

Projet de recherche Solargéotherm - Montauriol (66) F

Test de réponse thermique du terrain

Réalisation d'un essai dans une sonde géothermique posée sur le site
du projet, Les Hostalets (Montauriol) (F)

Commettant: DOMINGUEZ ENERGIE, Argelès-sur-Mer (66) F

Étude n° SGT 09.05-3

Mai 2009



Vue l'emplacement du projet aux Hostalets (Montauriol)

Gilbert Steinmann
Les Jausses B2
CH-1973 Nax

Table des matières

1 INTRODUCTION	1
2 DOCUMENTS REÇUS	2
3 FORAGE ET SONDE GÉOTHERMIQUE	2
3.1 Réalisation et situation du forage	2
3.2 Relevé du forage	3
3.3 Mise en place de la sonde géothermique	4
3.4 Récapitulatif des caractéristiques de la sonde pilote géothermique	5
4 TEST DE RÉPONSE	6
4.1 Appareillage	6
4.2 Calendrier du test de réponse	7
4.3 Modalités du test de réponse	8
4.4 Remarques (perturbations, ...)	9
4.5 Dépouillement des résultats	9
5 RÉSULTATS DU TEST DE RÉPONSE	10
5.1 Evolution des paramètres pendant le test de réponse	11
5.2 Détermination de la température initiale du terrain	12
5.3 Détermination de la conductivité thermique λ	12
5.4 Détermination de la résistance thermique effective de la sonde R_b	13
5.5 Résultats et incertitudes	14
6 COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS	15

Liste des annexes

ANNEXE 1: Protocoles d'essai



1 INTRODUCTION

Un projet de recherche appelé Solargéotherm a été initié par la société DOMINGUEZ ENERGIE, le BRGM, le Laboratoire ELIAUS, le Laboratoire PROMES et l'Agence Nationale de la Recherche ; il consiste à étudier les possibilités de stockage d'énergie dans les sols d'une carrière aux Hostalets, commune de Montauriol (66) F (image en première page de couverture).

Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement durable, dans le but de mettre en évidence les possibilités de stockage et de réutilisation d'énergie pour le chauffage et la climatisation de construction dans la région des Pyrénées-Orientales.

Dans le cadre de ce projet, 3 sondes géothermiques verticales (SGV) pilote ont été mises en place sur le site (Figure 1). La réalisation des forages et la pose des sondes ont été confiées à une entreprise de forages régionale.

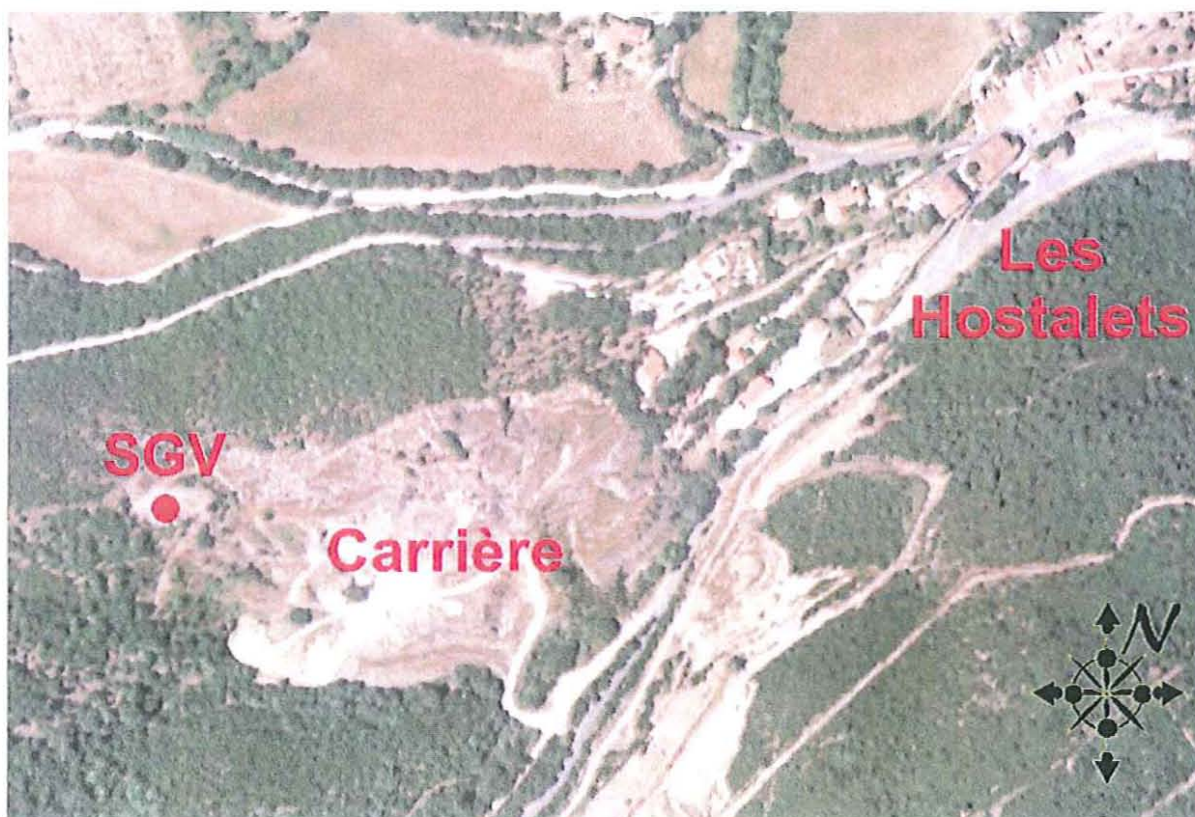


Figure 1. Situation de la sonde géothermique de test (SGV) à Bélesta (66)).

La société DOMINGUEZ ENERGIE a mandaté Swiss Geo Testing Sàrl (SGT) pour la réalisation d'un test de réponse thermique du terrain dans une des sondes mises en place sur le site.

Ce rapport rend compte des résultats de ce test en vue du dimensionnement des possibilités d'emmagasinement d'énergie dans le sous-sol.



2 DOCUMENTS REÇUS

Les différents partenaires de ce projet nous ont fait parvenir les documents suivants:

- Commande, courriel, du 28 mai 2009 pour la réalisation d'un test de réponse thermique du terrain par SGT.

3 FORAGE ET SONDE GEOTHERMIQUE

3.1 Réalisation et situation du forage

Le forage destiné à recevoir la sonde géothermique de test a été effectué les 23 et 24 février 2009 par l'entreprise de forages, sur le site du projet.

Ce forage a été réalisé à sec de 0 m à 202 m, MFT (marteau fond de trou), Ø 150 mm, sans tubage.

Lors du forage la présence d'eau a été signalée à 20 m de profondeur et un rocher gorgé d'eau.

La Figure 1 donne la position géographique du forage et de la sonde géothermique verticale (SGV) utilisée pour le test de réponse thermique du terrain.

Les coordonnées géographiques de cette sonde sont les suivantes:

Longitude: 2° 42' 20.76''E
Latitude: 42° 34' 28.67''N
Altitude: 273 m



3.2 Relevé du forage

La coupe géologique de ce forage (Annexe 2), basée sur l'examen des cuttings, a été effectuée par la Société DOMINGUEZ ENERGIE à Argelès-sur-Mer (66) F.

Une coupe très schématique du terrain au droit du forage est représentée à la Figure 2, ci-après.

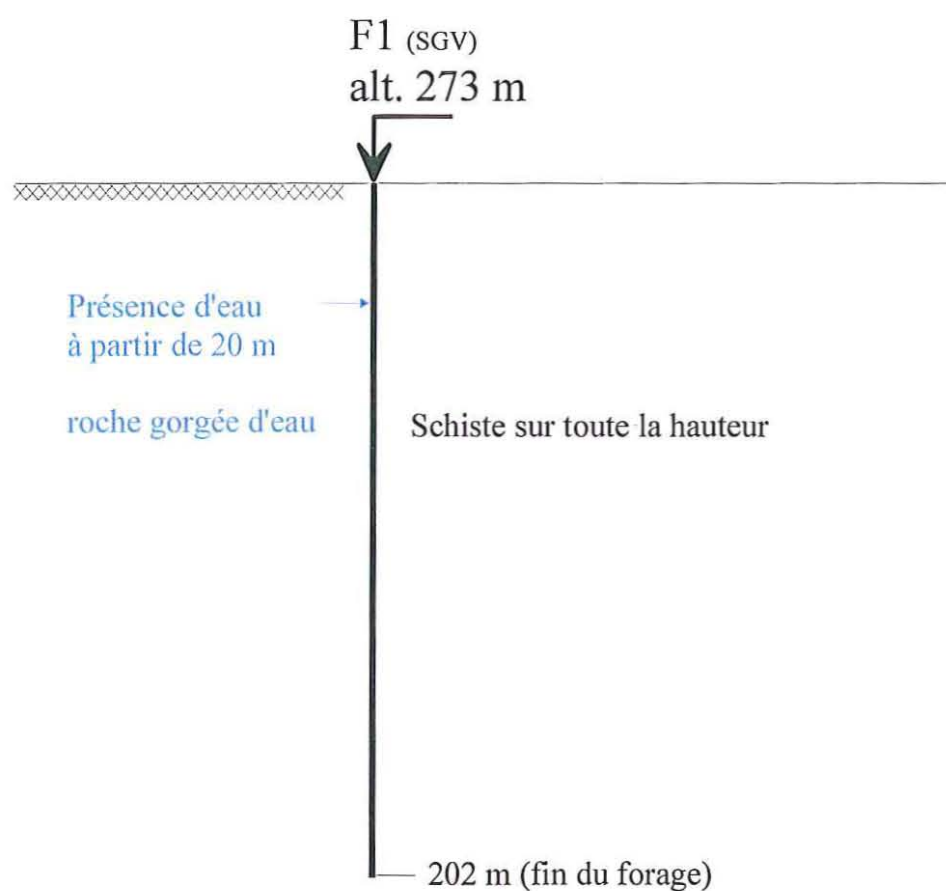


Figure 2. Coupe géologique (et géotechnique) schématique et simplifiée.

3.3 Mise en place de la sonde géothermique

Une fois le forage terminé, la sonde géothermique de type double U (\varnothing ext. 40 mm x 3.7 mm d'épaisseur) a été poussée dans le sondage jusqu'à la profondeur de 164 m avec distanceurs (figure 3). Il faut encore noter qu'une partie du forage, entre 202 m et 165 m, s'est éboulée avant la mise en place de la sonde, qui de ce fait ne mesure plus que 164 m.

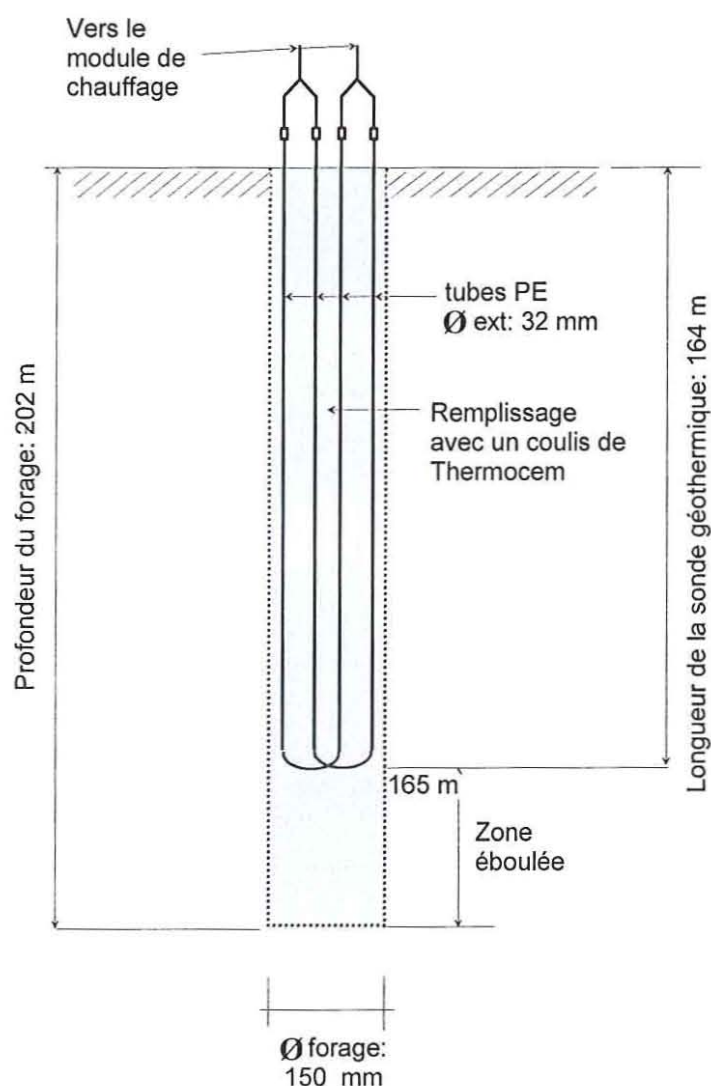


Figure 3. Schéma de la sonde géothermique verticale à Montauriol.

L'injection de remplissage des vides autour des tubes de la sonde a été effectuée au moyen d'un tube supplémentaire depuis le bas du forage le 5 avril 2009, soit plus d'un mois après la pose de la sonde. Un coulis de Thermocem[®] a été utilisé pour cette opération.



3.4 Récapitulatif des caractéristiques de la sonde pilote géothermique

La sonde pilote géothermique, mise en place par l'entreprise de forages (forage et pose), a les caractéristiques suivantes (Tableau 1):

Tableau 1. Caractéristiques de la sonde géothermique.

Caractéristiques	Sonde géothermique test (SGV1)
Emplacement: (Figure 1)	Les Hostalets, commune de Montauriol (66) F <ul style="list-style-type: none">Coordonnées: Longitude: 2° 42' 20.76'' E Latitude: 42° 34' 28.67'' NAltitude : Z: 273 mDate du forage: 23 – février 2009
Profondeur:	Forage: 202 m La sonde géothermique a une longueur de 164 m.
Forage:	Les diamètres suivants ont été utilisés : <ul style="list-style-type: none">de 0 à 202 m: Ø 150 mm, MFT, sans tubage Présence d'eau à partir de 20 m de profondeur avec une roche gorgée d'eau.
Type de sonde:	Double U en polyéthylène noir (PE) <ul style="list-style-type: none">diamètres: ext.: 40 mm, int.: 32.6 mmépaisseur des parois: 3.7 mm La sonde a été posée avec des distanceurs.
Remplissage:	Le remplissage de l'espace entre les tubes de la sonde géothermique et les parois du forage a été effectué par un coulis de Thermocem.
Protection:	Néant

4 TEST DE REPONSE

4.1 Appareillage

Ce test de réponse thermique du terrain a été effectué par notre personnel, au moyen du Mini-module de chauffage accrédité selon ISO/CEI 17'025, que possède le LMS. Il est constitué entre autres d'une chaudière électrique de puissance modulable jusqu'à 9 kW, d'une pompe de circulation dont le débit peut atteindre 2.5 m³/h, d'un vase d'expansion d'une contenance de 8 l et de dégazeurs-mélangeurs (figure 4). Des vannes permettent d'isoler certains secteurs afin d'effectuer la purge du système ou de faire circuler de l'eau de refroidissement.



Figure 4. Vue du module de chauffage de l'EPFL, utilisé pour le test de réponse.

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

- la température "aller" et "retour" du fluide caloporteur,
- la température de l'air à l'extérieur et à l'intérieur du module,
- le débit du fluide caloporteur,
- la consommation électrique,
- la pression "aller" et "retour" du fluide caloporteur.

Pour ce test de réponse thermique du terrain, le système de télétransmission en temps "pseudo-réel" des données par GPRS, implémenté sur le module de chauffage, a été utilisé. Avec cette configuration, les valeurs enregistrées dans le Data-Logger sont transmises directement sur un serveur relié à Internet et tout dysfonctionnement ou toute panne de courant peuvent être détectés très rapidement.



4.2 Calendrier du test de réponse

Le test de réponse thermique du terrain a duré huit jours, y compris installation et démontage de l'équipement, selon le calendrier suivant:

Mercredi 13.05.09	Arrivée sur place avec le Mini-module de chauffage. Mise en place du module à proximité immédiate de la sonde de test. Connexion électrique, branchement des capteurs et raccordement de la tuyauterie à la sonde géothermique (figures 5 et 6). Remplissage et purge du module de chauffage avec de l'eau. Isolation soignée des tubes externes par des tubes et des bandes de mousse isolante (figure 6) et protection du mini-module avec une bâche (figure 7). Mise en route du test à 17h avec la circulation du fluide dans la sonde et l'acquisition des données (sans chauffage).
Jeudi 14.05.09	A 08h contrôle à distance du fonctionnement et enclenchement du chauffage (puissance de 9 kW), avec circulation du fluide dans la sonde géothermique et poursuite de l'acquisition des mesures.
Mardi 25.05.09 12 ^{ème} jour	Arrêt du test, contrôle et sauvetage des dernières données sur un PC. Débranchement des capteurs et de l'alimentation électrique. Vidange du module, débranchement des raccords sur la sonde géothermique de test. Rapatriement du module de chauffage en Suisse.



Figure 5. Préparation de la sonde géothermique verticale et du Mini-module de chauffage.



Figure 6. Raccordement et isolation soignée des tubes de la SGV au Mini-module de chauffage.



4.3 Modalités du test de réponse



Figure 7. Vue du mini-module de chauffage pendant le test de réponse avec sa bâche de protection contre les intempéries.

La configuration du terrain a permis le transport du module de chauffage avec un véhicule directement sur l'emplacement du test (Figures 7 et 8).

Les tubes de cette sonde ont été connectés entre eux au moyen de deux raccords en Y, puis reliés au module de chauffage par 2 tuyaux souples de 1", soigneusement isolés thermiquement par des tubes en mousse isolante (Figures 5 et 6).

Une rallonge électrique à 5 conducteurs (400V triphasé) a été mise à notre disposition, pour le raccordement du module de chauffage au réseau électrique.

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

La date de la réalisation de ce test ainsi que sa durée ont été choisies d'un commun accord entre l'entreprise DOMINGUEZ ENERGIE et le personnel de SGT en fonction des agendas et des obligations des différents partenaires.



Figure 8. Site du projet Solargéotherm et préparation du TRT

4.4 Remarques (perturbations, ...)

Aucun dérangement n'est venu perturber ce test. Seules quelques mini coupures de courant de moins d'une minute sont observables sur les graphiques, mais non perceptible sur les résultats (figure 10).

4.5 Dépouillement des résultats

Les protocoles de l'Annexe 1 donnent les résultats bruts de ce test de réponse thermique du terrain sous la forme de graphiques pour les différentes phases du test, à savoir les périodes:

- sans chauffage pour la détermination de la température initiale du sol,
- avec chauffage pour la détermination des caractéristiques thermiques du terrain et de la sonde.

Le dépouillement et l'interprétation des mesures ont été effectués par Swiss Geo Testing Sàrl.



5 RESULTATS DU TEST DE REPONSE

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

Cette interprétation comprend notamment une analyse de l'évolution de la température du fluide par la méthode dite de la source linéaire de chaleur.

Au final, les résultats suivants peuvent être calculés :

- la température moyenne du terrain le long de la sonde avant le chauffage (T_i),
- la résistance thermique de la sonde (R_b),
- la conductivité thermique du terrain le long de la sonde (λ).

Les calculs ont été établis en prenant en compte les caractéristiques moyennes suivantes (Tableau 3) de l'essai:

Tableau 3. Caractéristiques prises en compte pour l'analyse des résultats.

Profondeur du forage	202 m
Diamètre moyen du forage	0.150 m
Longueur de la sonde	164 m
Type de sonde	double U
Tube	Polyéthylène (PE) noir
Diamètre externe tube	40 mm
Épaisseur paroi tube	3.7 mm
Matériau de remplissage	Coulis de Thermocem
Fluide caloporteur lors du test	Eau
Débit moyen lors du test	1'270 litre/h
Température maximale obtenue	27.6 °C (moyenne)

5.1 Evolution des paramètres pendant le test de réponse

Les graphiques suivants ou de l'Annexe 1 montrent l'évolution, pendant le test de réponse thermique, des paramètres mesurés pour les couches de sol traversées par la sonde géothermique testée de 220 m de profondeur:

- En phase initiale (Annexe 1, page 1/2) les températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du module de chauffage, le débit ainsi que les températures "aller" et "retour" du fluide caloporteur sont mesurés. Cette phase est maintenue jusqu'à l'obtention d'une valeur constante des températures du fluide caloporteur.

La température moyenne initiale (T_i) du terrain est calculée principalement à partir de ces valeurs.

- Ces mêmes paramètres sont également mesurés pendant la phase de chauffage (~9 kW). Une augmentation marquée de la température du fluide caloporteur (Annexe 1, page 2/2) est bien visible juste après la mise en marche du chauffage (phase transitoire) avant de passer à un "régime quasi-permanent" où les températures augmentent légèrement et de manière plus linéaire.

C'est à partir de ces paramètres que seront calculés la conductibilité thermique du terrain (λ) et la résistance thermique effective de la sonde.

- Par la suite la puissance thermique est calculée puis comparée à la puissance électrique consommée par les corps de chauffe (Figure 9). Sur ce graphique figurent également la température moyenne du fluide caloporteur et la température de l'air extérieur.

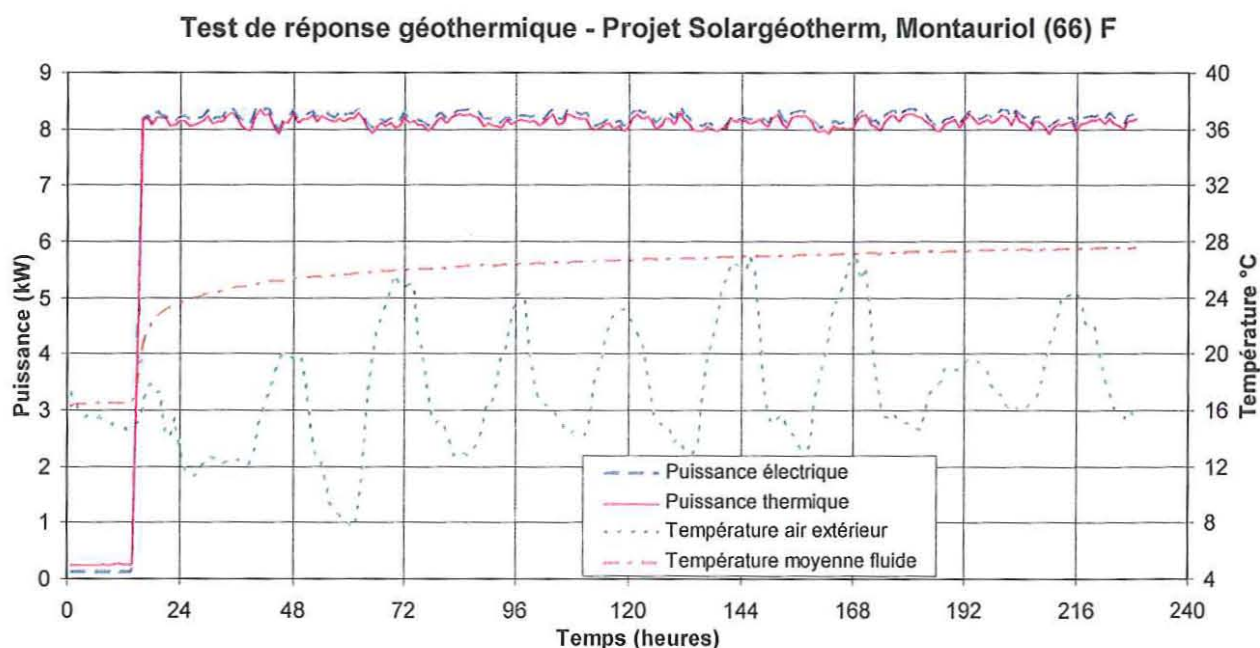


Figure 9. Evolution de la puissance électrique (mesurée), de la puissance thermique (calculée) et de la température moyenne au cours du test de réponse thermique du terrain.



Le rapport entre la puissance électrique (mesurée) et thermique (calculée) fait apparaître un écart inférieur à 1%. De ce fait les mesures de la température ont été utilisées sans aucune correction pour l'interprétation de ce test.

5.2 Détermination de la température initiale du terrain

Le calcul de la température moyenne initiale du terrain sans les effets thermiques de la pompe de circulation est obtenu en prenant en compte les paramètres suivants avec leurs incertitudes (Tableau 4):

Tableau 4. Paramètres pris en compte pour le calcul de la température initiale du terrain.

	Mesures /calculs	Erreur des paramètres	Unités	Erreur T_{terrain}
Température initiale du terrain avec puissance pompe	16.6	0.2	°C	0.2 °C
au temps t	10		heures	
Puissance thermique pompe	100	50	W	0.1 °C
Rb (résistance sonde)	0.08	0.05	K/(W/m)	0.1 °C
r_b (rayon sonde)	0.075	0.005	m	0 °C
λ terrain	3.3	0.2	W/(m·K)	0.0 °C
ρ_{Cp} terrain	2.5		MJ/(m ³ K)	
$R_{\text{terrain}} = R_{\text{pulse}}(\text{temps})$	0.071		K/(W/m)	
T_{terrain} sans l'effet du chauffage dû à la pompe	16.5		°C	±0.2 °C

5.3 Détermination de la conductivité thermique λ

La méthode de calcul est basée sur la théorie de la source linéaire de chaleur développée par P. Eskilson et G. Hellström de l'Université de Lund (S); le calcul de λ est obtenu par régression linéaire de la courbe expérimentale.

Cette estimation de la conductivité thermique du terrain λ (W/m·K) est effectuée en prenant en compte la longueur de la sonde géothermique, la puissance d'injection qui est restée globalement constante pendant le test et l'évolution de la température du fluide circulant dans la sonde.

Le graphique suivant (Figure 10) donne la valeur de la conductivité thermique déterminée par régression linéaire.

La valeur assez élevée de la conductibilité thermique obtenue pour ces sols est probablement due à une circulation d'eau dans ces roches schisteuses passablement fracturées.

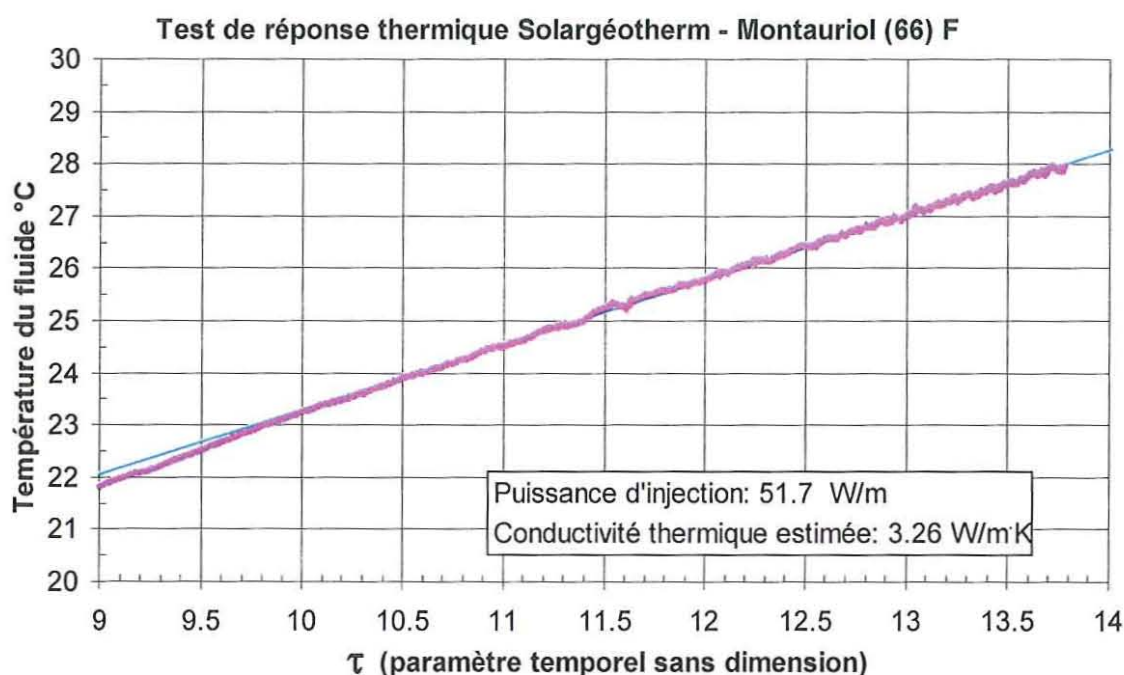


Figure 10. Détermination de la conductivité thermique λ .

5.4 Détermination de la résistance thermique effective de la sonde R_b

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

- la longueur de la sonde;
- la puissance d'injection (qui devrait rester la plus constante possible);
- la capacité thermique volumétrique du terrain;
- le diamètre du forage;
- la température initiale du terrain.

La résistance thermique de la sonde est la valeur moyenne des résistances calculées sur la période prise en compte du test (Figure 11).

Il faut remarquer que la faible résistance thermique de la sonde ($R_b = 0.078$ W/m·K) est probablement due à une injection optimale et à l'utilisation d'écarteurs qui maintiennent les tubes en PE de la sonde le plus près possible des parois du forage.

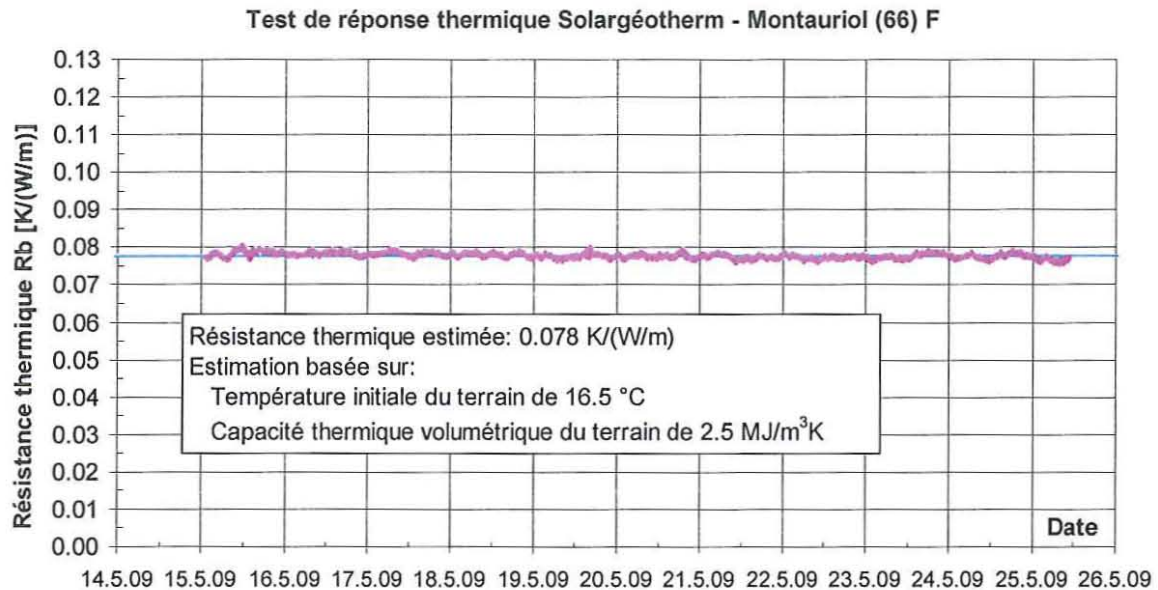


Figure 11. Détermination de la résistance thermique de la sonde R_b .

5.5 Résultats et incertitudes

Les erreurs sur l'estimation de la conductivité thermique du terrain et de la résistance thermique effective de la sonde (tableau 5) ont été évaluées en considérant les incertitudes sur les grandeurs suivantes:

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

Tableau 5. Détermination des erreurs et incertitudes sur les paramètres λ et R_b .

Grandeurs	Mesures/données	Erreurs	Erreurs λ W/(mK)	Erreurs R_b K/(W/m)
Puissance thermique injectée:	8.22 kW	-5% -	-0.12	0.004
Pertes thermiques équipement:	0 W/K	5 W/K	-0.02	-0.001
Longueur sonde :	159 m	0.5 m	-0.04	0
Diamètre forage :	0.15 m	0.01 m	0	0.002
Température initiale terrain:	16.5 °C	0.2 K	0	-0.005
Capacité therm. volumétrique terrain:	2.50 MJ/m³K	0.5 MJ/m³K	0	0.003
		Estimation	Erreur	
Conductibilité thermique terrain λ		3.26 W/(mK)	± 0.13 W/(mK)	
Résistance thermique effective de la sonde R_b		0.08 K/(W/m)	± 0.01 K/(W/m)	



6 COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS

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

Tableau 6. Résumé des résultats.

	Sonde SGV
Température moyenne initiale de la couche de terrain ¹⁾	16.5 ± 0.2 [°C]
Conductibilité thermique moyenne de la couche de terrain ¹⁾	3.26 ± 0.13 [W/(m·K)]
Résistance thermique effective de la sonde dans les conditions du test et pour un Ø moyen de 150 mm	0.08 ± 0.01 [K/(W/m)]

1) sur les premiers 159 m de profondeur du terrain

Les valeurs du Tableau 6 sont valables pour les conditions du test, en régime d'écoulement non-laminaire et avec un débit moyen de 1.27 m³/heure.

Pour la réalisation de ce test de réponse thermique du terrain de l'eau pure a été utilisée. S'il est prévu d'utiliser la circulation d'un mélange d'eau et d'antigel comme fluide caloporteur, il faut probablement s'attendre à avoir un régime d'écoulement laminaire dans les tubes. Cet effet se répercutera sur la résistance thermique effective moyenne des sondes géothermiques (R_b) qui prendra une valeur plus élevée. Le dimensionnement du système énergétique devra alors tenir compte de cet effet.

En admettant que les conditions hydrauliques restent identiques à celles du test tout au long de l'année, il est recommandé de se baser, pour le dimensionnement du système énergétique final, sur les valeurs les plus pessimistes de la conductivité thermique et des caractéristiques thermiques suivantes:

- Conductivité thermique de dimensionnement: $\lambda = 3.13$ [W/(m·K)]
- Température initiale du terrain: $T_i = 16.5$ [°C]
- Résistance thermique effective moyenne:
(dans les conditions du test) $R_b = 0.08$ [K/(W/m)]

Swiss Geotesting Sàrl

G. Steinmann
Ing. civil Reg-A



Swiss Geo Testing Sàrl

Géothermie et Géomécanique

Projet de recherche Solargéotherm - Montauriol (66) F

Test de réponse thermique du terrain

Réalisation d'un essai dans une sonde géothermique posée sur le site
du projet, Les Hostalets (Montauriol) (F)

Commettant: DOMINGUEZ ENERGIE, Argelès-sur-Mer (66) F

Étude n° SGT 09.05-3

Mai 2009

ANNEXE 1:

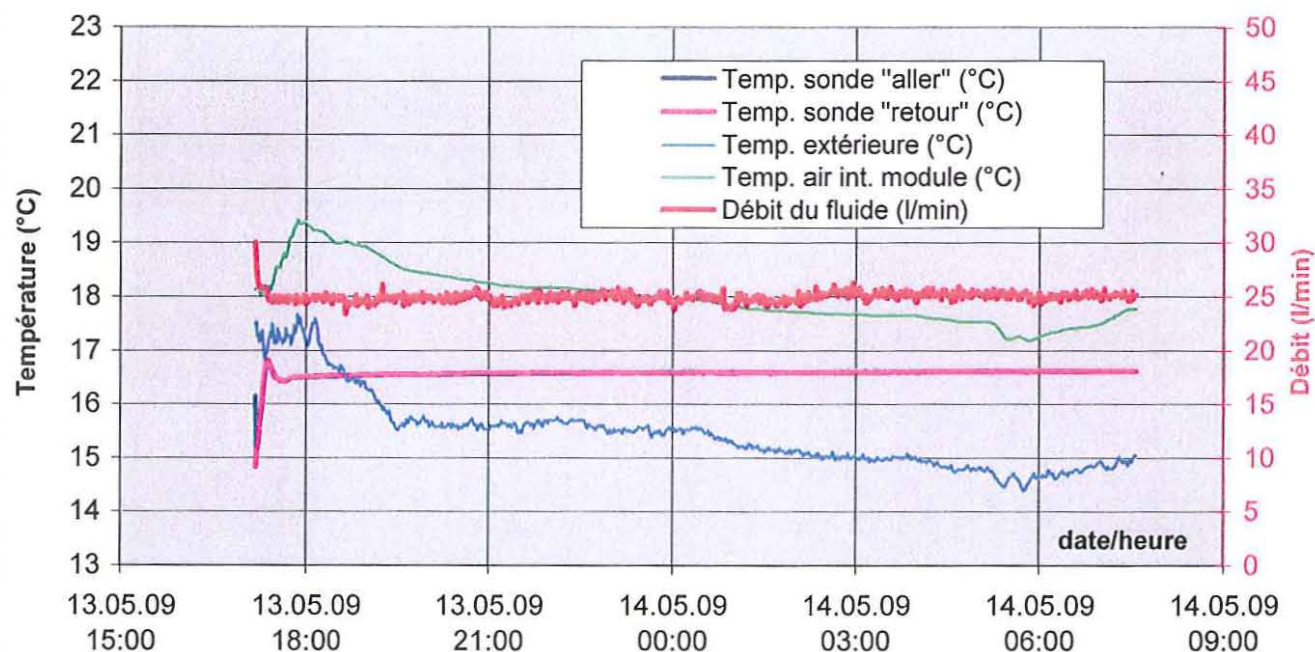
Protocoles d'essai

Gilbert Steinmann, Ing. civil Reg-A
Les Jausses B2
CH-1973 Nax

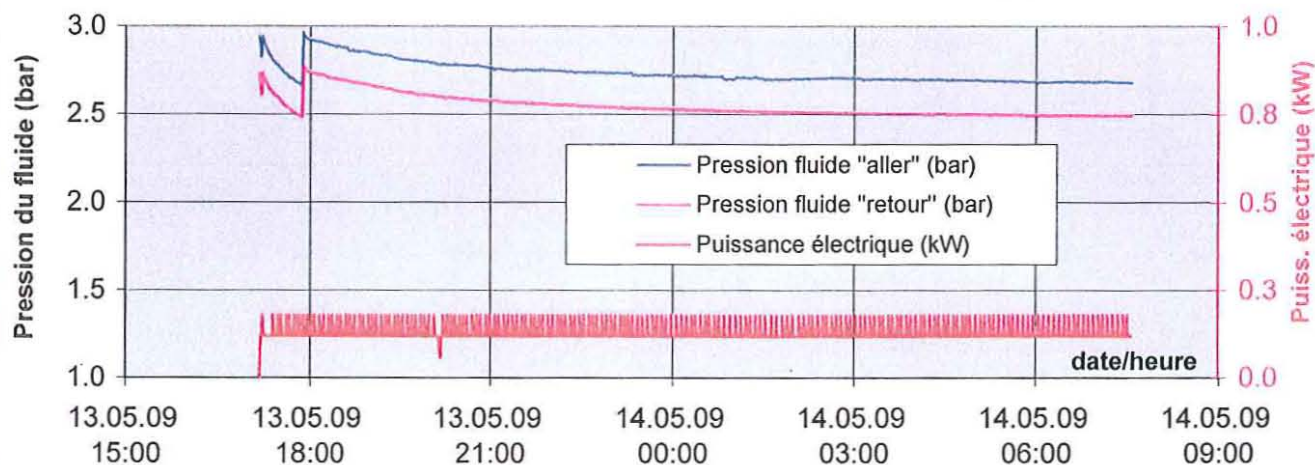


N° étude	Titre de l'étude					Committant		
SGT-09.05-3	Projet Solargéotherm - Montauriol (66) F					DOMINGUEZ- ENERGIE		
Essai n°/ Test n°	Ø forage (mm)	long. forage (m)	long. sonde (m)	Ø ext. tube (mm)	Ø int. tube (mm)	type de sonde	opérateur	
1	150	202	164 (159)	40	32.6	2 tubes en U	GSt	
Puissance de chauffage (W)	débit moy. (l/min)	fluide caloporteur		espaces oui/non	Coordonnées / altitude			
					Longitude	Latitude	Alt. sol (m)	
133 (pompe)	25.0	eau		non	2°42'20.76"E	42°34'28.67"N	273	
Entreprise de forage		Date du forage			23 - 24.02.2009			
Type de protection		Date pose de la sonde			05.04.2009			
Matériau de remplissage		Date du test			13.05 - 25.05.2009			
Entre-axe entre 2 tubes		Visa ingénieur						

Température initiale du terrain et débit (sans chauffage)



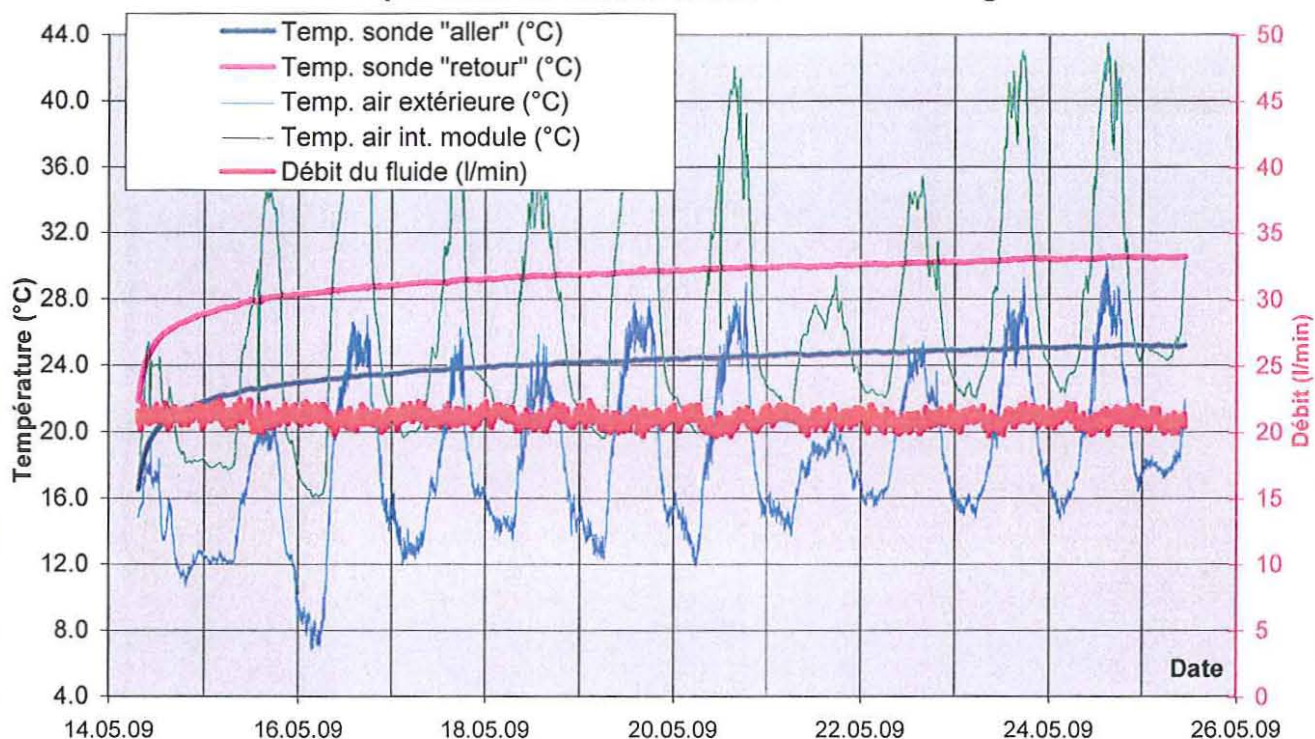
Pression et puissance électrique (sans chauffage)



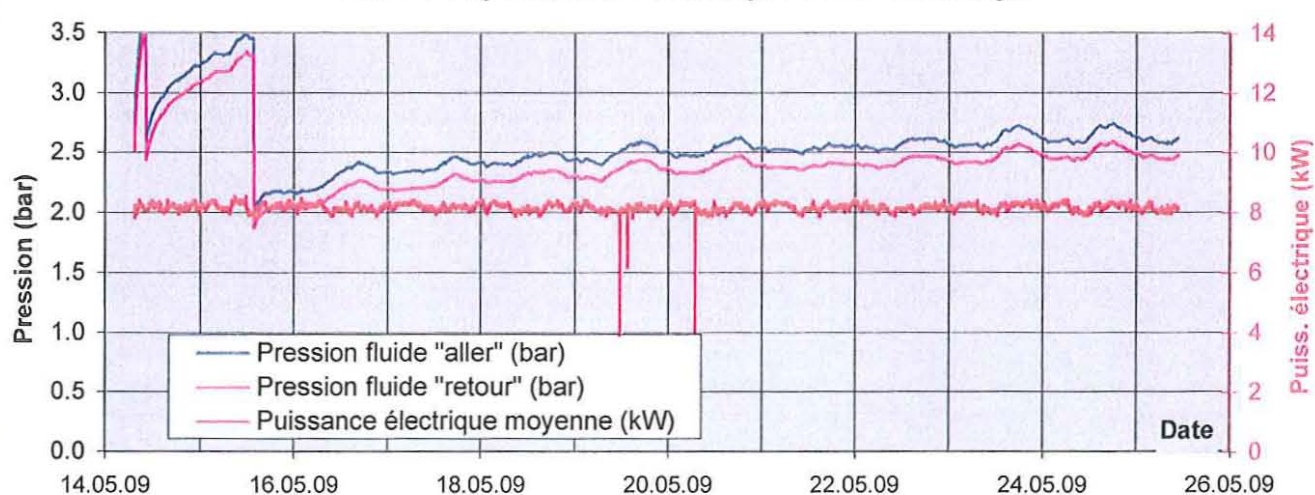


N° étude	Titre de l'étude					Commettant		
SGT-09.05-3	Projet Solargéotherm - Montauriol (66) F					DOMINGUEZ- ENERGIE		
Essai n°/ Test n°	Ø forage (mm)	long. forage (m)	long. sonde (m)	Ø ext. tube (mm)	Ø int. tube (mm)	type de sonde	opérateur	
1	150	202	164 (159)	40	32.6	2 tubes en U	GSt	
Puissance de chauffage (W)	débit moy. (l/min)	fluide caloporteur		espaceurs oui/non	Coordonnées / altitude			
					Longitude	Latitude	Alt. sol (m)	
8'218	21.2	eau		non	2°42'20.76"E	42°34'28.67"N	273	

Température du terrain et débit avec chauffage



Pression et puissance électrique avec chauffage



Remarques: