16
6 - COMITE DE PILOTAGE	16
7 - REUNIONS	16
8 - DOCUMENTS	16

9 - PROPRIETE DES RESULTATS.....	16
10 - PRESTATAIRES D'ETUDES	16
11 - DELAI DE REALISATION.....	17
12 - RESTITUTION ET CONFIDENTIALITE.....	17
13 - COUT DE LA MISSION	17
14 - CONTROLE.....	17

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Ordre de grandeur des résultats attendus	18
---	----

1 - PREAMBULE

L'AIDE A LA DECISION DE L'ADEME

L'ADEME souhaite contribuer, avec ses partenaires institutionnels et techniques, à promouvoir la diffusion des bonnes pratiques sur les thématiques énergie et environnement. Pour cela, son dispositif de soutien **aux études d'aide à la décision** (pré-diagnostics, diagnostics, étude de projets) est ouvert aux entreprises, aux collectivités et plus généralement à tous les bénéficiaires intervenant tant dans le champ concurrentiel que non concurrentiel, à l'exclusion des particuliers.

Dans le cadre de son **dispositif d'aide à la décision**, **l'ADEME soutient financièrement les études** avec un **objectif de qualité et d'efficacité** pour le bénéficiaire afin de lui permettre de réaliser sa transition énergétique.

Les Cahiers des Charges de l'ADEME

Les cahiers des charges / guide pour la rédaction d'un cahier des charges de l'ADEME définissent le **contenu des études que l'ADEME peut soutenir**. Chaque étude est conduite par une société de conseils ci-après dénommée « le prestataire conseil » ou « Bureau d'études », pour un client ci-après dénommé « le bénéficiaire » ou le « Maître d'ouvrage ».

Le suivi technique de l'ADEME

L'ADEME assure un conseil technique et un suivi de la prestation.

Pour ce faire, l'aide de l'ADEME implique une transmission des résultats de l'étude.

La confidentialité de ces informations est garantie par l'utilisation des codes d'accès strictement personnels. Les informations ne sont accessibles que par l'ADEME, le prestataire et bénéficiaire du soutien de l'ADEME.

Contrôle – Bilan des études financées par l'ADEME

L'étude, une fois réalisée, pourra faire l'objet - ce n'est pas systématique - d'un contrôle approfondi ou être analysée dans le cadre d'un bilan réalisé par l'ADEME. Eventuellement un contrôle sur site pourra être mené par un expert mandaté par l'ADEME afin de juger de la qualité de l'étude, de l'objectivité du rapport, de ses résultats, etc.. Dans tous les cas, le bénéficiaire et/ou le prestataire conseil pourront alors être interrogés sur l'étude et ses conséquences.

Le présent document précise le contenu et les modalités de réalisation et de restitution de l'étude qui seront effectués par un intervenant extérieur au bénéficiaire de l'aide de l'ADEME.

CAHIER DES CHARGES

ETUDE DE FAISABILITE MISE EN PLACE DE POMPE(S) A CHALEUR SUR EAUX USEES

EXIGENCES DE L'ADEME SUR LE PRESTATAIRE (cf. [chapitre « Prestataires d'études »](#))

Conformément au dispositif d'aide à la décision validé par le Conseil d'Administration de l'ADEME le 23 octobre 2014, les aides pour la prestation correspondant à ce cahier des charges ne pourront être accordées, à compter du 1er janvier 2017, que si le prestataire détient un référencement bénéficiant de la reconnaissance RGE¹ ou s'il peut attester de conditions équivalentes.

2 - OBJECTIFS DU DOCUMENT

Ce cahier des charges est destiné aux porteurs de projets qui envisagent la réalisation d'une opération de PAC sur Champ de Sondes Géothermiques Verticales (CSGV) ou sur géostructures énergétiques dans les secteurs résidentiel collectif, tertiaire, industriel ou agricole.

Le Test de Réponse Thermique (TRT) est une procédure qui permet de caractériser les propriétés thermiques moyennes des terrains traversés et de la Sonde Géothermique Verticale (SGV) testée. Un TRT est nécessaire pour un nombre important de SGV (en général plus de 1000 mètres linéaires cumulés de sondes). Le TRT ne permet pas de dimensionner directement une installation de PAC sur CSGV. L'interprétation du TRT fournit des informations sur les propriétés thermiques moyennes des terrains traversés et de la SGV qui pourront être utilisées dans le processus de dimensionnement de la PAC et du CSGV au moyen d'un logiciel adapté. En fonction des conditions propres au projet le maître d'ouvrage peut demander la réalisation d'un TRT en-dessous du seuil de 1000 mètres linéaires cumulés de SGV.

Le présent document a pour but de rappeler les objectifs d'un test de réponse thermique de terrain, d'en décrire le déroulement ainsi que le contenu type du rapport attendu à l'issue du test. Les étapes du TRT qui demandent un soin particulier sont mentionnées et détaillées. Le document s'appuie en grande partie sur le rapport du BRGM ([BRGM/RP-60816-FR de mars 2012 : Protocole de test de réponse thermique de terrain](#)) et sur la norme [NF EN ISO 17628 de mai 2018 : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais géothermiques - Détermination de la conductivité thermique des sols et des roches dans les sondes géothermiques](#).

La réalisation du test et la rédaction du rapport associé requièrent des compétences en sous-sol (hydrogéologie, géologie et forages) ainsi qu'en thermique.

¹ Reconnu Garant de l'Environnement : charte signée avec l'ADEME, le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et le Ministère de l'Egalité des territoires et du Logement. Elle concerne les signes de qualité (qualifications ou certifications) délivrés aux professionnels réalisant des prestations intellectuelles concourant à la performance énergétique des bâtiments et des installations d'énergie renouvelable.

3 - REALISATION DU TEST DE REPONSE THERMIQUE DU TERRAIN

3.1 - Objectifs du TRT

Le Test de Réponse Thermique (TRT) est un procédé qui permet d'accéder à trois grandeurs clés pour le dimensionnement d'une PAC sur CSGV :

- La température non perturbée (initiale) du terrain (milieu souterrain) T_0 (°C) ;
- La conductivité thermique moyenne du terrain λ_m ($W.K^{-1}.m^{-1}$) ;
- La résistance équivalente de la SGV R_f ($K.m.W^{-1}$).

Pour réaliser un TRT, il faut mettre en place une sonde géothermique verticale « test » (cf. norme [NF X10-970](#)). Il s'agit en fait d'une sonde géothermique verticale dans le sol au droit du site d'implantation du futur champ de sondes. **Cette SGV test doit être la plus représentative possible des futures sondes implantées dans le champ.**

3.2 - Principe du TRT

Le principe du test repose sur l'observation depuis la surface du sol des régimes de température en entrée et en sortie (T_e et T_s) de la SGV test lorsqu'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 SGV (au niveau du sol), et ne nécessite pas d'instrumenter le sous-sol (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 cela, un équipement de chauffage chauffe le fluide en sortie de SGV et le réinjecte en entrée de SGV. Le fluide caloporteur circule donc en boucle fermée (cf. Figure 1 ci-dessous). L'apport de chaleur est précédé d'une estimation de T_0 , la température non perturbée du terrain.

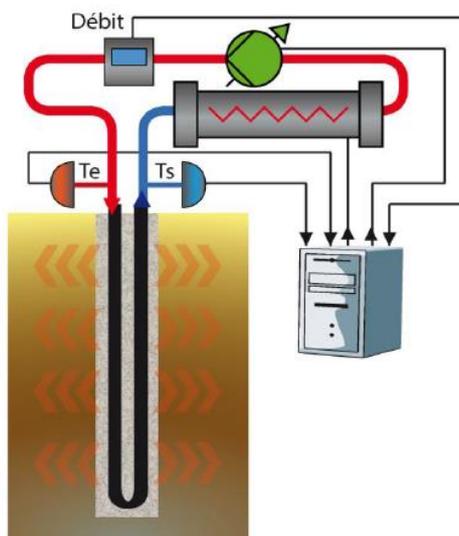


Figure 1 : Schéma d'un dispositif TRT. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

La puissance injectée P (W) est :

Équation 1 :

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

Avec :

- Q_m : le débit massique de fluide caloporteur dans la SGV ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- Q_f : le débit volumique de fluide caloporteur dans la SGV ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- ρ : la densité du fluide ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- C_{pf} : la chaleur spécifique du fluide (ou capacité calorifique massique) ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;
- T_e : la température en entrée (K) ;
- T_s : la température en sortie (K).

Il est important de connaître ces paramètres avec précision. On recommande ainsi d'utiliser de l'eau dont les propriétés physico-chimiques sont bien connues ($C_{pf} = 4\,180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$; $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$). On évitera les mélanges d'eau et d'antigel (eau glycolée par exemple).

Un exemple d'évolution des températures d'entrée et de sortie de SGV pendant un TRT est donné en Figure 2.

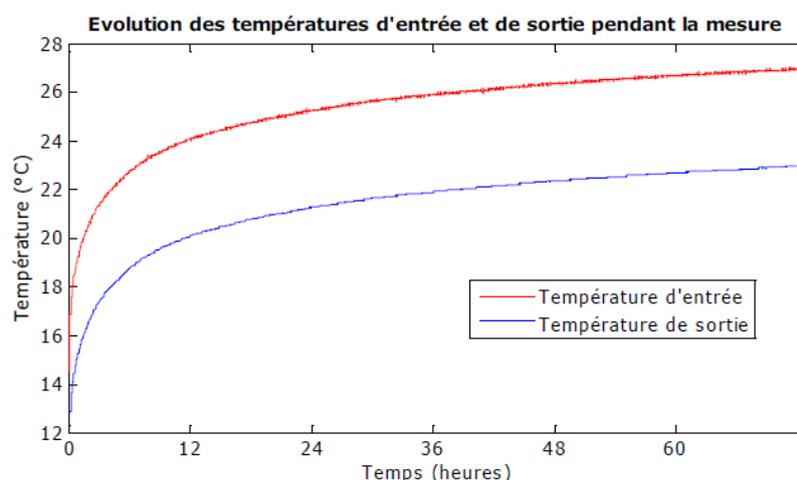


Figure 2 : Exemple d'évolution des températures d'entrée et de sortie de SGV pendant un TRT. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

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

- Un débit aussi stable que possible ;
- Une différence de température ($T_e - T_s$) aussi stable que possible.

Un exemple de TRT où la stabilité de ces paramètres est assurée est représenté en Figure 3.

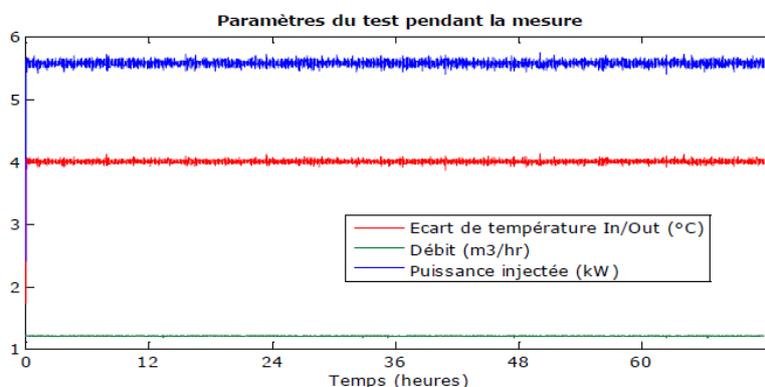


Figure 3 : Exemple d'évolution de différence de température ($T_e - T_s$), de débit et de puissance échangée pendant un TRT. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

On note T_f la température moyenne du fluide entre l'entrée et la sortie de la SGV définie par : $T_f = (T_e + T_s)/2$. En l'absence d'écoulements souterrains, la température moyenne du fluide varie linéairement avec le logarithme du temps (cf. Figure 4).

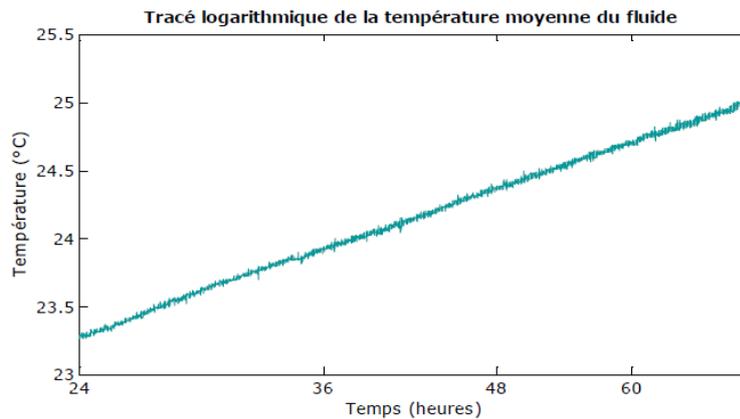


Figure 4 : Exemple d'évolution de la température moyenne d'entrée et de sortie de SGV pendant un TRT en fonction du logarithme du temps. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

3.3 - Composants du TRT

3.3.1 - SGV de Test

La SGV doit être représentative des SGV prévues dans le chantier futur. Lorsque la théorie de la source linéaire de chaleur est appliquée, la SGV 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 (cf. la section « Interprétation du TRT »). 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, avec recommandation de 125 mm à 165 mm par la norme [NF X10-970](#)) sont acceptables.

L'interprétation d'un TRT sur des corbeilles géothermiques ou des capteurs horizontaux s'appuie sur d'autres équations, et n'est pas considérée par le présent document.

3.3.2 - Présentation d'un appareil type

Un appareil de TRT 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 exemple : le réglage d'une intensité électrique parcourant une résistance de chauffage) est en effet plus facile 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 de calibrer, la puissance injectée dans le sol ;
- Une pompe de circulation permettant de réguler, ou à défaut de calibrer, le débit de circulation dans la SGV ;
- Des capteurs de température platine, minimum Pt100 classe B ou équivalent, permettant de relever :
 - La température en sortie de l'appareil (entrée de SGV) ;
 - La température en entrée de l'appareil (sortie de SGV) ;
- 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) ;

- 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.**

De plus, l'appareil doit 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 (ce qui conduirait à surestimer la puissance effectivement apportée au terrain).

3.3.3 - Précision de l'appareil de TRT

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.

Régulation :

La régulation consiste à maintenir la puissance injectée par la SGV test aussi stable que possible. Etant donné que la puissance injectée est fonction du débit de circulation et des températures entrée et sortie de la SGV 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.

Erreur due à l'absence de régulation :

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). Ainsi, la puissance d'un appareil de test non régulé et raccordé au réseau peut varier de 20% pendant le test, ce qui ne permet pas d'observer finement le comportement thermique de la SGV (dû à un bruit de fond important).

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.

Une distance pouvant atteindre la dizaine de mètres sépare généralement l'appareil de la SGV 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 température 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 SGV donc à distance de l'appareil :
 - o Soit l'appareil n'est pas régulé, dans ce cas, la mesure des régimes de température ne doit pas être perturbée par les déperditions au niveau des canalisations : celles-ci doivent être impérativement calorifugées.

- Soit l'appareil est réglé et la régulation s'effectue sur les températures mesurées sur la SGV de test. Dans ce cas, les déperditions sont prises en compte par la régulation, le calorifugeage des canalisations est alors inutile.

3.4 - Procédure de mise en œuvre

3.4.1 - Délai entre la pose et la mesure

La SGV de test étant posée et la cimentation effectuée, il est nécessaire de s'assurer que celle-ci soit prise pour :

- Atteindre un niveau de performance (conductivité) stable ;
- Eviter que la prise de la cimentation, plus ou moins exothermique (i.e. génératrice de chaleur) ne vienne 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.**

3.4.2 - Mesure de la température stabilisée du sous-sol

La mesure de la température stabilisée du sous-sol T_0 nécessite que la SGV 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 non perturbée du sous-sol, selon deux méthodes : le [relevé du log thermique](#) ou le [relevé par circulation](#).

3.4.2.1 - Cas du relevé du log thermique

Le relevé du log thermique se fait en introduisant dans la SGV 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. A 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 SGV pendant la descente du capteur et obtenir les mesures les plus précises :

- Avantage : on dispose du gradient de température sur la hauteur de la SGV avec une mesure précise ;
- Inconvénient : opération fastidieuse dont la précision dépend de la qualité de l'opérateur.

L'enregistrement doit faire apparaître l'augmentation de la température en fonction de la profondeur.

Lorsque la mesure est effectuée par relevé du gradient thermique le long de la SGV, il est impératif de minimiser le déplacement du fluide dans la SGV 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 SGV en surface, autres que celle utilisée pour l'introduction du capteur de température.

3.4.2.2 - Cas du relevé 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 SGV. La température de stabilité est obtenue par simple circulation dans les SGV, 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 SGV, 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 à la température moyenne du sous-sol.

La durée moyenne de la circulation est d'environ 30 minutes pour une SGV de 100 m de profondeur, cette durée variant avec la profondeur de la SGV (plus la SGV 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 ; la circulation sans apport de chaleur est préalable à celle avec apport de chaleur ;
- Inconvénient : mesure d'une température moyenne dont la précision est discutable (influence de la température du liquide caloporteur de l'appareil de test au moment du TRT, influence thermique de la pompe de 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, la mesure doit être relevée sans tarder. Dans la pratique, la **durée de circulation nécessaire ne devrait pas dépasser 30 minutes**.

Influence de la mise en eau de l'appareil de test :

Il est nécessaire de limiter autant que possible le volume d'eau additionnel 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.

3.4.3 - Choix des paramètres du test

Pour la mesure de la conductivité et le calcul de la résistance thermique de la SGV, la puissance injectée dans le sol est choisie dans une fourchette comprise entre 40 et 80 W.m⁻¹ de SGV test. Idéalement, la puissance injectée pendant le test est d'environ **50 W.m⁻¹**.

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

Il est recommandé que le débit de fluide caloporteur dans la SGV soit déterminé pour garantir un régime d'écoulement turbulent dans les tubes ($R_e > 2500$). En effet, si l'écoulement était laminaire, la résistance de convection dans le tube ne serait pas négligeable devant la résistance propre à la SGV. L'interprétation du TRT serait compliquée du fait de la difficulté à différencier la résistance de convection de la résistance propre à la SGV.

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

- 0,5 à 1 m³/h pour une SGV double U DN25 (i.e. la moitié pour une SGV simple U) ;
- 0,7 à 1,4 m³/h pour une SGV double U DN32 (i.e. la moitié pour une SGV simple U) ;
- 0,9 à 1,6 m³/h pour une SGV double U DN40 (i.e. la moitié pour une SGV 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 SGV).

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 SGV de test.

3.4.4 - Durée du test

La durée du test est donc au minimum de 48 voire 72 heures. 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).

3.4.5 - 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.

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**.

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

4 - INTERPRETATION DU TRT

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

- Le débit effectif dans la SGV Q ($m^3 \cdot s^{-1}$ ou $kg \cdot s^{-1}$) ou, au minimum, l'énergie injectée P (W)
- Les températures T_e et T_s ($^{\circ}C$)
- La puissance injectée P (W)

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 afin que le modèle choisi reproduise l'évolution observée de la température moyenne du fluide.

Il existe principalement deux méthodes permettant de déterminer la conductivité thermique moyenne du terrain en fonction de l'évolution temporelle de la température moyenne du fluide caloporteur :

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

Dans ce qui suit, on présente uniquement l'interprétation du TRT par le modèle LSI, car c'est la méthode qui correspond à l'état de l'art actuel. Le modèle LSI repose sur les hypothèses suivantes :

- Le milieu est homogène, isotrope, sans écoulements souterrains.

La SGV est assimilée à une ligne infinie qui émet de la chaleur sur toute sa hauteur (puissance échangée est constante sur toute la hauteur du forage)

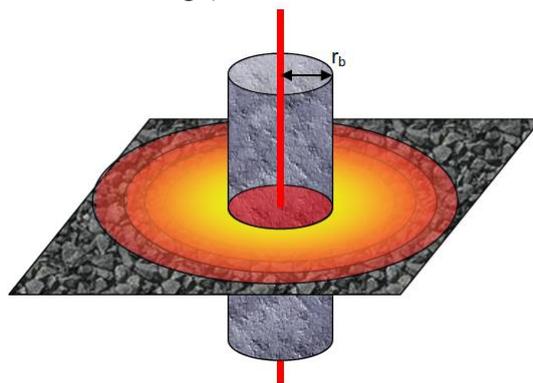


Figure 5 : Modèle de la ligne source infinie. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

La température T_f moyenne du fluide caloporteur estimée par le modèle LSI est donnée par :

Équation 2 :

$$T_f(t) = T_0 + \frac{p}{4\pi\lambda_m} \ln(t) + p \left(R_f + \frac{1}{4\pi\lambda_m} \left(\ln \left(\frac{4a_m}{r_f^2} \right) - 0,5772 \right) \right)$$

Avec :

- $T_f(t) = \frac{T_e(t)+T_s(t)}{2}$: la température moyenne entrée/sortie de SGV ;
- T_0 : la température initiale du terrain (°C) ;
- p : la puissance linéique par mètre de SGV ($W.m^{-1}$) où $p = P / H$ avec P la puissance apportée par le réchauffeur (W) et H la profondeur de la SGV (m) ;
- R_f : la résistance de la SGV ($K.m.W^{-1}$) ;
- λ_m : la conductivité thermique du terrain ($W.K^{-1}.m^{-1}$) ;
- a_m : la diffusivité thermique du terrain ($m^2.s^{-1}$) où $a_m = \lambda_m / (\rho C_p)_m$ avec $(\rho C_p)_m$ la capacité calorifique massique moyenne du terrain ($J.K^{-1}.m^{-3}$) ;
- r_f : le rayon du forage (m) ;
- \ln : le logarithme népérien.

L'interprétation du TRT consiste à ajuster les valeurs de conductivité thermique du terrain λ_m et de résistance de la SGV R_f afin que le modèle reproduise les températures moyennes de fluide mesurées. Le modèle de la ligne source infinie peut être utilisé si, après un régime transitoire, la température moyenne du fluide caloporteur en fonction du logarithme du temps résulte en une droite telle que représentée en Figure 6.

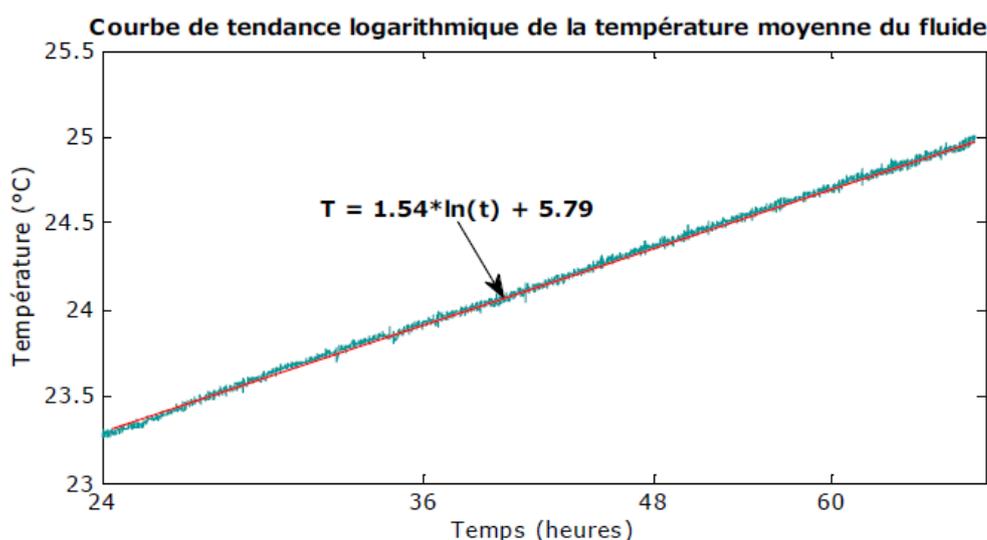


Figure 6 : Exemple de courbe tendance logarithmique de la température moyenne de fluide. Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR

L'intervalle pour l'interprétation du TRT est compris entre une durée minimale t_{min} et la durée du TRT. La durée minimale peut être donnée par le critère suivant :

Équation 3 :

$$t_{min} = 5 \frac{r_f^2}{a_m}$$

Pour utiliser l'Équation 3, il est nécessaire de faire une hypothèse sur la diffusivité thermique a_m et donc la conductivité thermique λ_m , par exemple au moyen de l'Annexe 1. Si l'évaluation de la conductivité thermique λ_m au moyen de l'Équation 5 s'éloigne significativement de la valeur prise en hypothèse, il est nécessaire de recalculer t_{min} et de recommencer l'interprétation. t_{min} est classiquement choisi entre 12 et 24 heures.

On peut écrire l'évolution de la température moyenne du fluide (Équation 2) sous la forme :

Équation 4 :

$$T_f(t) = A \ln(t) + B$$

Dans l'Équation 4, les coefficients A et B sont estimés à partir d'une courbe où le temps t est exprimé en secondes. En identifiant A comme le coefficient directeur de la droite représentant l'évolution de la température moyenne T_f en fonction du log du temps, et B comme l'ordonnée à l'origine ; on peut exprimer λ_m et R_f en fonction des paramètres du test, de A et de B :

Équation 5 :

$$\lambda_m = \frac{p}{4\pi A}$$

Équation 6 :

$$R_f = \frac{B - T_0}{p} + \frac{1}{4\pi\lambda_m} \left(0,5772 - \ln \left(\frac{4a_m}{r_f^2} \right) \right)$$

On estime d'abord λ_m à l'aide de l'aide de l'Équation 5 puis R_f à l'aide de l'Équation 6. Pour utiliser l'Équation 6, on a besoin de déterminer la diffusivité thermique du terrain $a_m = \lambda_m / (\rho C_p)_m$. La capacité calorifique massique moyenne du terrain $(\rho C_p)_m$ est estimée à partir de tables, telle que celle donnée en Annexe 1.

5 - RESULTATS ET CONTENU DU RAPPORT DE TRT

Le rapport doit permettre à un tiers de pouvoir interpréter la qualité du travail effectué. Il doit contenir toutes les informations nécessaires pour :

- Vérifier l'ensemble des calculs ;
- Lever les incertitudes sur les résultats, ou tout au moins apporter des éléments de réponse en cas d'anomalies relevées, sur les régimes de température notamment.

5.1 - Données du projet

- Localisation exacte du projet (coordonnées GPS ou Lambert93) ;
- Identité des intervenants (forage, mesure, contrôle).

5.2 - Dispositif de mesure

Le rapport de test doit présenter :

- Le dispositif de mesure utilisé, précisant notamment :
 - o La présence ou l'absence de régulation ;
 - o La position des capteurs de températures sur l'appareil ;
 - o La présence de calorifugeage sur les liaisons ;
- L'emplacement de l'appareil vis-à-vis de la SGV testée lors de la mesure.

5.3 - SGV test

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

- Profondeur du forage, diamètre de forage, méthode de forage utilisée ;
- Type de SGV (marque, modèle), profondeur effective de la SGV de test ;

- Type de cimentation utilisée (marque, conductivité) ;
- Coupe géologique obtenue, avec indication des arrivées d'eau constatées et éventuellement les débits estimés.

5.4 - 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 384-6).

Le rapport doit 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).

5.5 - Paramètres de test

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

- la durée entre la fin de la pose de l'ouvrage test et le début du TRT ;
- 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 (m³/h)
- la différence de température appliquée entre l'entrée et la sortie de la SGV 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.

5.6 - Courbes obtenues

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

- la température en entrée et sortie de SGV en fonction du temps ;
- la température moyenne du fluide en fonction du logarithme népérien du temps (ln(t)) sur la durée servant au calcul de la conductivité ;
- la régression linéaire obtenue sur la température moyenne en fonction du logarithme népérien du temps sur la durée servant au calcul de la conductivité, avec indication du coefficient de détermination R².

5.7 - Résultats

Le rapport doit présenter :

- La température stabilisée du sol relevée, précisant le type de mesure (gradient thermique ou circulation) ;
- La capacité calorifique estimée 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 SGV obtenue.

Le rapport doit présenter en outre la valeur obtenue pour : $\frac{t_{min} a_m}{r_f^2}$ (cf. Équation 3)

5.8 - Interprétation

Lorsque cela est nécessaire, le rapport doit tenter d'apporter des éléments de réponse permettant d'expliquer :

- Une conductivité anormalement élevée ou anormalement faible pour la géologie rencontrée ;
- Une résistance de SGV anormalement élevée ou anormalement faible pour le type de SGV utilisé.

5.9 - Suites à donner

Le rapport doit indiquer la façon dont ces données théoriques peuvent être utilisées pour optimiser le dimensionnement de la longueur de sondes à poser. Ceci passe généralement par :

- Une simulation dynamique simplifiée des besoins thermiques en surface ;
- Une méthodologie justifiée permettant de transcrire ces besoins thermiques dynamiques en besoins géothermiques dynamiques ;
- Une simulation de l'évolution des températures dans le sous-sol, sur une durée type de 15 ans ; cette durée peut être plus élevée lorsque la simulation ne repose pas sur un modèle de type « source infinie », généralement inadéquat pour décrire une évolution à plus long terme ;
- Une conclusion sur la longueur totale de sondes à poser et sur l'espacement à respecter, accompagnée des ratios géothermiques en W/m et en (kWh/an)/m.

6 - COMITE DE PILOTAGE

Les travaux relatifs à la réalisation du TRT, ses résultats et leur interprétation seront suivis par un comité de pilotage chargé d'orienter et de valider les démarches du bureau d'études. Il sera constitué :

- Du maître d'ouvrage ;
- D'un représentant de la direction régionale de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) ;
- D'un représentant du porteur de projet dans le cadre de l'étude de faisabilité exclusivement (seconde partie) ;
- Et de toute autre personne ou entité jugée utile par le maître d'ouvrage.

7 - REUNIONS

Dès signature du contrat, le prestataire retenu présentera au comité de pilotage lors d'une première réunion, son organisme, ses co-traitants et sous-traitants éventuels, les moyens affectés au test, la méthodologie envisagée et le temps consacré à l'étude.

Il est à prévoir ensuite une réunion de restitution avec le comité de pilotage.

8 - DOCUMENTS

Le bureau d'études devra se conformer aux délais annoncés au comité de pilotage lors de l'établissement de son devis.

9 - PROPRIETE DES RESULTATS

L'ensemble des résultats du rapport de TRT est la propriété du maître d'ouvrage.

10 - PRESTATAIRES D'ETUDES

Le bureau d'études désignera une personne référente qui assurera les relations avec le maître d'ouvrage.

En cas de sous-traitance, le bureau d'études aura à préciser les coordonnées, la fonction, les références de l'entreprise avec laquelle il souhaite travailler. L'aval du maître d'ouvrage est indispensable avant toute participation d'un sous-traitant.

Le bureau d'études précisera :

- Le nombre et la qualité des personnes mobilisées par l'étude, le temps prévisionnel passé par celles-ci pour l'étude en question ;
- Les délais garantis de réalisation, ses prix de prestations ;
- Ses références dans des études similaires ;
- Ses qualification / certifications relatives à la prestation.

11 - DELAI DE REALISATION

Le bureau d'études devra se conformer aux délais annoncés au comité de pilotage lors de l'établissement de son devis.

Tout écart devra être préalablement autorisé par le maître d'ouvrage.

12 - RESTITUTION ET CONFIDENTIALITE

A l'issue de la mission, le prestataire transmet le résultat de l'étude comprenant le rapport final d'étude (cf. « [Préambule – Le suivi technique de l'ADEME](#) »).

La confidentialité de ces informations est garantie par l'utilisation des codes d'accès délivrés par l'ADEME qui vous sont strictement personnels.

Sauf désaccord écrit du maître d'ouvrage, les résultats issus du TRT pourront servir à enrichir les connaissances du sous-sol et être mis en ligne (de manière anonyme) sur l'espace cartographique du site géothermies (www.geothermies.fr).

13 - COUT DE LA MISSION

Le prestataire établira un devis détaillé correspondant au coût de la prestation dans son ensemble, faisant apparaître le nombre de journées de travail, les coûts journaliers du ou des intervenants ainsi que les frais annexes.

Le montant ainsi proposé inclura au minimum l'ensemble de la prestation telle que définie dans le présent cahier des charges.

14 - CONTROLE

La mission, une fois réalisée pourra faire l'objet - ce n'est pas systématique - d'un contrôle approfondi. Dans le souci de tester un échantillonnage représentatif, les dossiers seront choisis de manière aléatoire. Eventuellement un contrôle sur site pourra être mené par un expert mandaté par l'ADEME afin de juger de la qualité de l'étude, de l'objectivité du rapport.

Annexe 1 : Ordre de grandeur des résultats attendus

	Type de roche	Conductivité thermique λ W/(m·K)		Capacité thermique spéc. ρ_c MJ/(m ³ ·K)		Densité ρ 10 ³ kg/m ³
		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	0,9 – 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/pierres, sec	0,4 – 0,5	0,4	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Gravier/pierres, 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
	Grès		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
	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 (remplissage 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

Molasse	Type de roche	Conductivité thermique λ W/(m.K)	
		Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée
Molasse d'eau douce supérieure	Argilite – pélite	2,3 – 2,4	2,3
	Pélite	2,3 – 2,4	2,3
	Grès fin	2,3 – 2,6	2,3
	Grès moyen	2,5 – 2,8	2,6
	Grès grossier et conglomérat	2,5 – 2,8	2,6
Molasse marine supérieure	Argilite – pélite	2,6 – 2,9	2,7
	Pélite	2,6 – 2,9	2,7
	Grès fin	2,7 – 3,3	2,9
	Grès moyen	2,7 – 3,2	2,8
	Grès grossier et conglomérat	2,6 – 3,0	2,7
Molasse d'eau douce inférieure	Argilite – pélite	2,2 – 2,7	2,3
	Pélite	2,3 – 2,8	2,4
	Grès fin	2,4 – 2,8	2,5
	Grès moyen	2,7 – 3,2	2,9
	Grès grossier et conglomérat	2,2 – 3,1	2,4

Tableau 1 : Conductivités et capacités calorifiques par type de matériau (d'après SIA-384/6)

Présence d'un aquifère :

La présence d'un aquifère immobile dope généralement la conductivité du milieu. Lorsque l'aquifère est en mouvement, le déplacement de matière évacue les calories injectées par le module de test : les régimes de température en entrée et sortie de SGV évoluent d'autant moins que le déplacement de matière est important, la conductivité estimée lors de l'interprétation 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 SGV et comment l'intégrer dans la simulation thermique dynamique ?

Bien souvent, le recours à une analyse hydrogéologique plus poussée permettra d'apporter des réponses permettant d'optimiser la conception du futur champ de SGV.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Cahier des charges ADEME
ETUDE DE FAISABILITE
MISE EN PLACE DE POMPE(S)
A CHALEUR SUR EAUX USEES

Bâtiment
à u d i t e s
d'énergie s
BTP - EnR

Entreprise
éco-conception
Diagnostic
énergie

Assistance
conseil
management
environnemental

Effet de serre
orientation
agriculture
déchetterie

Pollution
air - odeur
Plan de
déplacement
B r u i t

